

Potenzialanalyse von versiegelten und unversiegelten Flächen  
für die  
solare Niedrigtemperaturwärmeversorgung (NT) von Gebäuden  
in städtischen Quartieren

- Modell einer standortbezogenen Potenzialanalyse  
für solare Strahlung unter Berücksichtigung städtebaulicher Anforderungen-

Dissertation der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften der Carl von Ossietzky  
Universität Oldenburg zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)

angenommene Dissertation

von

Herrn Dipl.-Ing. Reinhard Wegener-Kopp,  
geboren am 25.01.1956 in Duisburg

1. Prüfer: Prof. Dr. Ingo Mose

2. Prüfer: Prof. Dr. Joachim Peinke

Tag der Einreichung: 21.November 2017

Tag der mündlichen Prüfung: 14.Juni 2018

Lemwerder, November 2017



## Vorwort

Für die Unterstützung meiner Arbeit möchte ich mich bei den Kommunalverwaltungen der Städte bedanken, die mir Datenquellen, Planungsunterlagen, Bauleitpläne und fachliche Informationen zur Verfügung gestellt haben. Ein besonderer Dank gilt den Vertretern der Städte, die an der Befragung teilgenommen und umfangreiche Informationen und Erfahrungen aus der Planungspraxis weitergegeben und mit umfangreichen Dateninformationen diese Arbeit ermöglicht haben. Weiterhin möchte ich den Gesprächspartnern<sup>1</sup> der Fachbehörden und Experten der kommunalen Verwaltungen, kommunalen Energieversorgern und den politischen Entscheidungsträgern für intensive Gespräche und Diskussionen meinen Dank aussprechen.

Die Teilnahme an öffentlichen Veranstaltungen, Fachmessen und wissenschaftlichen Vorträgen gab mir einen Überblick über die städtische Energieversorgung mit regenerativen Energien und städtebaulichen Versorgungsmodellen. Die aktive Mitarbeit in Planungsgruppen, Symposien und wissenschaftlichen Seminaren in den Themenfeldern Stadtentwicklung und Sanierungsvorhaben zeigte, dass die Situation der Energieversorgung von städtischen Quartieren mit Altbaubestand besonders geeignet ist, innovative Versorgungsmodelle vergleichend zu entwickeln.

Ich möchte mich bei der Universität Siegen, Fachgebiet Bauphysik und Solarenergie, für die Bereitstellung des Programms zur Berechnung des Energiebedarfs von Gebäuden bedanken. Eine energetische Auswertung und Bewertung der Bestandsgebäude in den Klimaregionen ist nur mit dieser Berechnungssoftware möglich gewesen. Ein besonderer Dank gilt der ROWA Soft GmbH für die kostenlose Bereitstellung der bauphysikalischen Software für energieoptimiertes Bauen nach der Energieeinsparverordnung zur Berechnung der Energiebilanz von Wohn- und Nichtwohngebäuden.

Die Bereitstellung der meteorologischen Standortdaten und Messdatenreihen über das Temperaturverhalten von Böden stellt die Grundlage für die Bewertung von Temperaturschwankungen dar, die das Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung als Referenzstation vorhält. Daten über den Versiegelungsgrad von Bebauungsgebieten und städtischen Quartieren sind den statistischen Datenwerten und den kommunalen GIS-Datenbanken entnommen worden.

---

<sup>1</sup> Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird ausschließlich die männliche Form verwendet. Personen weiblichen wie männlichen Geschlechts sind darin gleichermaßen eingeschlossen.

Bei den Veranstaltern des Zentrums für nachhaltige Raumentwicklung in Oldenburg (ZENARIO) möchte ich mich insbesondere für die Präsentation von Projekten und Themen aus den Bereichen der Regional- und Stadtentwicklung, Flächenplanungspolitik und des Natur- und Klimaschutzes bedanken, die mir Anregungen und Empfehlungen für die Abgrenzung des Themas und für den methodischen Aufbau der Dissertation gegeben haben. Für die Bereitstellung von Pilot- und Modellprojektkonzepten, Fachgutachten, Forschungsarbeiten und Datenquellen möchte ich mich bei den Fachbereichen der Universitäten in Hannover, Oldenburg, Hamburg, Siegen und Zürich bedanken.

Insbesondere bedanke ich mich für die umfangreiche fachliche Unterstützung, Betreuung sowie für die Fachgespräche mit den lehrenden Wissenschaftlern an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg:

- Prof. Dr. Joachim Peinke vom Institut für Physik, Turbulenz, Windenergie und Stochastik,
- Dr. Detlev Heinemann vom Lehrstuhl Energie- und Halbleiterforschung und Energiemeteorologie,
- Dr.-Ing. Peter Schaal vom Lehrstuhl der Regionalwissenschaften, Angewandte Geographie und Umweltplanung,
- apl. Prof. Dr. Niko Paech vom Lehrstuhl für Umwelt und Produktion, Fakultät II: Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Professor Dr.-Ing. Ingo Mose vom Fachbereich der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, Angewandte Geographie und Umweltplanung der Carl von Ossietzky Universität, für die langjährige Betreuung, Begleitung und fachliche Unterstützung während des Vorhabens.

Lemwerder, 03. November 2017

Dipl.-Ing. Reinhard Wegener-Kopp

## **Abstract**

Die Europäische Energiepolitik hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2020 langfristig die Emissionen von Treibhausgasen bis zu 20% zu reduzieren und den Anteil an regenerativen Energien um 18% zu erhöhen. Die Energiepolitik in Deutschland fokussiert sich auf einen beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie im Rahmen der Energiewende nach einem nationalen Energiekonzept 2050. Der Gebäudebestand in Deutschland benötigt einen Endenergiebedarf von bis zu 40% für die Bereitstellung von Gebäudewärme und Warmwasserbedarf.

Die Auswertung der Forschungsergebnisse von Modellvorhaben mit regenerativen Energien, gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie in den Jahren von 1970 bis 1980 zeigt, dass insbesondere das Grundwasserpotenzial in städtischen Quartieren zur Versorgung von Gebäuden zur Wärmeversorgung genutzt worden ist. Thermische Solaranlagen mit einem ineffizienten Anlagenwirkungsgrad sind in diesem Zeitraum für die zusätzliche Bereitstellung von Gebäudewärme und Warmwasser für Wohngebäude als Modellvorhaben erprobt worden.

Die Potenzialanalyse dieser Arbeit bezieht sich auf das Niedrigtemperaturwärmepotenzial von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen, dass aufgrund der saisonalen solaren Strahlungseinwirkung generiert werden kann. Zur Steigerung der Wärmeentzugleistung aus Trag- und Bodenschichten ist die Wärmepumpentechnik mit einem hohen technischen Wirkungsgrad anwendbar.

Die Arbeit gliedert sich auf in die Kapitel Stand der Technik und Stand der Forschung, Grundlagen der thermischen Physik, These, Methodik, Meteorologie und Stadtklima, Energieversorgung mit regenerativen Energien, Regionen und Stadtentwicklung mit regenerativen Energien, energetische Gebäudearchitektur. Die Ergebnisse der solaren Potenzialanalyse versiegelter und unversiegelter Flächen in städtischen Quartieren sowie die Prognose von Städten zur Generierung der Niedrigtemperaturwärme sind in dem Kapitel Potenzialanalyse und Schlussbetrachtung zusammengefasst.

Die über städtische Flächen absorbierte solare Strahlung erzeugt ein saisonales Wärmepotenzial innerhalb von Trag- und Bodenschichten. Meteorologische Faktoren beeinflussen das Stadtklima und folglich das Abkühlungs- und Erwärmungsverhalten von städtischen Oberflächen und Gebäudeflächen. Die Erfassung des täglich zur Verfügung stehenden Wärmepotenzials von Trag- und Bodenschichten sowie Gebäudeoberflächen ist über technische Kollektorsysteme zu gewährleisten. Die saisonale Steuerung der Niedrigtemperaturwärme für Bestandsgebäude in städtischen Quartieren ist über ein dezentrales

Warmwasserspeichernetz zu gewährleisten. Die aus der solaren Strahlung über städtische Oberflächen gewonnene Wärme ist in Latent- und Langzeitspeicheranlagen am Versorgungsstandort zu speichern und für die Heizperiode vorzuhalten. In den Sommermonaten eignet sich die Niedrigtemperaturwärmeversorgung zur effektiven passiven Kühlung von Gebäuden und zur Bereitstellung des Warmwasserbedarfs sowie für den Betrieb von Flächenheizungen.

Das in städtischen Flächen gespeicherte saisonale solare Wärmepotenzial ist durch Langzeitmessungen nachzuweisen. Die Veränderung der herkömmlichen Versorgungsstruktur in eine kommunale solare dezentrale Warmwasserversorgungsstruktur erfordert ein Umdenken der Entscheidungsträger zur Bereitstellung von Wärme für Gebäude in Städten. Vertragsregelungen zur Wärmeenergieabnahme und Bereitstellung von solarer Wärme durch Energieversorger und Energiegenossenschaften sind in die Versorgungsstruktur einzubeziehen. Das Geschäftsmodell zur Gründung von Energiegenossenschaften wie auch die Unterstützung durch Energieagenturen sind wesentliche Voraussetzungen für eine Stärkung der Akzeptanz einer solaren Energieversorgung mit regenerativen Energien in Regionen und Städten.

Städte mit einer leitungsgebundenen Nahwärmeversorgung eignen sich besonders, um das generierte Niedrigtemperaturwärmepotenzial von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen und thermischen Solaranlagen aufzunehmen und als Nutzenergie zur Verfügung zu stellen. Thermische Solaranlagen, KWK-Anlagen und Nahwärmenetze mit einem standortbezogenen Wärmespeicheranlagenetz zur ganzjährigen Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimakälte sind zur Versorgung des städtischen Gebäudebestandes zusätzlich erforderlich.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit sind Empfehlungen für die Regionalplanung und für die kommunale solare Stadtentwicklung abzuleiten, die für eine solare Energieversorgung mit Niedrigtemperaturwärme grundlegend sind. Die solare Energieversorgung in Regionen erfordert daher eine generelle Umstrukturierung der herkömmlichen Infrastrukturplanung mit geeigneten Planungsinstrumenten.

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse zur Bereitstellung der Niedrigtemperaturwärme in städtischen Quartieren sind in Feld- und Parzellenversuchen oder städtischen Modellvorhaben praxisnah zu untersuchen und nachzuweisen.

## **Abstract English**

The objective of European energy policy is to reduce greenhouse gas emissions over the long term by up to 20 percent by 2020 and to increase the share of renewable energies by 18 percent. German energy policy is focusing on an accelerated exit of nuclear energy sources as part of an “energy turnaround” as defined by the National Energy Concept 2050. Existing buildings in Germany require 40 percent of energy consumption for the provision of heating and hot water. The German Federal Ministry of Research and Technology funded research on model projects for renewable energies from 1970 to 1980, the results of which show that the Potenzial of groundwater in particular has been utilized in urban neighborhoods for the supply of building heating services. Thermal solar systems with a low level of efficiency were also piloted during this period for the provision of additional building heating and water services.

This abstract presents the results of a Potenzial analysis of the low-temperature district heating that can be generated through the impact of seasonal solar radiation on sealed and unsealed surfaces in cities. To increase the level of heat extraction from the ground’s subsurface and surface layers, heat pump technology with a high level of technical efficiency must be used.

This thesis consists of the chapters *Progress in Technology and Research, Basics of Thermal Physics, Hypothesis, Methodology, Meteorology and Urban Climate, Energy Supply through Renewable Sources, Regions and Urban Development with Renewable Energy, and Energy and Building Architecture*. The results of the solar Potenzial analysis of sealed and unsealed urban surfaces and the forecast for low-temperature district heating in cities are summarized in the chapter *Potenzial Analysis and Conclusion*.

The solar radiation absorbed through urban surfaces generates seasonal heating Potenzial within subsurface and surface layers. Meteorological factors affect the urban climate and consequently the cooling and warming patterns of urban and building surfaces. Technical collector systems ensure that the daily available heating Potenzial in subsurface and surface layers and building surfaces is recorded. A decentralized hot water storage network must ensure seasonal management of low-temperature heating for existing buildings in urban areas. The heat generated from solar radiation on urban surfaces must be stored and saved for the heating in latent and long-term storage systems period at the location of supply. During the summer the low-temperature heating supply is suitable for effective passive cooling of buildings, satisfying hot water needs, and for operating surface heating systems. The seasonal solar heating Potenzial stored in urban surfaces must be proved

through long-term measurements. Changing the traditional supply structure into a municipal, solar, decentralized hot water supply structure requires that decision makers re-think their strategies for heating buildings in cities. Contract provisions on purchasing thermal energy and supplying solar heating through energy suppliers and cooperatives must be incorporated into the supply structure. Business models for starting energy cooperatives and supporting energy agencies are important requirements for increasing the acceptance of solar energy supply with renewable energies in regions and cities.

Cities with grid-bound local heating are particularly suitable for absorbing the low-temperature heating Potenzial generated through sealed and unsealed urban surfaces and thermal solar systems, and for making this Potenzial available as useful energy. Thermal solar systems, CHP systems, and local heating grids with a location-based heating storage system network for year-round supply of space heating, hot water, and cooling are also required for existing urban buildings.

The results of this thesis can be used to develop recommendations for regional planning and communal solar urban development, forming the basis for solar energy supply with low-temperature heating. Supplying solar energy to regions therefore requires a general restructuring of traditional infrastructure planning with suitable planning instruments.

The results of the Potenzial analysis on supplying low-temperature heating in urban areas should be examined and verified practically in field tests or urban pilot projects.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract English</b> .....	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>11</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>14</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>15</b>
<b>Verzeichnis Fachvokabular</b> .....	<b>16</b>
<b>1. Einleitung und Problemstellung</b> .....	<b>26</b>
<b>2. Stand der Technik</b> .....	<b>34</b>
2.1. Energieversorgung und Kraftwerke .....	35
2.2. Nachhaltige Wärmeerzeugung .....	38
2.3. Zentrale und dezentrale Versorgungsnetzstruktur .....	40
2.4. Technische Nutzung solarer Strahlungsenergie .....	42
2.5. Wärmepumpentechnologie .....	44
2.6. Wärmespeichersysteme .....	49
2.7. Oberflächennahe Geothermie .....	51
2.8. Bauweisen von Verkehrsstraßen.....	52
2.9. Versiegelung von städtischen Flächen.....	56
2.10. Verschattung von städtischen Flächen als Einflussgröße .....	61
2.11. Technische Wärmespeicherung in versiegelten Flächen .....	64
2.12. Solare Wärmeaufnahme über Gebäudeaußenflächen .....	69
2.13. Anthropogene Wärmelasten.....	72
<b>3. Stand der Forschung</b> .....	<b>74</b>
3.1. Globaler Klimawandel .....	74
3.2. Stadtklima und städtische Wärmeinsel .....	76
3.3. Nahwärmekonzepte mit regenerativen Energien .....	79
3.4. Thermisches Verhalten von Verkehrsflächen und Bauteilen.....	84
3.5. Erdbeobachtung und Globalstrahlung .....	96
3.6. Meteorologische Fernerkundung .....	101
3.7. Energiemarktforschung .....	104
<b>4. Grundlagen</b> .....	<b>114</b>
4.1. Meteorologie und globales Klima.....	114

4.1.1. Wettermessdatennetze und Klimadiagramme .....	119
4.1.2. Solare Strahlung .....	123
4.2. Absorption solarer Strahlung über Bodenoberflächen .....	128
4.2.1. Solarer Strahlungsertrag.....	128
4.2.2. Langzeitvariabilität solarer Globalstrahlung .....	130
4.2.3. Klimatische Einflussfaktoren in Regionen.....	133
4.2.4. Oberflächentemperaturen und Bodenwärmepotenzial.....	136
4.2.5. Berechnung der Wärmeflussdichte von Flächen und Böden.....	149
4.2.6. Energiebilanz und Wärmeentzugsleistung von Böden .....	154
4.3. Planungsinstrumente für die solare Stadtplanung .....	158
4.3.1. Solare Berechnungsprogramme.....	158
4.3.2. Geodateninformationssysteme.....	163
4.3.3. Potenzialerhebung für die städtische Wärmeversorgungsplanung .....	165
4.4. Absorption solarer Strahlung von Gebäudeflächen in Städten .....	171
<b>5. These.....</b>	<b>179</b>
<b>6. Methodik.....</b>	<b>187</b>
6.1. Vorüberlegungen zur Methodik des Vorhabens.....	187
6.2. Literaturrecherche.....	190
6.3. Methodik der Potenzialanalyse .....	200
6.3.1. Bestandsaufnahme durch Befragung kommunaler Akteure .....	203
6.3.2. Auswahlkriterien der Modellgebiete in Klimaregionen.....	205
6.3.3. Auswahl und Untersuchung der Modellgebiete in Städten.....	206
6.3.4. Abschätzung des Wärmeenergiebedarfs des Gebäudebestandes.....	207
6.4. Auswertung der Modellgebiete .....	209
6.4.1. Abschätzung der solaren Strahlung von städtischen Flächen .....	211
6.4.2. Nachweis des solaren Wärmespeicherpotenzials in Böden .....	212
6.5. Korrelationsanalyse .....	213
<b>7. Meteorologie und Stadtklima.....</b>	<b>219</b>
7.1. Meteorologische Prognosemodelle.....	219
7.2. Urbane Klimamodelle .....	220
7.3. Meteorologische Datenwerte .....	223
7.4. Stadtklima .....	224
7.5. Urbane Flächen und solare Strahlung.....	230
7.5.1. Phänomen Treibhauseffekt und Wärmeinsel in Städten .....	234

7.5.2. Solare Strahlung und Oberflächentemperaturen .....	241
7.5.3. Thermische solare Einflüsse in Straßenschluchten von Metropolen.....	251
<b>8. Energieversorgung und regenerative Energien.....</b>	<b>253</b>
8.1. Energieversorgungsstrategien .....	253
8.2. Nachhaltige Energieversorgung und Energiemarktwirtschaft .....	261
8.3. Bevölkerungsentwicklung in Städten und Endenergiebedarf .....	266
8.4. Umweltschutz und Energieversorgung.....	268
8.5. Versorgungsstruktur der kommunalen Energieversorgung .....	274
8.5.1. Energiekonzerne und Stadtwerke .....	274
8.5.2. Energieversorgungsunternehmen und städtische Leitbildprozesse .....	276
8.5.3. Konzessionsverträge .....	278
8.5.4. Dezentrale städtische Energieversorgungsstrategie .....	279
8.5.5. Leitungsgebundene Wärmeversorgung .....	283
8.6. Sektorenkopplung und Einspeisung von Energie.....	286
8.7. Städtische Wärmespeicheranlagenetze .....	294
8.8. Energieversorgungsrecht.....	302
8.8.1. Energieversorgung und kommunale Selbstverwaltung .....	303
8.8.2. Anschluss- und Benutzungszwang für die Wärmeversorgung.....	304
8.8.3. Energieversorgung und Kraftwärmekopplung.....	306
8.8.4. Stadtquartiere und Gebäudebestand .....	307
8.8.5. Stromerzeugung und Energiemix .....	309
<b>9. Regionen und regenerative Energien .....</b>	<b>311</b>
9.1. Regionalentwicklung und Energieversorgung .....	313
9.2. Energieregionen und regionale Energiekonzepte.....	316
9.3. Regionale Netzwerke .....	321
9.4. Regionale und kommunale Energieleitbilder .....	323
<b>10. Stadtentwicklung und regenerative Energien.....</b>	<b>326</b>
10.1. Nachhaltige Energieversorgungsstrategien .....	326
10.2. Nachhaltige Stadtentwicklung und Energiebedarf.....	331
10.3. Flächenmanagement und Energieverbrauch.....	333
10.4. Städtische Wärmeversorgungsmodelle für den Gebäudebestand.....	335
10.4.1. Wohndichtemodelle und Wärmebedarfsdichte .....	335
10.4.2. Solare städtische Energieversorgungsplanung .....	337
10.5. Bauleitplanungsrecht und Landesbaurecht.....	339

10.5.1. Regenerative Energien und Raumordnung .....	339
10.5.2. Regenerative Energien und Städtebaurecht.....	341
10.5.3. Stadtumbau und Sanierungsvorhaben .....	351
<b>11. Energetische Gebäudearchitektur.....</b>	<b>356</b>
11.1. Gebäudebestand und Energieeffizienz .....	356
11.2. Gebäudemodelle und Wärmeenergiebedarf .....	360
11.3. Einflüsse auf den Primär- und Endenergiebedarf von Gebäuden.....	366
11.4. Solare Gebäudeplanung .....	374
11.5. Marktstudien und regenerative Energien.....	376
<b>12. Ergebnisse der Potenzialanalyse städtischer Flächen.....</b>	<b>378</b>
12.1. Auswertung der Befragung von Kommunen.....	378
12.2. Datenbasis für die solare Potenzialanalyse in Städten .....	381
12.3. Auswertungsergebnisse der solaren Potenzialanalyse .....	383
<b>13. Schlussbetrachtung.....</b>	<b>406</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>410</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Gradtagzahl und Heizgradtage (IWU,2016).....	20
Abbildung 2: Entwicklung der Jahresleistungskennzahlen von Wärmepumpen .....	46
Abbildung 3: Bruttostromerzeugung aus regenerativen Energien in der BRD .....	48
Abbildung 4: Beispielhafter Straßenaufbau außerhalb geschlossener Ortslage .....	52
Abbildung 5: Beispielhafter Straßenaufbau innerhalb geschlossener Ortslagen.....	53
Abbildung 6: Asphalttragschichten nach Bauklassen gemäß RStO 11 .....	54
Abbildung 7: Schichtaufbau einer Betonfahrbahn .....	54
Abbildung 8: Bodenversiegelung nach CLC-Raumdatenbestand - LUCAS.....	59
Abbildung 9: Luftaufnahme der Versiegelung einer Beton-Parkraumfläche.....	60
Abbildung 10: Simulierte Beschattungsberechnung nach HELIOS .....	63
Abbildung 11: Beispiel HELIOS-XP Gebäudesimulation und solare Strahlung.....	64
Abbildung 12: Rohrschlaufensystem zur Enteisung unter der Tragschicht.....	65
Abbildung 13: Wärmebild der Fahrbahnoberfläche mit Rohrschlaufensystem .....	65
Abbildung 14: Temperaturverlauf der Schicht- und Oberflächentemperatur.....	66
Abbildung 15: Solares Stauwärme-Potenzial in Städten mit hoher Baudichte .....	72
Abbildung 16: Atmosphärische Lufttemperaturabsenkung in Städten .....	77
Abbildung 17: Isothermenprofil einer Betonfahrbahn .....	85
Abbildung 18: Temperaturverlauf in der Grenzschicht oberhalb der Betonplatte .....	86
Abbildung 19: Abkühlungsreaktion in 5 mm Tiefe einer Betonplatte.....	87
Abbildung 20: Temperaturverteilung in einer Betonfahrbahnplatte A5 im Sommer.....	87
Abbildung 21: Temperaturverhalten in einer Betonfahrbahnschicht der BAB A5 .....	88
Abbildung 22: Saisonaler Temperaturverlauf in der Tragschicht Betonfahrbahn.....	89
Abbildung 23: Verlauf der mittleren atmosphärischen Lufttemperatur in Karlsruhe .....	90
Abbildung 24: Mittlere Lufttemperaturtageswerte im Monat Juni 2015.....	91
Abbildung 25: Mittlere Bodenschichttemperaturmesswerte im Monat Juni 2015.....	91
Abbildung 26: Messdiagramm Lufttemperaturen von 1900-2100 in Bremen .....	93
Abbildung 27: Auszug aus dem „European Urban Atlas“ am Beispiel München .....	97
Abbildung 28: Globalstrahlungskartenausschnitt Süddeutschland.....	99
Abbildung 29: Globalstrahlungskartenausschnitt Südfrankreich.....	100
Abbildung 30: Globalstrahlungskartenausschnitt Süditalien .....	100
Abbildung 31: Globalstrahlungskartenausschnitt Spanien.....	101
Abbildung 32: Europäisches Satellitenwetterbild vom 25.02.2012.....	103
Abbildung 33: Darstellung des Schichtaufbaus über der Erdatmosphäre .....	115

Abbildung 34: Darstellung der Klimatypen der Erde nach Neef .....	117
Abbildung 35: Sonnenstand am Standort Hannover (2014) .....	121
Abbildung 36: Phasenverlauf des Sonnenstandes am Standort Hannover .....	122
Abbildung 37: monatliche meteorologische Mittelwerte der Wetterdaten.....	122
Abbildung 38: Solarkarte und mittlere jährliche Sonnenscheindauer.....	125
Abbildung 39: Zoneneinteilung der jährlichen Sonneneinstrahlung .....	127
Abbildung 40: Strahlungsbilanz nach Tagesgängen über Waldbodenflächen .....	129
Abbildung 41: Jährliche mittlere Globalstrahlung von 2002 .....	131
Abbildung 42: Jährliche mittlere Globalstrahlung von 2005 .....	131
Abbildung 43: Temperaturtagesgänge der mittleren Lufttemperatur über Graslandflächen .....	138
Abbildung 44: Oberflächentemperaturwerte aus Häckel, 1999 .....	140
Abbildung 45: Wärmeflussdichte in unversiegelten Bodenoberflächen im Monat August .....	142
Abbildung 46: Bodenwärmestrom nach Bodentiefe und Tageszeit (Hillel, 2004) .....	143
Abbildung 47: Temperaturverhalten in unversiegelten Böden nach Tageszeit.....	144
Abbildung 48: Simulierte Bodentemperaturmesswertprofile in der Heizperiode .....	146
Abbildung 49: Bodenschichttemperaturprofil einer unversiegelten Fläche .....	148
Abbildung 50: Wärmeflussdichte eines monatlichen Tagesganges.....	151
Abbildung 51: Gesamte Wärmeflussdichte eines Tagesganges.....	151
Abbildung 52: Phasen der Erwärmung und Abkühlung in Bodenschichten .....	154
Abbildung 53: Tool zur Berechnung von Photovoltaik-Anlagen .....	212
Abbildung 54: Oberflächentemperaturen Stadtgebiet und Umland von Berlin .....	230
Abbildung 55: Satellitenbild der Stadt New York mit städtischen Oberflächen.....	235
Abbildung 56: Anstieg der Einwohnerzahl und Temperaturdifferenz der Stadtfläche ...	236
Abbildung 57: Temperaturen in Stadt und Umland nach Bevölkerungsstärke .....	237
Abbildung 58: Gemessene atmosphärische Lufttemperatur im August .....	239
Abbildung 59: München am 8. Juli 1982 Oberflächentemperaturmesswerte Tagzeit ....	242
Abbildung 60: München am 14. Juli 1982 Oberflächentemperaturmesswerte Nachtzeit	243
Abbildung 61: Mittlere Strahlungsäquivalenttemperaturwerte von städtischen Flächen	244
Abbildung 62: Atmosphärische Lufttemperaturmessung in 1,1 m Höhe über Flächen ..	245
Abbildung 63: Thermische Grenzschichtbetrachtung Stadt Umland von Salzburg.....	247
Abbildung 64: Darstellung der vertikalen atmosphärischen Lufttemperaturverteilung ..	248
Abbildung 65: Lufttemperaturverteilung über 2 m ü.N.N. um 13:00 Uhr UTC .....	249

Abbildung 66: Lufttemperaturverteilung über 2 m ü.N.N. um 19:00 Uhr UTC .....	250
Abbildung 67: Lufttemperaturverteilung über 2 m ü.N.N. um 24:00 Uhr UTC der Stadt .....	251
Abbildung 68: Weltölproduktion und Weltölverbrauch.....	262
Abbildung 69: Entwicklung der Weltbevölkerung von 1960 bis 2050 .....	266
Abbildung 70: Dezentrale Wärmeversorgung mit KWK-Anlagen.....	282
Abbildung 71: Wärmemengen aus Wärmenetzen – BMU Leitstudie 2008 .....	282
Abbildung 72: Kartierung geothermischer Potenziale in Nordrhein-Westfalen .....	302
Abbildung 73: Thermografie von einer Fassade eines Passivhauses .....	365
Abbildung 74: Wärmeverluste von Bauteilgruppen nach Gebäudetypologien .....	368
Abbildung 75: Tagesverteilung Wärme für Wohngebäude an einem trüben Wintertag.	369
Abbildung 76: Stündlicher Wärmebedarf eines Gebäudes nach Jahresstunden.....	370
Abbildung 77: Monatliche Heizperiode und Klimakältebereitstellung .....	370
Abbildung 78: Tagesverläufe zur Bestimmung von Stundenwerten der Wärmelast .....	371
Abbildung 79: Atmosphärische Tagestemperaturen und Bewölkungsgrad .....	374

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Daten von Straßen- und Siedlungsflächen in der EU (Stand 2012) .....	61
Tabelle 2: Spezifische Wärmeentzugsleistung nach Bodenqualität.....	157
Tabelle 3: Wärmeentzugsleistung von Erdwärmesonden nach VDI 4640 .....	158
Tabelle 4: Absorptionsgrade und Materialkennwerte von Oberflächen .....	232
Tabelle 5: Albedo von Oberflächen .....	233
Tabelle 6: Messwerte der monatlichen Sonnenscheindauer in Freisaal von 1987-1998.	247
Tabelle 7: Heizwärmebedarf vor und nach einer Gebäudesanierung .....	360
Tabelle 8: Entwicklung des Energiestandards von Gebäuden .....	363
Tabelle 9: Bodenflächen nach Art der tatsächlichen Nutzung in Deutschland .....	381
Tabelle 10: Mittlere Wärmeflussdichte für versiegelte und unversiegelte Flächen .....	381
Tabelle 11: Solares NT-Wärmepotenzial für die Gebäudeversorgung der Stadt Köln ...	388

## Abkürzungsverzeichnis

Zusammenstellung allgemeiner physikalischer Größen und Symbole

Physikalische Größe	Einheit	Symbol
Länge, Dicke	m	d
Fläche	m <sup>2</sup>	A
Volumen	m <sup>3</sup>	V
Masse	Kg	
Rohdichte	Kg/m <sup>3</sup>	$\rho$
Zeit	s, h, d, a	t
Celsius - Temperatur	°C	$\theta$
Absolute Temperatur	K	T
Wärme, Wärmemenge	J	Q
Wärmestrom	W	$\Phi$
Wärmestromdichte	W/m <sup>2</sup>	q
Wärmeleitfähigkeit	W/m k	$\lambda$
Wärmedurchlasskoeffizient	W/m <sup>2</sup> K	$\Delta$
Wärmedurchlasswiderstand	m <sup>2</sup> K/W	R
Wärmedurchgangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> K	U
Wärmespeicherfähigkeit	J/m <sup>2</sup> K	W
Spezifische Wärmekapazität	J/kg K	c
Jahres-Primärenergiebedarf	KWh/a	$Q_P$
Flächenbezogener Jahres- Primärenergiebedarf	KWh/m <sup>2</sup> a	$Q_P''$
Beheizte Gebäudenutzfläche	m <sup>2</sup>	
Jahresheizwärmebedarf	KWh/a	$Q_N$
Wärmebedarf Warmwasser	KWh/m <sup>2</sup> a	$Q_W''$
Anlagenaufwandszahl Wärmepumpe		$ep$
Solare Wärmegewinne	KWh/a	$Q_S$
Transmissionsverluste	KWh/a	$Q_t$
Anlagenleistung Kraftwerk	1 MW <sub>th</sub> / 10 <sup>3</sup> KW <sub>th</sub>	$P_{th}$
Bruttostromerzeugung nach Energieträgern	TWh	

## **Verzeichnis Fachvokabular**

### **Anlagenleistungszahl für die Wärmepumpe**

Die Anlagenleistungszahl beschreibt das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung einer Wärmepumpe zu der von ihr aufgenommenen elektrischen Leistung. Die Leistungszahl ist abhängig von der Temperatur der Wärmequelle, der Temperatur der Wärmesenke und der Wärmepumpe selbst. Die Anlagen-Jahresarbeitszahl (JAZ) stellt das Verhältnis der abgegebenen Heizenergie einer Wärmepumpe zu der insgesamt aufgewendeten Strommenge dar.

### **A/V-Verhältnis**

Das Verhältnis der Gebäudehüllfläche zum beheizten Gebäudevolumen dient als energetische Kennzahl, um die Kompaktheit eines Gebäudes zu quantifizieren. Bei kleinem A/V-Verhältnis ist die wärmeabgebende Gebäudehüllfläche geringer.

### **Bebauungsdichte**

Die Bebauungsdichte wird in der Stadtplanung über die Geschossflächenzahl (GFZ) definiert. Der Effizienzstandard kann über Energiebedarfskennwerte einer Gebäudetypologie ermittelt und mit GIS-basierten Energieverbrauchsdaten abgeglichen werden.

### **CO<sub>2</sub>-Strommix**

Die Emissionen des Strom-Mixes sind von den eingesetzten Energieträgern, dem Nutzungsgrad und der Betriebsdauer der einzelnen Kraftwerke abhängig.

### **CO<sub>2</sub>-Zertifikat**

Ein CO<sub>2</sub>-Zertifikat berechtigt Industriebetriebe und Kraftwerksbetreiber eine bestimmte Emissionsfracht zu verursachen. Die Anzahl der jährlich ausgegebenen Zertifikate wird über den Emissionszeitraum schrittweise reduziert, wodurch ein Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen erzwungen wird. Die Sektoren Verkehr und Haushalte unterliegen nicht dem CO<sub>2</sub> Zertifikathandel.

### **Energieleitplan**

Informelles Planungsinstrument, das Energiekonzepte in die kommunalen Planungsebenen Gesamtstadt, Stadtteil, Quartier und Gebäude integriert.

## **Energienutzungsplan**

Der Energienutzungsplan ist die „Fachplanung Energie“ auf Ebene der Flächennutzungsplanung.

## **Energiewende der Energiepolitik**

Bezeichnet die Reduzierung des Energiebedarfs durch die effiziente Nutzung von Energiequellen zum Beispiel durch Dämmung und gleichzeitiger Substitution fossiler Brennstoffe durch regenerative Energieträger.

## **Endenergie**

Als Endenergie bezeichnet man den Teil der ursprünglich eingesetzten Primär -energie, der dem Verbraucher nach Abzug aller Aufwände für Gewinnung, Transport, Weiterverarbeitung, Umwandlung und Lieferung zur Verfügung steht.

## **Endenergiekennwert Wärme**

Der Endenergiekennwert Wärme ist der auf die Energiebezugsfläche bezogene Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser.

## **Endenergiebedarf Raumheizung**

Die Energie für die Raumheizung und für die Warmwasserbereitstellung berechnet sich aus dem Nutzenergiebedarf und dem Wirkungsgrad des Heizungssystems.

## **Energetische Stadterneuerung<sup>2</sup>**

Die Energetische Stadterneuerung umfasst die strategische Ausrichtung und Koordinierung von Maßnahmen der Energieeinsparung, der Effizienzsteigerung und des Einsatzes regenerativer Energien. Sie ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die Akteure und Systemzusammenhänge auf den Ebenen Gebäude, Quartier und Gesamtstadt einbindet.

## **Energetische Stadtsanierung<sup>3</sup>**

Das Leitmotiv „Vom Einzelgebäude zum Quartier“ des KfW-Programms „Energetische Stadtsanierung“ stellt das Quartier als zentrale Handlungsebene für die energetische Sa-

---

<sup>2</sup> Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Definition energetische Stadterneuerung aus der Schriftenreihe Werkstatt, Praxis Heft 78, Berlin 2012.

<sup>3</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Energetische Stadtsanierung in der Praxis, Kreditanstalt für Wiederaufbau, Stand August 2014.

nierung in den Fokus. Energieeinsparung, Energieeffizienz und der Ausbau der regenerativen Energien sind quartiersbezogen und ganzheitlich zu betrachten. Anforderungen an die energetische Gebäudesanierung, effiziente Energieversorgungssysteme und den Ausbau regenerativer Energien mit demografischen, ökonomischen, städtebaulichen und wohnungswirtschaftlichen Fragestellungen zu verknüpfen. Die Interessen der handelnden Akteure werden miteinander verbunden und integrierte, energetisch effiziente Lösungen entwickelt.

### **Emissionskennwerte für CO<sub>2</sub>-Äquivalente**

Die Berechnung der klimawirksamen Gase erfolgt auf der Basis der Endenergiebedarfswerte. Als Maß wird das äquivalente Treibhauspotenzial auf äquivalente Mengen von CO<sub>2</sub> umgerechnet (GEMIS).

### **Energieeinsparverordnung EnEV**

Als Fachverordnung stellt sie Anforderungen an den Primärenergiebedarf, die Qualität der Außenhülle und die Energieeffizienz der eingesetzten Anlagentechnik eines Gebäudes (Heizung, Lüftung, Kühlung und Beleuchtung).

### **Erdwärmeabsorber** (vertikal und horizontal)

Die geothermische Nutzung von Fundamenten, Keller- oder Stützwänden ermöglicht ein umweltfreundliches, ressourcenschonendes sowie wirtschaftliches Heizen und/oder Kühlen von Bauwerken. Die Heizung und/oder Kühlung von Verkehrsflächen sowie Brücken gegen Vereisung sowie die direkte thermische Nutzung von Grundwasser stellen weitere Anwendungsgebiete dar.<sup>4</sup>

### **Regenerative Energien im Wärmebereich**

Das Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) soll insbesondere im Interesse des Klimaschutzes, der Schonung fossiler Ressourcen und der Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung ermöglichen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Wärme und Kälte aus regenerativen Energien fördern. Unter Wahrung der wirtschaftlichen Vertretbarkeit verfolgt das Gesetz das Ziel, den Anteil regenerativer Energien

---

<sup>4</sup> Markiewicz, Roman: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien, Wien, 2004.

am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahr 2020 auf 14% zu erhöhen. Öffentlichen Gebäuden kommt eine Vorbildfunktion zu. Regenerative Energien sind nach diesem Gesetz die dem Erdboden entnommene Wärme (Geothermie), die der Luft oder dem Wasser entnommene und technisch nutzbar gemachte Wärme mit Ausnahme von Abwärme (Umweltwärme), die durch Nutzung der Solarstrahlung zur Deckung des Wärmeenergiebedarfs technisch nutzbar gemachte Wärme (solare Strahlungsenergie) und die aus fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse erzeugte Wärme. Dazu gehört auch die dem Erdboden oder dem Wasser entnommene und technisch nutzbar gemachte oder aus Wärme technisch nutzbar gemachte Kälte (Kälte aus regenerativen Energien).

### **Fern- / Nahwärmeversorgung**

Leitungsgebundene Lieferung von Wärme zur Erzeugung von Heizungswärme und Warmwasser in Gebäuden. Die Fernwärmeversorgung erschließt ganze Städte oder Stadtteile. Kleinflächige Wohnsiedlungen werden durch Nahwärmenetze versorgt.

### **Gemeinde (Gemeindeordnung)**

Die Gemeinde ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts und nach Artikel 28 Grundgesetz mit Gremien und Aufgaben der Selbstverwaltung ausgestattet.

### **Gradtagzahl und Heizgradzahl**

Als „Heiztage“ werden alle Tage gewertet, an denen das Tagesmittel der Außentemperatur unter der festgelegten Heizgrenztemperatur liegt. Die Gradtagzahl stellt die Summe aller Temperaturdifferenzen zwischen der Innen- und Außentemperatur dar. Heizgradtage stellen die Summe der Temperaturdifferenzen zwischen der Heizgrenz- und der Außentemperatur in einer Heizperiode dar. Es werden in der Regel die Mittelwerte innerhalb der Heizperiode verwendet. Die nachstehende Abbildung zeigt das Verhältnis zwischen der Gradtagzahl, den Heizgradtagen und der Außentemperatur am Beispiel eines Kalendermonats.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup>Vgl.: IWU-Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt – Definition von Heiztagen, Gradtagzahl und Außentemperaturen. Information im Internet unter URL <http://www.ikz.de/nc/news/article/gradtagzahlen-und-heizgradtage-berechnen-iwu-date-0013578.html>. (Stand 2016).

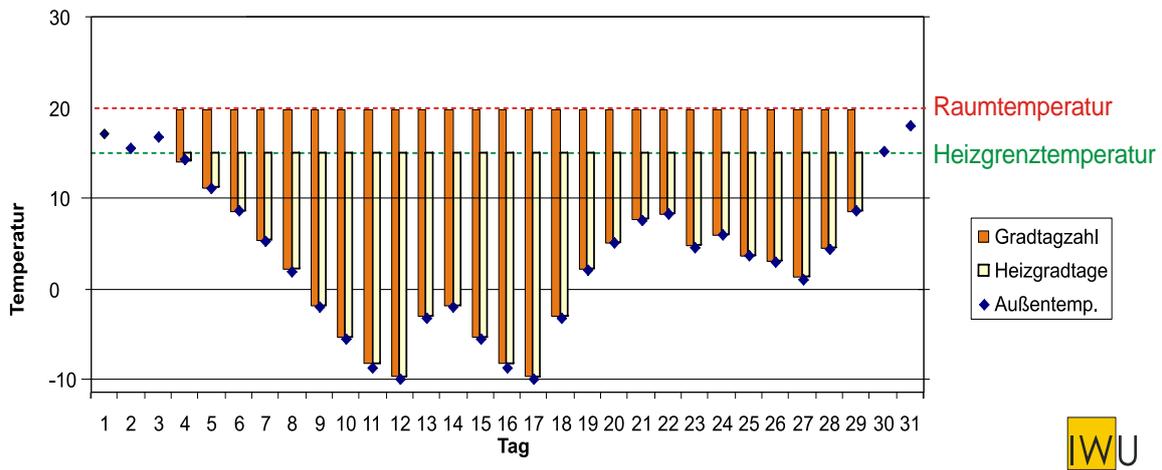


Abbildung 1: Darstellung der Gradtagzahl und Heizgradtage (IWU,2016)

### Grundwasservorkommen

Unterirdische Wassermengen in der Sättigungszone, die in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund stehen, werden als Grundwasser bezeichnet. Eine unter der Oberfläche liegende wasserführende Schicht oder andere geologische Formation mit hinreichender Porosität und Permeabilität, die einen Grundwasserstrom oder die Entnahme von erheblichen Grundwassermengen zulassen, werden als Grundwasserlinie bezeichnet.

### Heizwärmebedarf von Gebäuden

Wärmemenge, die jährlich erforderlich ist, um ein Gebäude auf einer gewünschten Raumtemperatur zu halten (typischerweise 19-21°C in der Heizperiode für Wohngebäude). In einem Passivhaus liegt der Heizwärmebedarf unter 15 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr (bezogen auf die Wohnfläche).

### Jahresdauerlinie Heizungsanlagen

Aus der Jahresdauerlinie wird ersichtlich, wie viele Stunden im Jahr eine bestimmte Energiemenge durch den Verbraucher nachgefragt wird. Alternativ kann die Jahresdauerlinie auch verwendet werden, um die Auslastung eines Strom- oder Wärmeerzeugers darzustellen.

### Jahresheizwärmebedarf von Gebäuden

Der Nutzenergiebedarf von Raumheizwärme setzt sich aus den rechnerischen Wärmeverlusten des Gebäudes, abzüglich der im Gebäude anfallenden und nutzbaren solaren Ge-

winne zusammen. Die Heizgrenztemperatur und die Heizperiode sind zusammenhängend zu betrachten und sind durch das Klima bestimmt.

### **Kirchhoff'sches Gesetz**

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz emittieren alle Körper Strahlungsenergie und absorbieren sie gleichzeitig. Schwarze Körper haben eine Absorptionszahl von  $\alpha = 1$ .

### **Kommunalverfassung**

Artikel 28 (2) des Grundgesetzes regelt generell das kommunale Selbstverwaltungsrecht. Die innere Kommunalverfassung setzt sich aus der Art, Zusammensetzung und dem Zustandekommen der Gemeindeorgane zusammen und begründet sich aus den jeweiligen Landesverfassungen und Gemeindeordnungen.

### **Kraftwärmekopplung (KWK)**

Anlagen der Kraftwärmekopplung sind Energieerzeugungsanlagen, in denen Strom und Nutzwärme gleichzeitig erzeugt werden. Kraftwärmekälte-Anlagen ergänzen die wärmegeführten Anlagen durch thermisch angetriebene Kältemaschinen. Die KWK-Anlagen werden mit Primärenergieträgern wie Stadtgas, Kohle, Mineralölen, Biogas, festen biogenen Stoffen, Biokraftstoffen und Abfall betrieben.

### **Nachhaltigkeitsaspekte**

Der Begriff der Nachhaltigkeit betrachtet Ökologie, Ökonomie und Sozialverträglichkeit und orientiert sich zum Beispiel an der Definition der Enquete - Kommission des Bundestages, Endbericht 2002 "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung". Die Definition von nachhaltiger Entwicklung wird auch mit «Vollzitat: Nachhaltige Entwicklung: „befriedigt die Bedürfnisse der heutigen Generation, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“»<sup>6</sup> begründet.

### **Netzbetreiber für das kommunale Versorgungsgebiet**

Die Betreiber von leitungsgebundenen Versorgungsnetzen mit Elektrizität, Erdgas und Wärmeenergie sind Netzbetreiber.

---

<sup>6</sup>Vollzitat aus Langniß, Ole; Pehnt, Martin (Hrsg.): Textbeitrag aus Energie im Wandel: Nachhaltige Energieversorgung. Der Weg ist das Ziel! Thesen und Begründungen, Springer Verlag, Heidelberg, 2001, S. 17 ff.

## **Numerische Simulationsberechnung zur Erdwärme- und Grundwassernutzung**

Bei geschlossenen technischen Systemen zirkuliert ein Wärmeträgermedium durch die Absorberleitungen, welches beim Durchströmen entweder erwärmt oder abgekühlt wird. Bei offenen technischen Systemen wird das Grundwasser aus dem Aquifer entnommen und direkt genutzt, anschließend wird das erwärmte oder abgekühlte Wasser wiederum dem Grundwasserträger zugeführt. Neben den klassischen „Erdwärmesonden“ und „Erdwärmekollektoren“ sind erdberührte Bauwerksteile als "Erdwärmeabsorber"<sup>7</sup> sehr wirtschaftlich in der Nutzung von geothermischen Anlagen.

### **Nutzenergie**

Als Nutzenergie werden alle technischen Formen der Energie zur Erzeugung von Endenergie bezeichnet. Nutzwärme ist die ausgekoppelte Wärme von Heizkraftwerken und KWK-Anlagen, die als Heizwärme, Warmwasser, Klimakälte oder als Prozesswärme bereitgestellt wird.

### **Potenzialdefinition**

Um eine Vergleichbarkeit von Potenzialuntersuchungen und eine differenzierte Betrachtung des Untersuchungsgegenstands zu ermöglichen, werden verschiedene Potenzialbegriffe verwandt. Die gängigste Unterscheidung geht auf Kaltschmitt zurück und unterscheidet die Potenziale erneuerbarer Energien in drei Kategorien. Das theoretische Potenzial umfasst das gesamte physikalisch nutzbare Energiedargebot in einem zeitlich und räumlich festgelegten Betrachtungsraum, wie die von der Sonne auf die Erdoberfläche eingestrahlte Energie. Das technische Potenzial setzt sich aufgrund der Leistungsberechnung zusammen. Das wirtschaftliche Potenzial beschreibt den Teil des technischen Potenzials, der unter ökonomischen Gesichtspunkten eine wirtschaftliche Verfügbarmachung und Nutzung erlaubt. Damit ist dieses Potenzial sowohl vom Marktpreis der Energieträger als auch vom Stand und den Kosten der Bereitstellungstechnologie abhängig.

### **Primär- und Sekundärenergie**

Als Primärenergie (PE) wird der chemisch oder physikalisch gebundene Energiegehalt eines Energieträgers oder einer regenerativen Energiequelle bezeichnet. Der Energieträger oder die Energiequelle ist noch keiner technischen Umwandlung in eine andere Energie-

---

<sup>7</sup>Adam, Dittmar und Markiewicz, Roman: Numerische Simulationsberechnungen zur Erdwärme- und Grundwassernutzung, Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien, Wien, Österreich.

form unterzogen worden. Die technische und prozessorientierte Umwandlung von Primärenergie führt zur Sekundärenergie.

### **Primärenergiebedarf**

Der Primärenergiebedarf für die Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser ist das Produkt des Primärenergiefaktors und des Endenergiekennwertes für Wärme.

### **Primärenergiefaktor**

Der Primärenergiefaktor gibt das Verhältnis von eingesetzter Primärenergie zur bereitgestellten Endenergie an. Der Primärenergiefaktor wird mit größer als 1 angegeben, da Umwandlungsprozesse erforderlich sind.

### **Region**

Die Definition der Region<sup>8</sup> wird als Zusammenführung von Landschaften begründet. Es besteht keine scharfe Abgrenzung zu Städten und Gemeinden oder Bundesländern. Zwölf Metropolregionen haben sich in Deutschland gebildet (Stand 2012). Das Europa der Regionen vernetzt sich über die Versammlung der Regionen Europas.

### **Solare Strahlungsanteile von Flächen**

Die kurzwellige Strahlung im Bereich von etwa 0.3 bis 3  $\mu\text{m}$  stammt primär von der Sonne und wird deshalb als solare Strahlung bezeichnet. Die Diffuse Sonnenstrahlung D (Himmelsstrahlung) ist die von den Molekülen, Aerosol- und Wolkenteilchen in der Atmosphäre gestreute solare Strahlung. Die Globalstrahlung (G) ist für die gesamte aus der Atmosphäre austretende solare Strahlung. Die auf den Boden treffende Globalstrahlung wird teilweise reflektiert und von der Erdoberfläche absorbiert. Die reflektierte Globalstrahlung (R) ist die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung und wird als Strahlungsflussdichte in  $\text{W}/\text{m}^2$  angegeben. Die langwellige Strahlung im Bereich von etwa 4 bis 60  $\mu\text{m}$  wird vom Boden und den Bestandteilen der Atmosphäre aufgenommen (Stefan-Boltzmann-Gesetz) und wird als terrestrische Strahlung bezeichnet.

Die atmosphärische Gegenstrahlung (A) ist die nach unten gerichtete terrestrische Strahlung der Atmosphäre. Die Strahlungsbilanz Q als Summe von  $Q_s$  und  $Q_t$  gibt an, welche

---

<sup>8</sup>Vgl.: Weser-Ems mit den Landschaften Ostfriesland, Oldenburg, Emsland, Grafschaft Bentheim und Osnabrücker Land. Metropolregionen sind zum Beispiel Bremen-Oldenburg und die Region Hannover. Information im Internet URL <http://wikipedia.de/regionen>.

Strahlungsenergie an der Erdoberfläche insgesamt zur Umwandlung in andere Energieformen verfügbar ist.

Die Strahlungsbilanzgleichung ist:

$$Q = Q_s + Q_t = S + D - R + A - E - r = (1 - a) - G + \varepsilon \cdot (A - \sigma - T^4 b) = (1 - a) - G + A - \sigma - T^4 b$$

Die solare Strahlungsenergie, die auf Oberflächen trifft wird reflektiert, absorbiert oder gespeichert. Die Summe der Strahlungsanteile ist gleich der einfallenden Strahlungsleistung nach der Berechnungsgleichung  $\rho + \alpha + \tau = 1$ . Körper, die zum Beispiel eine weiße Oberflächenbeschichtung besitzen, reflektieren anteilig weniger die solare Strahlungsenergie als Körper mit schwarzen, grauen und farbigen Oberflächen. Der Emissionsgrad von Materialoberflächen wird für Betonflächen, Wandflächen aus Ziegelmauerwerk mit 0,93 in der Fachliteratur angegeben.

### **Stadtgebiet und städtisches Versorgungsgebiet**

Als Stadtgebiet wird ein geschlossenes Siedlungsgebiet mit Infrastruktur, Bebauung und Baudichte, Gebäuden und Haushalten und einer sozialen Gesellschaftsstruktur bezeichnet, die aufgrund der wirtschaftlichen, politischen und kulturellen Bedeutung eine gewisse Orientierungsfunktion für das Umland einnimmt. Die Gemeindeordnung ist die Verfassung der Städte und Gemeinden und bestimmt die Stadtgrenzen und dazugehörigen Grundstücke. Das städtische Versorgungsgebiet wird in der Regel mit Elektrizität, Energieträgern, Wärme und Wasser über das leitungsgebundene Netz versorgt. In den Gemeindeordnungen werden Fern- und Nahwärmegebiete zur Versorgung des städtischen Versorgungsgebietes festgelegt.

### **Temperaturleitfähigkeitskoeffizient**

Asphalt besitzt einen Temperaturleitfähigkeitskoeffizient von  $0,38 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} 10^{-6}$  und Beton von  $0,29 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} 10^{-6}$ . Die Dichte beträgt für Asphalt  $2,11 \text{ kgm}^{-3} 10^3$  und für Schwerbeton  $2,40 \text{ kgm}^{-3} 10^3$ .

### **Transmissionswärmeverluste von Gebäudeflächen**

Transmissionswärmeverluste von Gebäuden während der Heizperiode werden über die Umfassungsflächen des Gebäudes an die Umgebungsluft über die Kontaktschichten der Fassadenoberfläche an die Umgebungsluft abgegeben.

## Wärmebedarfsdichte in einem städtischen Versorgungsgebiet

Die Wärmebedarfsdichte wird berechnet als jährlicher Wärmebedarf in MWh/(m<sup>2</sup>a), bezogen auf die absolute Fläche und errechnet sich aus der Bebauungsdichte und dem Effizienzstandard der geplanten oder bestehenden Bebauung.

## Wärmeleitfähigkeit von Bauteilen

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  gibt an, welche Wärmemenge stationär  $Q = \lambda / d \cdot (T_2 - T_1)$  innerhalb einer Zeiteinheit bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin durch eine Bauteilschicht oder eines Stoffes über eine Fläche von 1m<sup>2</sup> übertragen wird. Der instationäre Wärmestrom ist durch die Berechnungsgleichung  $Q = \lambda / d \cdot (T_2 - T_1) \cdot A \cdot t$  definiert.

## Wärmeeindringkoeffizient

Der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  zur Beurteilung des thermischen Verhaltens von Materialien ist mit  $b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$  definiert. Zum Beispiel hat Asphalt einen Wärmeeindringkoeffizient von 1.205 J/(m<sup>2</sup> K s<sup>1/2</sup>), Beton von 2.300 J/(m<sup>2</sup> K s<sup>1/2</sup>), Porenbeton von 250 J/(m<sup>2</sup> K s<sup>1/2</sup>), Ziegelmauerwerk von 1.100 J/(m<sup>2</sup> K s<sup>1/2</sup>) und Mineralwolle von 35 J/(m<sup>2</sup> K s<sup>1/2</sup>). Thermische Eigenschaften künstlicher und natürlicher Materialien (nach verschiedenen Tabellen aus OKE 1990).

## Wärmestrom $Q$

Der von einem Körper abgestrahlte Wärmestrom  $Q$  (W) ist die Wärmeleistung, die in einem Zeitabschnitt  $t(s)$  transportiert und in Abhängigkeit der Oberfläche, des Emissionsgrades und der Temperatur des abstrahlenden Körpers erzeugt wird. Mit zunehmender Temperatur eines Körpers steigt die Intensität der Wärmeabstrahlung.

# 1. Einleitung und Problemstellung

Die Vereinten Nationen<sup>9</sup> veröffentlichten den Weltbevölkerungsbericht mit dem Ergebnis, dass bereits jeder zweite Mensch in der Stadt lebt und im Jahr 2050 zwei Drittel der Weltbevölkerung in Städten wohnen und arbeiten wird. Einerseits sind Metropolen mit einem Energiebedarf von rund 80% die Großverbraucher von Energie und andererseits bietet die bauliche Dichte und Wohnraumdichte in urbanen Gebieten die Chance für eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs durch eine effiziente Versorgung von Gebäuden. Ein weiteres auf das globale Klima bezogenes Erfordernis für den Einsatz regenerativer Energien ist die Reduzierung der globalen Erwärmung auf maximal 2°C.

Die Bundesregierung hat sich im Kontext der Klimaschutzverpflichtung aus dem Kyoto-Protokoll weitreichende Ziele zur Reduktion von Treibhausgasen gesetzt. Ausgehend vom Basisjahr 1990 sind die Treibhausgase bis zum Jahr 2020 um mindestens 40% und bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95% zu senken. Diese Ziele sind im Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 mit Maßnahmen zum Klimaschutz festgeschrieben. Aus der Verpflichtung zum Klimaschutz sind ganzheitliche Lösungen für eine nachhaltige Energieversorgung in Städten im Einklang der Regional- und Stadtentwicklung, Infrastrukturplanung und städtischen Energieversorgung zu entwickeln.

Im Mittelpunkt der Energieversorgung von Regionen, Städten und Gemeinden steht die Gewährleistung einer ganzjährigen Versorgungssicherheit. Die Energieversorgungsstrategien der Länder stützen sich weltweit auf die Energiebereitstellung mit fossilen Brennstoffen bis zu 87% und verursachen jährlich circa 23 Mrd. Tonnen Kohlendioxid.<sup>10</sup> Bei einem konsequenten Wechsel von fossilen Brennstoffen zu regenerativen Energien mit der Umwandlung von solarer Strahlung in Strom- und Wärmeenergie für die regionale und städtische Energieversorgung könnte das CO<sub>2</sub>-Einsparziel langfristig erreicht werden.<sup>11</sup>

Die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages hat sich für das Jahr 2020 das politische Ziel gesetzt, den Einsatz von kohlenstoffreichen

---

<sup>9</sup>Vgl.: Weltbevölkerungsbericht 2014 der Vereinten Nationen. Information aus dem Internet unter URL [http://www.weltbevoelkerung.de/fileadmin/content/PDF/Weltbevoelkerungsbericht\\_2014.pdf](http://www.weltbevoelkerung.de/fileadmin/content/PDF/Weltbevoelkerungsbericht_2014.pdf).

<sup>10</sup>Langniß, Ole; Pehnet, Martin (Hrsg.): Energie im Wandel, Politik, Technik und Szenarien einer nachhaltigen Energiewirtschaft, Springer Verlag, Heidelberg, 2001, S. 22 ff.

<sup>11</sup>Heinrich Böll Stiftung (Hrsg.): Wärmewende in Kommunen – Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der Wärmeversorgung, Schriften zur Ökologie, Band 41, Berlin, 30.09.2015.

Energieträgern möglichst zu halbieren.<sup>12</sup> Die anstehende Energiewende für den Strom- und Wärmesektor in Deutschland fördert den Energiemix mit der Integration von erneuerbaren und regenerativen Energien in Regionen und Städten. Die Strom- und Wärmewende ist mittel- und langfristig nicht voneinander getrennt zu betrachten, da der Wärmesektor zunehmend Anteile des regenerativen Strommarktes benötigt. Die städtische Energieversorgung der Zukunft bis zum Jahr 2050 ist politisch durch einen Energie-Mix vorgegeben, der sich aus 25% fossilen Energieträgern, 25% heimischen regenerativen Energien, 50% importierten regenerativen Energien und aus Atomkraft zusammensetzt. Die Energie- und Klimaschutzprogramme der Länder, das Energiekonzept 2050 und der Nationale Aktionsplan regenerativer Energien sind Vorgaben, die bundesweit innovative regionale und städtische Energieversorgungskonzepte für eine klimaschutzorientierte- und ressourcenschonende Energiebereitstellung zukünftig erfordern. Die Ergebnisse der Analysen zur Entwicklung des Primärenergiebedarfs in Deutschland verdeutlichen die Relevanz dieser Problematik, da mehr als ein Drittel des Primärenergiebedarfs für die Wärmebereitstellung eingesetzt wird.<sup>13</sup> Der strategische Ansatz, von kohlenstoffreichen zu kohlenstoffarmen Energieträgern zu wechseln, erfordert für die städtische Energieversorgungsplanung eine Umstellung der Energieversorgungsstruktur und der Energieanlagen-systeme zur Erzeugung von Strom und Wärme für Gebäude.

In den Jahren 1970 und 1990 haben weltweit Erdölkrisen dazu geführt, dass Regionen, Städte und Gemeinden mit nachhaltigen Energieversorgungskonzepten, Energiesparmodellen und energetischen Gebäudesanierungen auf die Unsicherheit der Heizölversorgung reagierten. Dazu zählt die Entwicklung der Wärmepumpentechnologie und solare Energieversorgungsanlagen, solarer Städtebau und die Entwicklung von Langzeitspeichertechnologien für Strom und Wärme, um die Versorgungssicherheit in Städten ohne fossile Energieträger zu gewährleisten. Die Versorgung von Gebäuden und Haushalten mit Strom und Wärme ist jedoch abhängig von einer ganzjährigen sicheren Bereitstellung von Energie als Grund- und Spitzenlast.

Die Planung von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen zur solaren Strahlungsnutzung für die Wärmegebäudeversorgung und Aufbau einer Niedrigtemperaturwärmernetzstruktur in Städten erfordert regionale und städtische solare Energieversorgungskonzepte sowie Leitbilder, die sich auf die kommunale städtebauliche Planung und

---

<sup>12</sup>a.a.O.: S. 22.

<sup>13</sup>Vgl.: Statistische Analysen zum Primärenergieverbrauch - Bundesministerium für Wirtschaft, Stand 2015.

Infrastrukturversorgung in Städten auswirken. Der „solare Städtebau“ ist eine optimale städtebauliche Variante zur aktiven und passiven solaren Energieerzeugung über thermische Anlagen, Gebäudeaußenbauteile und Gebäuden in städtischen Quartieren. Der solare städtebauliche Planungsansatz ist insbesondere von der Bebauungsdichte, Südausrichtung von Dach- und Gebäudeflächen und städtebaulichen Ausrichtung von Gebäuden abhängig. Die Niedrigtemperaturwärmeversorgung ist in das städtebauliche Konzept des solaren Städtebaus einzubinden.<sup>14</sup>

Die solare Stadtentwicklung mit regenerativen Energien ist bisher modellhaft in Einzelprojekten für die Strom- und Wärmeversorgung eingesetzt worden. Die daraus gewonnenen Erfahrungen führen zu Planungsanforderungen für eine solare Stadtplanung zur Bereitstellung von Wärme für Gebäude.

Technische und natürliche Warmwasserspeichersysteme zur Aufnahme des solaren Wärmepotenzials von städtischen Flächen in Verbindung mit thermischen Anlagen von Gebäuden, Erdwärmekollektoren mit Einbautiefen von bis zu 2m unter Geländeoberkante, Brunnendubletten zur direkten energetischen Nutzung von Grundwasser sind zur Wärmeversorgung in städtischen Quartieren geringfügig eingesetzt worden. Die temporäre Wärmespeicherung zum Beispiel durch Aquifer Thermal Energy Storage - ATEs<sup>15</sup> ist Stand der Technik zur Aufnahme der Überschusswärme oder Wärme aus „power-to-heat“ – Anwendungen.

Eine intensive thermische Entzugsleistung von Flächen und Böden kann jedoch Langzeitauswirkungen auf die Boden- und Grundwassertemperaturen durch die Eiskrustenbildung von Böden<sup>16</sup> haben. Dies kann im Frühjahr dazu führen, dass Niederschlags- und Schmelzwasser nicht versickern und sich Staunässe bilden kann. Weitere potentielle Auswirkungen von Temperaturveränderungen könnten sich auf den Grundwasserchemismus oder auf die Grundwasserbiozönose<sup>17</sup> auswirken. Das Forschungsprojekt „groundwater urban heat island“<sup>18</sup> untersuchte den Einfluss von atmosphärischen Luft-

---

<sup>14</sup>Vgl.: Solarer Städtebau-Leitbilder und Potenziale: Forschungsprojekt RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Städtebau und Landesplanung, Partner: Ecofys GmbH FH Köln - Lehrstuhl für Regenerative Energietechnik, TU München - Lehrstuhl für Gebäudetechnik, 2003-2004.

<sup>15</sup>Vgl.: Bridger & Allen 2010; Bauer et al. 2013.

<sup>16</sup>Markert, Arvid: Diplomarbeit Studiengang Landschaftsplanung der Technischen Universität Berlin -Einfluss von Substrateigenschaften auf die Wärmeleitfähigkeit von Böden - Bodenphysikalische Nutzungsaspekte von Erdwärmekollektoren, Berlin, 2012.

<sup>17</sup>Vgl.: Brielmann et al. 2009; Possemiers et al. 2014; Griebler et al. 2015.

<sup>18</sup>Vgl.: Allen et al. 2003; Ferguson & Woodbury 2007.

temperaturen auf Oberflächen und Bodenschichten sowie Grundwassertemperaturen. Die Analyse von Wärmeströmungen in Bodenschichten unterhalb von versiegelten Flächen der Städte Köln, Karlsruhe und Basel zeigen, dass saisonale Temperaturveränderungen von Grundwassertemperaturen aufgrund der städtischen Versiegelung und Wärmespeicherung ganzjährig bestehen.<sup>19</sup>

Durch gesetzliche Regelungen zur Planung und Nutzung oberflächennaher Geothermie durch Erdwärmesonden sind insbesondere das Wasserrecht, Bergrecht und die Nachbarrechtsgesetze der Länder betroffen. Auswirkungen während des Betriebes der oberflächennahen Geothermie auf benachbarte Grundstücke, Bodenschichten und Grundwasservorkommen sind durch ein Monitoring von Labor- oder Feldversuchen<sup>20</sup> nachzuweisen.

Die Aufnahme der Parameter hydraulische Leitfähigkeit des Bodens, Wärmeleitfähigkeit oder Porosität von Flächen und Böden, meteorologische Standortdaten, Wärmebedarfsdichte ist in der grundstücksbezogenen Erschließungspraxis und im Bauleitplanverfahren nicht gesetzlich vorgeschrieben. Wärmevorkommen in Gebieten mit hoher geothermischer Nutzungsdichte erfordern daher eine Detailerkundung des Standortes und des Bodens wie auch die Aufnahme der Gebäude- und Siedlungstypologie.

Die Anlagendimensionierung und Auslegung von Wärmepumpenanlagen zur Optimierung der Anlageneffizienz (Verhältnis von generierter Wärme- oder Kühlleistung zur benötigten elektrischen Leistung der Wärmepumpe) sowie die optimierte Nutzung von standortbezogenen Wärmespeichern ist eine wesentliche Bedingung für die Umwandlung des Wärmepotenzials in die Nutzenergie Wärme.<sup>21</sup>

Die Infrastruktur- und solaren Erschließungskonzepte sind mit den Versorgungsstrategien der Entscheidungsträger einer fossilen Energieversorgung abzuwägen. Die zentrale Wärmebereitstellung zum Beispiel durch die Nutzung von oberflächennaher Geothermie in Deutschland wird durch den Bundesverband Geothermie (2015) auf ein Potenzial von circa 9,6 Mrd. kWh geschätzt. Der Anwendungsbereich der oberflächennahen Geothermie ist bis zu einer Bodentiefe von 400m definiert<sup>22</sup> und in Bodentiefen von bis zu 100m

---

<sup>19</sup>Vgl.: Balke 1974; Zhu et al. 2010; Menberg et al. 2013b und Epting & Huggenberger 2013.

<sup>20</sup>Vgl.: Arning et al. 2006; Brielmann et al. 2009; Jesušek et al. 2013; Griebler et al. 2015.

<sup>21</sup>Vgl.: Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2016) 21: 69-73. Fachbeitrag: Energiewende braucht Wärmewende – Chancen und Limitierungen der intensiven thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten vor dem Hintergrund der aktuellen Energiedebatte in Deutschland, Thomas, Vinken; Falk, Händel; Jannis, Epting; Peter, Dietrich; Rudolf, Liedl; Peter, Huggenberger. 30.6.2015, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.

<sup>22</sup>Vgl.: Anwendungsbereich der oberflächennahen Geothermie, Stober & Bucher, 2012.

für die standortbezogene Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern anwendbar.<sup>23</sup> In dieser Arbeit wird die oberflächennahe Bodentiefe bis zu einer Bodentiefe von 12,00m untersucht.

Auf der europäischen Ebene stellt die „Leipzig Charta zur nachhaltigen europäischen Stadt“ Förderprogramme zur Verfügung, die Probleme und Chancen von Städten und Regionen als „integrierte Stadtentwicklungspolitik“ untersucht. Der mit der energetischen Sanierung von Gebäuden verbundene solare Stadtumbau erfordert eine Untersuchung der ökonomischen und sozialen Aspekte der Eigentümerverhältnisse und Nutzer. Die modellhaften Stadtentwicklungsansätze zeigen, dass die „funktionsgerechte Stadt“ und die „autogerechte Stadt“ sich zu einer „energiegerechten umweltfreundlichen Stadt“ entwickelt haben. Insbesondere die Energieversorgungsplanung mit regenerativen Energien erfordert diesbezüglich einen integrierten Planungsansatz. Im kommunalen Bereich sind daher alle Planungsebenen stärker mit den Belangen des Klima-, und Umweltschutzes und der Energieversorgungsstrategie zu verknüpfen, damit Versorgungsmodelle der „solaren Stadtentwicklungsplanung und des solaren Stadtumbaus“ auf konkrete Planungsinstrumente zurückgreifen können. Eine nachhaltige Stadtentwicklung von der Gesamtstadt zum städtischen Quartier erfordert demnach ganzheitliche Energiekonzepte. Konzeptuell sind Ansätze wie „Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzepte mit regenerativen Energien“ oder „ökologische Leitlinien zum Klimawandel und Klimaschutz“ sind dahingehend zu untersuchen, ob der Wirkungsgrad einer solaren Stadtentwicklung erzielt wird. Die Literaturrecherche zeigt, dass eine Vielzahl von Stadtentwicklungskonzepten den strategischen Ansatz zur Formulierung von Energie- und CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen als Selbstverpflichtung durch die Mitgliedschaft in Klimaschutzbündnissen aufgenommen hat. Kommunale Gesamtenergiekonzepte stehen insbesondere als Handlungsleitfäden zur Festlegung von Benchmarks wie zum Beispiel zur Minimierung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses zur Verfügung.

Die Bauleitplanung von Städten und städtischen Quartieren erfordert die Erschließung und Versorgung mit Strom und Wärme. Energetische Leuchtturmprojekte in Städten wie Vauban (Freiburg) oder Masdar City (Dubai) zeigen, dass die Förderung einer Quartiersversorgung mit regenerativen Energien und energetischen Gebäuden sehr öffentlichkeitswirksam ist, damit die Akzeptanz in der Bevölkerung erhöht werden kann. Die Metropole Abu Dhabi hingegen will bei der Entwicklung von Technologien für erneuerbare Ener-

---

<sup>23</sup>Vgl.: Sanner et al. 2003; Florides & Kalogirou 2007.

gien und Klimaschutz eine ähnliche Vorreiterrolle spielen wie vor 40 Jahren das kalifornische Silicon Valley für die Halbleiterindustrie.<sup>24</sup>

Die Verlängerung von langjährigen Konzessionsverträgen zwischen den Energieversorgern und den Kommunen wird als kritisch gesehen. Bei der Fragestellung „Zwang oder Anreiz“ in der Energieversorgung ist die Debatte sehr aktuell, da in Neubaugebieten häufig ein Anschlusszwang festgelegt und bei Bestandsgebieten diskutiert wird, ob die Gemeindeordnung hinsichtlich eines Anschlusszwangs an das Fernheizungsnetz geändert werden sollte.

Die Auswertung der Datenstatistik über den bundesweiten Gebäudebestand<sup>25</sup> zeigt, dass die erste Wärmeschutzverordnung von 1978 eine bis zu 30% energetische Aufwertung des städtischen Gebäudebestandes in Deutschland bewirkt hat. Die Modernisierungsrate des Gebäudebestandes erreicht demnach eine Sanierungsquote von 1,1% pro Jahr. In den Folgejahren wurden durch Verordnungen zum Wärmeschutz (EnEV 2002) gezielte Förderprogramme für den Stadtumbau und für Modernisierungsmaßnahmen von Gebäuden durch die Bundesregierung und den Ländern bereitgestellt.

Auswertungen wissenschaftlicher Modellvorhaben der Schweiz, Österreich, Dänemark und Island zeigen, dass eine dezentrale städtische Energieversorgung zur Bereitstellung von Wärme mit leitungsgebundenen Energien und regenerativen Energien für Stadtquartiere praktisch umsetzbar ist. Technologien der Heizanlagen- und Wärmepumpenanlagentechnik stehen mit einem hohen Effizienzgrad zur Verfügung, die mit Langzeitwärmespeichersystemen einen wirtschaftlichen Betrieb sicherstellen können.

Eine effiziente städtische dezentrale Energieversorgung in Städten und Gemeinden erfordert Instrumente der Bauleitplanung sowie bau- und versorgungsrechtliche Regelungen. Bundestag und Bundesrat haben mit den Beschlüssen zur Energiewende im Sommer 2011 die Weichen in Richtung einer umweltfreundlichen und verstärkt dezentralen Energieerzeugung durch Kraftwerke ohne Kernenergie gestellt. Die wesentlichen Akzente werden durch die Nutzung regenerativer Energien, Steigerung der Energieeffizienz sowie Energieeinsparung vorgegeben.

---

<sup>24</sup>Vgl.: Informationen im Internet unter URL <http://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/6894-rtkl-masdar-city-die-null-emissions-stadt-der-wueste> (2017).

<sup>25</sup>Institut Wohnen und Umwelt (IWU) Hrsg.: Datenbasis Gebäudebestand: Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand, Autoren: Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus, Darmstadt, 9.12.2010.

Die Vielzahl an möglichen Eingriffspunkten zur Erreichung der gesetzten Ziele bedarf jedoch noch einer weiteren Ausgestaltung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Auf dem deutschen Wärmemarkt sind Umwandlungsprozesse zu verzeichnen, die zur fortlaufenden Absenkung des Endenergiebedarfs beitragen werden. Niedertemperatursysteme spielen zunehmend eine einflussreiche Rolle in der Wärmeversorgung von Gebäuden, bei der Sanierung im Gebäudebestand und bei Neubauten zur Umsetzung der Energieeffizienz. Für die Erzeugung von Strom und Wärme wird der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) weiterhin in Städten an Bedeutung gewinnen. Die Fern- und Nahwärmeversorgung bedient sich der Heizwerke und Heizkraftwerke, da kurzzeitige Spitz-enlasten im Wärmebedarf abgedeckt werden. Im Vergleich zu einer Vielzahl von ölbefeuerten Einzelanlagen wird in zentralen Heizkraftwerken die Wärmeerzeugung wesentlich effizienter gestaltet. So sind zum Beispiel durch den Einsatz modernster Feuerungstechnik niedrige NO<sub>x</sub>-, CO- und CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielt worden. Zur Unterstützung der Heizkraftwerke werden im gleichen Wärmeverbund Heizwerke zur Spitzenlastabdeckung eingebunden.

Eine dezentrale Energieerzeugung mit Strom und Wärme erfordert eine Infrastruktur wie Inselnetze zur Stadtteil- und Quartiersversorgung. Aus der Sicht der Energieversorgungsunternehmen und der Verbraucher ist der wirtschaftliche Anschluss an das Nahwärmenetz nur mit einer hohen Wärmebedarfsdichte, bestehend aus Wärmeleistung als Anschlusswert und Wärmeabnahme als Raumheizung und Brauchwassererwärmung, wirtschaftlich. Um das städtische Nahwärmenetze effektiv betreiben zu können, sind Wärmeerzeugungsanlagen wie zum Beispiel solarthermische Anlagen, geothermische Anlagen, Wärmepumpen und Biomasseanlagen einzubeziehen. Die Dissertation fokussiert sich daher auf die Potenzialanalyse des solaren Strahlungspotenzials von versiegelten und unversiegelten Flächen zur Erzeugung von Niedrigtemperaturwärme unter städtebaulichen und meteorologischen Bedingungen in städtischen Quartieren. Die selektive Internet- und Literaturrecherche über die Anwendung solarer Strahlungsenergie von Gebäudeflächen zeigt, dass dezentrale Energieversorgungsmodelle und gebäudebezogene Energieversorgungsprojekte umgesetzt worden sind. Ergebnisse aus den Eckdaten regenerative Energien des Bundesumweltministeriums<sup>26</sup> belegen, dass der Anteil an regenerativen Energien zur Bereitstellung von Stromenergie zwar gestiegen, aber der Anteil zur Bereitstellung von Wärme

---

<sup>26</sup>Bundesministerium für Umwelt (BMU): Eckdaten der Regenerativen Energien in Deutschland 2010/2011, Informationen aus dem Internet URL <http://www.regenerative-energien.de> (2012) auf der statistischen Grundlage der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V..

und Warmwasser aus regenerativen Energien, insbesondere für Bestandsgebäude, sich nicht merkbar erhöht hat. Die Arbeit zeigt solare standortbezogene Potenziale von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen zur solaren Wärmeversorgung auf. Die Methodik erfordert einen interdisziplinären Ansatz, insbesondere unter Berücksichtigung der Forschungsfelder Regional- und Stadtentwicklung, Klima- und Ressourcenschutz, technische Infrastrukturentwicklung, Wärmespeicherung, Wärmepumpentechnologie, städtische Energieversorgungsmodelle, Meteorologie und Klimaschutz.

## 2. Stand der Technik

Der Stand der Technik von Wärmepumpen und regenerativen Energiesystemen ist zur Nutzung von solarer Strahlungsenergie und Grundwasser für die Erzeugung von Warmwasser in wissenschaftlichen Forschungsberichten und Modellprojekten des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) aus dem Zeitraum von 1970 bis 1980 erstmalig untersucht und ausgewertet worden. Die Auswertung der themenspezifischen Projekte zeigt, dass in städtischen Modellgebieten die Nutzung von Grundwasserbrunnenanlagen zur Bereitstellung von Wärme für den Gebäudebestand mit Hilfe von Wärmepumpenanlagen im Vordergrund stand. Die Auswertung der Forschungsberichte des BMFT zeigt weiterhin, dass eine Wärmeversorgung des Gebäudebestands aus dem standortbezogenen Grundwasservorkommen bis zu 70% gewährleistet werden konnte. Der ineffiziente Anlagenwirkungsgrad von Warmwassersolaranlagen und Wärmepumpenanlagen sowie die Anlagenkombination mit miteinander führten nicht zur Wirtschaftlichkeit. Die Auswertung der in den Jahren von 1970 bis 1980 staatlich geförderten Modellprojekte in der Schweiz und in Österreich zeigen ähnliche Ergebnisse. Langjährige Aufzeichnungen und Auswertungen von Leistungskurven bivalenter Anlagenbetriebe von solar betriebenen thermischen Anlagen in Kombination mit Heizungsanlagen zeigen deutlich einen ineffizienten Anlagenbetrieb. Mit der Gewährleistung der Versorgungssicherheit durch die tägliche Verfügbarkeit der vorhandenen fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas verfestigte sich die Tendenz zu einer regionalen und städtischen zentralen Energieversorgung. Infolge der Weiterentwicklung des technischen Wirkungsgrades von Wärmepumpen und regenerativen Energien erfolgte die Ausweitung des Anwendungsbereiches primär von Einzelanlagen.

Die Auswertung von langjährigen Modellvorhaben zur Wärmeversorgung von städtischen Quartieren und Gebäuden während des Zeitraums von 1990 bis 2015 zeigen jedoch, dass ein Substitutionsanteil an der fossilen Energieversorgung bis zu 80% durch regenerative Energien unter Nutzung von Windenergie, Grundwasservorkommen, Erdwärme, Biomasse und Solarstrahlung erzielt werden könnte. Die Datenerfassung und -speicherung von geologischen und meteorologischen Standortbedingungen am Versorgungsstandort führte zu weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen zur Verbesserung der solaren Energieerzeugung und der Energieversorgungsnetzstruktur mit regenerativen Energien.

Seit dem Jahr 2000 sind regionale und städtische Klimaschutz- und Energiekonzepte zur Entwicklung von städtischen Leitbildern zum Schutz des globalen Klimas im Rahmen der Regional- und Stadtentwicklungsplanung als Planungsinstrumente eingesetzt worden. Als

ein wesentliches politisches Klima- und Umweltschutzziel für Regionen und Städte ist die Reduzierung von Kohlendioxidemissionen aus Kraftwerks- und Heizungsanlagen. Die in diesem Kontext geförderte Entwicklung der Anlageneffizienz, Anlagenablufreinigung und Technologieförderung zeigt, dass die Potenzialerhöhung an regenerativen Energien im Gegensatz zu der Energieversorgung mit fossilen Energieträgern für die Strom- und Wärmeerzeugung langfristig einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leistet. Der Schwerpunkt von Forschungsvorhaben im Energieversorgungssektor bezieht sich daher primär auf die Weiterentwicklung des effizienten Kohlekraftwerksanlagenbetriebes zur zentralen Bereitstellung von Strom- und Wärmeenergie. Die Konkurrenzfähigkeit der regenerativen Energien zu den Kraftwerkstechnologien zeigt sich in der Entwicklung zur Verbesserung der Leistungssteigerung, Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades zum Beispiel von Photovoltaikanlagen (Solarzellenentwicklung), Biomasseanlagen, Windkraftanlagen und einer effektiven Langzeitspeicherung von Strom und Wärme. Der technische Stand der Geothermie und der Wasserstofftechnologie zur dezentralen Versorgung von Regionen und Städten befindet sich in der Weiterentwicklung und Forschung.

## **2.1. Energieversorgung und Kraftwerke**

Der beabsichtigte Ausstieg aus der Atomkraftwerksversorgung unterstützt die Umstrukturierung von der zentralen zur dezentralen Energieversorgung mit regenerativen Energien. Den Schwerpunkt in einem zukünftigen dezentralen Versorgungssystem bilden energiebedarfsgesteuerte Smart-Grid<sup>27</sup> Netzwerksysteme, die eine Anlagenkombination und -steuerung zum Beispiel mit optimierten fossilen Kleinkombikraftwerken und Blockheizkraftwerken, solarthermischen Kraftwerken, Photovoltaik- und Biogasanlagen im Verbund fördern. Zur Umsetzung dieser Versorgungsstrategie mit fossilen Energieträgern und regenerativen Energien ist der Fokus auf Kleinkraftwerke als Inselversorgungszentren in Städten zu legen.

In einem langjährigen Demonstrationsprojekt des Energieversorgers RWE Deutschland AG unter Beteiligung der Firma Siemens<sup>28</sup> zu virtuellen Kraftwerken wurden im Jahr 2006 über den Probetrieb von virtuellen Kombikraftwerken unter Beteiligung von

---

<sup>27</sup>Dickert, Jörg; Schegner, Peter: T Neue Ansätze der Modellierung synthetischer Lastgänge für Planung und Betrieb von Smart Grids, Technische Universität Dresden, Paper, Conference: Internationaler ETG-Kongress 2011 - 11/08/2011 - 11/09/2011, Würzburg, 2011.

<sup>28</sup>RWE AG (Hrsg.): Virtuelle Kraftwerke: Theorie oder Realität? Arndt, Ulli, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Fachtext in BWK, Bd.58 (2006) Nr.6, Informationen im Internet URL <http://www.nun-dekade.de/fileadmin/nun-dekade/dokumente/dokumente/>.

Windkraftanlagen, Blockheizkraftwerken, Stromspeichern, Endenergieverbrauchern und Versorgungsnetzanlagen Ertragsleistungen zur Stromenergieerzeugung ausgewertet. Die technische und wirtschaftliche Reife der virtuellen Kraftwerke konnte durch dieses Modellprojekt nachgewiesen werden, aber es besteht noch Forschungsbedarf zur Anlagenanbindung und Anlagenkommunikation in Verbindung zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit.

Die Literaturrecherche zum Forschungsfeld Kraftwerkstechnologie zeigt, dass die Entwicklung von effizienten, emissionsarmen, fossil befeuerten Heizkraftwerken bedeutend geworden ist.

Der Forschungsbericht der COORETEC - Arbeitsgruppen<sup>29</sup> stellt unter Berücksichtigung der globalen Rahmenbedingungen und Anforderungen an zukünftige Kraftwerkstechnologien technische Möglichkeiten auf, die kurzfristig eine CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung durch Wirkungsgradsteigerung, mittelfristige Kombi-Technologien auf Kohlebasis und eine langfristige Steigerung des Wirkungsgrades für Hybridprozesse bewirken. Der Bericht zur Förderung von Forschung und Entwicklung zukunftsfähiger Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen zeigt, dass sich „...von den zurzeit zur Verfügung stehenden Kraftwerksprozessen der Dampfkraftprozess sowie der erdgasbefeuerte Gas- und Dampfprozess sich durchgesetzt haben. Die Fern- und Nahwärmeversorgung und Hybridkraftwerke für die städtische Energieversorgung werden immer mehr in den Vordergrund rücken“. Die Entwicklung von Hochtemperatur-Wärmespeichern für Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD) zur Integration in den Kraftwerksprozess ist daher ein wesentliches Forschungsfeld geworden.

Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke oder Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerke sind Kraftwerksanlagen, in dem die Prinzipien eines Gasturbinenkraftwerkes und eines Dampfkraftwerkes kombiniert werden. Mit der kombinierten Fahrweise wird im thermodynamischen Kreisprozess ein höherer Wirkungsgrad erreicht als mit Gasturbinen im offenen Betrieb oder in konventionell befeuerten Dampfkraftwerken. Kombikraftwerke gehören mit Wirkungsgraden von bis zu ca. 60 % zu den effizientesten konventionellen Kraftwerken und sind im Kraftwerksmanagement sehr flexibel einsetzbar. Wegen kurzer Startzeiten und der Möglichkeit schneller Laständerungen sind sie ideale Mittellast-Kraftwerke

---

<sup>29</sup>Vgl.: COORETEC-Arbeitsgruppen - Kraftwerke für die flexible Energieumwandlung, Energiesysteme. Information im Internet unter URL <http://kraftwerkforschung.info/energiesystem.de> (2017).

und können bei Bedarf Spitzenstrom liefern. Für den Betrieb der Gasturbine werden gasförmige oder flüssige Brennstoffe wie Erdgas, Biogas oder Heizöl eingesetzt.

Stand der Technik zum Beispiel bei GuD-Kraftwerken zur reinen Stromgewinnung, das heißt ohne eine weitere Nutzung der Abwärme zu Heizzwecken oder als Prozesswärme, ist der Drei-Druck-Prozess mit Zwischenüberhitzung. Die elektrische Leistung dieser Anlagen liegt bei etwa 400 MW. Mit einem Wirkungsgrad der Gasturbine zur Stromerzeugung von 40 % und einem Wirkungsgrad der Abwärmenutzung von 18,4 % (jeweils bezogen auf den Heizwert  $H_u$ ) liegt der bisher beste erreichte Gesamt-Wirkungsgrad bei 58,4 %.

Eine sichere Energieversorgung<sup>30</sup> durch regenerative Energien ist am Versorgungsstandort möglich, vor allem, wenn alle Wärmepotenziale genutzt und aufbereitetes Biogas in das städtische Erdgasnetz zusätzlich eingespeist werden kann. Das Kombikraftwerk ist eine geeignete Stromerzeugungsanlage, die Solaranlagen mit Biomasseanlagen verknüpfen kann. Die intelligente Verknüpfung einzelner Erzeuger, gekoppelt mit leistungsfähigen Vorhersageverfahren, kombiniert mit Wärmespeichern ermöglicht eine Leistungsverfügbarkeit, die den Anforderungen an eine Versorgungssicherheit gerecht werden kann. Für eine zukünftige aus regenerativen Energien basierte Energieversorgung ist die Installation von mehrfachen Überkapazitäten unbedingt erforderlich, damit Erzeugungsüberschüsse generiert und temporäre Erzeugungsdefizite verhindert werden können. Die Fähigkeit der regenerativen Energien zur zuverlässigen Wärmeversorgung und zur Sicherstellung des gesamten Strombedarfs wird durch aktuelle Forschungsaktivitäten im Rahmen der E-Energy-Projekte<sup>31</sup> weiter wissenschaftlich untersucht.

Forschungsvorhaben zur Wirtschaftlichkeit von Wärmeschutzstrategien in Städten durch die Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) und das Institut für Städtebau und Raumplanung haben gezeigt, dass die Investitionen in die städtische Fern- und Nahwärmeversorgung deutlich günstiger sind als die Investitionen zum Beispiel in Maßnahmen des Vollwärmeschutzes von Gebäuden in Städten. Die Abschätzung des jährlichen Gebäudeheizwärmebedarfs ist Voraussetzung für die Planung der leitungsgebundenen Nahwärmeversorgung. Die Konkurrenz zwischen der leitungsgebundenen Nahwärmeversorgung und

---

<sup>30</sup>Vgl.: Fachausschuss Nachhaltiges Energiesystem 2050 des Forschungsverbunds regenerativer Energien: Energiekonzept 2050 aus Basis regenerativer Energien, S.28-29, Kapitel 1.3.6, Juni 2010.

<sup>31</sup>Sterner, M.; Gerhardt, N.: Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem. Fraunhofer IWES, Kassel. Informationen im Internet URL <http://www.schluchseewerk.de/105.0.html>, Stand 2010.

der Erdgasversorgung verhindert in der Regel den Ausbau von Nahwärmenetzen, da das städtische Erdgasversorgungsnetz in den Städten den Energieträger für die Endenergieerzeugung bereitstellt. Die Integration von regenerativen Energiesystemen in die bestehende Wärmeversorgungsstrategie wird dadurch langfristig erschwert. Das Ergebnis der Sondierungsstudie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU)<sup>32</sup> belegt diese These und kommt zu dem Ergebnis, dass Effizienz-Potenziale zur Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele nicht allein ausreichen, sondern zusätzlich Suffizienz-Potenziale erschlossen werden müssen.

## 2.2. Nachhaltige Wärmeerzeugung

Die Literaturrecherche über den Forschungsstand<sup>33</sup> geothermischer Kraftwerke zeigt, dass im internationalen Ausland zum Beispiel im Bundesstaat Kalifornien „The Geysers“ weltweit das größte geothermische Kraftwerk mit einer thermischen Anlagenleistung von 700 MW betrieben wird. Die Entwicklung der Bohranlagentechnik führt zu einer Erhöhung der geothermischen Anlagenleistungen und zu Bohrtiefen mit einer hohen Förderung von Wärmepotenzialen. In Deutschland ist das Vorkommen an Geothermie-Potenzial<sup>34</sup> in Regionen für die tiefe Geothermie (>1000m) und für die Hydrogeothermie (>400m) für eine technische Erdwärmennutzung untersucht und in einem Gutachten durch den Bundesverband Regenerative Energie<sup>35</sup> bewertet worden.

Die Auswertung der Projektbeispiele in Deutschland wie in Mecklenburg-Vorpommern, Neustadt - Glewe<sup>36</sup>, Freistaat Bayern und Unterhaching<sup>37</sup> bei München zeigt, dass durch die geothermischen Vorkommen am Versorgungsstandort Gebäude, Haushalte von Wohnsiedlungen mit Strom- und Wärmeenergie ganzjährig versorgt werden können. Weitere Modellprojekte<sup>38</sup> bestätigen die Betriebsergebnisse und zeigen an den Standorten der Städte und Regionen in Aachen, Berlin, Erding und in der Elsass-Region Sultz-sous-

---

<sup>32</sup>Prytula, Michael: Ein integrales Energie- und Stoffstrommodell als Grundlage zur Bewertung, Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, 2011.

<sup>33</sup>Vgl.: Geothermische Vereinigung, Bundesverband Geothermie; Bericht im Innovations Report Forum für Wissenschaft, Industrie und Wirtschaft, Information im Internet URL <http://www.geothermie.de/aktuelles/geothermie-in-zahlen.html> (2012).

<sup>34</sup>Vgl.: Projektbericht von Rödl & Partner (Hrsg.), S.7 (Abbildung 1: Regionen mit Möglichkeit zur hydrothermalen Strom- bzw. Wärmegewinnung) aus Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland, 2009, S. 57.

<sup>35</sup>Bundesverband Regenerative Energie e.V. (BEE): Wege in die moderne Energiewirtschaft; Titel: Ausbauprognose der Regenerative-Energien-Branche, Teil 2 Wärmeversorgung 2020, Nr. 3.3.2, S. 11 ff., Berlin, Oktober 2009.

<sup>36</sup>Vgl.: Erdwärme Neustadt-Glewe GmbH; Information im Internet URL <http://www.wemag.com> (2011).

<sup>37</sup>Vgl.: Projektbericht von Rödl & Partner: Erfolgreiche Projektumsetzung Geothermie Unterhaching, Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG; Information im Internet URL <http://www.geothermie-unterhaching.de> (2011).

<sup>38</sup>Vgl.: Ringelziep/Zielke: Artikel aus Planet Wissen – Erdwärme –geothermische Kraftwerke, 13.09.2006.

Forêts die Versorgungsmachbarkeit von Wohnsiedlungen mit geothermischen Großanlagen. Der Vergleich von geothermischen Demonstrations- und Modellanlagen zeigt, dass geothermische Anlagen insbesondere Stromenergie erzeugen und weniger Wärmeenergie für die Gebäudewärmeversorgung bereitstellen.

Infolge von Tiefbohraktivitäten sind in Erdbebenzonen seismische Aktivitäten und Erdbewegungen am Versorgungsstandort registriert worden.<sup>39</sup> Im Rahmen der Standortvorbereitung erfolgt daraufhin eine geologische Standortbewertung, die von Landesbehörden im Rahmen von langjährigen hydrogeologischen und geologischen Untersuchungen zur Bewertung des Sicherheitsrisikos für die Bevölkerung und für die Umwelt veranlasst werden. Die Errichtung von geothermischen Anlagen bedarf der Anlagenerlaubnis nach §7 BBERG zur Aufsuchung bergfreier Bodenschätze zu gewerblichen Zwecken.

Die technischen Anforderungen an die Bauausführung, Bohrbetrieb und den Anlagenbetrieb von geothermischen Förderungen an Standorten sind in den Empfehlungen<sup>40</sup> der Fachbehörden der Länder dokumentiert. Das Beispiel aus den Landkreisen Osnabrück und Gemeinden in Niedersachsen<sup>41</sup> zeigt, dass die Förderung von geothermischen Energieressourcen in einer Region unter Berücksichtigung des Umweltschutzes und des Landschaftsschutzes gezielt eingesetzt worden ist. Die Betriebsergebnisse über den geothermischen Anlagenbetrieb sind durch die wissenschaftliche Begleitung von Terra Vita<sup>42</sup> veröffentlicht worden.

Forschungsvorhaben<sup>43</sup> zur Untersuchung von Mikro - Kraftwärmekopplungsanlagen für eine dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung, die gleichzeitig Wärmeenergie produzieren mit Motor-, Turbinen- und Brennstoffzellentechnologie, sind durch Modellprojekte evaluiert und in der Praxis zur Versorgung von Gebäuden getestet worden. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführte Befragung von Energieversorgungsunterneh-

---

<sup>39</sup>Vgl.: CNRS - französisches Zentrum für wissenschaftliche Forschung: "Cartographier les zones à risque sismique", Pressemitteilung des INRIA vom 07.12.2010. Information im Internet URL <http://www.inria.fr/centres-de-recherche-inria>, Philippe Rault, 2010.

<sup>40</sup>Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): Erdwärmenutzung in Hessen, Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW. 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden, 2005, S.21 –Technische Anforderungen an den Betrieb von Erdwärmesondenanlagen.

<sup>41</sup>Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz (Hrsg.): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden: Schematische hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Standortqualifizierung, S.13. (RISS – Kompetenzzentrum). Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden: Grundwasserlandschaften, S.14., Information im Internet URL [http://www.lgb-rlp.de/erdwaerme\\_karte.html](http://www.lgb-rlp.de/erdwaerme_karte.html).

<sup>42</sup>Vgl.: TERRA vita: Geothermie aus dem Geopark. Naturpark nördlicher Teutoburger Wald, Wiehengebirge, Osnabrücker Land e.V..

<sup>43</sup>Vgl.: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: Mikro-KWK und virtuelle Kraftwerke, Serafin von Roon.

men bestätigt, dass aus der Sicht der Netzbetreiber erdgasbetriebene Motoren für die Versorgung von städtischen Wohngebieten in Deutschland nicht wirtschaftlich sind. Mikro-KWK-Anlagen sind geeignet, für bestehende Niedrigtemperaturheizungsanlagen hohe Systemtemperaturen effizient bereitzustellen als auch die Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden zu sichern. Untersuchungen der Modellanlagen zeigen, dass der hohe Effizienzgrad einer gekoppelten Bereitstellung von Strom- und Wärmeenergie den Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich reduziert. Der Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen ist daher aus technischer Sicht geeignet, sich mit dezentralen Erzeugungsanlagen zu einem virtuellen Kraftwerk zu vernetzen. Die Forschungsergebnisse<sup>44</sup> begründen, dass der vernetzte Anlagenbetrieb die CO<sub>2</sub>- und Primärenergiebilanz im Vergleich zu einem monovalenten Anlagenbetrieb nur geringfügig verändert. Der Marktanteil in Deutschland von Mikro-KWK-Anlagen zur Versorgung von Wohngebäuden beträgt weniger als 1 %.

### **2.3. Zentrale und dezentrale Versorgungsnetzstruktur**

Die Vision der Umsetzung des nachhaltigen Energiekonzeptes 2050 mit einer 100%-igen Versorgung mit regenerativen Energien unterstützt der Forschungsverbund regenerative Energien, Fachausschuss „Nachhaltiges Energiesystem 2050“.<sup>45</sup> Die Balance zwischen dezentraler und zentraler Energieversorgung wird von den Verbänden als ein wesentliches Erfordernis für die Integration regenerativer Energiesysteme und zur Umstrukturierung der Energieversorgung mit fossilen Energieträgern angesehen.<sup>46</sup> Die notwendigen energiepolitischen Impulse für diese wesentliche Umstrukturierung erfordern eine Balance zwischen Zentralität und Dezentralität in der städtischen Energieversorgung, da insbesondere Kostenstrukturen infolge dieses Prozesses verändert oder angepasst werden müssten. In diesem Kontext werden daher zentrale Großkraftwerke<sup>47</sup> aufgrund des ineffizienten und emissionsbelastenden Anlagenbetriebes als ungeeignet angesehen, um den fehlenden Strom- und Wärmeenergiebedarf über ein energieintensives Lastmanagement auszugleichen. Die Bereitstellung eines sich ständig ändernden Spitzen- und Grundlast-Potenzials

---

<sup>44</sup>von Roon, Serafin: Tagungsbandbeitrag bei der FfE-Fachtagung 2009 - Stromversorgung des 21. Jahrhunderts, Veröffentlichung in Greenbuilding, Heft 12/2009, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin 2009.

<sup>45</sup>FVEE-Fachausschuss „Nachhaltiges Energiesystem 2050“ (Hrsg.): Energiekonzept 2050; Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % Regenerativen Energien, Juni 2010.

<sup>46</sup>Ebd.: S. 34–35, Kapitel 2.4 Balance zentraler und dezentraler Energieversorgung.

<sup>47</sup>Ebd.: S.35, Kapitel 2.4.2.

von Großkraftwerken durch einen klimabedingten und täglichen Energiebedarf wirkt sich langfristig wegen der auftretenden zusätzlichen Materialspannungen auf die Lebensdauer und die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerksanlagen aus. Neue Forschungsfelder auf dem Gebiet der Energieerzeugung und -versorgung rücken daher zur Einhaltung der Klimaschutzziele und folglich für die Umsetzung des bundesdeutschen Energiekonzeptes 2050 in den Vordergrund. Versorgungslösungen mit dezentralen Wärmeversorgungsstrategien und -konzepten, Fernwärmeversorgungs- und Nahwärmenetzen mit städtischen „Insellösungen“, Langzeitwärmespeichertechnologien in Kombination mit regenerativen Energiesystemen sind Lösungsansätze für den Klimaschutz und die Reduzierung von fossilen Energieträgern.

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. zeigt in seinem Eckpunktepapier<sup>48</sup> auf, dass Forschung und Entwicklung in der Energieversorgungswirtschaft auf die Abstimmung zentraler und dezentraler Wärmeversorgung fokussiert werden sollte. Je nach Art der eingesetzten Primärenergie haben zentrale oder dezentrale Systeme einen Vorteil hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionslast und des Primärenergieeinsatzes. Da bei der zentralen Wärmeversorgung aufgrund des notwendigen leitungsgebundenen Transportnetzes immer Wärmeverluste auftreten, wird tendenziell mehr Primärenergie benötigt als bei einem dezentralen System. Im Zuge der avisierten Gebäudesanierung sinkt der Wärmebedarf der Häuser perspektivisch durch verbesserte Wärmedämmung. Durch die kontinuierlich abnehmende Leistungsdichte der Wärmenetze erhöht sich der Anteil der Netzverluste auch in zentralen Systemen mit Einbindung der regenerativen Energien.<sup>49</sup> Da eine unzureichende Planungs- und Datenlage über den Leistungs- und Wirkungsgrad von dezentralen Wärmeversorgungskonzepten mit regenerativen Energien besteht, sind Modell- und Demonstrationsprojekte insbesondere in städtischen Quartieren durch Forschungs- und Entwicklungsprogramme zu fördern. Das politische Ziel der Bundesregierung ist langfristig festgelegt, um mindestens 80 % der Energieerzeugung durch regenerative Energien bereitzustellen.

---

<sup>48</sup>BDEW (Hrsg.): Eckpunktepapier „Zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich dezentrale KWK/Fernwärme“, Berlin, 11.10.2010.

<sup>49</sup>Vgl.: ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden: Studie Dezentrale vs. Zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt, Darmstadt und Dresden, Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz, September 2016.

## 2.4. Technische Nutzung solarer Strahlungsenergie

Regenerative Energien sind unerschöpfliche Energiequellen<sup>50</sup>, die sich primär aus der solaren Strahlungsenergie generieren und praktisch unerschöpflich zur Verfügung stehen. Die Oberflächenthermie und die geothermische Nutzung werden unter dem Begriff regenerative Energien zusammengefasst, obwohl eine ständige Erneuerung der Energiequelle nicht erfolgt, da das unerschöpfliche natürliche solare Wärmepotenzial sich aus dem thermischen Potenzial der Erdschichten generiert. Die Strahlungsleistung der Sonne besitzt zwar eine unerschöpfliche Strahlungskraft, ist aber von saisonalen, meteorologischen, klimatischen und den Tages- und Nachtzeiten abhängig. Die ganzjährig zur Verfügung stehende solare Strahlungsleistung wird über die solaren Jahresstunden als kurzweilige Strahlung bereitgestellt, in Wärmeenergie umgewandelt und über Oberflächen von Gebäuden, Bodenflächen, Gewässer aufgenommen und gespeichert. Die Absorption von solarer Strahlung über Flächen erfolgt als langwellige solare Strahlung. Die Energiebereitstellung aus der solaren Strahlung ist CO<sub>2</sub>-neutral.

Der Stand der Forschung zur Langzeitspeicherung von Wärme, Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser ist durch eine selektive Fachliteratúrauswertung von wissenschaftlichen Forschungsarbeiten des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) von 1972 bis 1990 untersucht worden. Die Ergebnisse aus den Einzelvorhaben belegen, dass überwiegend die Wärmeertragsförderung aus dem Grundwasserleiter über Förder- und Schluckbrunnen für Bestandsgebäude, Einzelgebäude und kleinere Mehrfamilienhäuser im Vordergrund stand. Die technische Entwicklung von Wärmespeichern wurde bis zum Jahr 1990 daher intensiv durch staatliche Förderprogramme unterstützt. Die Forschungsergebnisse der Modellvorhaben zeigen, dass die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser für Bestandsgebäude durch das standortbezogene solare Wärmepotenzial durch Wärmepumpenanlagen generell saisonal möglich ist. Die wissenschaftlich begleiteten Modellvorhaben und Feldversuche von mehr als zwanzig geförderten Forschungsprojekten auf dem Gebiet der regenerativen Energien zur Gebäudeversorgung und zur Nutzung von Wärmespeichern zeigen eine deutliche Steigerung des technischen Anlagenbetriebes mit Wärmepumpenanlagen. Technologische, betriebswirtschaftliche und umweltbezogene Kerndaten in Relation zum technischen Wirkungsgrad von

---

<sup>50</sup>Vgl.: Europäische Energie Agentur (EEA) Report Nr.4/2008; Informationen im Internet URL <http://www.eea.europa.eu/> (2014).

Wärmepumpen für die dezentrale Wärmeversorgung von städtischen Quartieren konnten daher generiert werden.

Seit 1977 und 1982 sind Parabolrinnen-Prozesswärme-Demonstrationsanlagen in den USA zur Erforschung installiert worden. Die ersten kommerziellen solaren Parabolrinnen-Kraftwerke sind seit 1990 in der Mojave-Wüste im Bundesstaat Kalifornien „Ivanpah“, in Spanien als Solarwärmekraftwerk PS 10 und in Andasol als Solarfarmkraftwerk zur Strom- und Wärmeerzeugung entwickelt worden. Das mit einer installierten thermischen Anlagenleistung von  $49,9 \cdot 10^3$  kWth größte Parabolrinnen-Kraftwerk Europas mit einer Anlagenfläche von  $195 \cdot 10^4$  m<sup>2</sup> erzeugt jährlich eine Strommenge von 150 GWh. Der Wirkungsgrad der Gesamtanlage beträgt 28 %.<sup>51</sup> Diese Kraftwerke verwenden fokussierende Reflektorflächen, um das einfallende Sonnenlicht auf den Absorber zu bündeln. Die Reflektoren oder der Absorber werden der Sonne nachgeführt. Solarfarmkraftwerke sammeln die Wärme über die Fläche verteilten Absorbern, während in Solarturmkraftwerken und Paraboloidkraftwerken die Strahlung der Sonne auf einen Brennpunkt gebündelt wird. Durch die Konzentration der solaren Strahlung auf Parabolspiegel sind hohe Systemtemperaturen erzielt worden. Das Kollektorfeld eines Solarfarmkraftwerkes erzeugt aus parallel geschalteten Parabolrinnen- oder Fresnel-Kollektoren die Wärme. Im Kollektorfeld wird ein Wärmeträgermedium erhitzt, entweder Thermoöl oder überhitzter Wasserdampf. Bei Thermoölanlagen sind Temperaturen von bis zu 390 °C erreichbar, die in einem Wärmeübertrager zur Dampferzeugung genutzt werden. Die Direktdampferzeugung kommt ohne Wärmeüberträger aus, da der überhitzte Wasserdampf direkt in den Absorberrohren erzeugt wird. Temperaturen werden von über 500 °C erzeugt. Der Wasserdampf wird anschließend wie in einem Dampfkraftwerk einer zentral angeordneten Dampfturbine zugeführt, die an einen Generator gekoppelt ist.

Betriebswissenschaftliche Studien und Untersuchungen der Energiewirtschaft prognostizieren aufgrund von Untersuchungen zum Beispiel für einen Kraftwerkspark mit solarthermischen Kraftwerken ein starkes Wirtschaftswachstum und einen zukünftigen Anstieg von einer installierten Anlagenleistung von mehr als 32 Gigawatt. Zur Planung von solaren Großanlagen ist eine standortabhängige Analyse und Bewertung erforderlich.<sup>52</sup>

---

<sup>51</sup>Vgl.: Solar Millennium AG: Die Parabolrinnen-Kraftwerke Andasol 1 bis 3 – Die größten Solarkraftwerke der Welt; Premiere der Technologie in Europa, S. 1-27, 2011.

<sup>52</sup>Telsnig, Thomas: Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrikas, Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart, Forschungsbericht, 2015.

Die Sarasin-Studie von 2013<sup>53</sup> zeigt, dass aufgrund der Analyse und des Vergleichs von Marktbewegungen, Technologieentwicklungen, Kraftwerks- und Heizanlagenherstellern für regenerative Energien und für Anlagen der Photovoltaik und der Solarthermie ein steigendes Wirtschaftswachstum weiterhin nur für die gut aufgestellten Unternehmen zu erwarten ist. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Gesamtkosten der Kohlendioxidvermeidung durch den Betrieb von Solarenergieanlagen reduziert und die aus Kraftwerken bereitgestellte Stromenergie teurer wird als die erzeugte Strom- oder Wärmeenergie von regenerativen Energieanlagen. Die aktuelle Nachhaltigkeitsstudie „Solarwirtschaft: Hartes Marktumfeld – Kampf um die Spitzenplätze“ von Sarasin zieht Bilanz zu börsennotierten Solarzellen- und Modulherstellern mit dem Ergebnis, dass neue Absatzmärkte und Anwendungen für Solarstrom ein betriebswirtschaftliches Wachstum erzeugen.

Die von A.T. Kearney und Estela publizierte Studie<sup>54</sup> prognostiziert eine weltweit installierte thermische Solaranlagenleistung von bis zu 30 GW bis zum Jahr 2020 und bis zu 100 GW bis zum Jahr 2025.

Die Studie<sup>55</sup> über die konzentrierte Solaranlagenleistung „Med - CSP“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrttechnik stellt die Hypothese auf, dass bis zum Jahr 2025 Strom aus den regenerativen Energiequellen günstiger angeboten werden kann als aus Kraftwerken, die mit fossilen Energieträgern betrieben werden.

## 2.5. Wärmepumpentechnologie

Der Stand der Technik der Wärmepumpentechnologie begann im Jahr 1970 mit einem Jahresanlagenwirkungsgrad zur Nutzung von der Wärmequelle Grundwasser von „1,5“ und stellte die betriebliche Leistung von konventionellen zentralen fossilbetriebenen Kraftwerken und Heizungsanlagen in den Vordergrund. Die Evaluierung der Schadstoffemissionen von Forschungsvorhaben und Langzeitstudien zeigte, dass die bivalente Wärmeversorgung mit strombetriebenen Wärmepumpen eine deutliche Reduzierung der Gesamtemissionen an gasförmigen und staubförmigen Verbrennungsgasen im Gegensatz

---

<sup>53</sup>Vgl.: Sarasin - Studie: Solarwirtschaft – grüne Erholung in Sicht, 30.11.2009 und Nachhaltigkeitsstudie Solarwirtschaft: Hartes Marktumfeld – Kampf um die Spitzenplätze, 2013. Information im Internet URL <http://www.jsafrasarasin.ch> (2017).

<sup>54</sup>Vgl.: ESTELA: is the European Solar Thermal Electricity Association, created in 2007 to promote solar thermal electricity (STE) in Europe and worldwide. ESTELA supports its members by fostering market penetration of solar thermal power. Information im Internet URL <http://www.estelasolar.eu> (2011).

<sup>55</sup>Vgl.: DLR / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Studie über Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Stuttgart, 16.04.2005, S.195.

zur Energieversorgung mit fossil betriebenen zentralen Heizkraftwerken und Gebäudeheizungsanlagen zur Folge hatte. Der Strom für den Betrieb von Wärmepumpenanlagen wurde durch konventionelle Kernkraft- oder Kohlekraftwerke mit einem geringen Wirkungsgrad von bis zu 30 % zur Verfügung gestellt. Die Schadstoffkonzentration der Gesamtabgasemissionen von Anlagen zur Erzeugung von Energie ist nach den Vorschriften des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) von 1974 durch das gesetzliche Erfordernis, die Anlage mit einer Abgasreinigungsanlage zu betreiben, langfristig reduziert worden. Der Schutz der Umwelt wurde in den Vordergrund der Anlagenplanung gestellt und Forschungsvorhaben, insbesondere zur Untersuchung von regenerativen Energieanlagen zur Erzeugung von Stromenergie durch Windkraftanlagen, Gezeitenkraftwerke, Solarkraftwerke etc. gefördert.

Die selektive Literaturrecherche zu Forschungsvorhaben, die die Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden mit Wärmepumpen gewährleisten, zeigen Untersuchungen an Modellvorhaben, die von den Bundesämtern, Instituten und Universitäten der Schweiz und Österreich veröffentlicht wurden. Das Schweizer Bundesamt für Energie untersuchte von 1995 bis 2004 im Rahmen des Forschungsprogramms „Umweltwärme“<sup>56</sup> den Betrieb von 250 Wärmepumpenanlagen für die Gebäudeversorgung mit einer maximalen Heizwärmeleistung von 20kW.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Wärmepumpentechnologie den Jahresanlagenwirkungsgrad von „3 bis 6“ erreicht und als zuverlässiges unterstützendes Heizungsanlagen-system zur Wärmeversorgung von Gebäuden eingestuft werden kann. Die Entwicklung der Jahresleistungskennzahlen (JAZ) von Wärmepumpensystemen ist aufgrund der Technologieentwicklung für den Zeitraum von 1993 bis 2003 in dem nachstehenden Diagramm<sup>57</sup> graphisch dargestellt.

---

<sup>56</sup>Rognon, Fabrice (Hrsg.): Programm Energie2000, 11. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des Bundesamtes für Energie (BFE) in Bern. FAWA - Feldanalyse von ca. 250 Wärmepumpenanlagen, HTA Burgdorf, 23.Juni 2004.

<sup>57</sup>Ebd.: Entwicklung der Leistungszahlen aus Abbildung 2, S. 30.

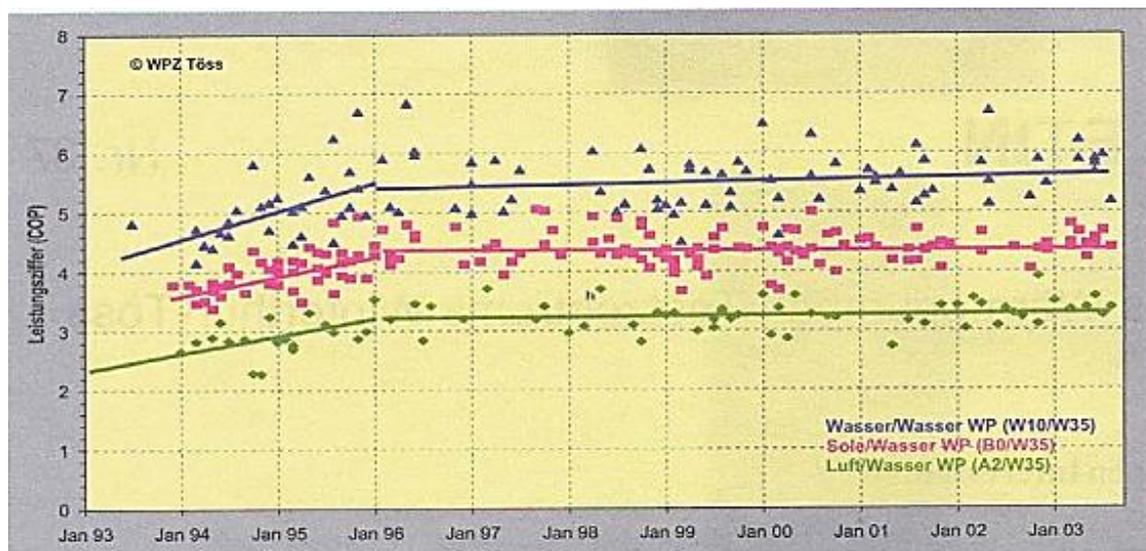


Abbildung 2: Entwicklung der Jahresleistungskennzahlen von Wärmepumpen

Der Grafik ist zu entnehmen, dass die Wärmepumpentechnologie innerhalb von zehn Jahren die JAZ von 2,2 bis auf den Wert von 4 fast verdoppeln konnte. Die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpensysteme erzielten bereits im Jahr 2012 eine maximale Leistungszahl von sechs<sup>58</sup>. Diese Technologieentwicklung führt zu einer Konkurrenz im energetischen Vergleich zu den Heizungsanlagen, die mit fossilen Energieträgern betrieben werden. Die Grafik zeigt ebenfalls, dass die Entwicklung von Wasser-Wasser Wärmepumpen einen höheren Leistungsbereich erreicht hat als Luft-Wasser Wärmepumpen oder Sole-Wasser Wärmepumpen. Die technologische Entwicklung von effizienten Wärmepumpenanlagen fördert den gleichzeitigen monovalenten oder bivalenten Anlagenbetrieb und ist für den Anlagenbetrieb mit mehreren Wärmespeicherarten am Versorgungsstandort geeignet.

In der Schweiz und in Österreich sind Modellprojekte zur Untersuchung des technischen solaren Wärmepotenzials des Abwasserkanalnetzes und der Umgebungsluft in Verbindung mit einem bivalenten Heizanlagen system initiiert worden. Die Untersuchungen<sup>59</sup> berücksichtigten die meteorologischen Einflüsse am Versorgungsstandort, die den Wärmeenergie- und Warmwasserbedarf durch die Endenergieverbraucher beeinflussen. Der 15. Tagungsband des Forschungsprogramms Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung,

<sup>58</sup>Ebd.: Wärmepumpentestzentrum in Winterthur - Töss, Schweiz. Test nach EN 14511 und Einführung eines Gütesiegels für Wärmepumpen in der Schweiz.

<sup>59</sup>Ebd.: S. 17, Peter Hubacher (11. Tagungsband des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung).

Kälte des Bundesamtes für Energie in der Schweiz zeigt den Forschungsstand<sup>60</sup> in der Wärmepumpentechnik seit dem Jahr 2009.

Die Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, publizierte die energiewirtschaftliche Bewertung von Wärmepumpenanlagen<sup>61</sup> für die Gebäudeversorgung und zeigt über einen Technologievergleich, dass die Wärmepumpenanlagen über den Strom-Mix Primärenergieeinsparungen von 25 bis 50 % erzielen können. Durch den ansteigenden Anteil von regenerativen Energien an der Stromerzeugung wird der Betriebsstrom für Wärmepumpenanlagen umweltfreundlich bereitgestellt und das Gesamtemissionsverhalten durch die Primärenergie- und Umweltbilanz<sup>62</sup> deutlich reduziert.

Die Windkraft- und Biomasseanlagen erzeugen einen wesentlichen Bruttostrombetrag, der anteilig als regenerativer Strom den Wärmepumpenanlagen zur Verfügung gestellt werden kann. Die Versorgungspraxis mit Wärmepumpen zeigt, dass insbesondere der Wärmepumpenanlagenbetrieb in der Nachtzeit mit günstigem Nachtstrom betrieben werden kann.

Die folgende Abbildung zeigt die Bruttostromerzeugung als gesamte erzeugte Strommenge aus regenerativen Energien, einschließlich des Eigenverbrauchs der Anlagen und der Leitungsverluste, für den Zeitraum von 2005 bis 2030.

---

<sup>60</sup>Bundesamt für Energie (BFE): 15. Tagungsband des Forschungsprogramms Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte, HTI Burgdorf, <http://www.bfe.admin.ch/forschung/waermepumpe> (2009).

<sup>61</sup>Wagner, U.: Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung, TU München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, April 2009, S. 15 ff.

<sup>62</sup>Ebd.: S. 20 (Fazit): In einem Beispielgebäude mit 86 kWh/(m<sup>2</sup> a) reduziert die Wärmepumpe die Kohlendioxid-Emissionen je nach Technologie zwischen 7,5 und 12,5 kg/(m<sup>2</sup> a), ausgehend von 22,5 kg/(m<sup>2</sup> a) bei Gasbrennwertkesseln.

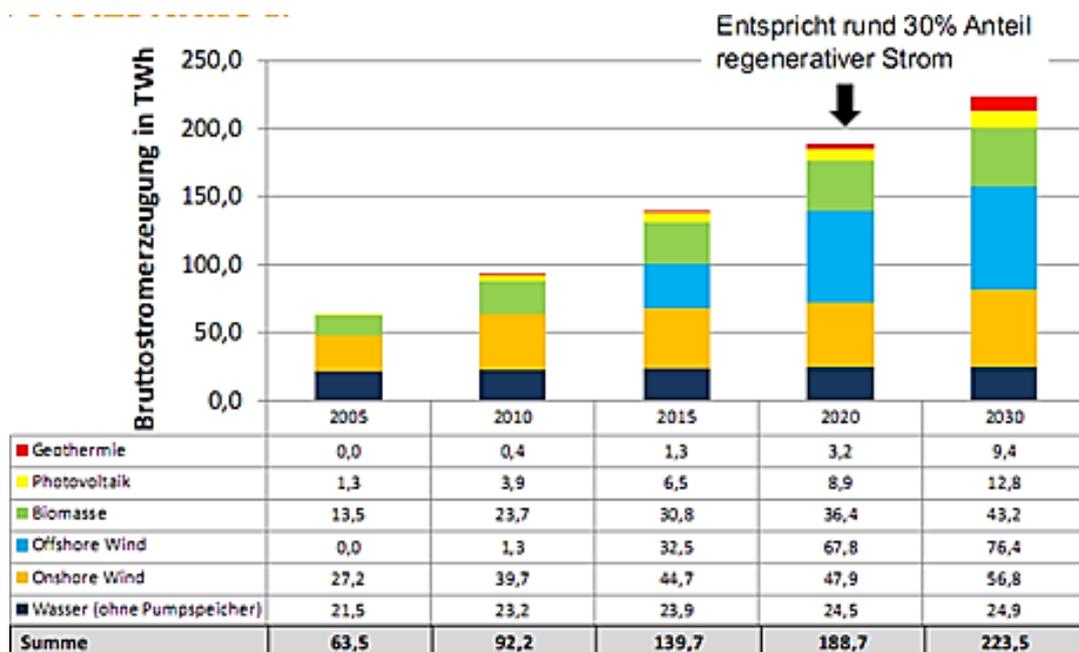


Abbildung 3: Bruttostromerzeugung aus regenerativen Energien in der BRD

Die Recherchen und Analysen der Deutschen Energie Agentur<sup>63</sup> begründen den Ausbau von regenerativen Energien, da das integrierte Klimaschutz- und Energieprogramm der Bundesregierung, die Dena-Netzstudie I und die BMU Leitstudie „Ausbaustrategie Regenerative Energien“ wertvolle Impulse geben für die Umstrukturierung der fossilen Energieversorgung in Deutschland. Der Zugang für Wärmepumpenanlagen wird somit indirekt gefördert.

Die wissenschaftliche Untersuchung der Technischen Universität München<sup>64</sup> zeigt, dass sich die mit Wärmepumpentechnologie bereitgestellte Wärmeenergie positiv auf den Primärenergieeinsatz und auf die CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen in Deutschland auswirkt. Die Untersuchung stützt sich auf die Analyse von Strom- und Wärmeerzeugungsszenarien in Deutschland bis zum Jahr 2030 mit einem Anlagenausbau von einer Million Wärmepumpen. Die Studie<sup>65</sup> stellt dar, dass die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Wärmepumpen unter Anwendung des Strom-Mixes ab einer Jahresarbeitszahl von „2“ deutlich geringer sind als bei den untersuchten Referenzanlagen.<sup>66</sup> Der Nachweis des Primärenergieträger-

<sup>63</sup>Vgl.: Deutsche – Energie – Agentur: Kurzanalyse des Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020 (mit Ausblick auf 2030), Annahmen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen, 2008, Berlin, vgl. S. 32 (Abbildung Nr.5 aus Datenquelle: BMU 2007 und dena 2005).

<sup>64</sup>Wagner, U.: Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung, Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2009.

<sup>65</sup>Ebd.: S. 10 - 12 (Vergleich Wärmepumpe zu Referenzsystemen).

<sup>66</sup>Ebd.: S. 16: Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, Wärmepumpeneffizienz, Feldtest des Fraunhofer ISE, Presseinformation vom 4.Dezember 2008, Nr.35/08, Freiburg.

einsatzes zur Strombereitstellung und der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Kraftwerkparcs wurde durch das Simulationsprogramm „Ifeon“<sup>67</sup> in der Studie vorgestellt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Primärenergieersparnis bei der Wärmeversorgung von Wohngebäuden und eine Reduzierung des fossilen Energieträgereinsatzes von Erdgas, Heizöl und Braunkohle in Heizungsanlagen langfristig zu erwarten sind.<sup>68</sup> Durch die Forderung, den Anteil an regenerativen Energien und Wärmespeichern nach dem EEWärmeG<sup>69</sup> zu erhöhen, ist in diesem Zusammenhang nachzuweisen, ob eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung in den Städten langfristig erzielt werden kann.

## 2.6. Wärmespeichersysteme

Den Stand der Forschung für Langzeitwärmespeicher zeigt der Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“.<sup>70</sup> Die für die städtische Energieversorgung geforderte Versorgungssicherheit zur ganzjährigen Bereitstellung von Wärmeenergie bedingt eine Technologie zur Zwischenspeicherung des erzeugten Wärmepotenzials. Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Wärmeenergiespeicherung zeigen, dass die Entwicklung der technischen Großvolumenspeicherleistung mit der Gewährleistung einer hohen Speicherdichte mit geringen Speicherverlusten, die Optimierung von Speichermaterialien und das Auffangen von Temperaturschwankungen im Vordergrund steht. Die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen über Wärmeenergiespeicheranlagen beweisen, dass verschiedene Speicherformen, wie Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeichersysteme<sup>71</sup>, kombinierbar sind. Der Warmwasserspeicherbetrieb von großvolumigen Anlagen ist in Pilotvorhaben über einen längeren Zeitraum untersucht worden; jedoch befindet sich die Auswertung der technischen Daten zur Verbesserung der Energie- und Leistungsdichte in den Zulauf- und Entnahmephase noch im Anfangsstadium. Forschungsvorhaben<sup>72</sup> auf den Gebieten der anwendungsspezifischen Entwicklung von Hybridkonzepten in Kombination mit Kurz- und Langzeitwärmespeichern für thermische

---

<sup>67</sup>Ebd.: S. 6 (Optimierungsprogramm ifeon zur Optimierung des Zubaus von Kraftwerken).

<sup>68</sup>Ebd.: S. 20 (Fazit der Studie).

<sup>69</sup>Vgl. EEWärmeG: §§ 5,7,10,15 EEWärmeG, Anlage zum EEWärmeG, Einsatz von Wärmepumpen ab einer Jahresarbeitszahl von mindestens 3,5, Stand 2008.

<sup>70</sup>Oertel, Dagmar: Energiespeicher - Stand und Perspektiven, Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“, Arbeitsbericht Nr. 123, Februar 2008, S. 141 ff.

<sup>71</sup>Schmidt, Thomas: Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher. Solar- und Wärmetechnik Stuttgart, Forschungsinstitut der Steinbeis-Stiftung, Stuttgart, April 2005, S.1-12.

<sup>72</sup>a.a.O.: S.138.

Energie und Einbau von modularen PCM-Materialien in Warmwasserschichtspeichern zur Pufferung von Temperaturschwankungen befinden sich in der Experimentierphase. Der aktuelle Forschungsstand zur thermischen Nutzung und Solarspeicherung von solarer Strahlung ist im Abschlussbericht der Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich<sup>73</sup>, dargestellt. Arbeitsgruppen, wie Solar-Projekt „Solarthermische Anwendungen“, „Solare Warmwasseranlagen in Tunesien“ werden im BMBF-Verbundvorhaben zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von solarunterstützten Heizungssystemen zur Wassererwärmung wissenschaftlich untersucht.

Der Forschungsverbund<sup>74</sup> Sonnenenergie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrttechnik veröffentlicht Untersuchungsergebnisse über den Anlagenbetrieb von Wärmespeicherkonzepten mit folgendem Ergebnis: «*Vollzeit: Solarthermische Großanlagen bieten im Wohnungsbau die derzeit kostengünstigste Möglichkeit, Solarenergie zur Trinkwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung zu nutzen.*» (Schmidt, 2001)<sup>75</sup> Zentrale Wärmespeicherkonzepte am Versorgungsstandort in Verbindung mit solarthermischen Anlagen erfüllen demnach die Wirtschaftlichkeit.

Das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg untersucht in Forschungsvorhaben die Stromspeichertechnologie sowie die Umwandlung von Stromenergie zu Wasserstoff und Methan. Das Prinzip stützt sich auf die durch Sonnen- und Windenergie gewonnene überschüssige Stromenergie, die mit dem Elektrolyseverfahren und der Methanisierung die Stromenergie in den Energieträger Methan umwandelt. Der Energieträger Methan ist aufgrund der stofflichen Zusammensetzung für die Einspeisung in das städtische Erdgasnetz für die Heizwärmeerzeugung einsetzbar. Die aus diesem Forschungsvorhaben entwickelte Rückführung von Methan zu Stromenergie steht als ein weiteres Forschungsprojekt im Fokus der Untersuchungen.<sup>76</sup>

---

<sup>73</sup>Faber, Christian und Hoffschmidt, Bernhard: Forschungsbericht des Forschungsschwerpunktes thermische Nutzung der Sonnenenergie, Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich, SIJ. Weitere Arbeitsgruppen sind AG-Solar-Projekt "Solarthermische Anwendungen", Projekt-Nr. 25200291 /GT2+5 AG-Solar-Projekt "Solare Warmwasseranlagen in Tunesien", Projekt-Nr. 25200291 /GT4.

<sup>74</sup>Milow, Bernhard und Stadermann, Gerd: Workshop Wärmespeicherung vom 28.-29.05.2001 in Köln, Beteiligte: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. und der Forschungsverbund Sonnenenergie, Köln, 2001.

<sup>75</sup>Vgl.: Schmidt: Langzeit Wärmespeicher für solare Nahwärme. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, 2001.

<sup>76</sup>Vgl.: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): Forschungsanlage für Stromspeichertechnologie, Informationen aus dem Internet URL <http://www.zsw-bw.de> (April 2012).

## 2.7. Oberflächennahe Geothermie

Die Nutzung der Erdwärme bis zu einer Bodentiefe von 400m wird als „Oberflächennahe Geothermie“ eingestuft. Prinzipiell eignet sich die oberflächennahe Geothermie für Einfamilienhäuser, Büro- und Verwaltungsgebäude, öffentliche Gebäude wie Schulen, Krankenhäuser, Museen und Schwimmbäder, für Gewerbebetriebe und deren Werks- und Montagehallen sowie für ganze Wohnsiedlungen. Mit Hilfe einer Wärmepumpe kann im Winter das Gebäude beheizt und im Sommer gekühlt werden. Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden und erdberührte Betonbauteile sind in der praktischen Erprobung zur Bestimmung der Wärmeentzugsleistung von Bodenschichten. Das technische System besteht aus einem Wärmetauscher, Kunststoffrohrregister und einem Wärmeträgermittel.<sup>77</sup>

Die Ergebnisse aus dem Abschlussbericht zum Modellprojekt<sup>78</sup> der Universität Siegen über technische Erdwärmetauscher zeigen, dass die Anlagengröße zu der im Erdreich verlegten Kollektorfläche und zur Gebäudeheizfläche mindestens die doppelte Energieerzeugungsfläche im Boden bereitstellen muss. Die maximale Wärmeleistung, die aus dem Erdreich durch das Erdregister entnommen werden kann, wird in der wissenschaftlichen Literatur zur oberflächennahen Geothermie<sup>79</sup> mit mittleren Ertragsleistungen von 15 bis 55 W/m<sup>2</sup> angegeben. Die Ertragswerte beziehen sich primär auf den Diffusionsgrad der Bodenschichten. Die Auswertung von städtischen Modellanlagen zum Abstand von Flächenkollektoren zu den Grundstücksgrenzen zeigt, dass mindestens ein Sicherheitsabstand von drei Metern eingehalten werden muss, da eine Beeinflussung der Bodentemperaturwerte von unmittelbaren benachbarten Bodenschichten eintreten kann. Bei einer Tiefenbohrung von bis zu 100 m ist eine Wärmeentzugsleistung des Bodens in der Regel von 50 W/Bohrmeter bis maximal 80 W/Bohrmeter zu erwarten, wenn günstige geologische Verhältnisse vorliegen. Die Ertragswerte sind für ein Erdsondensystem berechnet worden, wenn in der Sonde in einem geschlossenen Kreislauf Soleflüssigkeit zirkuliert und die Wärme den anstehenden Bodenschichten direkt entzogen wird.

---

<sup>77</sup>Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Umwelt-Wissen-Klima & Energie, Oberflächennahe Geothermie, 2010, Aktualisierung 2013.

<sup>78</sup>Heidt, F.D.: Abschlussbericht zum Projekt: Graphische Auslegung von Erdwärme-Austauschern (GAEA), Fachbereich Bauphysik & Solarenergie, Universität Siegen Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie i. K. mit dem Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, AG Solar NRW, 2000, S.11 ff.

<sup>79</sup>Bohne, D. und Scherer, U.: Wärme- und Kältenutzung mit oberflächennaher Geothermie, Kap. D1. Schwerpunkt Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Bauphysikkalender 2007, Fouad, N. (Hrsg.), Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2007.

## 2.8. Bauweisen von Verkehrsstraßen

Die bautechnische Regelung von Standardplanungen für den Neubau und Erneuerung von Verkehrsflächen erfolgt durch die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 01)<sup>80</sup> außerhalb und innerhalb von geschlossenen Ortslagen. Der Straßenaufbau und die Straßenabmessungen unterscheiden sich nach außerhalb und innerhalb geschlossenen Ortslagen mit Randbebauung. Die nachstehende Abbildung 4 stellt den Straßenaufbau außerhalb geschlossener Ortslage dar.

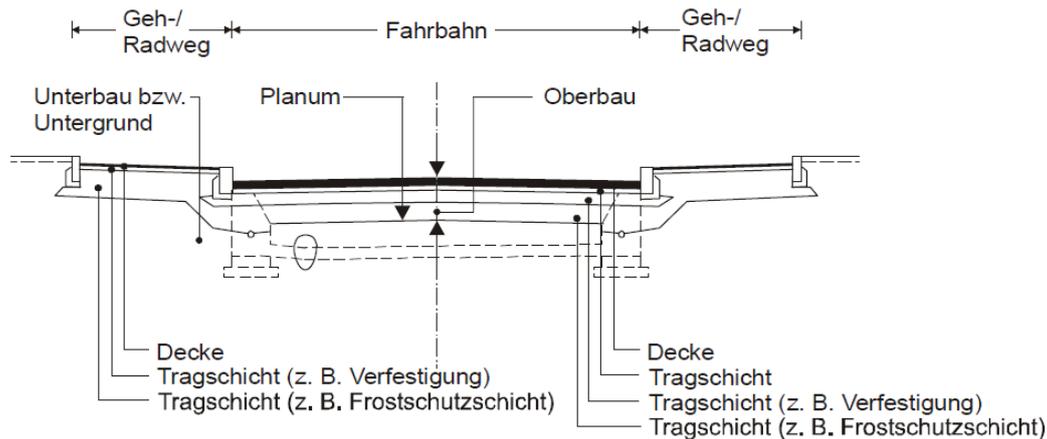


Abbildung 4: Beispielhafter Straßenaufbau außerhalb geschlossener Ortslage

In der nachstehenden Abbildung 5 ist der Straßenaufbau innerhalb geschlossener Ortslagen dargestellt. Das Straßenprofil ist durch Parkbuchten und Geh- bzw. Fußgängerwegflächen erweitert, sodass eine Vergrößerung der Energieerzeugungsfläche „Verkehrsfläche“ je nach Stadtgebietsgröße zur Verfügung steht. Der Querschnitt eines standardisierten Tragsystems von versiegelten Verkehrsflächen aus Beton oder Asphalt besteht nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RSTO 01) in der Regel aus dem anstehenden Boden als Untergrund, den Tragschichten des Unter- und Oberbaus. Unmittelbar über den Bodenschichten wird der künstlich hergestellte Dammkörper eines Straßentragsystems aufgesetzt.

Der Straßenoberbau besteht in der Regel aus einer Asphalt- oder Betondecke oder Betonplatte und aus mehreren Tragschichten. Nach den Vorgaben der RSTO 01 wird der Einbau einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT) unter der Betondecke gefordert. Die Frostschutzschicht (FSS) befindet sich meistens in einem dreischichtigen Tragsystem,

<sup>80</sup>Vgl.: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Arbeitsgruppe Neufassung RStO 11, Ausgabe 2011.

angeordnet auf dem anstehenden Boden. Die Schichtstärken der hydraulisch gebundenen Tragschicht betragen zwischen 12 cm und 25 cm je nach zu erwartender Verkehrsbelastungsdichte. Ein Beispiel für einen Standardaufbau nach der RSTO 01 für eine Betonfahrbahn ist nachstehend abgebildet.

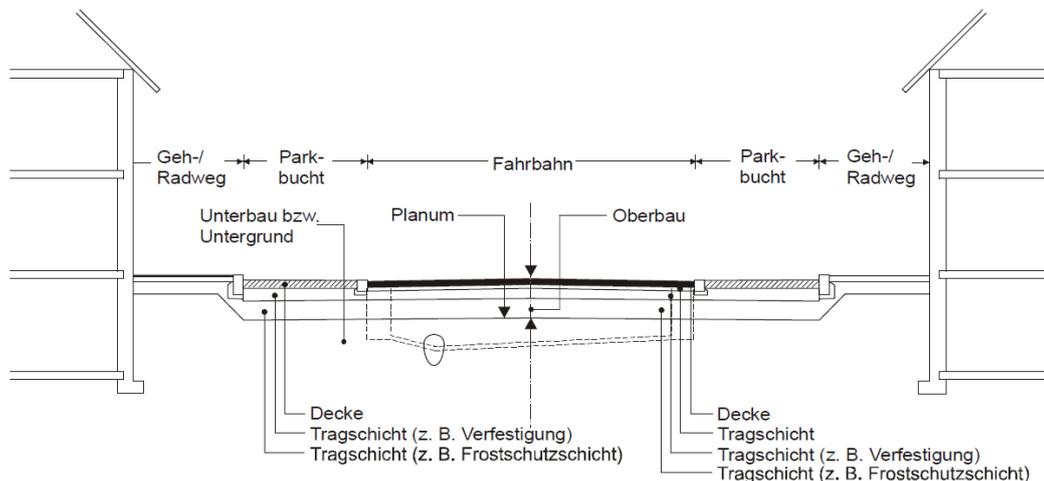


Abbildung 5: Beispielhafter Straßenaufbau innerhalb geschlossener Ortslagen

Ist ein Straßenoberbau in Asphalt- oder Betonbauweise vorgesehen, erfolgt die Dimensionierung nach Bauklassen. Schichtdicken und Anforderungen der zu verwendenden Baustoffe sind nach Verkehrsbelastung berücksichtigt. Für ländliche Wege, Flugbetriebsflächen und durch Sonderlasten beanspruchte Verkehrsflächen gelten besondere technische Regelwerke. Für die Konstruktion und Ausführung sind die einschlägigen zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien heranzuziehen.

Die Frostempfindlichkeit von anstehenden Böden erfolgt nach der Klassifizierung gemäß ZTV E-StB und wird in Frostempfindlichkeitsklassen unterteilt. Die Anforderungen an Tragschichten sind in den ZTV Asphalt-StB, den ZTV Beton-StB und den ZTV SoB-StB enthalten. Für Tragschichten unter Pflasterdecken gilt die ZTV Pflaster-StB. Die Wahl der Schichtdicken für Asphalt- und Betonfahrbahnen ist in den Tabellen 1 bis 4 der RStO 11 nach Bauklassen (siehe Abbildung 6) festgelegt.

Die Materialdicke des Straßenaufbaues ist so gewählt, dass ein ausreichender Ermüdungszustand gegen Belastung aus Verkehr und Witterung während der geplanten Nutzungsdauer sowie eine ausreichende Frostsicherheit gewährleistet ist.

(Dickenangaben in cm;  $\leftarrow$   $E_{T,0}$ -Mindestwerte in MN/m<sup>2</sup>)

Zeile	Bauklasse	7				6				5				4				3				2				1			
	B	> 32				> 10 - 32				> 3,2 - 10				> 1,8 - 3,2				> 1,0 - 1,8				> 0,3 - 1,0				≤ 0,3			
Dicke des frostsich. Oberbaues <sup>1</sup>		55	65	75	85	55	65	75	85	55	65	75	85	45	55	65	75	45	55	65	75	35	45	55	65	35	45	55	65
1	<b>Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht</b>																												
	Asphaltdecke	12				12				12				10				4				4				4			
	Asphalttragschicht	22				18				14				12				16				14				10			
Frostschuttschicht		Σ 34				Σ 30				Σ 26				Σ 22				Σ 20				Σ 18				Σ 14			
Dicke der Frostschuttschicht		-	31	41	51	25	35	45	55	29	39	49	59	-	31	41	51	25	35	45	55	27	37	47	57	21	31	41	51
2.1	<b>Asphalttragschicht und Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf Frostschuttschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material</b>																												
	Asphaltdecke	12				12				12																			
	Asphalttragschicht	14				10				8																			
Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)		Σ 41				Σ 37				Σ 35																			
Frostschuttschicht		Σ 45				Σ 41				Σ 37																			
Dicke der Frostschuttschicht		-	-	34	44	-	28	38	48	-	30	40	50																

Abbildung 6: Asphalttragschichten nach Bauklassen gemäß RStO 11

Tragsysteme können auch in Verbundbauweise hergestellt werden. Die Verbundwirkung bezieht sich auf die Schicht zwischen Betonplatte und HGT. Die nachstehende Abbildung 7 stellt den Standardaufbau einer Betonfahrbahn dar. Der Schichtaufbau setzt sich aus der Betonfahrbahn, hydraulisch gebundener Tragschicht und der Frostschuttschicht zusammen. Die Gesamtstärke beträgt 74cm. Gemische für Tragschichten mit hydraulischem Bindemittel sind in technischen Merkblättern Straßenbau festgelegt. Die Tragschicht besteht aus ungebrochenen und gebrochenen Baustoffgemischen und hydraulischen Bindemitteln.<sup>81</sup>

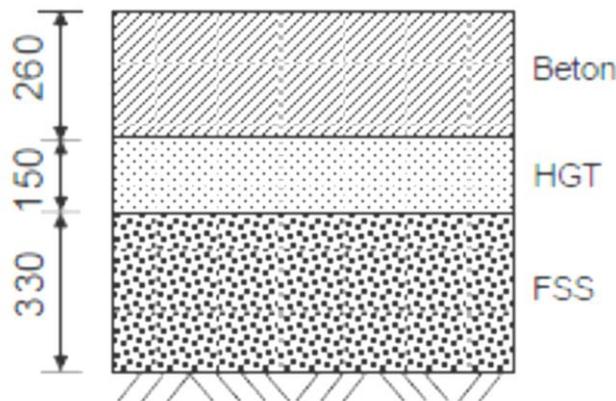


Abbildung 7: Schichtaufbau einer Betonfahrbahn

<sup>81</sup>Vgl.: Zement-Merkblatt Straßenbau S3, 6.2007: Gemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln, Informationszentrum Beton GmbH, Erkrath (Hrsg.), 6.07/03.

Zur Vermeidung der Verbundwirkung zwischen den Schichten wird eine dünn-schichtige Vliesunterlage zur Förderung der Entwässerung eingebaut. Bituminöse Zwischenschichten können ebenfalls nach der RSTO 01 gewählt werden. Bei langen Bauabschnitten gleichen Querschnitts, zum Beispiel bei Autobahnen oder auch Flugfeldern, hat sich die Gleitschalungsfertigungstechnik durchgesetzt. Im Gegensatz zu kleineren Verkehrsflächen wird der Beton feld- oder streifenweise eingebracht. Zur Untersuchung der Fahrbahnschichten für den effizientesten ganzjährigen Wärmeentzug sind weitere Forschungsvorhaben erforderlich.

## 2.9. Versiegelung von städtischen Flächen

Das Ziel der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung ist, bis zum Jahr 2020 die tägliche Versiegelung für Siedlungs- und Verkehrsflächen in Deutschland auf 30 ha/Tag zu reduzieren.<sup>82</sup> Die anthropogene Bodenversiegelung in Deutschland ist vorrangig abhängig von der Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche. Freiflächen werden der Bebauung zugeführt, asphaltiert, mit wassergebundenen Decken versehen, stark verdichtet oder ganz oder teilweise versiegelt. Die Auswirkungen auf den Schutz der Böden und folglich die Reduzierung der Speicherfunktion des Bodens sind irreversibel und belasten die Umwelt. Forderungen nach einem zusätzlichen Nachhaltigkeitsindikator zum Rückgang der Bodenversiegelung in der Stadtentwicklungsplanung sind erhoben worden. Die Verringerung der Evapotranspiration in städtischen Gebieten durch Versiegelung führt zu städtischen Wärmeinseln.<sup>83</sup>

Die Flächennutzung der Bundesländer Stand 31.12.2005 zeigt, dass zwischen den Jahren 2000 und 2005 die versiegelten Flächen und die Siedlungs- und Verkehrsflächen in den Ländern bis zu 10% zugenommen haben. Die Anteile der versiegelten Flächen innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsfläche schwanken zum Beispiel zwischen 43,5% für Mecklenburg-Vorpommern und 49,8% für Berlin. In den Ländern Berlin, Bremen, Hamburg und Saarland erreicht die Versiegelung bereits 60%. Zur Auswertung der Flächenstrukturen liegen bundesweit keine Daten nach Art der Oberflächenbeschaffenheit vor.<sup>84</sup>

Die Nutzungsart „Verkehrsfläche“ in den Bundesländern (ohne Sachsen-Anhalt) erreichte im Jahr 2000 insgesamt 16.357,35km<sup>2</sup>, davon wurden 8.551,72km<sup>2</sup> Flächen mit Asphalt- und Betonoberflächen versiegelt. Im Jahr 2005 erhöhte sich der Versiegelungsanteil bereits auf 16.775,92km<sup>2</sup>. Ein Anstieg des versiegelten Flächenanteils auf 8.798,85km<sup>2</sup> zeigt den Anstieg des Versiegelungsgrades innerhalb eines Zeitraumes von fünf Jahren.<sup>85</sup>

Nach der Datenstatistik des Regionalatlas Deutschland „Nachhaltigkeit Flächeninanspruchnahme“ entwickelte sich der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche zwischen

---

<sup>82</sup>Rat für Nachhaltige Entwicklung: Mehr Wert für die Fläche: Das Ziel 30 ha für die Nachhaltigkeit in Stadt und Land, Empfehlungen des Rates für Nachhaltige Entwicklung an die Bundesregierung, S.1-68, 2008.

<sup>83</sup>Europäische Kommission: Arbeitsunterlage der Kommissionsdienststellen – Leitlinien für bewährte Praktiken zur Begrenzung, Milderung und Kompensierung der Bodenversiegelung, Brüssel, den 15.5.2012, SWD(2012) 101 final/2, S. 14.

<sup>84</sup>Statistische Analysen und Studien Nordrhein-Westfalen (Band 44): Schätzverfahren zur Bodenversiegelung: UGRdL-Ansatz, Diplom-Geografin Britta Frie, Diplom-Volkswirt Ralph Hensel, S.19 ff., Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik Nordrhein-Westfalen (Hrsg.).

<sup>85</sup>Ebd.: S.29 (Abbildungen 8 bis 10, statistische Analysen und Studien NRW, Band 44)

1996 und 2000 um 11,8%, 2000 bis 2010 um 12,3%, 2010 bis 2013 um 13,4% und von 2013 bis 2016 um 13,6%. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche nimmt jährlich um mindestens 0,5% zu.<sup>86</sup> 2012 wurden in Deutschland pro Tag 70 Hektar Freifläche für den Bau neuer Siedlungen und Verkehrswege in Anspruch genommen. Der gesamte Versiegelungsanteil von Nutzflächen steigt jährlich um 0,1%.

Die Bodenversiegelung zählt zu den Hauptbelastungsfaktoren des Ökosystems Boden. Damit ist die Bodenversiegelung als Teil der städtischen Flächeninanspruchnahme durch die industrielle Entwicklung zunehmend zum Thema deutscher Nachhaltigkeitspolitik geworden und ist ein wesentlicher Aspekt für die nachhaltige Flächennutzung.

Die gesamte versiegelte Bodenfläche in den Mitgliedstaaten Europas wird auf etwa 100.000km<sup>2</sup> geschätzt. Der Versiegelungsgrad beträgt 2,3% (Basisjahr 2006). Auf die Einwohnerzahl bezogen beträgt die Versiegelung im Durchschnitt 200 m<sup>2</sup> pro Einwohner. Europäische Mitgliedstaaten mit einem hohen Versiegelungsanteil von mehr als 5% sind Malta, die Niederlande, Belgien, Deutschland und Luxemburg.

Zur Berechnung des Versiegelungsgrades und Datenerhebung von Oberflächenstrukturen ist ein Schätzverfahren entwickelt worden. Die Daten werden sekundärstatistisch durch Auswertung der automatisierten Liegenschaftsbücher (ALB) der Länder gewonnen. Die gesamte Flächennutzung wird als Bodenfläche nach Nutzungsarten bei DESTATIS für die Bundesländer katalogisiert. Für den Berechnungsansatz zur Aufnahme von versiegelten und unversiegelten Flächen in den Kommunen der Bundesländer ist die Datengrundlage „Bodenfläche nach Nutzungsarten“<sup>87</sup> und nach „Nutzungsartenschlüssel“<sup>88</sup> festgelegt. Die Bewertung des Schätzverfahrens zur Bodenversiegelung<sup>89</sup> zeigt, dass bundesweit keine ausreichende Datenlage über die Oberflächenstrukturen in Abhängigkeit des Versiegelungsgrades vorliegt. Aus diesem Grund wird der Versiegelungsgrad für Städte und Gemeinden der einzelnen Bundesländer auf der Grundlage der Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Flächennutzungen geschätzt. Das Schätzverfahren zur Ermittlung der Bodenversiegelung auf Bundesländerebene (UGRdL) nach Dahlmann, Gunreben u.a.

---

<sup>86</sup>Vgl.: Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Genesis) Regionaldatenbank: Themenbereich Nachhaltigkeit Flächeninanspruchnahme. <http://www.regionalstatistik.de>.

<sup>87</sup>Vgl.: Destatis Statistisches Bundesamt: Zahlen und Fakten, Flächennutzung, Bodenfläche nach Nutzungsarten. Information aus dem Internet URL <http://www.destatis.de> (2015).

<sup>88</sup>Vgl.: Destatis Statistisches Bundesamt: Fachserie 3, Reihe 5.1, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015.

<sup>89</sup>Vgl.: Statistische Analysen und Studien NRW, Band 44, S. 19-32, Schätzverfahren zur Bodenversiegelung: UGRdL-Ansatz, Diplom-Geografin Britta Frie, Diplom-Volkswirt Ralph Hensel, S.19.

(2007) wird dadurch aufgewertet, dass der Nachhaltigkeitsindikator „Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsfläche“ um eine zusätzliche Komponente erweitert worden ist.

Die statistische Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Flächennutzung erfolgt bundesweit in einem Zeitraum von vier Jahren auf der Datengrundlage der regionalen Gliederung und der Flächennutzung. Vor dem Hintergrund, dass die Versiegelungsanteile der einzelnen Nutzungsarten der Siedlungs- und Verkehrsfläche auch von der Dichte der Besiedlung abhängig sind, wird als Korrekturfaktor zur Berechnung der Bodenversiegelung das sogenannte Verdichtungsmaß eingeführt. Als Verdichtungsmaß hat sich die Siedlungsflächendichte für Verkehrsflächen als besonders geeignet erwiesen und wird nach dem Berechnungsgrundsatz von Christian Singer (1995) mit  $VA = 0,32VM + 47,85$  berechnet.<sup>90</sup> Im Ergebnis stehen statistische Flächendaten als Grundlage zur Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie Daten von städtischen versiegelten Flächen der Bundesländer nach Nutzungsarten zur Verfügung.

Die Grundlage für die Berechnung ist die Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung, die auf den Angaben des automatisierten Liegenschaftsbuches (ALB) des jeweils angegebenen Jahres basiert. Die Erhebung der tatsächlichen Nutzungsdaten erfolgt durch die Katasterbehörden. Zum Beispiel wird in Niedersachsen die gemeindebezogene (Netto-)Versiegelung mit einem Berechnungsmodell ermittelt, das die digital erhobenen und exakt vermessenen Flächendaten aus einem Pilotgebiet zur Bestimmung des Versiegelungsgrades für die Gesamtfläche nutzt.<sup>91</sup>

Das Amtliche Topografisch-Kartografische Informationssystem (ATKIS®) ermittelt durch die Verwendung von ATKIS®-Daten eine verfeinerte Darstellung der Versiegelungsverhältnisse. Der GMES-Dienst für Raumplanung (GMES - Global Monitoring for Environment and Security, Globale Umwelt- und Sicherheitsüberwachung) stützt sich auf die innovative Satellitentechnologie und nutzerseitigen in-situ Datenbanken. Der Informationsdienst offeriert eine Reihe von Geo-Informationsprodukten mit dem inhaltlichen Fokus auf der Flächeninanspruchnahme durch Siedlungs- und Verkehrsflächen und Bodenversiegelung. Im Rahmen des Projektes GSE Land, einem GMES Service-Element der Europäischen Weltraumorganisation ESA sind diese Dienste für Verwaltungsbehörden in neun europäischen Ländern implementiert und validiert worden. Die Informationsproduk-

---

<sup>90</sup>Ebd.: S.24 (Abb.3)

<sup>91</sup>Vgl.: THARSEN & GUNREBEN, 2001.

te basieren auf hochauflösenden, aus Satellitendaten abgeleiteten Landnutzungsdaten aus dem Land Monitoring Core Service (LMCS).<sup>92</sup> Die ermittelten Versiegelungsgrade sind nach Nutzungsarten des ALB (Katasterdaten) und dazugehörigen Nutzungsnummern nach den Arbeitsgemeinschaften der Vermessungsverwaltungen der Länder zugeordnet worden.<sup>93</sup> Das Programm URBACT der Kommission fördert den Erfahrungsaustausch zwischen Gemeinden zur Erarbeitung von Strategien, Methoden, Instrumenten und praktischen Empfehlungen für lokale und regionale Behörden.

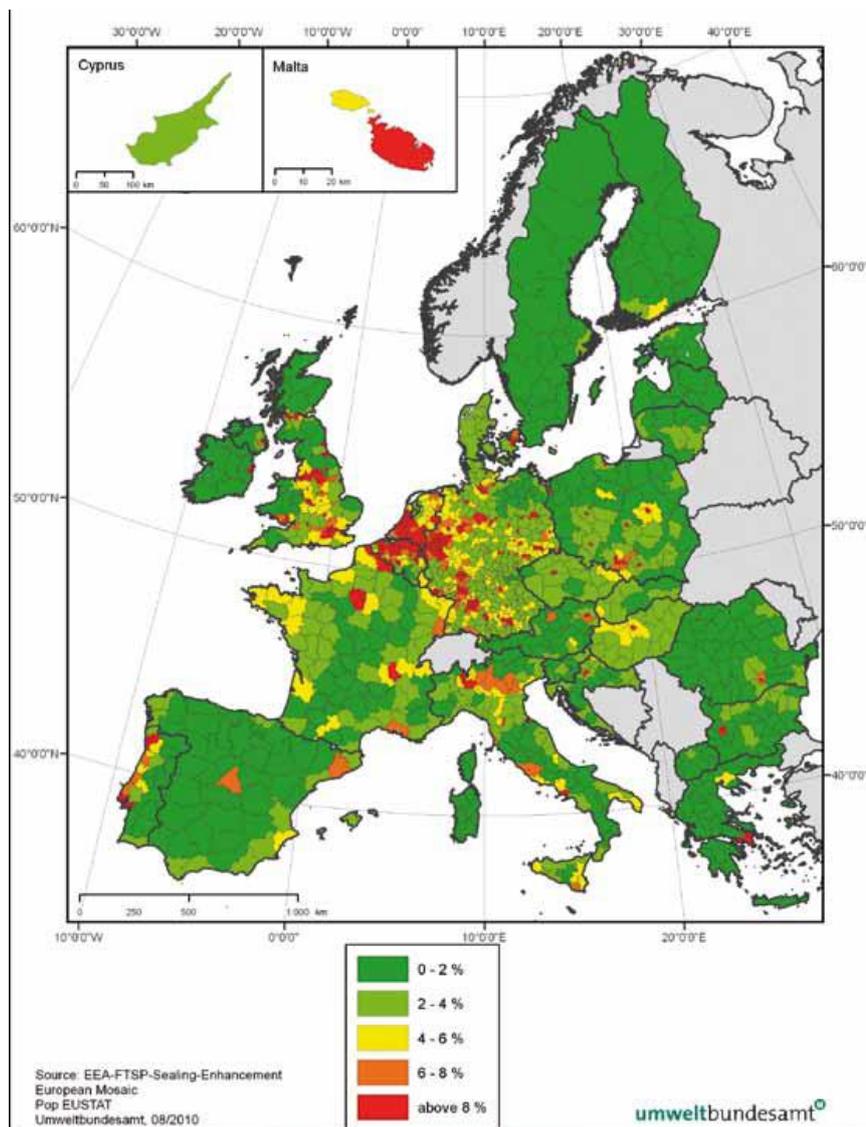


Abbildung 8: Bodenversiegelung nach CLC-Raumdatenbestand - LUCAS

<sup>92</sup>Vgl.: ESA Earth online: Earth tropics, solid earth Overview, Data Access. Information im Internet URL <https://earth.esa.int/web/guest/data-access/how-to-access-esa-data> (2017).

<sup>93</sup>Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: Flächenverbrauch und Bodenversiegelung in Niedersachsen, aus GeoBerichte 14, Version 26.09.2016, Hannover, 2015.

Die Genauigkeit der dargestellten CLC-Datenaufnahme<sup>94</sup> zeigt, dass Flächennutzungsänderungen von kommunalen Flächen und lineare Strukturen, wie zum Beispiel Straßenverkehrsnetzausbau und Verkehrsstraßenbau nicht ausreichend digital aufgenommen werden. Die Arbeitsunterlage der Kommission beruht auf der Studie PROKOP u.a. (2011) und richtet sich in erster Linie an die zuständigen nationalen, regionalen und lokalen Behörden in den Mitgliedstaaten sowie an Fachleute der Regionalplanung und Bodenbewirtschaftung. Die Raumplanung kann zur Erreichung einer nachhaltigeren Landnutzung einwirken, dass die Qualität und Merkmale verschiedener Landgebiete und Bodenfunktionen in Relation zu konkurrierenden Zielen und Interessen gesetzt wird. Der Flächenverbrauch und die Bodenversiegelung sind darauf zurückzuführen, dass neue Verkehrs- und Nutzflächen benötigt werden infolge der städtischen Bevölkerungsentwicklung und wirtschaftlichen Entwicklung.



Abbildung 9: Luftaufnahme der Versiegelung einer Beton-Parkraumfläche

Zur Feststellung des Versiegelungsgrades nach Oberflächenstrukturen in Kommunen ist die Einführung einer regionalen Überwachung zum Flächenverbrauch und Bodenversiegelung unter Berücksichtigung der Bodenqualität vorgesehen.

---

<sup>94</sup>Vgl.: Europäische Kommission: Arbeitsunterlage der Kommissionsdienststellen – Leitlinien für bewährte Praktiken zur Begrenzung, Milderung und Kompensierung der Bodenversiegelung, Brüssel, den 15.5.2012, SWD(2012) 101 final/2.

Länder	Bodenfläche gesamt (km <sup>2</sup> )	Straßen- und Siedlungsflächen (km <sup>2</sup> )	Bebaute Flächen (km <sup>2</sup> )	Straßenflächen als „nicht bebaute Flächen“ (km <sup>2</sup> )
EU (27)	4.306.585	195.972	65.055	130.921
Deutschland	357.134	27.455	9.184	18.272
Schweden (Referenzstaat)	438.576	7.889	1.637	6.252

Tabelle 1: Daten von Straßen- und Siedlungsflächen in der EU (Stand 2012)

Die statistischen Flächendaten stehen in der Datenbank „Land cover and land use, landscape (LUCAS) (lan)“ zur Verfügung.<sup>95</sup>

Das Verhältnis zwischen Flächenverbrauch und Bevölkerungswachstum ist für verschiedene europäische Staaten und Regionen heterogen, das heißt der Flächenverbrauch ist höher als die Zunahme der Bevölkerungszahlen. Etwa 75% der europäischen Bevölkerung leben derzeit in städtischen Gebieten. Schätzungen zufolge wird diese Zahl bis zum Jahr 2020 auf 80% ansteigen nach EUA (2010c).<sup>96</sup>

## 2.10. Verschattung von städtischen Flächen als Einflussgröße

Die Simulation der Tagesdurchgänge zur Verdeutlichung der Beschattungsverhältnisse in einer Stadt im Rahmen von kommunalen Planungsverfahren wird anhand von meteorologischen Daten des solaren Azimutes des Sonnendurchgangs im Stundenrhythmus durch Architektur- und Planungsbüros vorgenommen. Als wissenschaftlich anerkannte Methode dient die Transformation von urbanen Kataster- und Flächendaten sowie Geodaten zur Erstellung eines virtuellen 3-D-Stadtmodells. Weitere Datenquellen sind Crowdsourcing-Initiativen wie OpenStreetMap-3D oder private Anbieter. Bestehen aufgrund der geographischen Datenlage keine exakten Kenntnisse über die topographischen Verhältnisse der Randzonen einer Stadt, ist eine Simulation des Sonnenstandverlaufs über die Tag- und Nachtgleiche (Äquinoktium) erforderlich. Die Berechnungsgrundlage des maximalen Beschattungsgrades von städtischen Flächen stützt sich auf den „kürzesten Tag“ am 21. Dezember und auf den „längsten Tag“ am 21. Juni sowie auf den „mittleren Win-

<sup>95</sup>Vgl.: Eurostat-Datenbank Land cover and land use (LUCAS), Reference Metadata in Euro SDMX Metadata Structure (ESMS) Compiling agency: Eurostat, the statistical office of the European Union ([http://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/lan\\_esms.htm](http://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/lan_esms.htm)), 2012.

<sup>96</sup>Vgl.: Europäische Kommission: Arbeitsunterlage der Kommissionsdienststellen – Leitlinien für bewährte Praktiken zur Begrenzung, Milderung und Kompensierung der Bodenversiegelung, Brüssel, den 15.5.2012, SWD(2012) 101 final/2, S.49.

tertag" am 2. November oder 8. Februar bzw. „mittleren Sommertag" am 30. Mai oder 22. August eines jeden Jahres. Als konventionelle Technik zur manuellen Konstruktion von Schattensimulationen dienen Schattenlängen-Diagramme, deren Informationen nach Datum und Uhrzeit in den Grundriss eines geplanten Gebäudes übertragen werden. Eine detaillierte Simulation der Beschattung von Flächen erfolgt nach der Methode des "2-Stunden-Schattens". Schattensimulationen sind in den Architektur CAD- und Visualisierungsprogrammen standardmäßig integriert und werden aufgrund von geologischen und meteorologischen Daten abgeglichen. Die Beschattungsverhältnisse für unterschiedliche Tages- und Jahreszeiten werden simuliert und visuell in zweidimensionalen Bebauungsplänen dargestellt. Planungsalternativen und planungsrechtliche Festsetzungen sind mit einem 3-D-Stadtmodell kombinierbar.

Ein Beispiel zur exakten Berechnung der Beschattung von Flächen durch Gebäude in Städten zeigt die Beschattungssimulation durch das Berechnungsprogramm Helios<sup>97</sup>.

Infolge der täglich wechselnden Beschattungssituation, verursacht durch Gebäude und Einzelobjekte, kann sich die solare Strahlungsleistung der benachbarten versiegelten und unversiegelten Flächen verändern. Die nachstehende Abbildung 10 zeigt eine Simulation der Beschattung nach HELIOS im Monat Dezember bei einem Sonnenstand zur mittäglichen Tageszeit. Das Berechnungsmodell ist für die Erstellung von Solarpotenzialanalysen, gebäudescharfe Analysen und Dachsegmentanalysen erweiterbar. Daraus lassen sich Energiegewinnungspotenziale für Städte auch über präzisere Wärmebedarfskarten erstellen. Als technische Voraussetzungen sind 3-D-Stadtmodelle mit Daten zu Baujahr, Baualterklasse, Gebäudefunktion, Gebäudenutzung und Sanierungsstand zu versorgen.

Dreidimensionale Schnitte durch Bodenschichten zur Aufnahme der geologischen Verhältnisse sind in Kombination mit 3-D-Stadtmodellen realisierbar. Die Informationsverknüpfung von Daten, Karten und Analysen sind nutzbar für die Analyse des solaren Wärmepotenzials von unversiegelten und versiegelten Flächen.<sup>98</sup>

---

<sup>97</sup>Vgl.: HELIOS-XP: Überarbeitung Programm Helios, Schlussbericht im Auftrag vom Bundesamt für Energie BFE – Forschungsprogramm „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“, Bern, 2006.

<sup>98</sup>InGeoForum im ZGDV e.V. (Hrsg.): 3D-Stadtmodelle – Projekte im Raum, Broschüre, Information im Internet unter URL <http://www.ingeoforum.de/3d-stadtmodelle> (2017).

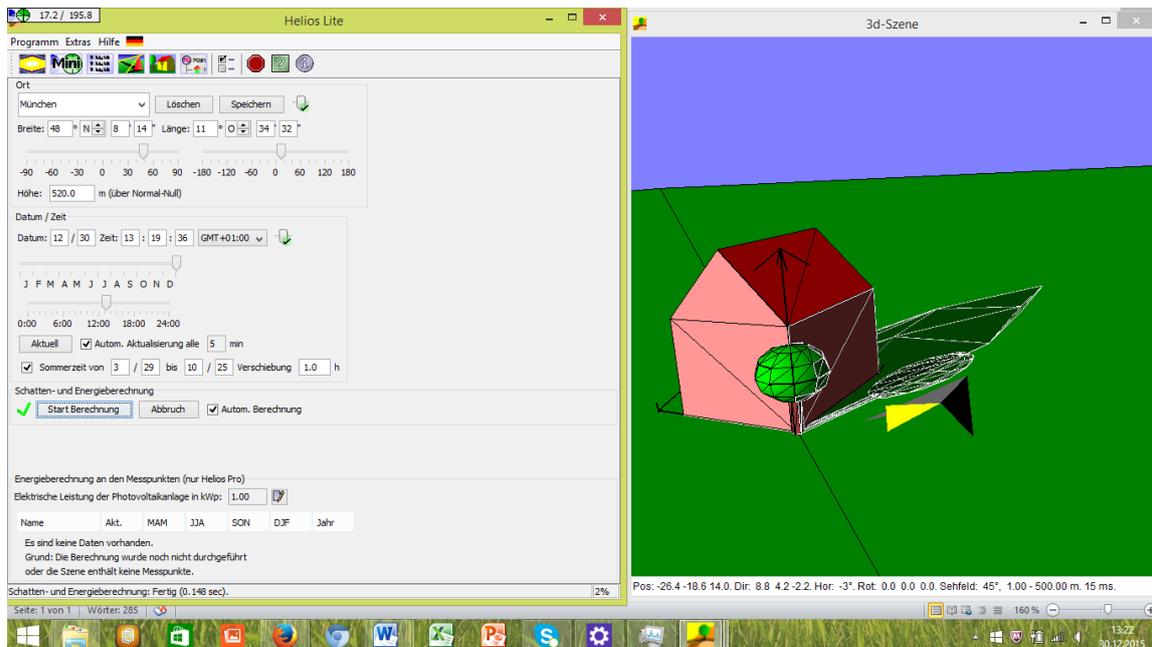


Abbildung 10: Simulierte Beschattungsberechnung nach HELIOS

Programmversionen von HELIOS-XP<sup>99</sup> geben Planungshilfsmittel vor, die die dynamische Gebäudesimulation ermöglicht. Das Programm deckt im Besonderen den Anwendungsbereich des thermischen Verhaltens von Gebäuden mit großen Solargewinnen oder internen Lasten ab und erlaubt die Untersuchung des Nutzenergiebedarfs für Heizen und Kühlen und des thermischen Komforts. Das Rechenprogramm basiert auf einem thermischen Einzonenbilanzmodell. Bauphysikalische Bilanzverfahren zur Untersuchung der Heiz- oder Kühllast sowie zur Aufnahme des zeitlichen Verlaufs von atmosphärischen Lufttemperaturen, Wärmeströmen und Bauteiltemperaturen in Gebäudeaußenflächen sind mit 3-D Stadtmodellen zu verknüpfen. Beschattungseinflüsse durch den Sonnenstand, Gebäudestandorte, Dachkonstruktionen sind im Berechnungsmodell zu berücksichtigen. Technische Berechnungsprogramme für Gebäude zeigen durch Simulation konstruktive Mängel wie Wärmebrücken, Wärmeverluste von erdberührenden Bauteilen und stellen dynamische Kennwerte von Bauteilen sowie eine detaillierte Berechnung für die Modellierung des Wärme- und Strahlungsdurchganges von Gebäudebauteile zur Verfügung.

<sup>99</sup>Vgl.: Bundesamt für Energie: HELIOS XP, - Forschungsprogramm „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“, Gebäudesimulationsprogramm, Bern, 2006.

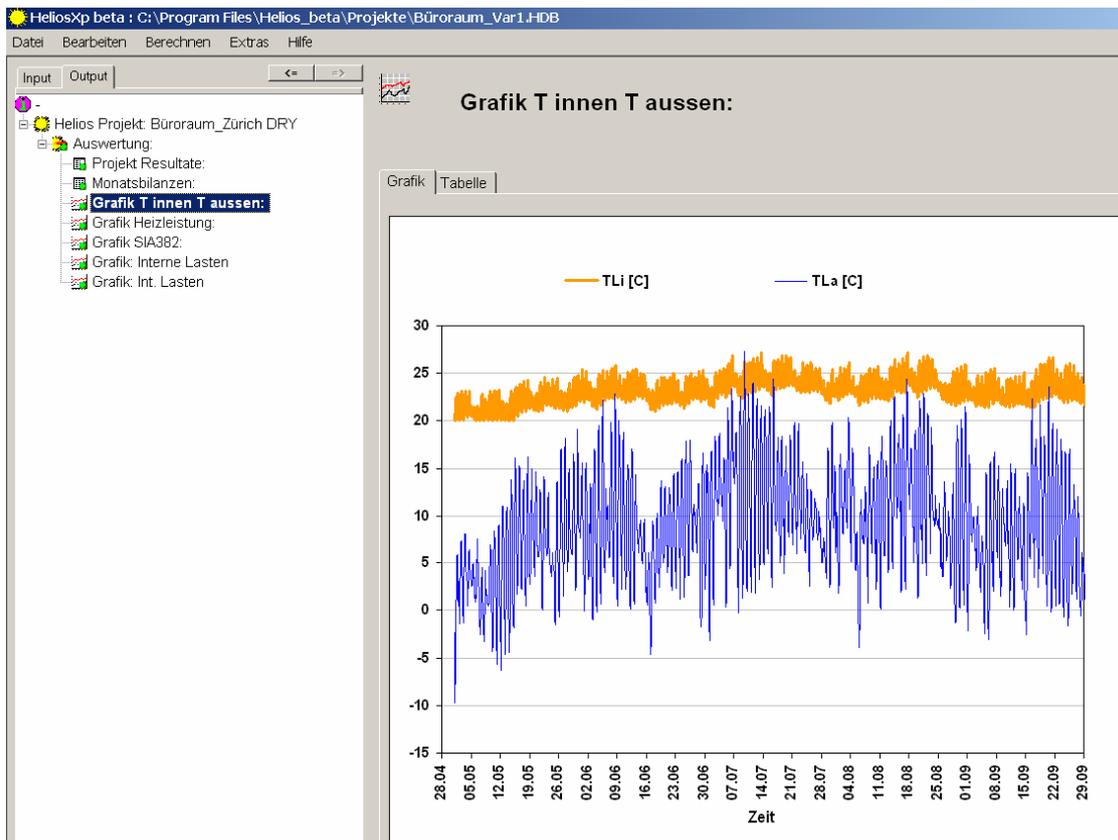


Abbildung 11: Beispiel HELIOS-XP Gebäudesimulation und solare Strahlung

## 2.11. Technische Wärmespeicherung in versiegelten Flächen

Das Projekt SERSO<sup>100</sup> untersuchte in einem Modellvorhaben die solare Rückgewinnung aus versiegelten Verkehrsflächen mit einem geringen Reflexionsgrad und einem hohen Absorptionsgrad. Die kurzweilige solare Strahlung trifft auf die Asphalt- oder Betonflächen auf und erwärmt tagsüber die Bauteiloberfläche. Ortsbezogene Messungen der Oberflächentemperaturen zeigen, dass insbesondere bei der Asphaltbauweise Temperaturwerte von 60° C in den Sommermonaten erreicht werden. Im Rahmen eines Modellvorhabens der Geothermie ist in Feldversuchen die Wirkung der solaren Strahlung auf das Wärmespeicherpotenzial des Fahrbahnschichtaufbaus mit innenliegendem Rohrschleifensystem untersucht worden.<sup>101</sup>

Das technische Prinzip besteht darin, dass die Tragschichten der Straßenoberfläche durch ein im Rohrschleifensystem zirkulierendes Kältemittel von unten erwärmt werden. Eine

<sup>100</sup>Meschter, Jürg: Berner Fachhochschule, HTA Burgdorf, Abteilung Energietechnik, Burgdorf. Jahresbericht 1999 z.Hd. des Bundesamtes Energie, Projekt Nr. 27006, SERSO - Sonnenenergie Rückgewinnung aus Straßenoberflächen -, November 1999, S.2 ff.

<sup>101</sup>Pahud, Daniel: Projektleitung SUPSI-DACD, ISAAC, 6952 Canobbio, Geissmann, Markus im BFE Forschungsprogramm Geothermie.

Eisbildung auf den Straßenflächen wird an den Wintertagen verhindert. Die nachstehenden Infrarotwärmebildaufnahmen zeigen die Wirkung der zugeführten Wärme über Rohrleitungsschleifen, die Wärme- und Kältezonen innerhalb der Fahrbahnoberfläche erzeugen.



In der Fahrbahn verlegte Rohrschleifen dienen im Winter der Oberflächentemperierung.

Abbildung 12: Rohrschleufensystem zur Enteisung unter der Tragschicht

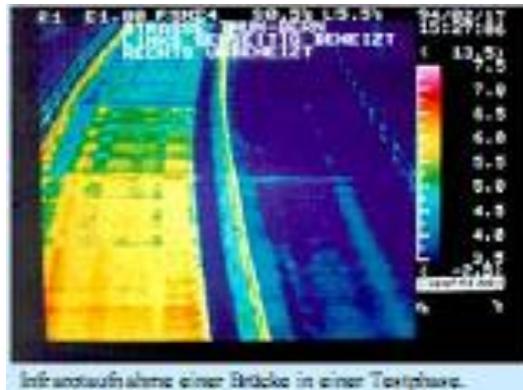


Abbildung 13: Wärmebild der Fahrbahnoberfläche mit Rohrschleufensystem

Die Auswertung der Messergebnisse<sup>102</sup> von ganzjährigen Wärmepotenzialmessungen in den Tragschichten zeigt die Wirkung der Strahlungswärme in Abhängigkeit der Sonnenstundenzahl und des Verschattungsgrades. Stündlich durchgeführte Temperaturmessungen in den Tragschichten beweisen, dass ein Temperaturanstieg in einer Schichttiefe<sup>103</sup> von 2cm nachgewiesen worden ist. Während der Wintermonate von November bis März ist in einer Schichttiefe von 2cm ein mittlerer Temperaturmesswert von 5°C nachgewiesen worden. In den Sommermonaten ist eine Fahrbahnbelagstemperatur von 10°C bis 25°C in einer Schichttiefe von 2cm gemessen worden. Die nachstehenden Temperaturmessdiagramme stellen den Temperaturverlauf innerhalb der Straßenbelagsschichten dar. Während den Wintermonaten stellt sich ein Temperaturverhalten von über 0°C innerhalb der Schichttiefe von 2cm ein.

---

<sup>102</sup>Firma Polydynamics LTD. Zürich: Temperaturmessungen an Fahrbahnoberflächen in Zusammenarbeit mit der Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Architektur Burgdorf im Zeitraum von 1991-1997, Zürich.

<sup>103</sup>Geothermische Energie: Darstellung der simulierten Stundenwerte der natürlichen Belagstemperatur an der Oberfläche wie auch in 2 cm Tiefe in Abhängigkeit der Sommer- und Wintersaison. Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e.V., Nr.38/39, 10. Jahrgang/Heft 5/6, November/Dezember 2002.

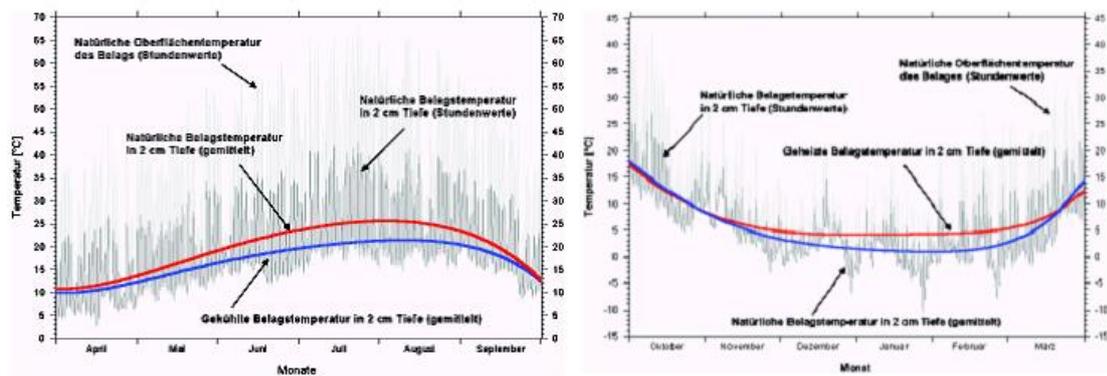


Abbildung 14: Temperaturverlauf der Schicht- und Oberflächentemperatur

Die Messergebnisse der Feldversuche über einen Zeitraum von drei Jahren zeigen, dass der natürliche Wärmespeicher jeweils am Ende der Winterperiode in den Jahren 1994/95 und 1997/98 ein positives Warmwasserspeichersaldo vorhält. Der Energieumsatz im Warmwasserspeicher<sup>104</sup> bestätigt die Auswertungsergebnisse über einen Zeitraum von fünf Jahren, dass eine ausgeglichene Energiebilanz zwischen dem Wärmeertrag in den Sommermonaten und der Wärmeentnahme in den Wintermonaten erzielt worden ist. Der Wirkungsgrad des Wärmespeichersystems, bezogen auf den Oberflächen- und Kollektorwirkungsgrad, ist von 10% bis 25% bei einer Betriebseffizienz von bis zu 40% nachgewiesen worden.

Das Forschungsprojekt des Instituts für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum<sup>105</sup> zum tatsächlichen Erfordernis frostbeständiger Straßenbaustoffe in innerörtlichen Straßen untersucht das saisonale Temperaturverhalten in versiegelten Straßenflächen mit wasserundurchlässigen Randbereichen und geschlossener seitlicher Bebauung mit Entwässerungsleitungen. Die Messorte sind in Regionen mit niedrigen atmosphärischen Lufttemperaturen während der Wintermonate ausgewählt worden. Die Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen an den Straßenfahrbahnquerschnitten der Landesstraße im Hochsauerlandkreis - L776 in Bad Fredeburg - sowie in einer Wohnstraße innerorts der Stadt München -Tulbeckstraße - sind in der Frosteinwirkungszone III nach Vorgaben der Straßenbaurichtlinie durchgeführt worden. Die Methodik der Temperatur-

<sup>104</sup>Meschter, Jürg: Berner Fachhochschule, HTA Burgdorf, Abteilung Energietechnik, Burgdorf. Jahresbericht 1999 z.Hd. des Bundesamtes Energie, Projekt Nr. 27006, SERSO-Sonnenenergieerückgewinnung aus Straßenoberflächen, November 1999, S.4 ff.

<sup>105</sup>Ruhr-Universität Bochum Fakultät für Bauingenieurwesen: Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau, Untersuchungen zum tatsächlichen Erfordernis frostbeständiger Straßenbaustoffe in Innerortsstraße, Schlussbericht, Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Krass, Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF), AiF-Vorhaben Nr. 13763 N/1. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit über AiF. Bochum, Oktober 2005.

messungen bezieht sich auf den Temperaturverlauf bzw. den Feuchtigkeitsgehalt im Straßenfahrbahnquerschnitt in verschiedenen Tiefen durch Temperatursensoren. An den Messstandorten Bad Fredeburg, Bödefeld, Lüdenscheid, Darmstadt, Wiesbaden, Riedstadt, Nürnberg-Flughafen und Nürnberg Roth, Berlin-Dahlem und Potsdam Messdatensreihen sind die Temperaturverhältnisse anhand der meteorologischen Daten simuliert worden. Der Straßenaufbau ist der Kategorie Bauweisen mit Asphaltdecke für Fahrbahnen auf F2- und F3 Untergrund/Unterbau nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO 11) zuzuordnen. Die Temperaturmessungen sind in Schichttiefen der Straßenfahrbahnquerschnitte von 20cm, 40cm und 60cm am Standort München und in 20cm, 45cm und 70cm am Standort der L 776 während des Zeitraumes von Dezember 2004 bis März 2005 durchgeführt worden.

Feldversuche und Modellvorhaben<sup>106</sup> sind zur Entwicklung von Fußbodenheizungssystemen als Kollektorsysteme in Straßenoberflächen durchgeführt worden. Die Temperaturauswertungen zeigen verwertbare Ergebnisse bei der Oberflächenerwärmung von Landebahnflächen von Flughäfen und Stadtstraßen zur Gewährleistung der Eisfreiheit. Referenzanlagen in den Niederlanden, Schottland und Belgien zum Beispiel mit einer solaren Energieerzeugungsfläche von 10.000m<sup>2</sup> in Rotterdam, 7.500m<sup>2</sup> in Woensdrecht und 3.350m<sup>2</sup> in einem Industriegebiet in Hoorn, 700m<sup>2</sup> in Belgien Zoerle-Parwijs und 500m<sup>2</sup> im schottischen Ullapool stellen die Praxistauglichkeit von Kollektorsystemen dar.<sup>107</sup>

Berechnungsmodelle zur Gewährleistung der Wärmeversorgung eines Gebäudes mit 70 Wohneinheiten zeigen, dass die Langzeitspeicherung der solaren Strahlung in einem 180m langen Straßenabschnitt und in einer benachbarten Parkplatzfläche technisch möglich ist.<sup>108</sup>

Im Jahr 2008 untersuchte das Worcester Polytechnic Institute (WPI)<sup>109</sup> die Wirksamkeit von Asphaltkollektoren und deren praktische Nutzung zur Energiegewinnung. Die während der Sommermonate durch solare Strahlung erzeugte Oberflächentemperatur in Asphaltfahrbahnen wird über einen in der Asphalttragschicht eingebrachten Wärmetauscher

---

<sup>106</sup>Vgl.: Henk Verweijmeren: Entwicklung einer Fußbodenheizung als Kollektorsystem in Straßenoberflächen, 1995. Information unter URL <http://www.icax.co.uk/ThermalBanks.html> (2016).

<sup>107</sup>Sullivan, Chris: Innovation in the production and commercial use of energy extracted from asphalt pavements, Ooms International Holding bv Henk Verweijmeren - Invisible Heating Systems Ltd., Material Edge Ltd. Chelford, United Kingdom, 1995. Information im Internet URL <http://www.materialedge.co.uk/> (2017).

<sup>108</sup>Vgl.: OOMS Energy systems: Versorgungsmodell im Norden von Avenhorn, Information unter URL <http://www.oomsbouw.nl/bouw/alle-projecten-uit-bouw/> (2016).

<sup>109</sup>Vgl.: Worcester Polytechnic Institute, Center for Community Empowerment and Environmental Responsibility, heat and energy projects (2008).

als Rohrregister in Nutzwärme umgewandelt. Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Zugabe von hoch leitfähigen Zusatzstoffen wie Quarzit die Transmission der solaren Wärmestrahlung durch die Asphaltsschicht fördert. Wassergeführte Kupferrohre in der Asphaltfahrbahnoberfläche führen zu einer Leistungssteigerung der Absorption von solarer Wärme. Materialuntersuchungen von Kupferrohrleitungen in Verbindung mit einem speziell entwickelten, hocheffizienten Wärmetauscher zeigen, dass die solar gespeicherte Wärme in den Tragschichten aufgenommen und einer Nutzung zugeführt werden kann.<sup>110</sup> Das patentierte ICAX Solar Road System nutzt in Fahrbahnen eingebrachte Asphaltkollektoren, die die solare Wärme in isolierten „ThermalBanks Saisonspeichern“ zwischenspeichern, die im Bereich der Gebäudefundamente installiert sind.<sup>111</sup>

Weitere Projekte in Deutschland zur Nutzung der solaren Strahlung auf Flächen sind in der Experimentierphase. Im Jahr 2009 wird im Tragschichtbereich der Straßenbrücke des Elbe-Lübeck-Kanals im Zuge der B 208 in der Ortslage Berkenthin (Kreis Herzogtum Lauenburg) ein Heizsystem aus Kunststoffrohren zur Verhinderung der Eisbildung eingesetzt. Die zugeführte Wärme wird einem Geothermiespeicher aus einer Tiefe von 80m entnommen. In den Sommermonaten erfolgt eine Umkehrung des technischen Prinzips mit der Ableitung der überschüssigen gespeicherten solaren Wärme aus der Fahrbahnoberfläche in Erdwärmespeichern bis zu einer Bodentiefe von 250m.<sup>112</sup>

Im Jahr 2001 ist das Modellprojekt Flughafen Eindhoven mit dem örtlichen Energieversorger umgesetzt worden. Die Asphaltfläche der Flughafenerweiterung von 80.000m<sup>2</sup> ist für die Erzeugung von Niedertemperaturwärme mit der Nutzenergieerzeugung über Wärmepumpenanlagen geplant worden und versorgt 2.600 Neubauwohnungen und 130.000 m<sup>2</sup> Büroflächennutzung in der unmittelbaren Nachbarschaft des Flughafens. Der Kollektor unter der Asphalttragschicht erfasst die absorbierte solare Wärme über ein wassergeführtes Rohrleitungsnetz. Die gewonnene Wärme wird in einem Brunnensystem mit Aquiferspeicher eingelagert und in den Wintermonaten als Wärmequelle für Raumheizungen des Gebäudes genutzt. Die Nutzenergie wird über monovalente Wärmepumpen erzeugt. Das Heizungs-Rücklaufwasser steht wieder als Heizungswärme für die benach-

---

<sup>110</sup>Vgl.: Symposium der International Society for Asphalt Pavements mit Hauptsitz in Lino Lakes, Minnesota. Michael Hulen, Präsident der Novotech Inc. in Acton, Massachusetts.

<sup>111</sup>Vgl.: ICAX: Architekt Mark Hewitt, ThermalBanks store heat between seasons, Information im Internet URL <http://www.icax.co.uk/ThermalBanks.html> (2016).

<sup>112</sup>Vgl.: Bundesanstalt für Straßenwesen, Prof. Ingbert Mangerig Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr, München, 2011.

barten Wohnhäuser zur Verfügung. Das Brauchwasser aus dem Rücklauf der Heizungsanlage wird in dem Aquiferspeichersystem zwischengespeichert und für die Gebäudekühlung wiederverwendet.<sup>113</sup>

## **2.12. Solare Wärmeaufnahme über Gebäudeaußenflächen**

Die Temperaturrandbedingungen in Gebäudebauteilen, die durch solare Strahlung und Temperaturveränderungen entstehen, sind mit bauphysikalischen Messprogrammen ausgewertet worden.<sup>114</sup> Die Analyse der Temperaturverhältnisse außer- und innerhalb einer Gebäudehülle zeigt, dass Außenbauteile die solare Wärmestrahlung generell absorbieren und als Wärme aufnehmen und teilweise saisonal in das Gebäude transportieren. Wissenschaftliche Untersuchungsergebnisse an Bestandsgebäuden mit herkömmlichen Wärmedämmsystemen zeigen, dass die sich bildenden Wärmeströme aufgrund der Dämm- und Materialeigenschaften nicht widerstandsfrei in das Gebäudeinnere diffundieren können. Der Schlussbericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie über die Entwicklung eines lichtdurchlässigen energiegewinnenden Isoliersystems als transparente Wärmedämmung (TWD) im Projekt LEGIS zeigt, dass der passive solare Wärmegewinn in Gebäudebauteilen zu einer effizienten technischen Nutzung zur Unterstützung der Raumheizung führen wird.<sup>115</sup> Die bauphysikalischen Untersuchungen im Rahmen des Projektes führen zu funktionsfähigen Prototypsystemen transparenter, wärmedämmender Fassadenbekleidungen in Rahmenmontagekonstruktionen. Die Wahl der Fassadensysteme ist von verschiedenen Faktoren wie von der Funktion der TWD-Fassade, Anlagenwirkungsgrad, Baulastverteilung, architektonischen Gestaltungsanspruch und dem vorgegebenen Kostenrahmen abhängig. Das bauphysikalische und wärmetechnische Verhalten von transparenten Wärmedämmmaterialien erzeugt Wärmepotenziale nach Jahreszeit und solarer Einstrahlung. In der Heizperiode entsteht innerhalb von transparent gedämmten Wänden ein Wärmestrom, der von außen nach innen strömt, wenn solare Strahlung die Außenflächen erwärmt. Im Gegensatz zu den Wintermonaten wird ein Wärmestau in den

---

<sup>113</sup>Deutsch-Niederländische Handelskammer (Hrsg.): Zielmarktanalyse Geothermie mit Profilen der Marktakteure, Niederlande 2013, Den Haag, S.29.

<sup>114</sup>Vgl.: Fraunhofer IBP: Projekte – Effizienzhaus Plus Berlin – Monitoring und Messtechnische Untersuchung – Vergleich zwischen Heizungsanlage mit dezentralen Heizungspumpen – Positionspapier Wärmedämmung (KEA) gefördert durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.), 08.2016.

<sup>115</sup>A. Goetzberger, J. Schmid, V. Wöttwer: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Transparente Wärmedämmung, K. Bertsch, E. Boy, K. Gertis Fraunhofer-Institut für Bauphysik Institutsbereich Wärme/Klima, Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben "LEGIS", (BMFT-FB-03E-8411-A), Stuttgart und Freiburg, 1987.

Sommermonaten innerhalb der Gebäudebauteile verhindert. Technische Systemverbesserungen zeigen sich in der Materialstrukturoptimierung der Dämmung durch einen selektiven Schichtaufbau. Transparente Dämmmaterialien müssen daher mindestens zwei Eigenschaften erfüllen: Zum einen sollten sie über gute Wärmedämmeigenschaften und zum anderen über eine hohe Transparenz im Spektralbereich der Solarstrahlung verfügen. Aus energetischen Gründen stellen Hohlkammerstrukturen (Kapillaren und Waben) aus Kunststoff oder Glas die beste Kombination aus Wärmedämmung und Transparenz dar. TWD aus Kunststoff wie Polymethylmethacrylat, zum Beispiel Plexiglas®, Polycarbonat zum Beispiel Makrolon®, bieten sich als Absorberschicht für die ganzjährige Wärmespeicherung in Bauteilen an. Die Materialien Glas und Silica-Aerogel sind als Absorbersysteme einer Eignungsprüfung unterzogen worden. Das Hybridsystem, bestehend aus einem Wärmeträger (Luft oder Wasser), übernimmt den Energietransport mit einem innenliegenden Kanal- oder Röhrensystem.

Die Speicherung wird durch in Gebäuden installierte Latentwärmespeicheranlagen gewährleistet, die zentral das Wärmepotenzial zur Verfügung stellen. Wasserdurchströmte Fassadensysteme unterstützen die Gebäudeheizung im Winter und übernehmen die Warmwasserbereitung im Sommer und unterbinden somit eine sommerliche Überhitzung. Die technisch hoch entwickelten Fassadensysteme erreichen einen technischen Standard, der einen kommerziellen Einsatz an Wohn- und Gewerbegebäuden, sowohl bei Neubau- maßnahmen als auch bei der Altbausanierung gestattet. TWD-Materialien sind mechanisch empfindlich, nicht witterungsstabil und anfällig für Verunreinigungen und es bedarf der Montage eines Rahmensystems mit einer UV- und wasserundurchlässigen Schicht.<sup>116</sup>

Die saisonale Entstehung von Stauwärmeströmen unter Gebäudedachflächen und technischen Solaranlagen auf Metaldächern ist in Feldversuchen an der Universität Göttingen im Rahmen eines Forschungsvorhabens<sup>117</sup> untersucht worden. Die Stauwärme, die sich insbesondere unter Dachflächen bildet und über die Bauteilkonstruktion in den Luftraum der Dachunterkonstruktion geleitet wird, steht für die Zuführung von Lüftungssystemen innerhalb von Gebäuden zur Verfügung. Die über die Dachtraufe angesaugte Wärme wird mittels eines Luftkanals aufgenommen und einem Luft-Sole-Wärmetauscher zur Umwandlung in Heizwärme dem Heizungskreislauf zugeführt. Das thermische Verhalten

---

<sup>116</sup>Fachverband Transparente Wärmedämmung e.V.: Transparente Wärmedämmung Eigenschaften und Funktionen, Informationsmappe 2, Version 2.0, 2000.

<sup>117</sup>Vgl.: Energetische Aktivierung von Dachflächen in Neu- und Altbauten durch Stauwärmennutzung. Georg-August-Universität Göttingen, Information im Internet unter URL <http://www.uni-goettingen.de/de/85315.html> (2011)

absorbierter solarer Strahlungsenergie in Außenbauteilen von Gebäuden ist in Forschungsvorhaben unter Berücksichtigung der Wärmepumpenanlagentechnik untersucht worden.

Praxisnahe urbane Forschungsprojekte<sup>118</sup> in Städten untersuchten die Wirkungen der im Stadtkern aufgestauten Umgebungsluft im Rahmen der Wärmeinseleffekte. In diesem Zusammenhang erforscht die Universität Göttingen in Feldversuchen die Strömungsverhältnisse der städtischen Umgebungsluft im Bereich von urbanen Gebäuden. Die über die Fensterbrüstungen angesaugte städtische Luftmenge wird über einen Wärmetauscher geführt und die Nutzenergie als Wärmepotenzial einem zentralen Warmwasserspeicher bereitgestellt. Die stadtklimatische Untersuchung während den Nachtstunden in den Sommermonaten von 23:00 bis 6:30 Uhr zeigt eine deutliche Abkühlung der atmosphärischen Umgebungstemperaturen in hoch versiegelten Stadtgebieten. Dieser Temperaturrückgang bewirkt ebenfalls einen verzögerten Temperaturrückgang in den anstehenden städtischen Flächen und Bodenschichten. Ein Anstieg der Temperaturwerte wird durch die ganztägige solare Strahlung erzeugt, die einen Temperaturanstieg in den Bodenschichten wieder zur Folge hat.

Für diese Arbeit stehen keine eindeutigen Messergebnisse aus den Modellvorhaben „Stauwärmenutzung“ zur Verfügung (Stand 2016).<sup>119</sup> Die technische Nutzung der Stauwärme über Gebäudebauteile für die Wärmeversorgung in Städten ist daher saisonal zu untersuchen und zu erforschen. Eigene Überlegungen welcher Einfluss der solaren Strahlung in städtischen Gebieten mit hohem Versiegelungsgrad und hoher Baudichte auf die atmosphärischen Luftströme besteht ist in der nachstehenden Skizze<sup>120</sup> dargestellt.

Das thermische Prinzip der Bildung von Stauwärmepotenzialen in städtischen Räumen ist im Rahmen der angewandten Stadtklimaforschung untersucht worden. Die urbane Wärmelast entwickelt sich in den Sommermonaten nach dem Prinzip der Wärmeinsel. Die erwärmten Luftmassen schichten sich über der urbanen Stadtfläche auf.<sup>121</sup>

---

<sup>118</sup>Vgl.: Fachbericht Solarthermie: Die Jugendherbergen in Schleswig-Holstein, Hamburg und Niedersachsen. Prinzip der Stauwärmenutzung in der Jugendherberge Dahme, Beteiligung Deutsche Stiftung Umwelt, Georg-August-Universität Göttingen. Information im Internet unter <http://www.stauwaermenutzung.de> (Stand 2016).

<sup>119</sup>Ebd.: Matthias Baum, M.Sc., Department für Nutzpflanzenwissenschaften Abteilung Agrartechnik Gutenbergstraße, Göttingen.

<sup>120</sup>Verfasser: Eigenes Skizzenmodell zur Funktionsweise von Stauwärme in Straßenräumen - Wirkungsschema bei hohem Versiegelungsgrad (2012).

<sup>121</sup>Kuttler, Wilhelm: Mehr als städtische Wärmeinseln – Angewandte Stadtklimaforschung von Wilhelm Kuttler und Andreas-Bent Barlag, Fachbeitrag in Essener Unikate 19/2002, S.84-96.

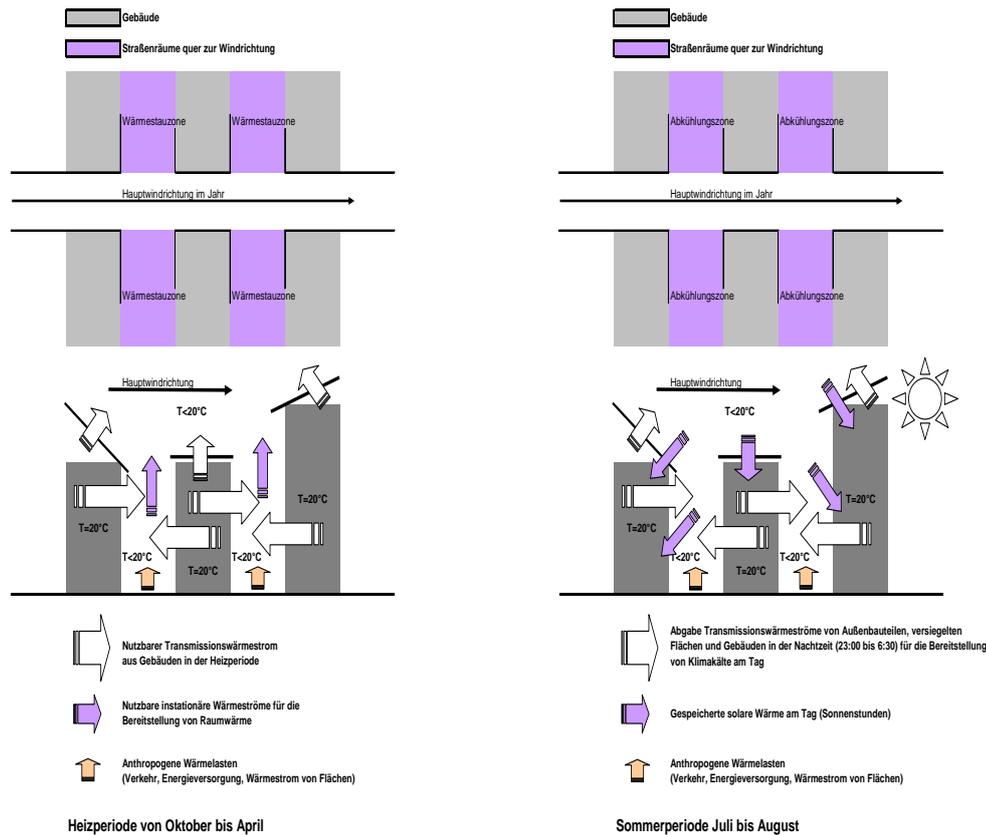


Abbildung 15: Solares Stauwärme-Potenzial in Städten mit hoher Baudichte

## 2.13. Anthropogene Wärmelasten

Die Wirkungsuntersuchung anthropogener Beeinflussung durch Wärmelasten von emissionsverursachenden Aktivitäten in Städten auf die städtische Umwelt durch Industrie, Verkehr und Energieversorgung ist in stadtklimatologischen Forschungsvorhaben untersucht worden. Anthropogene Klimafaktoren beeinflussen primär die Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre, da die kurzwellige solare Strahlungsenergie durch Wolkenbedeckung, atmosphärische Luftschichten und Bodenoberflächenbeschaffenheit reflektiert oder absorbiert wird. Die Stromerzeugung für Städte ist weltweit für die Bildung von anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen verantwortlich und führt zu der Entstehung von Treibhausgasemissionen.<sup>122</sup>

Ergebnisse aus urbanen Forschungsvorhaben zeigen, dass zum Beispiel von unversiegelten Flächen circa 30% der auftreffenden kurzwelligigen solaren Strahlungsenergie reflek-

<sup>122</sup>Vgl.: OECD - Kernaussagen - Deckung des wachsenden Weltenergiebedarfs und Bewältigung seiner ökologischen, sozialen und politischen Auswirkungen, Zusammenfassung des Berichts, S.15ff.

tiert, jedoch 70% als langwellige Strahlung von städtischen Flächen und Gebäudeflächen absorbiert wird. Anthropogene Wärmelasten können sich daher nur langsam abschwächen und tragen zu einem wesentlichen Belastungsfaktor der Stadtluft bei. Die Aerosolanteile, die sich in der atmosphärischen Luftschicht befinden, reflektieren zum einen das Sonnenlicht und zum anderen kondensiert an den Aerosolen das Wasser und führt zu einer Entwicklung der Wolkenbildung, die insbesondere in der Heizperiode von Oktober bis April zum Smogeffekt in Städten führen kann. Die jährlichen anthropogenen Wärmelastpotenziale in Großstädten werden in der Fachliteratur zwischen  $\frac{1}{6}$  und  $\frac{1}{3}$  des jährlichen vorhandenen solaren Strahlungspotenzials angegeben. Ein Anstieg der anthropogenen Wärmelasten ist bis auf das 2,5-fache während der Heizperiode in Luftschichten über Städten festgestellt worden. Das Phänomen des urbanen atmosphärischen Lufttemperaturanstiegs beruht auf die Entstehung anthropogener Wärmelasten.<sup>123</sup>

---

<sup>123</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Balke, K.-D., Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen, S. 53 (anthropogene Wärmeerzeugung, Untersuchung Sonneneinstrahlung und Wärmegewinne durch Peterson 1969).

## 3. Stand der Forschung

### 3.1. Globaler Klimawandel

Im Kontext des globalen Klimawandels steht die regionale und städtische Klimaveränderung im Vordergrund. Anthropogene Faktoren verursachen Veränderungen in Städten durch die Erhöhung des Luftverschmutzungsgrades. Die Zusammensetzung der atmosphärischen Schichten wird durch die Intensität der solaren Strahlung verändert. Der globale Klimawandel<sup>124</sup> wird in der wissenschaftlichen Fachliteratur definiert als ein durch den direkten oder indirekten Einfluss des Menschen verändertes Phänomen mit dem Effekt der Erwärmung oder Abkühlung der bodennahen Atmosphäre. Forschungsergebnisse, die durch den wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung<sup>125</sup> veröffentlicht worden sind, bestätigen den direkten Einfluss auf den globalen Klimawandel infolge des Abbaus natürlicher Ressourcen, einer flächengroßen Entwaldung, einer stetig wachsenden Urbanisierung mit Anstieg des Versiegelungsgrades und Flächennutzungsveränderungen.<sup>126</sup> Im Mittelpunkt des Klimawandels stehen somit insbesondere die erzeugten anthropogenen und natürlichen Treibhausgasemissionen.<sup>127</sup> Der Einfluss des Menschen auf die Veränderung des Klimasystems wird durch den Vierten Sachstandsbericht des IPCC (AR4) bestätigt. In allen kontinentalen Regionen mit Ausnahme der Antarktis haben anthropogene Antriebe wahrscheinlich zum Anstieg der Oberflächentemperatur auf der Erde seit Mitte des 20. Jahrhunderts beigetragen.<sup>128</sup> Die meteorologische Untersuchung von Klimaänderungen ist mindestens dreißig Jahre durchzuführen.<sup>129</sup>

Die Analyse der meteorologischen Daten durch wissenschaftliche Klimabeobachtungen der letzten Jahrzehnte beweisen eine globale Erwärmung auf der Erde. Der Unterschied im globalen Temperaturmittel zwischen der letzten Eiszeit auf der Erde vor circa 21.000

---

<sup>124</sup>Vgl.: Definition des Klimawandels nach IPCC, Konsensbericht der Arbeitsgruppe III, 2010.

<sup>125</sup>Vgl.: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen (WBGU). Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel, 2007. Information aus dem Internet URL unter <http://www.die-gdi.de/CMS-Homepage> (2010).

<sup>126</sup>Vgl.: UNEP: Carbon & Biodiversity, Globaler Atlas Online. World Conservation Monitoring Center (WCMC) in Cambridge, Fachzeitschrift des BMU, Heft 6, S. 375, Juni 2010.

<sup>127</sup>Vgl.: Klimagase: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> und die Chlor-Fluor-Karbonate. Information aus dem Internet URL unter <http://klima-der-erde.de> (2010).

<sup>128</sup>Vgl.: Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP: Klimaänderung 2014 - Synthesebericht – Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger (deutsche Übersetzung), S. 2-32, 2014

<sup>129</sup>Vgl.: WMO Statement on the State of the Global Climate in 2016 (World Meteorological Organization), WMO-No. 1189, ISBN 978-92-63-11189-0, S. 6-7, 2017

Jahren und der heutigen Klimaveränderung beträgt etwa 4 bis 7° C mit der Tendenz eines Temperaturanstiegs. Folge ist die Erwärmung der Atmosphäre und der Ozeane sowie der Anstieg der Meere. Wissenschaftliche Untersuchungen des globalen Klimas deuten darauf hin, dass die fortschreitende Klimaerwärmung zusätzlich zu einer Veränderung der Häufigkeit, Dauer und räumlichen Ausdehnung von Extremwetterereignissen führt.<sup>130</sup>

Auf der Grundlage von Langzeittemperaturmessungen in der Zeit von 1980 bis 2009 stellt BORCHERT die These auf, dass die globale Temperaturerhöhung in der südlichen Hemisphäre der Erde nicht nur vom Menschen, sondern auch von einer außergewöhnlichen Sonnenaktivität verursacht worden ist. (*Vollzitat: «Der CO<sub>2</sub> - Anstieg ist eine Folge der beschriebenen solar induzierten Erwärmung der Ozeane.»* (H. BORCHERT<sup>131</sup>). Messtechnische Untersuchungen<sup>132</sup> bestätigen die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Repräsentative Beispiele von NASA-Temperaturkurven“ von H. BORCHERT. Das anvisierte globale Klimaschutzziel der Staaten stützt sich insbesondere auf die weltweite schrittweise Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2025.<sup>133</sup> Eine Halbierung der CO<sub>2</sub>-Emissionsfracht, bezogen auf den Stand von 1990, ist daher bis zum Jahr 2050 mit einem Klimaschutzplan für Europa festgelegt worden. Die meteorologische Datenauswertung von 74% der weltweiten Messstationen stellt weiterhin einen kontinuierlichen Anstieg der mittleren jährlichen atmosphärischen Lufttemperaturwerte auf der Erde fest.

Messtechnische Auswertungen<sup>134</sup> von 1.700 Lufttemperaturmessungen aus 46 Wettermessstationen sowie die Analyse von Temperaturkurven von 775 Messstationen der NASA zeigen, dass jedoch globale Temperaturerhöhungen und folglich die Erwärmung der Erde in der vorindustriellen Zeit schneller stattfand als in den Zeitepochen vorher. Zur Aufnahme der klimatischen Veränderungen sind nationale Klima-Monitoringsysteme für die Analyse und Auswertung von klimatologischen Parametern in der Entwicklung.<sup>135</sup>

---

<sup>130</sup>Vgl.: Bericht Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014, S.3.

<sup>131</sup>Borchert, Horst: Titel der Veröffentlichung „Südpazifische Oszillation und Kosmische Strahlung“ bei EIKE - Europäisches Institut für Klima und Energie, Mainz, 2010.

<sup>132</sup>Ewert, Friedrich-Karl: Veröffentlichung „Repräsentative Beispiele von NASA Temperaturkurven“, Zweite ergänzte Fassung, 24.7.2010.

<sup>133</sup>Vgl.: Europäische Kommission: Forderung der Europäischen Union zur drastischen Reduzierungen von Treibhausgasemissionen aufgrund des IPCC-Berichtes. Bericht Nr. IP/07/610, Brüssel, 2007.

<sup>134</sup>Vgl.: EWERT, 2010

<sup>135</sup>Vgl.: WMO Statement on the State of the Global Climate in 2016 (World Meteorological Organization), WMO-No. 1189, ISBN 978-92-63-11189-0, S. 23ff., 2017

### 3.2. Stadtklima und städtische Wärmeinsel

In der Fachliteratur wird das „Stadtklima“ als durch städtische Flächennutzungsstrukturen beeinflusstes modifiziertes Klima definiert. KUTLER et al.<sup>136</sup> definiert den Begriff „Stadtklima“ als ein mit der städtischen Bebauung in Wechselwirkung stehendes Klima, das zusätzlich durch Abwärme und anthropogene atmosphärische Spurenstoffe modifiziert wird. Die durch die solare Strahlung erwärmten versiegelten Flächen des städtischen Kerngebietes<sup>137</sup> verursachen eine Lufttemperaturdifferenz zwischen Stadt und Stadtumland, die zu einem Anströmen von kalten Luftschichten aus dem Stadtumland führt und die atmosphärischen Lufttemperaturen in den Morgenstunden deutlich abkühlt. Über den Kontaktflächen von städtischen Flächen bildet sich eine Ausgleichsströmung, die einen Wärmeaustausch über den städtischen Flächen verursacht. Aneinander angrenzende Luftmassen im Stadtgebiet mit einer Temperaturdifferenz führen dazu, dass sich Windströmungen im urbanen Raum bilden. Die städtische Flächenbilanz und Bebauungsstruktur wirkt sich direkt auf die Entstehung des Stadtklimas aus und beeinflusst die Luftmassen und Lufttemperaturen in zeitlicher und räumlicher Abhängigkeit. Negative Auswirkungen zum Beispiel auf das Regional- und Stadtklima mit deutlich wahrnehmbaren "Stadtklimaeffekten" infolge von erhöhten anthropogenen Wärmelasten konnten auch in städtischen Metropolen nachgewiesen werden. Zur Aufnahme und Analyse der städtischen Luftmassenverhältnisse und Entstehung von Wärmeinseln in urbanen Stadtgebieten ist daher das „Urban Canopy Layer (UCL) Klimamodell“<sup>138</sup> entwickelt worden. Die urban Canopy-Layer (UCL) Ebenen werden in klimatische und räumliche Einheiten den Stadtteilen, Stadtquartieren oder einzelnen Gebäudebaukörperstrukturen zugeordnet. Die Simulation von Klimamodellen erzeugt Stadtklimaverhältnisse und analysiert die Entstehung von städtischen Wärmeinseln.<sup>139</sup> Die nachstehende Abbildung 16 zeigt ein Temperaturmessdiagramm über die atmosphärische Lufttemperaturabsenkung in einem Stadtge-

---

<sup>136</sup>Möller, Detlev: Beitragsserie Klimaänderung und Klimaschutz; Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus (Hrsg.), Kuttler, Wilhelm: Stadtklima Teil 1: Grundzüge und Ursachen, Universität Duisburg-Essen, Berlin.

<sup>137</sup>Müller, Weise: Numerische Simulation von Heat-Island-Phänomenen an innerstädtischen Straßenbelägen in Nagoya, Arbeitsweise des Simulationsprogramms, BAM, Fachgruppe VII.1 - Baustoffe.

<sup>138</sup>Vgl.: UCL-Definition von urban canopy layer. Bereich zwischen Erdboden und mittlerem Dachniveau, aus: Stand der Forschung, S.7 ff., OKE, 1987. Information aus dem Internet URL <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/02/02H216/t4.pdf>.

<sup>139</sup>Roth, M., Oke & W., T.R., Emery, W.J.: Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology, Atmospheric Science Program, Department of Geography, The University of British Columbia, Vancouver, S.1699-1720, 22.10.2007.

biet während eines Sommertages im Monat August in den Morgenstunden zwischen vier und sechs Uhr innerhalb von einer Stunde. Die Abkühlung der atmosphärischen Luftschichten und atmosphärischen Lufttemperaturen von 23°C auf 17°C im urbanen Stadtgebiet wird insbesondere durch die Zuführung von abgekühlten Luftströmungen in den Morgenstunden aus dem Umland verursacht.

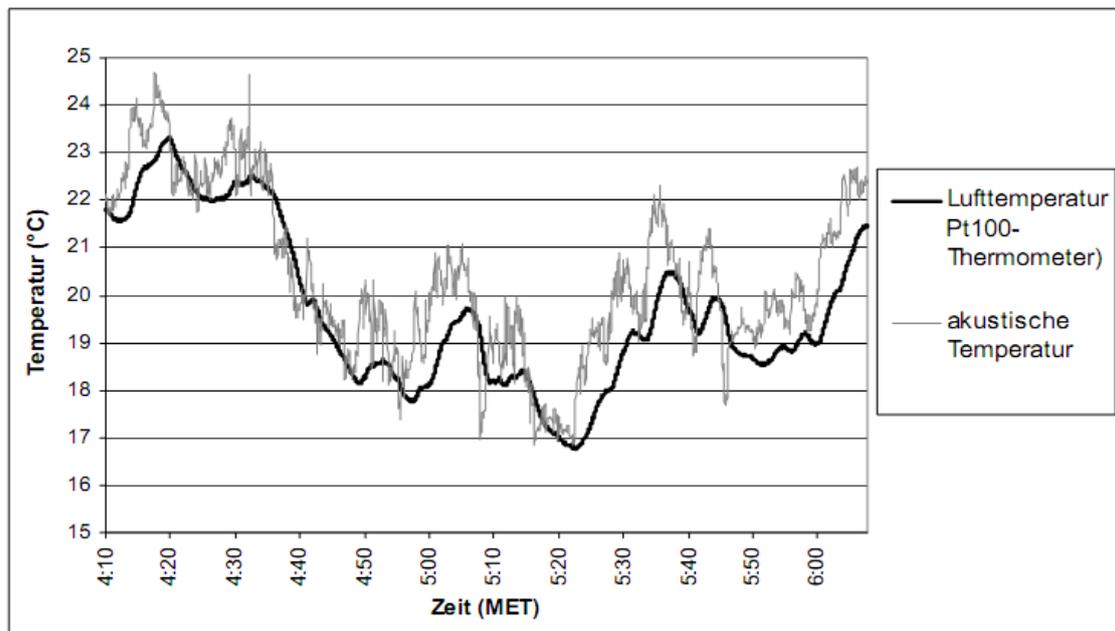


Abbildung 16: Atmosphärische Lufttemperaturabsenkung in Städten

Die Absenkung der atmosphärischen Lufttemperaturwerte während den Morgenstunden ist ein typisches urbanes Phänomen in den städtischen Kerngebieten mit einem hohen Versiegelungsgrad, da die Temperaturdifferenz der Luftmassen oberhalb von versiegelten Flächen temperaturabhängige Luftströmungen erzeugen. Der Wärmeinsel-Effekt ist in Städten auch mit weniger als 100.000 Einwohnern festgestellt worden. Die Wärmeinselintensität korreliert positiv mit der Flächengröße und Einwohnerzahl. Die mit Wärmeinsel-Zuschlag spezifisch berechneten Klimaindikatoren reagieren sehr sensitiv auf klimatische Veränderungen zum Beispiel bis zum Jahr 2060. Die grobe quantitative Abschätzung eines städtischen Wärmeinselleffektes ist im Rahmen der Klimafolgenabschätzung ein wichtiger Forschungsgegenstand.<sup>140</sup>

Stadtklimatologische Untersuchungen<sup>141</sup> beschreiben die Charakteristik des Stadtklimas in einer Großstadt und zeigen, dass insbesondere das Verhältnis zwischen bebauten Flä-

<sup>140</sup>Vgl.: Städtischer Wärmeinsel-Effekt - Grundlagenarbeit für die Klimarisikoanalysen 2060, erstellt durch INFRAS Forschung und Beratung, Auftraggeber: BAFU-Bundesamt für Umwelt, Mai 2015.

<sup>141</sup>HUPFER und KUTTLER, 1986

chen und unbebauten Flächen das Stadtklima ganzjährig erheblich beeinflusst. Die Ergebnisse von Feldversuchen durch KUTTLER et. al zeigen, dass in einem Stadtgebiet mit einem hohen Versiegelungsgrad eine geringere Globalstrahlung von 10%, eine geringere Sonnenscheindauer von 8-10 %, ein Luftmassenwärmestrom von mehr als 50% und eine Erhöhung der atmosphärischen Lufttemperaturen in der Winterperiode von mehr als 10K im Gegensatz zum städtischen Umland nachgewiesen worden ist.<sup>142</sup> Durch die solare Erwärmung von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen, Gebäudefassaden und Gebäudedachflächen entstehen folglich Luftschichten durch Konvektionsprozesse im urbanen Raum, die während der Tageszeit langsam erwärmt werden. Eine Erhöhung der atmosphärischen Lufttemperaturen und Luftmassenströme in den Städten ist daher die Folge. Oberflächenstrukturen, die einen hohen Rauheitsgrad besitzen, führen zusätzlich zu einer Bildung von horizontalen Windströmungen und Turbulenzen im urbanen Raum. Die Veränderung des Stadtklimas wird durch eine dichte Bebauungsstruktur, mangelnde Stadtraumbelüftung und großflächige Gebäude verstärkt.

Meteorologische Untersuchungen in Städten<sup>143</sup> zur Entwicklung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklimamodells zeigen, dass die atmosphärischen Lufttemperaturschwankungen über Grenzflächen von städtischen Flächen aus den solaren Strahlungseinflüssen, sensiblen und turbulenten Luftwärmeströmen sowie den Bodenwärmeströmen des anstehenden Bodens gebildet werden. Die Beschattung von Flächen durch dicht bebaute Stadtquartiere und Gebäudehöhen wurde in diesem dreidimensionalen Stadtklimamodell berücksichtigt.<sup>144</sup>

Die Simulation von Windfeldern in Städten nach dem Modell MISKAM<sup>145</sup> zeigt, dass die Entstehung von Windströmungen durch Gebäudeformen und durch vertikale und horizontale Gebäudeflächen verursacht wird. Das Simulationsprogramm MISKAM ist ein mikroskaliges, dreidimensionales Strömungs- und Ausbreitungsmodell zur kleinräumigen Prognose von Windverteilungen und Immissionskonzentrationen in Straßen und Stadtteilen bezogen auf städtische Gebäudestrukturen mit dichter Straßenrandbebauung. Der

---

<sup>142</sup>Kuttler, Wilhelm: Mehr als städtische Wärmeinseln, Angewandte Stadtklimaforschung, Universität Duisburg-Essen, Essener Unikat 19/2002, S.84-97.

<sup>143</sup>EICHHORN, 1989

<sup>144</sup>Eichhorn, Joachim: Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklimamodells, Dissertation, Johannes Gutenberg Universität Mainz, 1989.

<sup>145</sup>Vgl.: Städtebauliche Klimafibel online: Berechnungsmodell MISKAM, Methoden der Informationsgewinnung für die Planung und numerische Modellierung, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg. EICHHORN, 2010; VDI-RICHTLINIE 3782 Bl.8. Information aus dem Internet unter <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de>.

Aufnahmebereich von MISKAM liegt im Bereich kleinräumiger Prozesse mit Ausdehnungen bis zu circa 100m.

### 3.3. Nahwärmekonzepte mit regenerativen Energien

Das Projekt 50 Solarsiedlungen<sup>146</sup> untersucht Nahwärmekonzepte mit Unterstützung einer saisonalen Warmwasserspeicherung in Siedlungsgebieten an energetischen Modellgebäuden in Nordrhein-Westfalen.<sup>147</sup> Das ganzheitliche Versorgungskonzept bezieht sich nicht nur auf die energetische Optimierung von Wohngebäuden, sondern auch auf eine effiziente Quartiersversorgung unter dem Aspekt von ökologischen Gesichtspunkten. Die Ergebnisse der Auswertung sind Grundlage zur Planung von kommunalen Solarsiedlungen und stellen Planungshilfen für die städtische energetische Bauleitplanung zur Aufstellung von Bebauungsplänen zur Verfügung. Städtebauliche Forschungsprojekte zur Modernisierung von Gebäuden im Bestand stützen sich primär auf die Gesamtprimärenergieeinsparung am Versorgungsstandort.<sup>148</sup> Das kommunale Energieversorgungskonzept der Stadt Wulfen<sup>149</sup> zum Beispiel versorgt städtische Quartiere durch eine zentrale Grundwasserpumpenanlage, die Niedrigtemperaturwärme aus einer Grundwasserbrunnenanlage generiert. Die Entnahme- und Einleitungsbrunnen sind in einem Abstand von 500 bis 700 m Luftlinie voneinander entfernt und versorgen das mittig gelegene Stadtquartier.<sup>150</sup>

Weitere Energieversorgungsmodelle zeigen unterschiedliche konzeptionelle Ansätze, die Klimaschutz, Umweltschutz oder das Energiesparen als Leitbild aufgenommen haben. Das Versorgungsmodell im Rahmen eines Stadtentwicklungskonzeptes zur Reduzierung der Gesamtkohlendioxidemissionen für den Stadtteil Kronsberg der Stadt Hannover reduziert primär die Abgase aus Heizkraftwerken und Gebäudeheizungen (Herle et al., 2001). Die Reduzierung des Gesamtjahresheizwärmebedarfs und die gleichzeitige Minimierung der Kohlendioxidemissionen sind mit dem Gebäudemodell Passivhaus und einer Nah-

---

<sup>146</sup>Vgl.: Energie Agentur NRW: Projekt 50 Solarsiedlungen in Nordrhein-Westfalen und 100 Klimaschutzsiedlungen, Arbeitsgruppe Bauen und Wohnen, Information im Internet URL <http://www.energieagentur.nrw.de/solarsiedlungen> (2012).

<sup>147</sup>Vgl.: Grautloff, 1998.

<sup>148</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Primärenergiesparende Energieversorgung der Wohnsiedlung „Neue Stadt Wulfen“. Stadtkern West durch Ausnutzung natürlicher Wärmequellen. Broich, P. Entwicklungsgesellschaft Wulfen mbH, Dorsten in Kooperation mit der Forschungsstelle für Energiewirtschaft München, Forschungsbericht T86-060, Juli 1986.

<sup>149</sup>Vgl.: Information im Internet URL [http://de.wikipedia.org/wiki/Neue\\_Stadt\\_Wulfen](http://de.wikipedia.org/wiki/Neue_Stadt_Wulfen) Umsetzung (2010) Neue Stadt Wulfen; Stadtumbau Barkenberg unter <http://www.stadtumbau-barkenberg.de/> (2011).

<sup>150</sup>Ebd.: S.165 ff. (Interpretation der Ergebnisse und Auswertung des Projektes nach Kalenderjahren).

wärmeversorgung erreicht worden. Das Forschungsprojekt Bioenergiedorf der Gemeinde Jühnde<sup>151</sup> in Niedersachsen zur autonomen Versorgung des gesamten Gemeindegebietes untersucht die kommunale Eigenversorgung mit Wärme und Strom. Das Energiekonzept stützt sich auf die Versorgung durch ein Biomasse-Blockheizkraftwerk mit Nahwärmenetz. Die im Gemeindegebiet betriebene Biogasanlage speist Biogas in das Versorgungsnetz und stellt Primärenergie für das Heizkraftwerk zur Verfügung. Ein wesentlicher Bestandteil des kommunalen Energiekonzeptes ist die Sanierungsverpflichtung des Gebäudebestandes nach der Energieeinsparverordnung (EnEV 2014). Das kommunale Energiekonzept beruht auf einem Beteiligungsmodell mit Energiegenossenschaften.

Das Gewerbegebiet in Aachen/Heerlen<sup>152</sup> ist als Forschungsprojekt „Stadtteilkonzept Wohnen und Arbeiten“ mit dem Klimaschutzziel für eine CO<sub>2</sub>-neutrale Versorgung geplant worden. Im Planungsprozess der vorbereitenden Bebauungsplanung wurde das kommunale Energiekonzept frühzeitig konzipiert. Gebäudesanierung und Energiesparmodelle für Gebäude führen zu einer nachhaltigen Stadtteil-Wärmeversorgung mit einem Nahwärmenetz, das durch ein Biomasse-Kraftwerk mit Holzvergasungstechnologie und einem Blockheizkraftwerk mit nachwachsenden Rohstoffen versorgt wird.

Eine Vielzahl von Modellvorhaben mit einem nachhaltigen kommunalen Energieversorgungskonzept ist im Rahmen der Stadtversorgungsplanung analysiert worden. Der Stand der Forschung von nachhaltigen Stadtversorgungskonzepten für Wärme und Strom ist europaweit untersucht worden.<sup>153</sup> Die EU Richtlinie 2010/31 stellt Planungsempfehlungen für Stadtversorgungsstrukturen mit erneuerbaren Energien für eine „Nearly Zero Energy Buildings Strategy“ den Kommunen zur Verfügung.<sup>154</sup>

Forschungsvorhaben im Bereich der Stadtmodernisierung, Stadterneuerung, des Stadtbbaus und der Gebäudesanierung zeigen, dass vorgegebene städtische Leitziele und stadtpolitische Entwicklungsziele die lokalen technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Randbedingungen für eine leitungsgebundene Wärmeversorgung stark beeinflussen. Städtebauliche Strategien stützen sich auf konzeptionelle Ansätze zum Schutz der

---

<sup>151</sup>Vgl.: Gemeinde Jühnde: Bioenergiedorf Jühnde, Information im Internet URL <http://www.bioenergiedorf.de>. Die wissenschaftliche Begleitforschung erfolgte durch das IZNE Göttingen (2009).

<sup>152</sup>Vgl.: Energie - Cités: Erfahrungen in Aachen / Heerlen, Stadt Aachen, Fachbereich Umwelt. Information im Internet URL <http://energycities.eu> (2002).

<sup>153</sup>Vgl.: Information im Internet unter URL <https://www.energie-cities.eu> (2016).

<sup>154</sup>Vgl.: EU Directive 2010/31EU - Heating and Cooling Strategy: Industry and local authorities join voices to request structural reforms in revised climate and energy legislation. Information im Internet URL <http://www.energie-cities.eu/IMG/pdf/2016021>, S. 1-3 (2016).

Umwelt und zum Ressourcen- und Klimaschutz. Das Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau hat im Rahmen eines wissenschaftlichen Pilotprojektes<sup>155</sup> bereits im Jahr 1980 Randbedingungen für eine koordinierende Stadterneuerungs- und Energieversorgungsplanung für Städte festgelegt. Die Planung von dezentralen städtischen Energieversorgungsmodellen erfordert Versorgungscluster mit dezentralen Energieversorgungsanlagen und Versorgungsinseln, die wiederum lokale städtische Versorgungsnetze miteinander versorgen. Roth et al., 1980 untersuchte in Forschungsvorhaben, dass Siedlungs- und Gebäudetypologien für die Planung einer leitungsgebundenen städtischen Energieversorgungsstruktur unabdingbar sind und daher regionale und städtische Fern- und Nahwärmeversorgungsnetze mit einer hohen Wirtschaftlichkeit und Effizienz betrieben werden können. Roth bestimmte daher neun Siedlungstypen, die einer Gebäude- und Baualtersstruktur zugeordnet und für eine leitungsgebundene Wärmeversorgung geeignet sind. Die Untersuchung bezog sich nicht nur auf städtische Forschungsvorhaben zum Stadtklima und auf die Ressourcenbilanzierung von „städtischen Fernwärmesystemen“, sondern auch auf die Analyse von Energieeinsparpotenzialen für städtische Kerngebiete<sup>156</sup>. Die aus den Siedlungskategorien entwickelten Raumtypen sind anhand ihrer relevanten Merkmale in Datenprofilen dargestellt und unterscheiden sich hauptsächlich in der Art und Dichte der Besiedlung, in der Bevölkerungsdichte und in der Flächenbeanspruchung. Diese Werte sind ausschlaggebend für die Betrachtung der städtischen Wärmeversorgung.

Die Fernwärmeeignung ist nach der Siedlungstypologie von Schulz, 1984 und nach Blesl, 2001 sowie nach dem Stoffstrommodell von Buchert, 2004 untersucht worden. Eine genauere Ermittlung des Wärmebedarfs einer Siedlung ist nur unter Berücksichtigung der Gebäudebestandsstruktur innerhalb des Siedlungstyps gegeben. Die energierelevanten, baulich konstruktiven Gebäudemerkmale sind mit der Gebäudetypologie dargestellt. Die Kategorisierung der Gebäudetypen ist durch die Bauform und den Bautyp unter Berücksichtigung der Baualtersklasse definiert. Blesl erweiterte die Siedlungstypologie für seine

---

<sup>155</sup>Vgl.: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau: Rationelle Energieverwendung im Rahmen der kommunalen Entwicklungsplanung, Schriftenreihe Städtebau, Heft 03.083, Bonn 1980, S.18.

<sup>156</sup>Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes NRW: Möglichkeiten und Grenzen der Fernwärmeversorgung im Wohnungsbau. Siedlungstypen nach Roth am Beispiel der Stadt Aachen, S.57.

Modellbetrachtungen durch Festlegungen des Jahresheizwärmebedarfs und den leitungsgebundenen Energieversorgungssystemen.<sup>157</sup>

Neuere Forschungsvorhaben zeigen, dass für die städtebauliche Entwicklungsplanung von Neubau- und Sanierungsgebieten mit hoher Wohndichte eine Fern- und Nahwärmeversorgung erst bei einer Geschossflächenzahl (GFZ) von 0,5 wirtschaftlich ist. Landes- und Stadtentwicklungsforschungsvorhaben<sup>158</sup> in Nordrhein-Westfalen untersuchten die Wechselwirkungen zwischen Gebäudekonzeption, Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen anhand von Versorgungsmodellen, die sich auf die Forschungsergebnisse von Roth et al. (1980)<sup>159</sup> stützen. Ein Forschungsziel ist die Untersuchung von technischen Grenzen der Fern- und Nahwärmeversorgung im städtischen Wohnungsbau und die Wirkung von städtebaulichen Maßnahmen auf den Wärmebedarf eines Versorgungsgebietes. Als Ergebnis ist festzustellen, dass die leitungsgebundene Fern- und Nahwärmeversorgung für hoch verdichtete städtische Gebiete aus Gründen des Ressourcenschutzes nachhaltig und umweltschonend ist. Die Forschungsarbeiten von Roth et al. sind Grundlage zur Erstellung von Wärmeatlanten für Regionen und Städten.

Das Forschungsgebiet zur Untersuchung von zentralen und dezentralen Systemen zur geothermischen Wärmeversorgung zeigt Konzepte der kommunalen Versorgung mit erneuerbaren Energien auf. Die Wärmeversorgung einer städtischen Siedlung erfolgt über ein zentrales im städtischen Quartier platziertes Sondenfeld und über den zentralen Betrieb von Wärmepumpen, die in das Nahwärmenetz Erdwärme einspeisen. Das Forschungsvorhaben untersuchte die Projektierung, Wärmeübertragung, Primärenergiebilanz und Planung von Verteilnetzen sowie den technischen Einsatz von Materialien und Regelungskomponenten. Die Erkenntnisse und Erfahrungen führten in die Entwicklung einer speziellen Anlagen-Auslegungssoftware zur Planung einer kalten Nahwärmeversorgung. Neuere Anlagensysteme mit CO<sub>2</sub>-Sonden als Heat-Pipe mit Thermosiphon-Effekt und der Einsatz einer Direktverdampfersonde als Phasenwechselsonde befinden sich in der technischen Erforschung. Kombinationen mit solarthermischen Anlagen und erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen sowie einer Wärmequelle als Kaskaden-Solarthermie-

---

<sup>157</sup>Vgl.: Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme (solies): Solar district heating (SDH), Studie zur detaillierten Bewertung von solaren Wärmenetzkonzepten für drei typische Siedlungsgebiete, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Stuttgart, Mai 2015, S.6ff.

<sup>158</sup>Ebd.: Abb. 23, S. 46.

<sup>159</sup>Ebd.: S. 54 ff.

Speicherung in einer „Geothermiezisterne“ mit Untergrundvereisung sind weitere Modellvorhaben.<sup>160</sup>

Seit 1996 sind in Deutschland solare städtische Versorgungskonzepte mit Langzeit-Wärmespeicheranlagen analysiert worden. Für die Grundlastdeckung des gesamten Wärmebedarfs von städtischen Quartieren mit einem solaren Potenzial von weniger als 100% ist eine zusätzliche Wärmeerzeugung erforderlich. Das Forschungsergebnis zeigt auch, dass Langzeit-Wärmespeicher als Warmwasser-Wärmespeicher, Kies/Wasser-Wärmespeicher, Erdsonden-Wärmespeicher und Aquifer-Wärmespeicher ein wesentlicher Bestandteil von Nahwärmenetzen ist. Stand der Forschung sind Multifunktionsspeichersysteme, die nicht nur die erzeugte Wärme von thermischen Solarkollektoren aufnehmen, sondern auch gleichzeitig die Wärme von Kraftwärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) speichern. Die technische Entwicklung von Wärmedämmsystemen für unterirdische Wärmespeicheranlagen führte zu Wärmedämm-Verbundsystemen mit Wärmedämmstoffen auf der Basis von Schaumglasschotter.<sup>161</sup>

Das Forschungsvorhaben „Wissenschaftlich-technische Begleitung des Förderprogramms Solarthermie2000plus zur solar unterstützten Nahwärme (SuN) und Langzeit-Wärmespeicherung von 2008 bis 2012 zeigt Ergebnisse von den Pilotanlagen in Friedrichshafen, Rostock, Neckarsulm, Crailsheim und Eggenstein-Leopoldshafen sowie begleitende Forschungsarbeiten zum innovativen Betrieb von solaren Nahwärmeversorgungssystemen mit Wärmespeicher-Modellierung.“<sup>162</sup>

---

<sup>160</sup>Vgl.: Forschungsvorhaben kalte Nahwärme gefördert durch das BMWi - Baugebiet "Sonnenberg" in Ludwigsburg sowie Baugebiet "Grüne Höfe" in Esslingen.

<sup>161</sup>Vgl.: Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik – ITW der Universität Stuttgart, Aktuelle Pilotprojekte solarer Nahwärme in Crailsheim, WinterSun - Weiterentwicklung innovativer Technologien zur solaren Nahwärme und saisonalen Wärmespeicherung. Information im Internet unter URL <http://www.itw.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/aktuell/>. (Stand 2016).

<sup>162</sup>Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) Universität Stuttgart - Solarthermie2000plus: Wissenschaftlich-technische Begleitung des Förderprogramms Solarthermie2000plus zu solar unterstützter Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicherung von August 2008 bis September 2012, Forschungsbericht zum BMU Vorhaben, 17.04.2013.

### 3.4. Thermisches Verhalten von Verkehrsflächen und Bauteilen

Das ganzjährige Temperaturverhalten von Straßenoberflächen und Bodenschichten ist in Feldversuchen durch Temperaturmessungen untersucht worden. Die Ergebnisanalyse zur Wärmeleitfähigkeit von Betonflächen zeigt, dass eine Abhängigkeit zu den Parametern Hydrationsgrad, Feuchtegehalt, Art und Menge der Gesteinskörnung, Porenvolumen und -gehalt besteht. Näherungsweise ist die Wärmeleitfähigkeit bei einem Volumenanteil der Zuschlagstoffe von 70% des Betonvolumens mit  $0,7 \lambda_g + 0,4$  bestimmbar. Für die Tragschichten aus Normal-, Kies- und Splittbeton ist eine Wärmeleitfähigkeit von 2,1 W/(mK) in der Literatur vorgegeben.

Die nachfolgende Abbildung 17 zeigt das Isothermenprofil einer Fahrbahnoberfläche mit einer Betontragschicht. Die Analyse des Temperaturverhaltens zeigt, dass zur Tagzeit aufgrund der solaren Strahlung eine Erwärmung der Tragschicht erfolgt (rot). Die Temperatur der Bodenschichten reduziert sich nach Schichttiefe und nach Tageszeit (gelb und grün). Eine Umkehrung des Temperaturverhaltens erfolgt in den Bodenschichten während den Nachtstunden. Die Temperatur in der Tragschicht nimmt entsprechend ab. Aus dem Temperaturverhalten entwickeln sich vertikal gerichtete Wärmeströmungen. Ändert sich das Wärmestromverhalten in einer Bodenschicht durch die Einwirkung der solaren Strahlung, so ändert sich der Temperaturwert in den angrenzenden Bodenschichten.

Die Wärmediffusivität der anstehenden Böden ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) unter der Betontragschicht stellt den Wärmetransport sicher und ist eine reine Transportgröße, die von der Material- und Bodendichte sowie von der spezifischen Wärmekapazität abhängig ist. Die Wärmemenge in Böden resultiert aus der Differenz der Wärmeflussdichten an den Rändern (Grenzschichten) der übereinander liegenden Bodenschichten  $G_o$  und  $G_u$  nach folgender mathematischer Differentialgleichung:

$$dW / dt = Gu - Go = -k \frac{\partial Wu}{\partial z} - \left( -k \frac{\partial Wo}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial Wo}{\partial z} - \frac{\partial Wu}{\partial z} \right) = k \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}$$

Die Herleitung der Differentialgleichung ist auf S. 152 ff. (Phasen der Erwärmung und Abkühlung in Bodenschichten) dargestellt. Die Wärmemenge, die zur Bildung von Wärmeströmen in anstehenden Böden erforderlich ist, errechnet sich aus dem Produkt der Wärmekapazität einer Bodenschicht und der Temperaturveränderung. Der während der Tageszeit unter den versiegelten Flächen sich bildende Wärmestrom wird in den Trag- und Bodenschichten zeitversetzt bei kontinuierlicher solarer Strahlung gespeichert. Der Wärmeübergang zwischen der Fahrbahnoberfläche und der Grenzschicht wird beeinflusst

von Luftströmungsverhältnissen (Windfelder) und Windgeschwindigkeiten insbesondere im urbanen Raum.

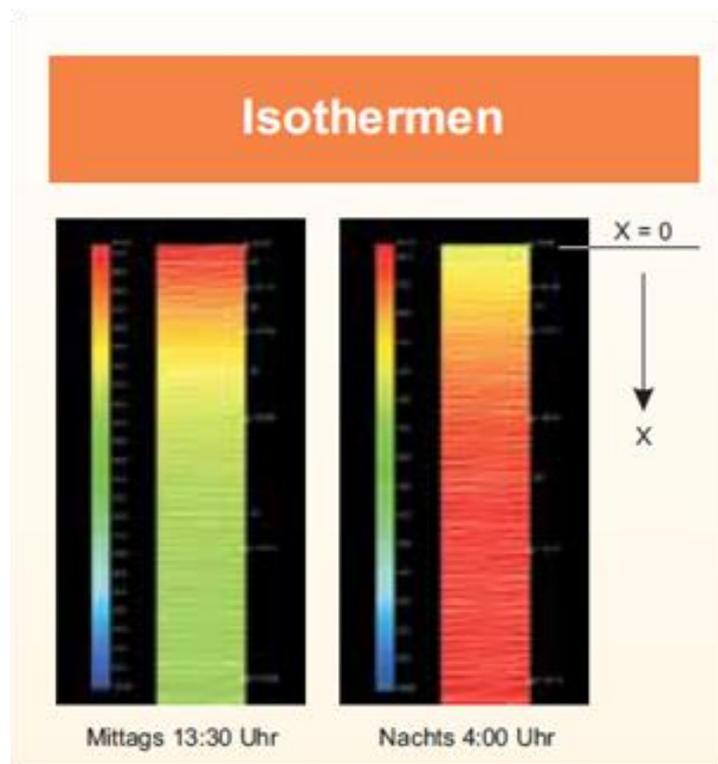


Abbildung 17: Isothermenprofil einer Betonfahrbahn

Unter Laborbedingungen sind standortbezogene meteorologische Bedingungen simuliert worden, um die Temperaturverteilung in Betonfahrbahnplatten messtechnisch erfassen zu können. Das Temperaturmaximum von  $55^{\circ}\text{C}$  stellt eine Oberflächentemperatur von versiegelten Flächen während eines Sommertages zur Mittagszeit dar. Da die Feuchteverteilung in den zu untersuchenden Betonplatten Einfluss auf die Temperaturleitfähigkeit hat, wurde mit Multiringelektroden die Temperaturverteilung in der Tragschicht mit einbetonierten Temperaturfühlern gemessen.

Die Simulation der solaren Strahlung erfolgt mit Heizstrahlern, die über der Modellfläche mit einer maximalen Leistung von  $1800\text{ W}$  angeordnet wurden und die Betonplattenoberseite auf eine Temperatur von  $55^{\circ}\text{C}$  innerhalb von sechs Stunden erwärmen. Der zeitlich abhängige Temperaturverlauf während der Erwärmungsphase an der Oberfläche ist in der nachstehenden Abbildung 18 dargestellt.<sup>163</sup>

---

<sup>163</sup>Foos, Sam: Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen, Dissertation von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Univ.-Prof. Dr. Ing. Harald S. Müller, Karlsruhe, S.61 ff., 02.12.2005.

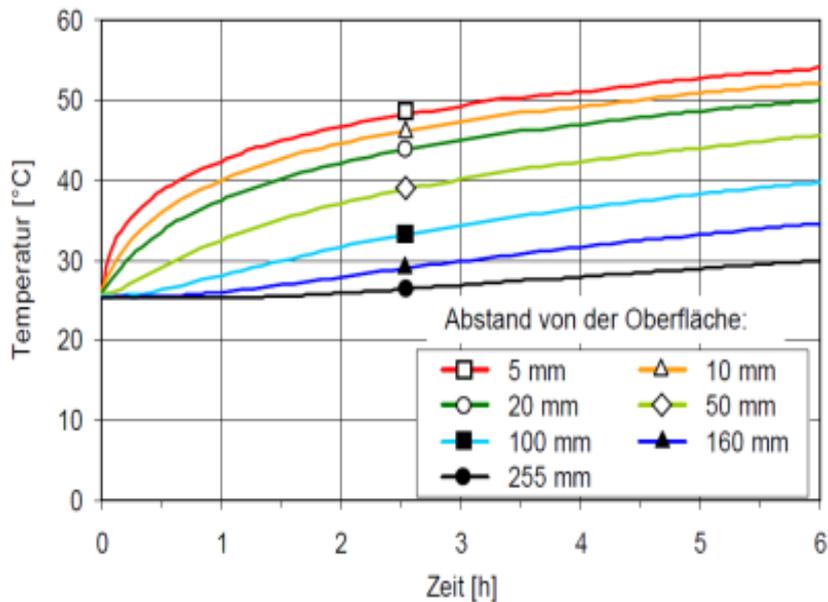


Abbildung 18: Temperaturverlauf in der Grenzschicht oberhalb der Betonplatte

Die Temperaturwerte über der Oberfläche nehmen innerhalb der Erwärmungsphase von 25°C bis 55°C in der Grenzschicht während eines Zeitabschnittes von sechs Stunden zu. Innerhalb der Zeitspanne von einer Stunde beträgt die Temperaturdifferenz nach der Erwärmung der Oberfläche 20K. Die Simulation von Wettersituationen in der Winterjahreszeit unter Laborbedingungen ist durch einen extremen Temperatursturz mittels Abkühlung durch Eiswasser auf einer Betonfahrbahn nachgebildet worden.

Der Temperaturverlauf in Abbildung 19 (Zyklus 5 in Phase b) zeigt einen deutlichen Temperaturrückgang in der Betonplatte von 55°C auf 12°C innerhalb eines kurzen Zeitraumes von einer Stunde. Am Ende der Abkühlphase steigt der Temperaturwert wieder auf 28°C (Temperaturdifferenz 16K) innerhalb von zwei Stunden wieder an und verläuft danach linear.

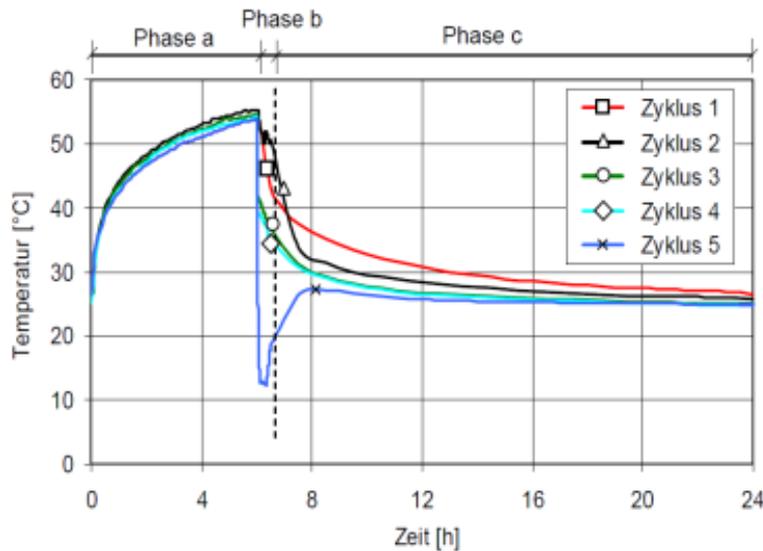


Abbildung 19: Abkühlungsreaktion in 5 mm Tiefe einer Betonplatte

Die Abbildung 20 zeigt den Temperaturrückgang von 4K innerhalb von 30 Minuten unter der Betonplattenoberfläche in einer Schichttiefe von 8cm und unterbricht den kontinuierlichen Temperaturanstieg. Die Analyse des Temperaturverhaltens in Betonfahrbahnschichten zeigt ein vergleichbares Ergebnis zum Temperaturverhalten in anstehenden Bodenschichten. Aufgrund der thermischen Trägheit von Straßenbaustoffen sind langsame Temperaturveränderungen in den Tragschichten innerhalb eines Zeitintervalls von 8 bis 12 Stunden nachgewiesen worden.<sup>164</sup>

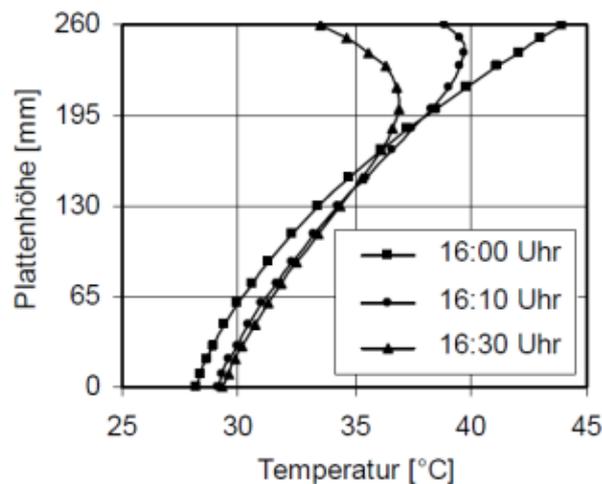


Abbildung 20: Temperaturverteilung in einer Betonfahrbahnplatte A5 im Sommer

<sup>164</sup>Foos, Sam: Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen, Dissertation von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Univ.-Prof. Dr. Ing. Harald S. Müller, Karlsruhe, S.61 ff., 02.12.2005.

Numerische Berechnungsergebnisse über die Temperaturverteilungen in Betonfahrbahnplatten sind unter Feldversuchsbedingungen mit dem FE-Programm DIANA<sup>165</sup> nachgewiesen worden. Das Untersuchungsobjekt ist ein Fahrbahnabschnitt der Betonplatte der Bundesautobahn A5 bei Kronau mit einer Plattendicke von 26cm, einer hydraulisch gebundenen Tragschicht von 15cm und einer Frostschutzschicht von 30cm. Die Temperaturverteilung in diesem Straßenfahrbahnabschnitt zeigt einen zeitlich veränderten Temperaturverlauf durch einen Temperaturrückgang von 15K infolge einer Abkühlung der Oberfläche, der durch einen Gewitterregen hervorgerufen wird. Die Bauteiltemperatur in der Betonfahrbahnplatte verändert sich demnach ab einer Schichttiefe von 195mm bis 260mm innerhalb von 20 Minuten. Die Abbildung 21 zeigt den Tagestemperaturverlauf in den Schichttiefen der Betonfahrbahn A5. Das Temperaturmaximum wird ab 12:00 Uhr in einer Bauteiltiefe von 15mm erreicht. Das Temperaturminimum stellt sich bis 04:00 Uhr am Morgen in den Bauteilschichten ein. In einer Schichttiefe von 235mm wird die parabelförmige Temperaturkurve deutlich flacher und verschiebt sich auf der Zeitachse. Die Phasenverschiebung ist durch den Temperaturmesswertevergleich innerhalb der Bauteilschichten nachgewiesen. Die Temperaturmaximalwerte der Temperaturkurven verschieben sich zeitlich bei zunehmender Bauteiltiefe unter Abnahme der atmosphärischen Lufttemperaturwerte und Abkühlung der Oberfläche.

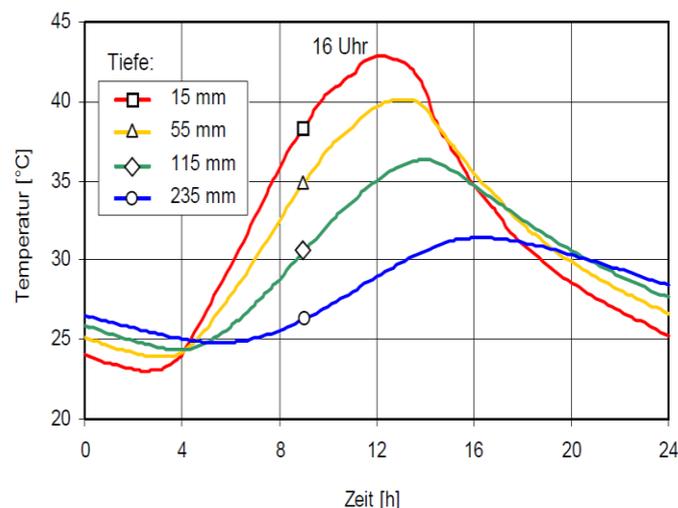


Abbildung 21: Temperaturverhalten in einer Betonfahrbahnschicht der BAB A5

<sup>165</sup>Vgl.: FE-Modell DIANA, Finite Elemente Methode, FEM im Massivbau, Technische Universität Berlin Prof. Dr. sc. Techn. Mike Schlaich, Fachgebiet Massivbau, 4. Auflage, April 2007.

Die Phasenverschiebung der Temperaturmaximalwerte in den Bauteilschichten setzt sich in den Bodenschichten bis zu einer Tiefe von 200cm gleichermaßen fort.

Der Temperaturverlauf der mittleren Jahres- und Tagestemperaturwerte in der Abbildung 23 zeigt, dass sich während der Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter ein wie in Abbildung 21 dargestellter Temperaturverlauf in den Betonfahrbahnen einstellt. Die Ursache der Temperaturschwankungen in den Tragschichten von Betonfahrbahnen wird durch Witterungsschwankungen, Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeit und atmosphärischen Temperaturveränderungen ausgelöst. Die thermische Veränderung in den Bauteilschichten ist durch die Temperaturdifferenz bewirkt worden und erzeugt vertikal gerichtete Wärmeströme zwischen den Grenzschichten der Fahrbahnschichten.

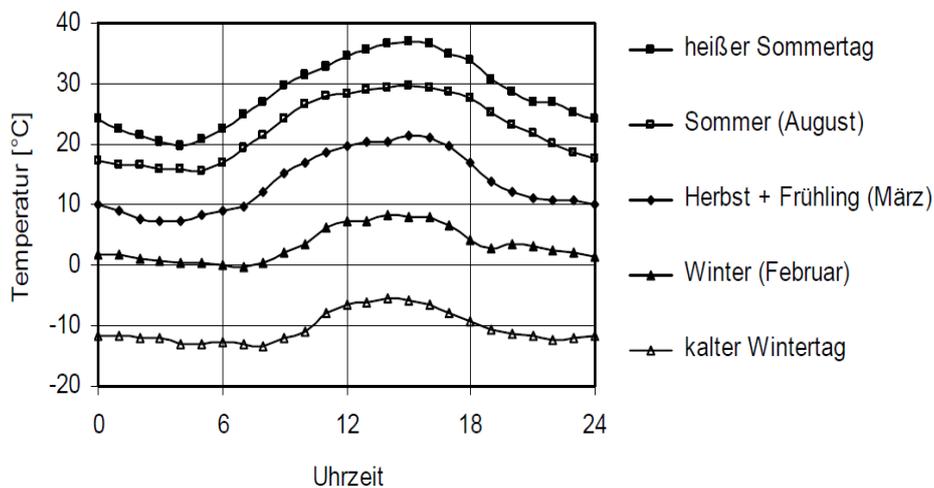


Abbildung 22: Saisonaler Temperaturverlauf in der Tragschicht Betonfahrbahn

Der Verlauf der nachstehenden Temperaturdiagramme über die ganzjährigen atmosphärischen Lufttemperaturmessungen am Messstandort in Karlsruhe zeigt, dass eine direkte Abhängigkeit zwischen der Veränderung der atmosphärischen Lufttemperaturen infolge saisonaler meteorologischer Veränderungen und den Temperaturveränderungen in den Tragschichten der Betonfahrbahn besteht.

Die Wirkung, der zeitliche Verlauf und Richtung von Wärmeströmen innerhalb der Fahrbahn- und Bodenschichten sind unter Berücksichtigung der Richtlinien für Straßenbau in Feldversuchen nachzuweisen. Das Temperaturverhalten und die Entstehung von Wärmeströmen innerhalb von unversiegelten Oberflächen sind unter Einbeziehung von langjährigen atmosphärischen Lufttemperatur- und Bodenmessungen in Regionen und Städten nachzuweisen.

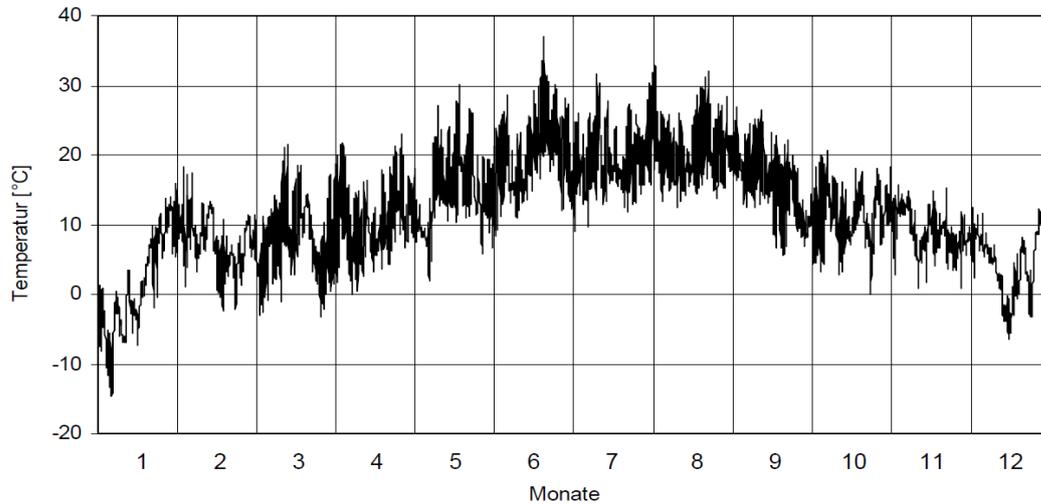


Abbildung 23: Verlauf der mittleren atmosphärischen Lufttemperatur in Karlsruhe

Die Säkularstation Potsdam<sup>166</sup> erfasst auf dem Versuchsfeld des Telegraphenberges in Potsdam seit dem 01.01.1893 täglich meteorologische Daten und Bodenmesstemperaturwerte mit einer säkularen Klimamessreihe unter Angabe von Messparametern und Methoden für Messungen und Beobachtungen des standortbezogenen Klimas. Die Bodenschichttemperaturwerte werden dreimal täglich zu verschiedenen Tageszeiten in den Bodenschichten gemessen.<sup>167</sup> Die bodennahen Temperaturwerte unterliegen der Einwirkung von wechselnden Windverhältnissen, Bewölkungsgrad, solarer Strahlung und Stunden- sowie Tagessummenwerte der Sonnenscheindauer.

Die nachstehende Abbildung 24 zeigt die Messwerte der mittleren Tagestemperaturwerte von Bodenschichten im Monat Juni des Jahres 2015 am Standort Potsdam.

---

<sup>166</sup>Vgl.: Säkularstation Potsdam: Ergebnisse der Auswertung von Messdaten des Messfeldes. Information aus dem Internet <https://www.pik-potsdam.de/services/climate-weather-potsdam> (2016).

<sup>167</sup>Vgl.: Säkularstation Potsdam: Bodenschichttemperaturwerte werden dreimal täglich zu verschiedenen Tageszeiten (07.08 Uhr, 14.08 Uhr, 21.08 Uhr MEZ) in den Bodenschichten von einer Tiefe ab 2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm, 2 m, 4 m, 6 m und 12 m gemessen. Information aus dem Internet <https://www.pik-potsdam.de/services/climate-weather-potsdam> (2016).

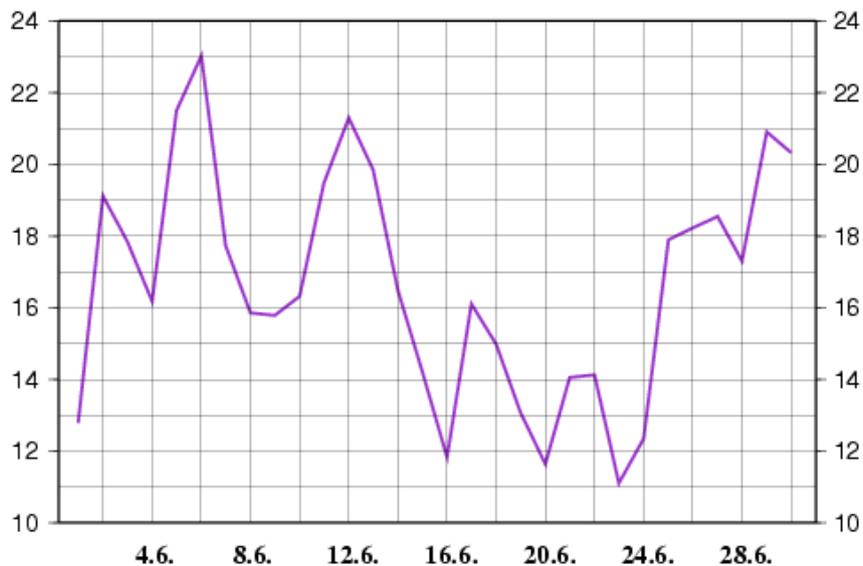


Abbildung 24: Mittlere Lufttemperaturtageswerte im Monat Juni 2015

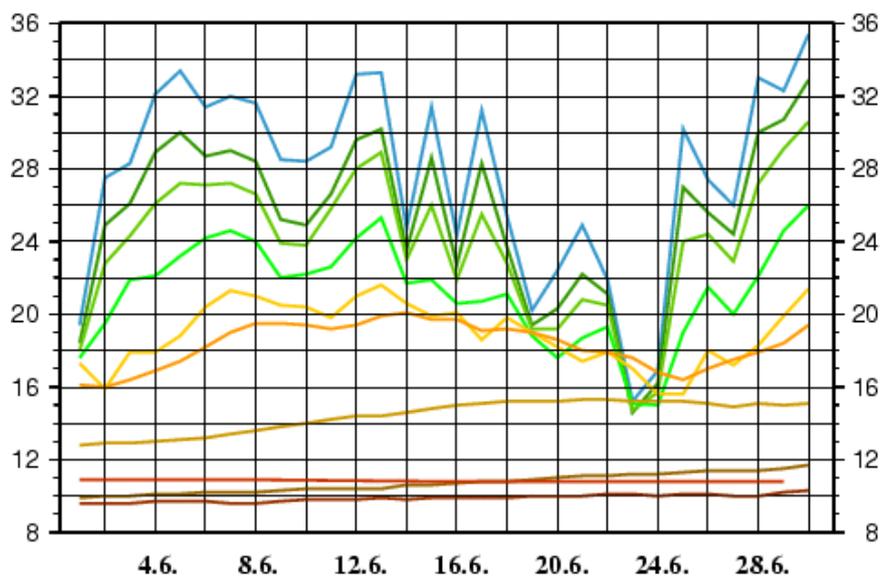


Abbildung 25: Mittlere Bodenschichttemperaturmesswerte im Monat Juni 2015

Der Vergleich der Messwerte zwischen den atmosphärischen Lufttemperaturwerten dargestellt in Abbildung 24 und den Bodenmesswerten zeigt, dass die Messwertkurven einen übereinstimmenden Kurvenverlauf zeigen. Aus dem Kurvenverlauf ist abzuleiten, dass bei einer ungestörten täglichen solaren Einstrahlung eine Erhöhung der Bodentemperaturwerte zwischen den anstehenden Bodenschichten bis zu einer Bodentiefe von 200cm zeitverzögernd sich einstellt. Ab einer Bodentiefe von 200cm bis 600cm stellt sich ein Temperaturwert von 8°C bis 11°C ein. Die Auswertung der Bodentemperaturmessdatenreihe in Abbildung 25 zeigt deutlich den Einfluss der atmosphärischen Lufttemperaturwerte auf die langsame Erwärmung der Bodenschichten. Der Wärmestrom entsteht proportional zum Vertikalgradienten der Bodenschichttemperatur in der darüber liegenden Bodenschicht. Während eines Tages mit solarer Einstrahlung bilden sich zeitversetzt

Wärmeströme (Wärmeflussdichte), die sich als Wärmewelle aufgrund des Zusammenspiels aus Wärmezufuhr, Wärmeverlust, Wärmespeicherung und Wärmeleitfähigkeit ausbreitet. Der periodische Wechsel von kurzweiliger Sonneneinstrahlung und langweiliger Wärmeabgabe führt zu unregelmäßigen Tages- und Jahrgängen in den Grenzschichten. Bodenspezifische Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten beeinflussen die Entstehung von Tages-Temperatur-Amplituden in den Böden.

Da sich die solare Einstrahlung über versiegelte und unversiegelte städtische Flächen stündlich und täglich ändert, sind Auswirkungen auf die Temperatur-Amplitude sowohl für die Tagesgänge als auch für die Jahrgänge in den Bodenschichten zu erwarten.<sup>168</sup>

Die Entstehung von thermischen Prozessen im Boden setzt voraus, dass die von der Bodenoberfläche aus in den Boden eindringende Wärmewelle mit zunehmender Tiefe immer größere Bodenvolumina erwärmen muss und damit an Intensität verliert. In Bodenschichten zwischen 10 bis 50cm verändert sich diese Phasenverschiebung derart, dass sich der Tagesgang der Bodentemperaturen entgegengesetzt richtet. In einer Bodentiefe von etwa 50 bis 100cm nimmt der Tagesgang der Bodentemperaturen ab und stagniert in einer Tiefe von 12 bis 20m. Die Bodenoberfläche ist ein instationärer Temperaturbereich, der bei regelmäßiger solarer Einstrahlung als Wärmespeicher „Boden“ kontinuierlich mit solarer Wärme gespeist wird.<sup>169</sup>

Nachts bzw. in den Wintermonaten, wenn die solare Einstrahlung an der Bodenoberfläche an Intensität verliert, kommt es zur sukzessiven Abkühlung des Bodens von oben nach unten, was zu einem Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe führt (positiver Gradient). Dieser thermische Prozess beeinflusst die Temperaturwerte der Bodenschichttiefen, die in den meisten Fällen mit zunehmender Bodentiefe größer werden (positiver Gradient).

Die Auswertung der Tages-Bodenschichttemperaturwerte zeigt, dass die Temperaturwerte der oberen Bodenschichten und die bodennahen atmosphärischen Lufttemperaturwerte in der Grenzschicht meist einen höheren Temperaturwert als die atmosphärische Lufttemperatur einnehmen (Abbildung 24). Das Jahresmittel der Bodentemperaturwerte in 50 cm Bodentiefe liegt somit über dem Jahresmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe.<sup>170</sup> Schlichting et al. ,1995 geben an, dass das Jahresmittel der Temperaturen in der Bodentiefe 1 bis 2°C höher liegt als das Jahresmittel der Lufttemperatur in 2 m Höhe. Die Boden-

---

<sup>168</sup>Vgl.: Scheffer & Schachtschabel, 2002.

<sup>169</sup>Vgl.: Scheffer & Schachtschabel, 2002.

<sup>170</sup>Vgl.: Watson 1980 und Tabelle 2.4.

temperaturwerte weisen demnach einen stärker ausgeprägten positiven linearen Trend auf als die atmosphärischen Lufttemperaturwerte. Eine Entkopplung der Boden- und Lufttemperaturwerte wird durch die Bildung von „Isolationsschichten“ wie Vegetation oder Schnee, durch Gefrieren oder Tauen, durch starke Verdunstung im Boden (zum Beispiel nach einem Niederschlagsereignis im Sommer) sowie durch starke nächtliche Ausstrahlung hervorgerufen. Infolge einer Abkühlung der Bodenoberfläche durch Niederschlag kann die Kopplung zwischen Boden- und Lufttemperaturen aufgehoben werden.

Die Temperatur der oberen Bodenschichten und die der bodennahen Luft sinken infolge der Strahlungsinversion unter die atmosphärische Lufttemperatur. In der Langzeitentwicklung zeigen zum Beispiel die langjährigen Juli-Mitteltemperaturen eine klare Beziehung zwischen den Maxima und Minima der Sonnenscheindauer und denen der Bodentemperatur. Der Jahresgang der atmosphärischen Lufttemperaturen zeigt aber keinen Zusammenhang zwischen Niederschlag und Bodentemperatur. Die Ergebnisse der Bodentempera-turauswertung beweisen, dass sowohl die atmosphärischen Lufttemperaturen als auch die Bodentemperaturwerte infolge des Klimawandels jährlich ansteigen. Mit dem Klimamodell STARS<sup>171</sup> werden Klimaszenarien bis zum Jahr 2100 simuliert. Die nachstehende Abbildung 26 zeigt den prognostizierten Verlauf des atmosphärischen Lufttemperaturanstiegs für die Stadt Bremen von 1900 bis 2100. Der Vergleich von atmosphärischen Lufttemperaturwerten während dieses Zeitintervalls weist nach, dass in deutschen Städten ein langsamer kontinuierlicher Anstieg der atmosphärischen Lufttemperaturen (Messpunkt 2 m über Grund) zu verzeichnen ist.

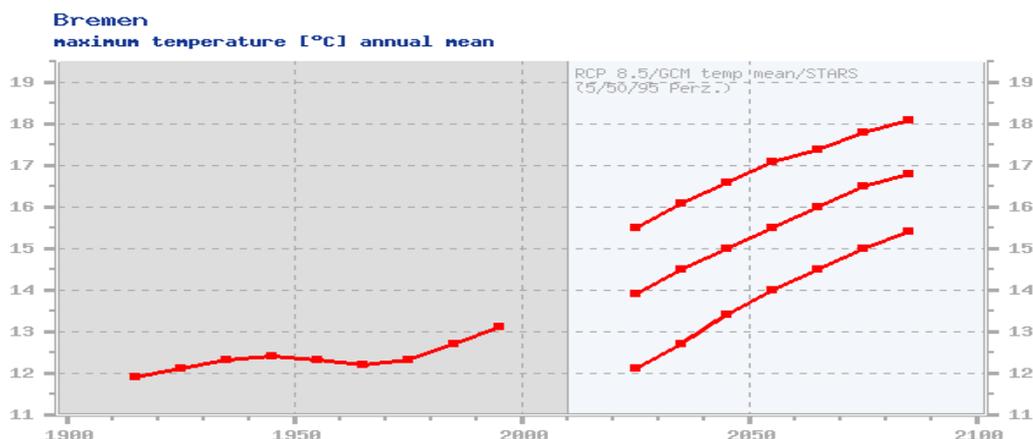


Abbildung 26: Messdiagramm Lufttemperaturen von 1900-2100 in Bremen

<sup>171</sup>Wendling, U., und Müller, J. (1984): Entwicklung eines Verfahrens zur rechnerischen Abschätzung der Verdunstung im Winter, Z. Meteorol. 34, 82-85.

## Gebäudeoberflächen und Wärmespeicherung

Im Gegensatz zur saisonalen Wärmespeicherung von horizontalen Straßenfahrbahnoberflächen und Böden weisen 90° geneigte gedämmte Gebäudefassaden aufgrund der Gebäudestellung, Art der Außenflächen, Beschattungsgrad, solarer Strahlungsintensität und Standort ein geringeres Wärmespeicherpotenzial auf. Dagegen horizontale und nach Süden mit einem Neigungsgrad von weniger als 60° ausgerichtete Dachflächen speichern über den Dachflächenaufbau oder über technische Solaranlagen. Die Standort- und Potenzialanalyse nach digitalen Oberflächenmodellen ist erforderlich um Standortfaktoren wie Neigung, Ausrichtung, Verschattung und solare Einstrahlung bewerten zu können. Zur Lokalisierung der geeigneten Gebäude werden die Gebäudegrundrisse aus den digitalen Katasterkarten entnommen. Die Grundlage der Solarpotenzialanalyse sind Laserscandaten entweder aus Luftbildern mit einer hohen Aufnahmedichte. Die Interpolation der Daten erfolgt über digitale Oberflächenmodelle nach 1 m<sup>2</sup> Rasterflächen.<sup>172</sup> Die installierte Leistung und solarthermische Kollektorfläche und das solarnutzbare Dachflächenpotenzial von thermischen Solaranlagen und PV-Anlagen in Regionen ist in der Datenbank durch die Agentur für erneuerbare Energien digitalisiert worden. Der Potenzialvergleich zeigt eine Steigerung der solaren Flächennutzung in den südlich gelegenen Bundesländern.<sup>173</sup> Die Übersicht über die Gesamtwerte der monatlichen Stromertragsdaten von PV-Anlagen in den Regionen zeigt die jährliche Entwicklung der Anlageninstallation.<sup>174</sup> Die optimale Neigung feststehender Photovoltaikmodule wird mit 28 bis 30 Grad Neigungswinkel in der Literatur angegeben. Bei einer optimalen Neigung der Photovoltaik Module steht durchschnittlich 850kWh/Jahr Stromertrag pro 1kWp installierter Photovoltaikleistung als Nutzenergie zur Verfügung.<sup>175</sup>

Im Rahmen der Nachweisführung zur Vermeidung der sommerlichen Überwärmung von Gebäuden ist die thermische Trägheit von Gebäudebauteilen in österreichischen Städten untersucht worden. Die Nachweisführung der thermischen Trägheit ist als Österreichische Norm im Jahr 1989 für die energetische Planung von Gebäuden festgelegt worden.

---

<sup>172</sup>Vgl.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg, Ermitteltes Solarpotenzial auf Dachflächen. Information im Internet unter URL <http://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflachen/potenzial-dachflachenanlagen> (2017).

<sup>173</sup>Vgl.: Agentur für erneuerbare Energien, Solare Beiträge zur Energiewende nach Bundesländern. Information im Internet unter URL <https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/HB/kategorie> (2017).

<sup>174</sup>Vgl.: Solarenergie-Förderverein Deutschland e.V.: Bundesweite Aufnahme der monatlichen Stromertragsdaten von PV-Anlagen, Aachen. Information im Internet unter URL <http://www.pv-ertraege.de/cgi-bin/pvdaten> (2017).

<sup>175</sup>Vgl.: Renewable Energy Concepts: Dachneigung-Einfallswinkel Solaranlage, Hemmingen. Information im Internet unter URL <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/erneuerbare-energien> (2017).

Grundlegend für die Nachweisführung sind die meteorologischen Daten der Regionen Österreichs, die als Berechnungsgrundlage gewählt wurden. Ziel der Untersuchung ist, das Wohlbefinden der Bevölkerung in Städten infolge Überhitzung bei einer atmosphärischen Lufttemperatur von über 27°C nachzuweisen. Die Ergebnisse der Untersuchung beziehen sich auch auf die Wärmespeicherung von Gebäuden. Auf Grund der thermischen Trägheit von Gebäudefassaden mit einer hohen Materialrohddichte stellt sich eine Veränderung des internen Temperaturverlaufes im Gebäude zum städtischen Klima ein. In den Wintermonaten ist eine Speicherung der solaren Strahlung in den Gebäudebauteilen und Außenfassaden erwünscht, damit eine Unterstützung zur Heizwärme gewährleistet werden kann. Während den Sommermonaten ist folglich eine Überwärmung der Gebäude über die Außenbauteile wie Fassaden und Dachflächen nachgewiesen worden. Die Gebäudebauteile absorbieren über die Fassadenflächen die solare Wärme. Die Gebäudeaußenbauteile kühlen aufgrund des Rückgangs der atmosphärischen Lufttemperaturen in Städten während den Nachtstunden aus, um am darauffolgenden Tag wieder als Speichermasse für die solare Einstrahlung zur Verfügung zu stehen. In den Gebäudefassaden wird die Wärme tagsüber gespeichert, wenn die Umgebungstemperatur höher ist als die Gebäudebauteiltemperatur.<sup>176</sup>

Die Wärmespeicherung in Gebäudebauteilen ist abhängig von der Rohddichte, Wärmekapazität der Bauteilkonstruktion und von dem Wärmeeindringkoeffizienten sowie der Temperaturdifferenz zwischen Bauteil- und atmosphärischer Außenlufttemperatur. Schwere Baustoffe wie Betonbauteile und Ziegelwände ohne Fassadenschutz stellen eine hohe Speichermasse als idealer Wärmespeicher zur Verfügung.

Thermoaktive Bauteilsysteme in Außenwandflächen sind für eine Rückkühlung mittels innenliegender Rohrregister geeignet. Als thermisch aktivierte Bauteile sind Fußboden, Wand und/oder Decken für die Kühlung von Gebäuden nutzbar. Eine Fußbodenflächenheizung weist eine geringere Kühlleistung auf, als eine Nutzung der Deckenbauteile. Der Vorteil ist durch die Selbstregulierung aufgrund der geringen Temperaturunterschiede zwischen Bauteilen und Luftraumtemperatur gegeben.<sup>177</sup>

Die thermische Trägheit von Bauteilen wird über den Ansatz der instationären Wärmeleitungsgleichung nach der ÖNORM EN ISO 13786 berechnet. Die Ergebnisse des Berech-

---

<sup>176</sup>Pöhn, Dr. Christian: Nachweisführung der thermischen Trägheit. Wärmespeicherung – Die ÖNorm B 8110-3, MA 39 - VFA, Bauphysiklabor.

<sup>177</sup>Vgl.: Arbeitsgruppe Ressourcenorientiertes Bauen – Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur Wien, Sommertauglichkeit im Gebäudebestand: Broschüre F1494, Wien, Februar 2011, S.21 ff.

nungsmodells beweisen, dass nach der Aufnahme von solarer Wärme in Bauteilen ein Anstieg der Wärmespeicherkapazität in Gebäudebauteilen gering nachgewiesen worden ist.<sup>178</sup>

Zur Gewährleistung der Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz sind eine lückenlose Wärmedämmung, eine hohe Luft- und Winddichtigkeit der Gebäudehülle und die Vermeidung von Wärmebrücken erforderlich. Dagegen ist die sommerliche Überwärmung von Gebäuden durch Wärmespeicherung und solarem Einfluss zu berücksichtigen. Die passive Solarenergienutzung ist nur durch eine gezielte Gebäudeplanung mit wärmespeichernden Bauteilen gewährleistet. Ein möglichst hoher passiver Direktgewinn über den solaren Strahlungseintrag ist durch einen flächengroßen Fassadenanteil an verglasten, unverschatteten Südflächen von Gebäuden zu erreichen.<sup>179</sup>

In Forschungsvorhaben ist die saisonale solare Wärmepotenzialbilanz von städtischen Gebäudeaußenflächen und Dachflächen zu versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen in Städten mit einem hohen Versiegelungsgrad zu vergleichen und nachzuweisen.

### **3.5. Erdbeobachtung und Globalstrahlung**

Die Erdbeobachtung ist für die Raumentwicklung und Landesplanung ein Instrument zur Daten- und Informationsgewinnung. Die Aufnahme von aktuellen raumbezogenen Informationen, die von einer erhöhten Position aus einem Flugzeug oder aus dem Weltall durch Satellit aufgenommen werden, ist zur Untersuchung von Oberflächen und städtischen Objekten stärker einzusetzen. Flugzeug- und satellitengestützte Sensoren erfassen kleinräumige urbane Räume, geometrische Strukturen und Erhebungen von Landschaftsstrukturen in kurzen Zeitintervallen. Die Bildaufnahmen, Koordinaten- und Oberflächen-daten werden gespeichert und in digitale Regionalkarten und Stadtatlanten übertragen.

Die nachstehende Abbildung 27 zeigt die Bildaufnahme von städtischen Flächennutzungen der Stadt München, die in einem „Urban Atlas“ übertragen und zugeordnet worden sind. Die Erfassung von Oberflächendaten versiegelter und unversiegelter Flächen erfolgt durch Fernerkundung und Datenableitung von flächendeckenden Karten des „globalen

---

<sup>178</sup>Vgl.: ÖNORM B8110-3 1999-12-01 und ÖNORM B8110-3/AC1 2001-06-01 Wärmeschutz im Hochbau, Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse, ÖNORM EN ISO 13786.

<sup>179</sup>Künzel, Helmut: Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Heizenergieverbrauch von Gebäuden, Textbeitrag in der Fachzeitschrift arcus, 1983, S. 30-34.

urbanen Fußabdrucks“. Aus den gering auflösenden Datenmengen der Sensoren wie MODIS, MERIS oder DMSOP-OLS<sup>180</sup> sind digitale Aufnahmen mit einer geometrischen Auflösung von 250m bis zu 2.000m gegeben.

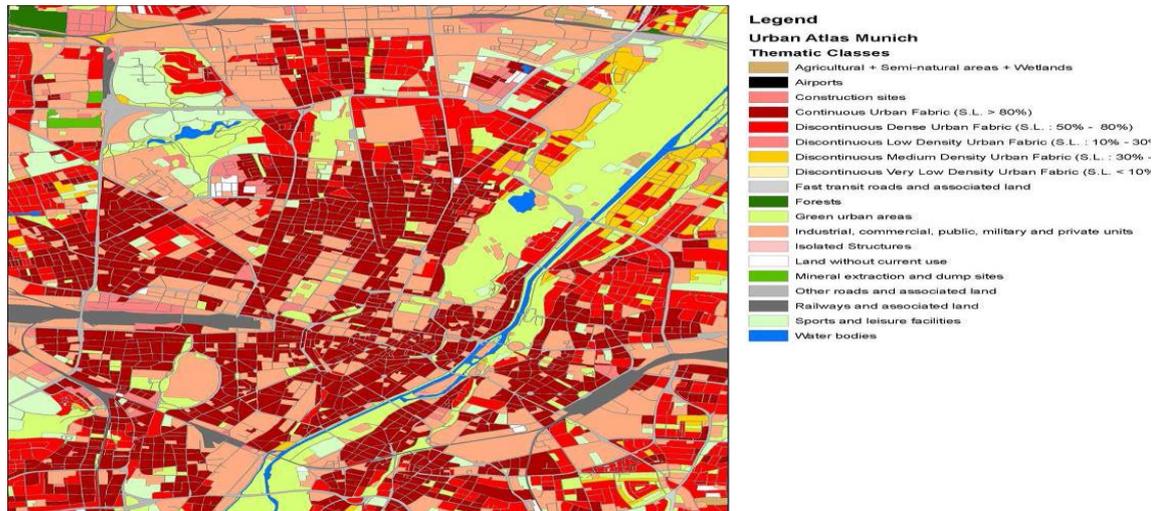


Abbildung 27: Auszug aus dem „European Urban Atlas“ am Beispiel München

Ein weiteres Beispiel sind Global Landcover 2000 (GLC00) oder GlobCover (GLOBG), die 22 verschiedene thematische Landbedeckungsklassen mit einer räumlichen Auflösung von 500m bis 1000m erfassen. Mit automatisierten Algorithmen ist eine Untersuchung aus diesen Daten mit einem Informationsmehrwert für die Regionalplanung abzuleiten.<sup>181</sup>

Datenbanken für solare Strahlungsdaten sind E.S.R.A.-European Solar Radiation Atlas und WRDC- World Radiation Data Center. Simulationsprogramme für die Planung von Solaranlagen berechnen die technische Wärmeleistung von Anlagen auf der Basis von solaren Strahlungsdaten.<sup>182</sup> Die Berechnungsgrundlage für den mittleren stündlichen solaren Strahlungswert bezieht sich auf den Zeitraum von 24 Stunden und auf die Monats- und Jahresmittelwerte der solaren Strahlung. Die Datenaufnahme der solaren Strahlung wird nach dem Zweischrittverfahren durchgeführt. Zur Synthese der solaren Tagesmittelwerte sind zwei statistische Verfahren für die Simulation von PV-Systemen etabliert worden. Das Markov-Übergangsmatrizen basierende Verfahren nach Aguiar und Collares-Pereira, das standardmäßig zum Beispiel von METEONORM verwendet wird und das autoregres-

<sup>180</sup>Vgl.: Potere et al., 2009

<sup>181</sup>Vgl.: Weng & Quattrochi, 2007; Netzband, Stefanov & Redman, 2007; Weng, 2008; Gamba & Herold, 2009; Rashed & Jürgens, 2010; Taubenböck & Dech, 2010.

<sup>182</sup>Quaschnig, Volker: Datenbanken für Solarstrahlung, Fachartikel erschienen in Sonne Wind & Wärme 8/2001, S. 39-41, Information im Internet URL <http://www.bva-solar.de> (2001), Autor vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und PL an der Plataforma Solar de Almería in Spanien.

sive Modell nach Gordon und Reddy, das in INSEL, PVCAD und PVS implementiert ist.<sup>183</sup>

Datenbanken speichern solare Einstrahlungsdaten, die für „Meteonorm“ bereitgestellt werden. Weltweite meteorologische Daten über solare Strahlungswerte und Parameter atmosphärischer Außentemperaturen, Windgeschwindigkeiten, Luftfeuchtwerte oder Luftdruckwerte stehen damit für jeden Standort zur Verfügung.<sup>184</sup> Die Klimadatenbank „Climate1“ der Universität Flensburg speichert die monatlichen Sonnenscheinstunden, Globalstrahlungswerte und Sonnenbahndiagramm Daten mit den atmosphärischen Temperatur-, Feuchtigkeits- und Niederschlagswerten für den Raum Deutschland.<sup>185</sup> Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) stellt das „STEPS-System“ auf der Basis von Satellitenbildern zur Verfügung, mit dem Vorteil, dass die Genauigkeit bei der Bestimmung der solaren Direktstrahlung verbessert wird.<sup>186</sup> Die Solarstrahlungsbestimmung wird berechnet nach Regionen, solaren Strahlungsmessungen, Messperioden, Auflösungsstrukturen und Messstandorten.<sup>187</sup> Die Qualität der Auswertung von Satellitendaten wird durch das „PVSAT-System“ erhöht. Das World Radiation Data Center (WRDC)<sup>188</sup> speichert Solarstrahlungsmesswerte weltweit.

Die Analyse zum Vergleich der globalen mittleren jährlichen Strahlungswerte in Europa stützt sich auf den Europäischen Strahlungsatlas (European Solar Radiation Atlas, E.S.R.A.), der die mittleren Jahressummen der Globalstrahlung und Maximal- und Minimalwerte zur Verfügung stellt.<sup>189</sup>

---

<sup>183</sup>Schuhmacher, Jürgen: Zum Stand der Simulation von PV-Systemen, Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, Abteilung Energie- und Halbleiterforschung. Information im Internet unter URL <http://www.insel.eu/fileadmin/insel.eu/papers/pvstatus.pdf>.

<sup>184</sup>Vgl.: Einstrahlungsdaten für jeden Ort des Planeten. Information im Internet unter URL <http://www.meteonorm.com/de/downloads>. (2016).

<sup>185</sup>Vgl.: Datenbanken für solare Strahlung – Veröffentlichung in Sonne, Wind & Wärme, 8/2001, S.39-41. Information im Internet unter URL <http://volker-quaschnig.de/artikel/solarstrahlung2/> (Stand 2016).

<sup>186</sup>Vgl.: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) - Solar Energy Symposium - Nicosia, September 2001: Assessment of Solar Resources and Sites by Satellite Remote Sensing Technology by Dr. Franz Trieb (Steps).

<sup>187</sup>Vgl.: 13. Internationales Sonnenforum Berlin: Paper - Vergleich und Bewertung verschiedener Verfahren zur Solarstrahlungsbestimmung, Volker Quaschnig, DLR e.V., 12-14.09.2002, S.1-7.

<sup>188</sup> Vgl.: World Radiation Data Center. Information im Internet unter URL <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/solar-radiation.html>.

<sup>189</sup>Schuhmacher, Jürgen: Zum Stand der Simulation von PV-Systemen, Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, Abteilung Energie- und Halbleiterforschung. Information im Internet unter URL <http://www.insel.eu/fileadmin/insel.eu/papers/pvstatus.pdf>.

Als Datenbasis dienen gemessene Mittelwerte von Wetterstationen aus den Jahren 1966 bis 1975. Die Strahlungskarten von MeteoTest<sup>190</sup> gibt für Deutschland das langjährige Jahresmittel der Globalstrahlung wieder und erreicht eine durchschnittliche mittlere Jahressumme der Globalstrahlung in den Sommermonaten von 1.221 bis 1.260 kWh/m<sup>2</sup>a und in den Wintermonaten von 901 bis 940 kWh/m<sup>2</sup>a Die Datenmenge der solaren Strahlungswerte wird von den Wettermessstationen in Städten und Gemeinden über einen Zeitraum von vierzig Jahren in Wetterdatenbanken gespeichert. Die nachstehend abgebildete Regionskarte zeigt die über den Monat März 2010 gemittelte Einstrahlleistung dargestellt nach Farbgebungsabstufungen von gelb (95-100 W/m<sup>2</sup>) über hellgrün (85 - 90 W/m<sup>2</sup>) nach dunkelgrün (71 - 75 W/m<sup>2</sup>).



Abbildung 28: Globalstrahlungskartenausschnitt Süddeutschland

Der Vergleich, der über das Jahr gemittelten solaren Einstrahlleistung in den Regionen Deutschlands zum Beispiel im Monat Juli 2011, führt zu einem Maximalwert von 179 W/m<sup>2</sup>, einem Mittelwert von 139 W/m<sup>2</sup> und einem Minimalwert von 117 W/m<sup>2</sup>.<sup>191</sup>

Dagegen erreicht die gemittelte solare Einstrahlleistung im Monat Januar 2011 nur 22 W/m<sup>2</sup> und einen Maximalwert von 60 W/m<sup>2</sup>. Die Auswertung der solaren Strahlungsdaten zeigt, dass eine effektive Nutzung von solartechnischen Anlagen nur mit einer mittleren solaren Einstrahlungsleistung von mehr als 100 W/m<sup>2</sup> gegeben ist. Eine ganzjährige Nutzung der solaren Strahlung durch technische Solaranlagen ist daher in den mittleren und südlichen Regionen der Mittelmeerländer ganzjährig von Vorteil. Der Vergleich der durchschnittlichen mittleren Jahressumme der Globalstrahlung aus Regionen in Frankreich mit Regionen in Deutschland zeigt, dass dort eine deutlich höhere Globalstrahlung (Messzeitraum von 4/2004-3/2010) von 1.821 bis 1.840 kWh/m<sup>2</sup>a gemessen worden

<sup>190</sup>Quelle: METEOTEST Strahlungskarte von Deutschland. Daten als langjähriges Mittel. Produktion: 7.4.2008/fd Scale 1:2'800'000; Projektion: DHDN\_3\_Degree\_Gauss\_Zone\_3 (ArcGIS 9.2/2007) <http://solargis.info>.

<sup>191</sup>Quelle: Deutscher Wetterdienst: Strahlungskarte Deutschland. Monatssumme und durchschnittliche jährliche Summe der Globalstrahlung in kWh/m<sup>2</sup>a, Juli 2011.

ist.<sup>192</sup> Insbesondere in der südöstlichen Mittelmeerregion und auf Korsika erreicht die durchschnittliche mittlere Jahressumme der Globalstrahlung überdurchschnittlich hohe solare Leistungswerte.

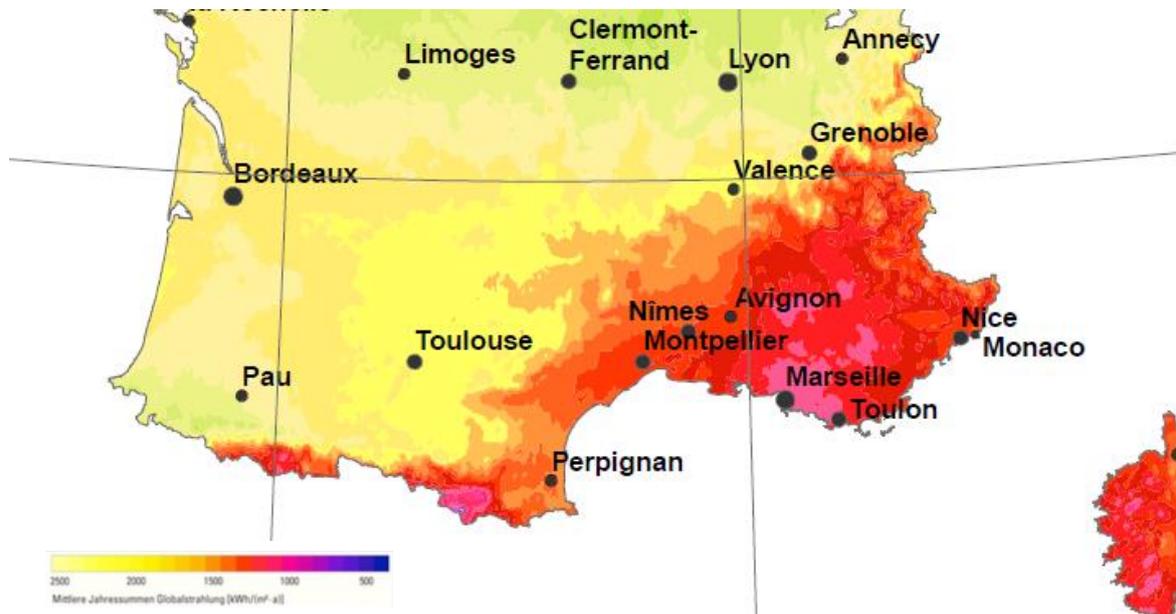


Abbildung 29: Globalstrahlungskartenausschnitt Südfrankreich

Die mittlere Jahressumme der Globalstrahlung in den Regionen von Süditalien, Sardinien und Sizilien erreicht Maximalwerte zwischen 1.901 bis 1.940 kWh/m<sup>2</sup>a.

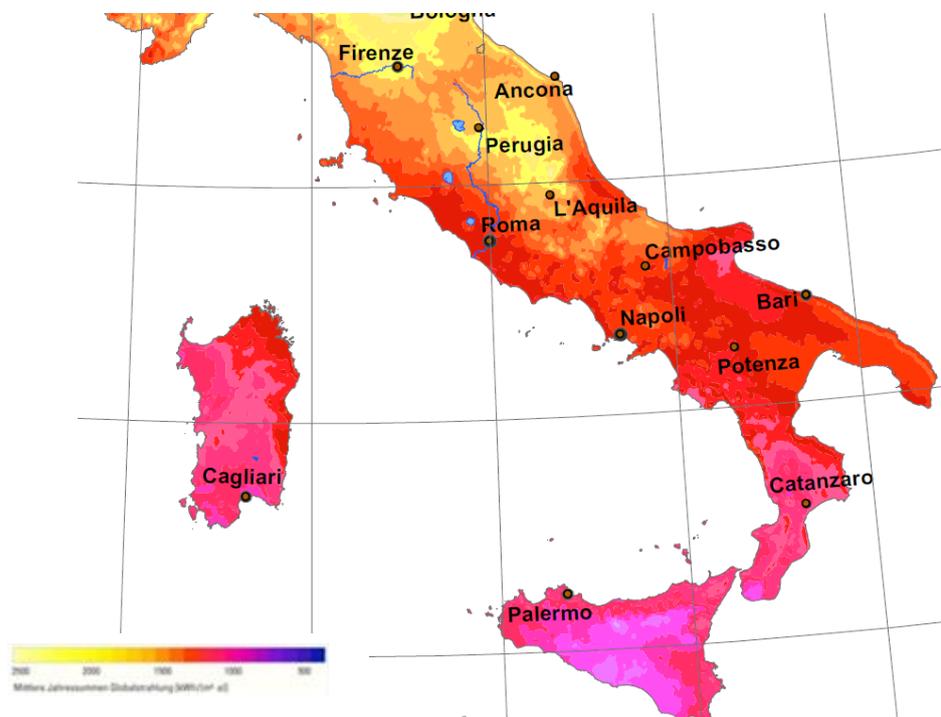


Abbildung 30: Globalstrahlungskartenausschnitt Süditalien

<sup>192</sup>Quelle: Meteotest: Strahlungskarte Frankreich, Bern. Information im Internet URL <http://www.meteotest.com>.

Die mittlere Jahressumme der Globalstrahlung in Regionen Spaniens erreichen mit 2.381 bis 2.420 kWh/m<sup>2</sup>a die höchsten Werte als in den übrigen europäischen Ländern.

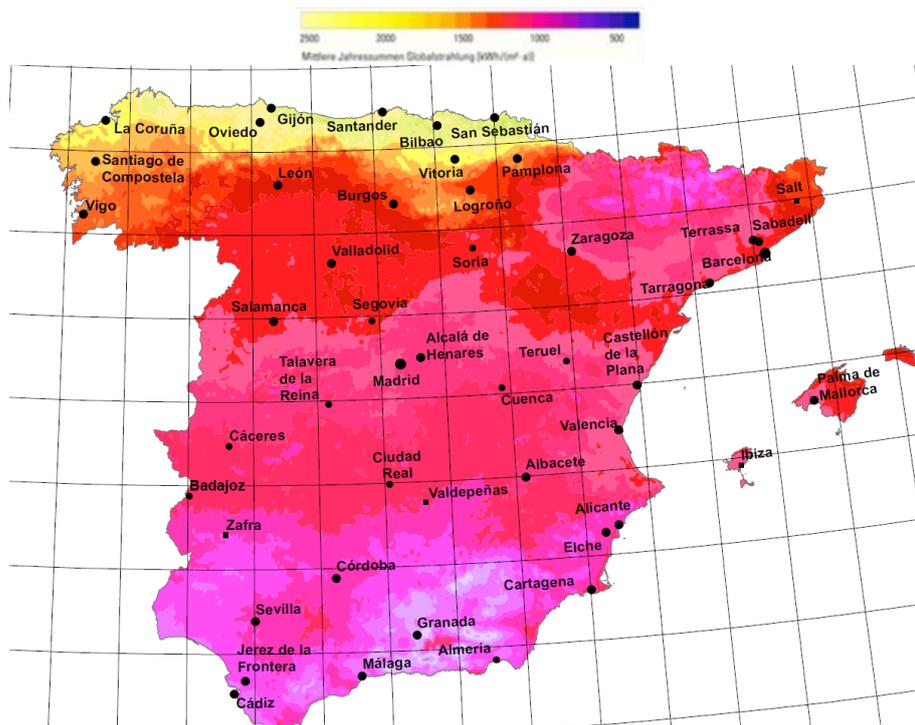


Abbildung 31: Globalstrahlungskartenausschnitt Spanien

Der Vergleich der mittleren Jahressummen der Globalstrahlung zwischen den Regionen in Deutschland zu den südeuropäischen Ländern zeigt, dass insbesondere die südlich gelegenen Regionen dreifach höhere Werte erreichen und die solare Strahlung einer effektiven Nutzung zur Warmwasserversorgung und Warmwasserspeicherung zugeführt werden kann. Die standortbezogene solare Strahlungsleistung wird durch internetgestützte Photovoltaik-Rechnersystemen zur Planung von Photovoltaikanlagen und thermischen Solaranlagen berechnet. Die detaillierte technische Auslegung der Solaranlagen wird über internetgestützte Portale gewährleistet.<sup>193</sup>

### 3.6. Meteorologische Fernerkundung

Meteorologische Fernerkundung, aufgenommen durch satellitengestützte Fernerkundungssysteme, wird seit dem Jahr 1966 direkt aufgezeichnet und in Datenbanken beim Deutschen Wetterdienst gespeichert. Seit der Umstellung auf die digitale Datenverarbeitung im Jahr 1974 hat sich der Aufwand für den operationellen Betrieb kontinuierlich auf

<sup>193</sup>Vgl.: Photovoltaikrechner. Information im Internet unter URL <http://www.renewable-energy-concepts.com> (Stand 2016).

Forschungsthemen zur Untersuchung der satellitengestützten Erkundung von meteorologischen Situationen verlagert. Die Forschungsfelder beziehen sich inhaltlich auf die Untersuchung der klimatischen Einflussgrößen und deren Prognose und Potenzialabschätzung. Das solare Strahlungspotenzial und die Wirkungen, die während der Reflexion der solaren Strahlung auf der Erde entstehen, werden über das satellitengestützten Forschungsvorhaben „SOLIS clear sky modell“<sup>194</sup> und mit dem „Direct-Modell“<sup>195</sup> unter Betrachtung der Diffusstrahlung unter Wolken untersucht. Standortbezogene meteorologische Messdatenreihen aus 1.267 Städten stellen meteorologische Daten und aktuelle Wetterinformationen und Wetterwarnungen sowie Vorhersagen für Wetterbedingungen bereits für die nächsten vierzehn Tage zur Verfügung.<sup>196</sup>

An der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg wird die Entwicklung von meteorologischen Vorhersagemodellen für die Solarenergie und Windkraft durch Forschungsprojekte untersucht. Die Auswertung von Satellitendaten zur Untersuchung der erdnahen solaren Strahlungsleistung ist durch die Satellitenaufnahme von METEOSAT 7 weitergeführt worden.<sup>197</sup> Das Forschungsfeld berücksichtigt die Analyse der auf die Erdoberfläche ankommenden Globalstrahlung durch Satellitenaufnahmen von METEOSAT 8 und HELIOSAT 2.<sup>198</sup>

Das Klima-Monitoring von EUMETSAT bezieht sich auf die Bewertung der solaren Globalstrahlung unter Berücksichtigung der Bewölkung.<sup>199</sup>

Das Forschungsprojekt zur Entwicklung einer Datenbasis „Meteo - Control“ und „Meteo-media“ der Freien Universität Berlin untersucht die Ergebnisse von Messdatenreihen,

---

<sup>194</sup>Hammer, A. et al.: direct normal irradiance for CSP based on satellite images of Meteosat second generation, Abschnitt 3. Analysis and results. Carl von Ossietzky Universität, Lehrstuhl Energiemetereologie.

<sup>195</sup>Kemper, A.: Bestimmung der Diffusstrahlung unter Wolken aus Daten des Satelitten MSG. Diplomarbeiten, Oldenburg University, Germany, 2007.

<sup>196</sup>Vgl.: Deutscher Wetterdienst (DWD); Information aus dem Internet URL <http://www.dwd.de/bvbw/appmanager>. (Dezember 2011).

<sup>197</sup>Carsten Hoyer, Christoph Schillings, Detlev Heinemann, Hermann Mannstein, Franz Trieb: SOLAR RESOURCE ASSESSMENT AND SITE EVALUATION USING REMOTE SENSING METHODS, University of Oldenburg, Faculty of Physics, Department of Energy and Semiconductor Research, World Renewable Energy Congress VII, Cologne, Germany, 29 June - 5 July, 2002.

<sup>198</sup>Kais J. AL-Jumaily, Ali M. AL-Salihi, Osama T. Al-Tai: Evaluation of Meteosat-8 measurements using daily global solar radiation for two stations in Iraq, Department of Atmospheric Sciences, College of Science, AL-Mustansiriyah University, Baghdad, Iraq, in Volume 1, Issue 4, 2010 pp.635-642 Journal homepage <http://www.IJEE.IEEFoundation.org>, 2010

<sup>199</sup>EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring: Algorithm Theoretical Baseline Document, Meteosat Solar Surface Radiation and effective Cloud Albedo Climate Data Records - Heliosat, SAF/CM/DWD/ATBD/METEOSAT\_HEL, Issue/Revision Index: 1.3, 01.11.2014

die Globalstrahlungsdaten von Wetterstationen auswerten. Die Auswertung erfolgt über das Datentool D-GRID.<sup>200</sup>

Das Institut für Meteorologie der Technischen Universität Berlin<sup>201</sup> untersucht durch das Forschungsvorhaben „Sattelitenmeteorologie“ und GRID-Datenmanagement<sup>202</sup> sowie die Megadaten der polarumlaufenden Satelliten NOAA 17 und NOAA 18 und Daten des geostationären Satelliten MSG II. Stationäre Wettersatelliten senden aus dem Weltall Daten mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 120-135 kByte aus einer Höhe von 36.000 km zur Erde.<sup>203</sup>

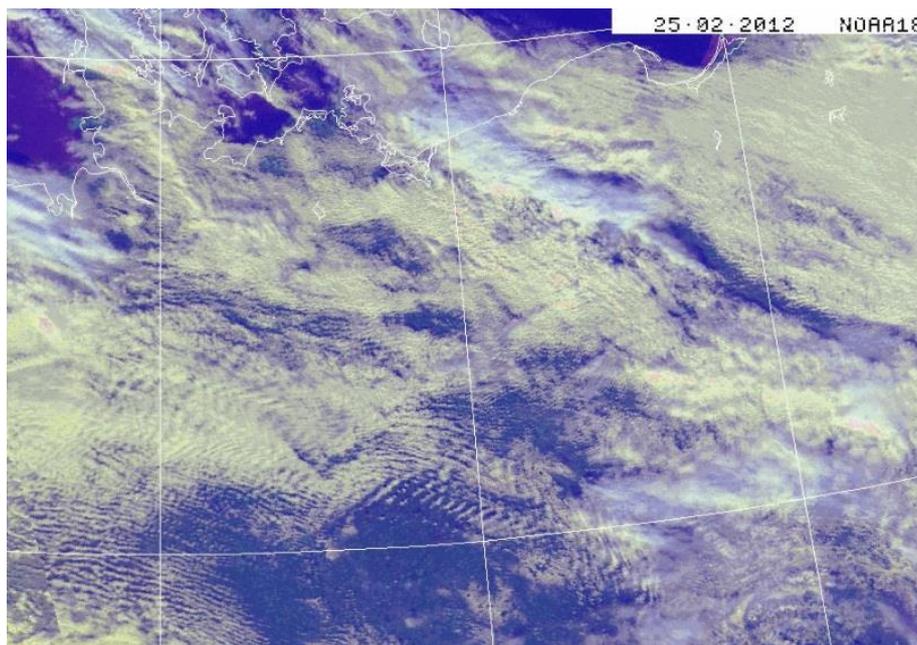


Abbildung 32: Europäisches Satellitenwetterbild vom 25.02.2012

Meteorologische Forschungsprojekte untersuchen die Entwicklung und Interpretation von Algorithmen zur Ableitung meteorologisch relevanter Größen, um Aussagen über räumliche und zeitliche Veränderungen im globalen System zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre geben zu können. Als Basis für die fernerkundungsbezogene Modellierung sind flächendeckend zum Beispiel für das Land Österreich Albedo-Zeitreihen aus MODIS-

---

<sup>200</sup>Ulbrich, U.: C3 GRID - ein Werkzeug für die Klimaforschung. Institut für Klimaforschung, Freie Universität Berlin, S.5.

<sup>201</sup>Vgl.: Technische Universität Berlin: Institut für Meteorologie, AG Sattelitenmeteorologie. Informationen im Internet URL <http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/sat/satdaten/index.html> (25.02.2012).

<sup>202</sup>Kindermann, S., Stockhaus, M., Ronneberger, K.: Intelligent Data Net Working for the Earth. C3 GRID meta - data management, System Science Community, German Climate Computing Center, Hamburg, 2007.

<sup>203</sup>Vgl.: Technische Universität Berlin: Institut für Meteorologie, AG Sattelitenmeteorologie, GOES-EST, GOES-12; GOES-WEST, GOES-11; GMS-5; Meteosat-5; Meteosat-7, Informationen im Internet URL <http://www.met.fu-berlin.de/de/wetter/satellitendaten/content cms.html> (25.02.2012).

Satellitenbilddaten erstellt worden. Unterschiedliche Methoden der räumlichen Interpolation stellen sicher, nach Zeitreihen meteorologische und geologische Daten auszuwerten und zu analysieren. In den ausgewählten Untersuchungsgebieten sind aus der Datengrundlage Flächennutzungskartierungen erstellt und mit den Satellitenbildern abgeglichen worden. Als Ergebnis ist ein idealisiertes Landnutzungsschema erstellt und quantifiziert worden.<sup>204</sup>

Die Regionalplanung und städtische Bauleitplanung ist auf unterstützende Fernerkundungssysteme durch Satellitenbilddauswertungen angewiesen, damit Flächenkartierungen mit meteorologischen Daten ergänzt werden können. Fernerkundungsbasierte Klimatologie ist ein Instrument zur präventiven Unterstützung des Bevölkerungsschutzes. Die satellitengestützte Fernerkundung erfasst die bodennahe Globalstrahlung zur Überwachung der räumlichen Ausdehnung von extremer solarer Einstrahlung. Die Analyse der solaren Globalstrahlungswerte zeigt den Trend der bodennahen Globalstrahlung auf und prognostiziert die Zunahme der solaren Strahlung in den Regionen. Die radar- oder satellitengestützte Fernerkundung ermöglicht die zeitnahe, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste, flächendeckende Erfassung von Daten. Für klimatologische Auswertungen stehen qualitativ hochwertige, aber kurze Zeitreihen mit hohem Informationsgehalt zur Verfügung, die eine Auswertung von Extremereignissen zulässt.<sup>205</sup>

Die Untersuchung der thermographischen satellitengestützten Bildaufnahme von städtischen Flächen, Gebäudeflächen und Wärmeinseleffekten in Städten ist durch städtebauliche Forschungsvorhaben in Verbindung mit dem Forschungsfeld der Meteorologie zu unterstützen.

### **3.7. Energiemarktforschung**

Die Bundesregierung hat sich zum Schutz des Klimas als politisches Ziel vorgegeben, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020, bezogen auf das Jahr 1990, um mindestens 40% zu senken. Die globale Entwicklung der regenerativen Energien zeigt eine Steigerung der Kollektorfläche auf circa 1,7 Mio. m<sup>2</sup> zur technischen thermischen Nutzung für die Wärmeversorgung von Gebäuden bereits im Jahr 2013. Die solare Stromproduktion durch Photovoltaikanlagen wird über eine Gesamtfläche von 13 Mio.m<sup>2</sup> gewährleistet.

---

<sup>204</sup>Vgl.: Ritter & Diehl, 2007.

<sup>205</sup>Vgl.: Deutscher Wetterdienst (DWD): Präsentation über Fernerkundungsbasierte Klimatologien – ein neues Instrument zur Unterstützung des Bevölkerungsschutzes, GMES Thementage, 14.-15.11.2012, Düsseldorf.

Die Studie<sup>206</sup> des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie dokumentiert jährlich die Entwicklung der erneuerbaren Energien und analysiert den Marktanteil in Deutschland. Die Investitionen von Anlagen zur solaren Nutzung sind seit dem Jahr 2015 rückgängig, da die Förderbedingungen eingeschränkt worden sind und auf andere Energiebereiche verlagert wurden.<sup>207</sup> Der prozentuale Anteil am Nutzenergiebedarf durch regenerative Energien in Deutschland teilt sich insbesondere auf in Anlagen, die biogene Festbrennstoffe, Geothermie und Solaranlagen einsetzen.

Marktwirtschaftliche Daten aus der Energiemarktforschung stehen über die Zeitreihenentwicklung der regenerativen Energien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie jährlich zur Verfügung.<sup>208</sup> Die Leitstudie Strommarkt zur Analyse ausgewählter Einflussfaktoren auf den Marktwert regenerativer Energien zeigt insbesondere, dass der Hauptgrund für die besondere Relevanz der Marktwertbetrachtung bei fluktuierenden regenerativen Energien in der eingeschränkten Steuerbarkeit liegt. Im Unterschied zu den konventionellen oder regelbaren regenerativen Kraftwerken wird verbrauchsorientiert zu produzieren eingeschränkt und eine Gewinnsteigerung über den Strommarkt erschwert.<sup>209</sup> Die Ergebnisse des Wärmemonitors Deutschlands im DWI Wochenbericht<sup>210</sup> bestätigen den Trend des rückläufigen Energiebedarfs. Datengrundlage ist die Einschätzung über die Verbrauchsanalyse der ISTA Deutschland GmbH<sup>211</sup> und des Deutschen Wetterdienstes sowie des Statistischen Bundesamtes. Ein jährlicher Anstieg des Nutzenergieverbrauchs von circa 4,7% begründet sich auf den Wechsel der milden zur kühleren Witterung.<sup>212</sup> Statistische Erhebungen zum Heizwärmeverbrauch von Haushalten durch das Statistische

---

<sup>206</sup>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Entwicklung der Regenerativen Energien in Deutschland im Jahr 2014 - Studie der Arbeitsgruppe Regenerative-Energien-Statistik (AGEE-Stat.), 2014.

<sup>207</sup>Ebd.: Aktuelle Informationen der AGEE-Stat. (Stand 2016)

<sup>208</sup>Ebd.: Zeitreihen zur Entwicklung der regenerativen Energien bis 2015. Information aus dem Internet unter <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/arbeitsgruppe-regenerative-energien-statistik>. (Stand 2016)

<sup>209</sup>Fraunhofer (ISI) Hrsg.: Leitstudie Strommarkt Arbeitspaket 4 Analyse ausgewählter Einflussfaktoren auf den Marktwert Regenerativer Energien von Jenny Winkler, Frank Sensfuß, Martin Pudlik. Karlsruhe, Juli 2015.

<sup>210</sup>Vgl.: Deutsches Institut der Wirtschaft (DIW) - Wärmemonitor Deutschland 2014: Rückläufiger Energiebedarf und lange Sanierungszyklen – Claus Michelsen, Michelsen, C., Neuhoff, K., Schopp, A. (2014): Wärmemonitor Deutschland 2013: Gesunkener Heizenergiebedarf, gestiegene Kosten. DIW Wochenbericht 41/2014.

<sup>211</sup> Vgl.: ISTA Deutschland: Forsa-Studie und Energiemanagement Optimales Management ihrer Energieverbräuche. Information im Internet unter <https://www.ista.com/de/loesungen/energiemanagement/> (2016).

<sup>212</sup>Vgl.: Regionaldatenbank des statistischen Bundesamtes. Information im Internet unter URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung> (2017).

Bundesamt bestätigen ebenfalls, dass die Veränderung des globalen Klimas Auswirkungen auf den Gebäudewärmebedarf hat.<sup>213</sup>

Die Heizkostenabrechnungen sind Grundlage für die Verbrauchsprognosen, da detaillierte Informationen zum Nutzenergieverbrauch, Abrechnungszeitpunkt, Energieträgerwahl und Energiekostenbilanz zur Verfügung stehen. Der aus den Verbrauchsdaten berechnete rückläufige Wärmeenergiebedarf ist in einigen Jahren von einer erheblichen Reduzierung der Heizkosten regional beeinflusst begleitet worden. Statistische Untersuchungen zum Nutzenergieverbrauch auf der Grundlage von ausgestellten Energieausweisen von Mehrfamilienhäusern zeigen, dass energetische Sanierungsvorhaben von Bestandsgebäuden zur Energieeinsparung auch durch eine effiziente Heizanlagentechnik in Deutschland bis zu 75 Jahren dauern. Die Heizungsmodernisierung ist seit dem Jahr 2000 in 49% der Wohnungen nach den Ergebnissen des Bundesverbandes umgesetzt worden, da das Alter der Heizungsanlagen mehr als 20 Jahre beträgt. Das Anlagenalter von Heizungsanlagen ist Ursache von einem Anstieg des Energieverbrauchs, Betriebskosten sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>214</sup> Die Regionaldatenbank zeigt die Datenstruktur des Wohnungsbestandes mit 41,4 Mio. Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die jährliche Erhöhung des Wohnungszuwachses zum Vergleichsjahr 2000 wird prognostiziert mit 6,8%.<sup>215</sup>

Die Regionaldatenbank des statistischen Bundesamtes stellt Daten über das Vorkommen von Zentralheizungen zur Verfügung und zeigt, dass die Anzahl von zentralen Wärmeerzeugern in Gebäuden um 70% abnimmt und der Anteil der Fernwärme auf 13,5% anwächst. Die Fernwärme nimmt zur Versorgung von Wohngebäuden einen Anteil von 5,2% und zur Versorgung von Wohnungen 13,5% ein. In Deutschland werden insgesamt 5,5 Mio. Wohnungen mit Fernwärme versorgt. Die Versorgung mit Strom zur Bereitstellung von Heizenergie entspricht einem Anteil von 4,1%. In 27% der Wohnungen und in 34% der Ein- und Zweifamilienhäusern wird neben der primären Heizung noch ein zweiter Wärmeerzeuger genutzt. Mit einem Anteil von 72% steht die zentrale Warmwasserversorgung in Wohnungen an erster Stelle und wird bereits mit 11% durch solarthermische Anlagen unterstützt. Die Betrachtung von Heizungssystemen zeigt, dass die Erdgas-

---

<sup>213</sup>Bundesverband Regenerative Energie e.V.(Hrsg.): REPAP 2020, Ausbauprognose der Regenerative-Energien-Branche für Deutschland, Stand 30.11.2009.

<sup>214</sup>Vgl.: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: BDEW Studie zum Heizungsmarkt „Wie heizt Deutschland?“, Juli 2015, S. 13ff.

<sup>215</sup>Vgl.: Regionaldatenbank des statistischen Bundesamtes. Information im Internet unter URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Bauen> (2017).

Zentralheizung in Wohngebäuden einen Anteil von 40,5% und in Wohnungen einen Anteil von 36,1% einnimmt. Die leitungsgebundenen Heizungssysteme erzielen bei den Wohngebäuden einen Marktanteil von 56,1% und bei den Wohnungen von 63,5%. Die leitungsgebundene Versorgung mit fossilen Energieträgern von Städten und Gemeinden bildet das Kerngeschäft der Energieversorgungsunternehmen. Die Zentralheizung versorgt circa 18,9 Mio. Wohnungen und 15 Mio. Gebäude mit Wärme. Das Heizungssystem nimmt einen Marktanteil von 78% ein wie auch Etagen-, Fernwärme- oder Einzelheizungsanlagen.

Für den zukünftigen Ausbau der erneuerbaren und regenerativen Energien des Stromsektors<sup>216</sup> hat sich die Bundesregierung weitere ambitionierte Ziele gesetzt, die den Anteil des erzeugten Stroms aus regenerativen Energien am Strommarkt auf mindestens 80% bis zum Jahr 2050 erhöhen sollen. Weitere Etappenziele sind bis zum Jahr 2025 mit 40 bis 45% und bis zum Jahr 2035 mit 55 bis 60% anvisiert. Mit der Verabschiedung des Regenerativen-Energie-Wärmegesetzes (EEWärmeG) ist beabsichtigt, den Anteil an regenerativen Energien für die Wärmeversorgung auf 14% bis zum Jahr 2020 zu erhöhen.<sup>217</sup> Die Bruttostromerzeugung aus regenerativen Energien im Jahr 2016 beträgt 29% in Deutschland. Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) und der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) stellen jährliche Energiebilanzen der Länder über den Primärenergie- und Endenergieverbrauch zur Auswertung zur Verfügung.<sup>218</sup>

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft stellt regionale Daten über die Verteilung von Heizungssystemen in Gebäuden und Wohnungen der Länder zur Verfügung. Die Verteilung ist sehr unterschiedlich und ist insbesondere auf geografische, soziografische oder gebäudehistorische Gründe zurückzuführen. Städtebauliche Einflussfaktoren sind unter anderem die Bebauungsdichte, Ausbauzustand der Energienetze sowie die regionale Baukultur und Architektur. Der fossile Energieträger Erdgas wird im Norden und in der Mitte Deutschlands stärker eingesetzt als in den südlichen Bundesländern.

---

<sup>216</sup>Bundesverband Regenerative Energie e.V. (Hrsg.): Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gesetzes zur Förderung Regenerativer Energien im Wärmebereich (Regenerative-Energien-Wärmegesetz - EE-WärmeG) BT-Drs. 18/6885 der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN sowie zur Unterrichtung durch die Bundesregierung - Erfahrungsbericht zum Regenerative-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG-Erfahrungsbericht) BT-Drs. 17/11957). Stand 12.02.2016.

<sup>217</sup>Vgl.: Forschungszentrum Jülich (PtJ) - Energetische Biomassennutzung, Bekanntmachung über die Forschung und Entwicklung zur kosten- und energieeffizienten Nutzung von Biomasse im Strom- und *unglücklicher Seitenumbruch* Wärmemarkt „Energetische Biomassennutzung“, 09. Juli 2015, Bekanntmachung veröffentlicht am 21. Juli 2015, BAnz AT 21.07.2015 B1.

<sup>218</sup>Vgl.: Länderarbeitskreis Energiebilanzen (LAK): Energiebilanzen der Länder. Information im Internet unter <http://lak-energiebilanzen.de/wp/download/ArchivBilanzen/Bremen/2014/Energiebilanz> (2016).

Besonders hohe Marktanteile besitzen die Erdgas-Heizungssysteme in Niedersachsen (64,4%), Bremen (59,9%) und Nordrhein-Westfalen (57,7%). Die Fernwärmeversorgung ist in den Stadtstaaten im Norden und Osten Deutschlands traditionell stark vertreten. In Berlin werden 15,3% aller Wohngebäude mit Fernwärme beheizt. In den südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg ist die Öl-Zentralheizung mit circa 41% noch immer das am meisten verbreitete Heizungssystem.<sup>219</sup>

Das Forschungsprojekt Gebäude, Klimaschutz und Kommunikation (GEKKO)<sup>220</sup> an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg untersucht die Akzeptanzpotenziale zur Anwendung von regenerativen Energieversorgungssystemen mit Blick auf die Erfüllung von Nachhaltigkeitskriterien für den Klimaschutz in Städten und Gemeinden. Im Portfolio des Forschungsprojektes stehen individuelle Energieberatungen, Kommunikationsforen und Beratungen zur Analyse der Wirtschaftlichkeit. Der Abschlussbericht<sup>221</sup> des Forschungsprojektes zeigt insbesondere auf, dass politische Hemmnisse und Kommunikationsdefizite im Umsetzungsprozess für eine nachhaltige Energieversorgung mit den beteiligten Akteuren und den kommunalen Entscheidungsträgern bestehen. Die Ziele des Forschungsprojektes fokussieren sich daher insbesondere auf die nachhaltige Energieversorgung von Bestandsgebäuden in Städten und Gemeinden, um einen wirksamen Beitrag zum Schutz des Klimas und zur Reduzierung des Wärmeenergiebedarfs zu erreichen. Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Befragung der kommunalen Entscheidungsträger und Energieversorger zeigt, dass circa 90%<sup>222</sup> des städtischen Nutzenergiebedarfs zur Bereitstellung von Gebäudewärme und Warmwasser erforderlich ist. Die vorgenommene Vergleichsbetrachtung zum Nutzenergiebedarf in Städten in Deutschland zeigt, dass zur Bereitstellung von Wärmeenergie für Wohngebäude ein Nutzenergiebedarf von 40 bis 60% für kommunale Energiekonzepte angenommen werden muss. Das Verbraucherverhalten zur Abnahme von Wärme- und Stromenergie ist abhängig von Energiepreiserhöhungen. Bauliche Wärmedämmmaßnahmen, eine effiziente Heizanlagentechnik und die Änderung des Nutzerverhaltens führen zu einem jährlichen Rückgang des Gebäudeheizwärmever-

---

<sup>219</sup> Vgl.: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: BDEW Studie zum Heizungsmarkt „Wie heizt Deutschland?“, Juli 2015, S. 1-33.

<sup>220</sup> Paech, Niko: Forschungsprojekt GEKKO der Universität Oldenburg; Gebäude, Klimaschutz und Kommunikation: „Informieren! - Anschauen! - Mitmachen! Nirgends kann so viel Energie und Geld gespart werden wie im Gebäudebereich“. CENTOS - Oldenburg Center for Sustainability Economics and Management, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät II, Oldenburg.

<sup>221</sup> Ebd.: Abschlussbericht zum Forschungsprojekt GEKKO, S. 126-134.

<sup>222</sup> Ebd.: Forschungsgrundlagen und theoretische Grundlagen zur zweiten Basisstudie, S. 2 ff.

brauchs und zu einer Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs. Die technische Aufklärung zur Anlageneffizienz, Heizungsanlagensystemwahl, Betriebswirtschaftlichkeit und Investitionskosten zeigt, dass im Rahmen der Aufklärungskampagnen und Beratungsleistungen von Kommunen für Gebäudeeigentümer, Wohngesellschaften und Endenergieverbraucher die Akzeptanzförderung für das Energiesparen deutlich verbessert worden ist.<sup>223</sup> Die Untersuchungsergebnisse lassen den Schluss zu, dass Wissensdefizite über Finanzierung und Förderung von besonderer Bedeutung sind oder die Rentabilität bestimmter technischer und baulicher Maßnahmen unterschätzt wird. Die klimaschonende Sanierung von Bestandsgebäuden erfordert aufgrund seiner Komplexität einerseits einen beträchtlichen finanziellen Aufwand und andererseits ein aus individueller Sicht außerordentliches Investitionsprojekt für den Bauherrn. Die Verkürzung von Innovationszyklen mit neuen Lösungen oder die Umplanung von Versorgungsvarianten sind geeignet, die Multioptionalität des gebäudebezogenen Klimaschutzes zu erhöhen. Das Analyseergebnis zeigt auch, dass eine erforderliche Vernetzung der kommunalen Schlüsselakteure für die Umsetzung der Klimaschutzanforderungen erforderlich ist. Die Entwicklung von interaktiven Systemen zur Akzeptanzförderung von regenerativen Energiesystemen in Regionen, Städten und Gemeinden sowie die Festlegung von nachhaltig geprägten Leitzielen zur Steuerung einer klimaorientierten und umweltfreundlichen Stadtentwicklung unterstützen den kommunalen Strategieansatz für eine klimaschutzorientierte städtische Bauleitplanung.<sup>224</sup> Das EnGeno Forschungsprojekt der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg „Transformationspotenziale von Energiegenossenschaften mit postfossilen Dezentralisierungsstrategien zur Energiewende“ untersucht die dezentralen Energieversorgungsmodelle in Kommunen. Das Projekt analysiert die Entstehung von Motiven der Vernetzungsstrategien von Energiegenossenschaften, die Stabilisierung von Management- und überorganisationale Ko-Evolutionsprozesse sowie genossenschaftlich organisierte Lösungen der Wirtschaftlichkeits-, Institutionalisierungs- und Vernetzungsbedingungen. Detaillierte Forschungsergebnisse stehen dem Autor bisher nicht zur Verfügung.<sup>225</sup>

---

<sup>223</sup>Ebd.: Forschungsgrundlagen und theoretische Grundlagen zur zweiten Basisstudie, S. 12 ff.

<sup>224</sup>Paech, Nico: Forschungsprojekt GEKKO, Gebäude, Klimaschutz und Kommunikation. Endbericht. S 1-140. Information im Internet unter <http://www.gekko-oldenburg.de/images/stories/gekko-endbericht-normale-auflosung.pdf>.

<sup>225</sup>Vgl.: EnGeno - Transformationspotenziale von Energiegenossenschaften mit postfossilen Dezentralisierungsstrategien zur Energiewende (bmbf-projekt), Positionspapier Bürgerbeteiligung-Energiedemokratie-Dezentralität? Kernziele der Energiewende in Gefahr?. Information im Internet unter [http://engeno.net/wp-content/uploads/2013/09/EnGeno\\_Positionspapier\\_Langfassung.pdf](http://engeno.net/wp-content/uploads/2013/09/EnGeno_Positionspapier_Langfassung.pdf). (Stand 2015).

Aus den genannten Projektergebnissen sind Empfehlungen für Forschungsprojekte abzuleiten, die die erschließbaren Marktpotenziale für regenerative Energiesysteme, Kundenpotenziale, Strategien für Kleinanlagen-Contracting und die Verwendung von kohlenstoffarmen Energieträgern für moderne Heizungsanlagentechnik zur dezentralen städtischen Quartierswärmeversorgung untersuchen.

### **Ergebnisse repräsentativer Bevölkerungsumfragen**

Repräsentative Umfragen des Umweltbundesamtes<sup>226</sup> zur Untersuchung des Umweltbewusstseins der Bevölkerung in Deutschland im Auftrag der Bundesregierung zeigen, dass eine überwiegende Zustimmung von 78% der Befragten zur Umsetzung von klimapolitischen Handlungsmaßnahmen gegeben ist. Die Auswahlentscheidung für Mieterinnen und Mieter fokussiert sich nicht generell auf den Energiebedarf des Wohngebäudes oder der Wohnung, sondern primär auf die Lage des Wohnortes und Verkehrsanbindung. Mieterinnen und Mieter von Wohnungen haben sekundär ein großes Interesse an einer kostengünstigen allgemeinen Energieversorgung.<sup>227</sup>

Die Befragung der politischen Entscheidungsträger von Regionen und Städten in Europa, initiiert durch die Versammlung der Regionen Europas (VRE)<sup>228</sup> im Jahr 2009, zeigt, dass die Übertragung der politischen Eigenverantwortung für Kommunen durch eine selbständige Bewilligung von Förderprogrammen die Vorgaben der Energie- und Klimaschutzpolitik unterstützen würden. Die Auswertung der Umfrageergebnisse zeigt eine Zustimmung von 91% der Befragten für eine prioritäre Veränderung des Energieversorgungssektors in den nächsten 15 Jahren und dass somit eine regionale Energieversorgungsstrategie unter Berücksichtigung des Klima- und Umweltschutzes langfristig möglich ist. Die Befragungsergebnisse verdeutlichen, dass eine strukturierte Energieversorgungsplanung und wirtschaftliche Förderung durch die internationale, europäische und nationale Politik erforderlich ist, um den Anteil der regenerativen Energien in Regionen und Städten flächendeckend erhöhen zu können.

---

<sup>226</sup>Vgl. Umweltbundesamt (UBA): Umweltbewusstsein in Deutschland 2014 - Ergebnis einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, Stand 2015. Hrsg. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Referat Öffentlichkeitsarbeit, 11055 Berlin. Förderkennzeichen dieser Studie 371317100.

<sup>227</sup>Ebd.: Kapitel 7.5, S. 52.

<sup>228</sup>Versammlung Regionen Europas (VRE): Umfrage unter den Regionen Europas in 66 Regionen von 24 Ländern, 2009, Information aus dem Internet URL <http://www.aer.eu> (2010).

Die Forsa-Umfrage 2016 „Energieversorgung und Energiewende“ fokussiert sich auf den globalen Klimawandel und auf die Ressourcenknappheit an fossilen Energieträgern. Die höchste Priorität nehmen die Energiekosten und die Versorgungssicherheit ein. Die Ergebnisse aus weiteren Forsa-Umfragen bestätigen, dass die Mehrheit der Bürger in Deutschland den Ausbau von regenerativen Energien unter Beibehaltung der derzeitigen Fördermittelstrategie für Regionen befürwortet. In den norddeutschen Bundesländern, wo die regenerativen Energien mit Windkraftanlagen bereits einen hohen Anteil an der Stromversorgung einnehmen, fordert die Mehrheit der Befragten, dass mit dem weiteren Ausbau der regenerativen Energien sensibler umgegangen werden sollte.<sup>229</sup>

Die Agentur für regenerative Energien beweist anhand von aktuellen Daten und statistischen Ergebnissen, dass für die Erzeugung von Wärmeenergie für Gebäude mit regenerativen Energien zur Umsetzung der Energiewende immer noch ein hoher Primärenergieanteil erforderlich ist.<sup>230</sup>

Die Akzeptanzumfrage 2016 von TNS Emnid zeigt, dass eine sichere Zukunft mit Hilfe der Energiewende zum Klimaschutz mit dem weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien gegeben sein kann.<sup>231</sup> Die Unabhängigkeit von Energieimporten und die Chance, sich an der eigenen Energieversorgung zu beteiligen, sind wichtige Beweggründe dafür, dass die Mehrzahl der Bürger bereit ist, den Umstieg auf regenerative Energien zu unterstützen.<sup>232</sup>

Die Ergebnisse der repräsentativen Umfrage von TNS Emnid im Auftrag von Primagaz über das kommunale Energieversorgungssystem zur Strom- und Wärmeerzeugung zeigen, dass 32% der Befragten erdgasbetriebene Mikro-Blockheizkraftwerke zur dezentralen Versorgung von Wohngebäuden akzeptieren. Die Errichtung und der Betrieb von Mini-Blockheizkraftwerken in Regionen, Städten und Gemeinden mit 5.000 bis 20.000 Ein-

---

<sup>229</sup>Vgl.: Forsa-Institut: Umfrageergebnisse aus der jährlichen Forsa-Umfrage zur Akzeptanz der regenerativen Energien in Deutschland 2010. Information aus dem Internet URL <http://www.unendlich-viel-energie.de> (2010).

<sup>230</sup>Vgl.: Agentur für Regenerative Energien, Informationen aus dem Internet unter <http://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/D/kategorie/top+10> (Stand 2015).

<sup>231</sup>Vgl.: Tns Emnid -Umfrage: Durchführung der Umfrage im Jahr 2016 unter Beteiligung von Architektur- und Ingenieurbüros, Bauunternehmen und gewerblichen Bauträgern über Erfahrungen „ein Jahr nach Inkrafttreten des Regenerativen-Energie-Wärmegesetzes (EEWärmeG)“, Information aus dem Internet URL <http://www.agenda21.darmstadt.de> (2016).

<sup>232</sup>Vgl.: Meinungsumfrage der TNS Emnid 2013. Bürger befürworten Energiewende und sind bereit, die Kosten dafür zu tragen. (Stand 2015)

wohnern werden primär befürwortet. Im Gegensatz zu den Städten mit mehr als 500.000 Einwohnern stehen dezentrale Energieversorgungsstrukturen nicht im Fokus.<sup>233</sup>

Der Bundesverband Regenerativer Energien e.V. stellte im Jahr 2009 eine Marktanalyse zur Entwicklung der Jahreszahlen regenerativer Energien auf und stellte bereits fest, dass der Gesamtanteil an regenerativen Energien im Wärmeversorgungssektor um 9,6% angestiegen ist.<sup>234</sup>

Die Veränderung der Wärmeversorgungsstruktur in Deutschland unter Berücksichtigung der Eckdaten von 2014 wird im Szenario SZEN-15 „100“ abgebildet.<sup>235</sup> Die Einzelversorgung von Gebäuden und Wohnungen mit Heizöl und Erdgas wird sich daher langfristig reduzieren und durch Biomasse, Solarkollektoren, Umweltwärme und Geothermie teilweise ersetzt werden. Die Wärmebereitstellung mit KWK-Anlagen in Wärmenetzen durch fossile Energieträger, Biomasse, Geothermie und Wasserstoff erhöht sich langfristig auf circa 26% des Wärmebedarfs. Zusätzlich erschließt sich die Strom- und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien durch neue Nutzungsbereiche mit einem wachsenden Wärmepumpenmarkt, einem verstärkten Einsatz der industriellen Prozesswärme sowie durch die Nutzung von Stromüberschüssen. Mittelfristig erfolgt eine Abschwächung des bereits geringen Wachstums auf dem Wärmemarkt, da durch politische Vorgaben im Regenerativen-Energie-Gesetz die Biomasse als Energieträger stärker gefördert wird. Der Wärmebeitrag aus KWK-Anlagen, der sich in den letzten Jahren durch die Stromerzeugung aus Biomasse deutlich erhöht hat und auf 24% der gesamten Biomassewärme angestiegen ist, wird durch die Vorgaben des Erneuerbaren-Energie-Gesetzes (EEG) zurückgehen. Die Biomasse stellt mit 86% den größten Anteil am Wärmeversorgungsmarkt. Die solare Wärme, Umweltwärme, Erdwärme und Geothermie nehmen einen Anteil von 1,3% am Nutzwärmebedarf für Wohngebäude ein.<sup>236</sup>

Das Bundesamt für Geologie und Rohstoffe veröffentlicht die „Marktanalyse über geothermische Energien und Energierohstoffe“ auf der Basis der wissenschaftlichen For-

---

<sup>233</sup>Vgl.: Mikro-Blockheizkraftwerke. Textbeitrag: Jeder Dritte kennt die Technik in Hausbaunachrichten. Informationen im Internet unter URL <http://www.bonner-bauen.de/hausbau-ratgeber/hausbau-nachrichten-bonn/>, Bonn, 23.04.2012.

<sup>234</sup>Vgl.: Bundesverband Regenerativer Energien e.V. - Studie zur Entwicklung der Jahreszahlen für Regenerative Energien, 2009.

<sup>235</sup>Nitsch, Joachim: Kurzexpertise für den Bundesverband Regenerative Energien e.V. - SZEN-15 - Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Eckdaten des Jahres 2014. Stuttgart, 19. April 2015, S. 4 ff.

<sup>236</sup>Ebd.: S. 26-27.

schungsergebnisse nach Lund et al., 2005.<sup>237</sup> Die Wahl der bivalenten Heizungsanlagen-systeme mit Unterstützung von Wärmepumpenanlagen wird von 56,5% der Befragten befürwortet. Ein hoher Marktanteil der geothermischen Nutzung in Europa ist in den Ländern Schweden und Island sowie in der Türkei zur Direktwärmenutzung für Wohnge-bäude und Wohnsiedlungen erzielt worden.<sup>238</sup>

---

<sup>237</sup>Vgl.: Bundesamt für Geologie und Rohstoffe (Hrsg.): Veröffentlichung von Energierohstoffen 2009, Kapitel 7.1, 2005.

<sup>238</sup>Bundesamt für Geologie und Ressourcen (Hrsg.): Regionale Verbreitung genutzter Vorkommen, Kapitel 7.3.3, S. 185, 2003.

## 4. Grundlagen

Der interdisziplinäre Ansatz dieser Arbeit erfordert die Berücksichtigung der Themenfelder Klima und Meteorologie, Regional- und Stadtentwicklung, Städtebaurecht, Umweltschutz, Wärmelehre und Bauphysik sowie Strategien der städtischen Energieversorgung. Die physikalischen Grundlagen zur Berechnung von Wärmeströmen in versiegelten und unversiegelten Bodenschichten beziehen sich auf Forschungsergebnisse der wissenschaftlichen Literatur und der Fachliteratur Bauphysik und Wärmelehre. Die Untersuchung des solaren Speicherpotenzials von unversiegelten und versiegelten Flächen bezieht sich primär auf die meteorologischen Einflüsse in Regionen und an den Versorgungsstandorten in urbanen Gebieten. Das solare Wärmestrompotenzial bildet sich in Trag- und Bodenschichten von städtischen Quartieren und wird beeinflusst durch meteorologische Bedingungen und Standorteinflüsse. Die solare Strahlungsintensität erreicht über die Grenzschicht die städtischen Oberflächen und wird zeitversetzt in den anstehenden Bodenschichten gespeichert.

### 4.1. Meteorologie und globales Klima

Die Atmosphäre der Erde bildet sich aus der Stratosphäre, Mesosphäre und Thermosphäre. In den atmosphärischen Schichten<sup>239</sup> bilden sich das Wettergeschehen, das globale Klima und jahreszeitabhängige Wettersituationen. Die Ozonschicht bildet sich in der Stratosphäre.<sup>240</sup> Die nachstehende Abbildung 33 zeigt den Schichtaufbau der Atmosphäre in Abhängigkeit zur Höhe über der Erdoberfläche und den Temperaturwerten dar. Die äußersten atmosphärischen Schichten der Erde bilden die Thermosphäre und die Mesosphäre mit Temperaturen von bis zu 1.000°C. In 80 km Höhe trennt die Mesopause die Thermosphäre von der Mesosphäre und in circa 50 km Höhe bildet die Stratosphäre die Grenzschicht zur Tropopause.

Die Stratopause trennt die Mesosphäre von der darunterliegenden Stratosphäre, in der sich Ozon bildet und die ultraviolette solare Strahlung absorbiert wird.

---

<sup>239</sup>Vgl.: Alexander: Temperatur- und Höhenangaben der Atmosphäre, 2004, S. 229.

<sup>240</sup>Vgl.: Klima der Erde: Information im Internet URL <http://klima-der-erde.de/atmosphaere.html> (2010).

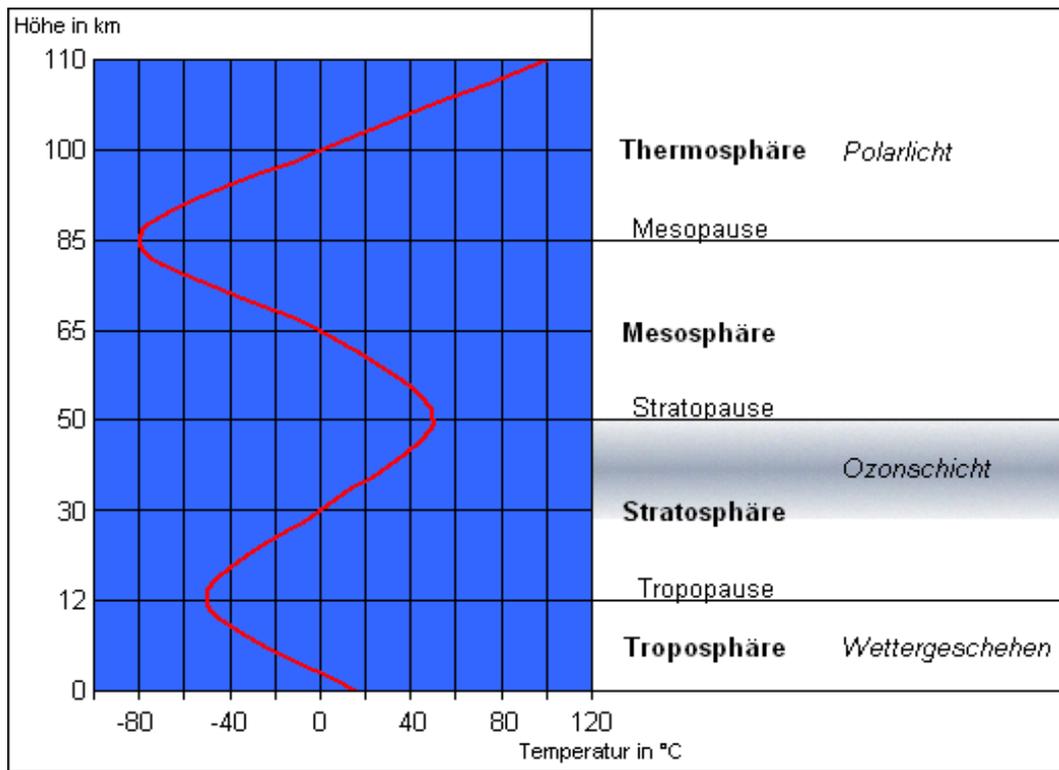


Abbildung 33: Darstellung des Schichtaufbaus über der Erdatmosphäre

Die Bildung von Ozon ( $O_3$ ) bedingt die Absorption der kurzwelligeren ultravioletten Strahlung und wird durch die Absorption der langwelligeren solaren Strahlung verursacht. Sowohl für die Ozonbildung als auch für den Ozonabbau wird die lang- und die kurzwellige UV-Strahlung benötigt. Dadurch wird in der Ozonschicht die UV-Strahlung nahezu vollständig absorbiert, sodass auf die Erdoberfläche das sichtbare Licht und die infrarote Strahlung als Wärmestrahlung auftreffen. Unter der Grenzschicht der Tropopause befindet sich die Troposphäre, in der sich das Wettergeschehen bildet. In dieser atmosphärischen Schicht erwärmt sich die aufsteigende Warmluft und kühlt wieder ab. Dadurch entstehen Temperatur- und Luftdruckunterschiede, die für die Bildung von Windströmungen, den Bewölkungsgrad, die atmosphärischen Lufttemperaturen und Wetterereignissen verantwortlich sind. Die globale atmosphärische Mitteltemperatur steigt im Laufe des letzten Jahrzehnts trotz stetig steigender Treibhausgaskonzentrationen an. Die globale Mitteltemperatur in Bodennähe wird in der Regel als primärer Indikator der beobachteten Klimaerwärmung genutzt.<sup>241</sup> Klimaindikatoren wie zum Beispiel Ozeantemperaturen, Meeresspiegelanstieg, Gletscherschmelze und der Rückgang des arktischen Meereises zeigen ein

<sup>241</sup>Vgl.: Umweltbundesamt (UBA): Globale Erwärmung im letzten Jahrzehnt? Herausgeber: Umweltbundesamt Fachgebiet I 2.1 „Klimaschutz“, Dessau-Roßlau, 09.2013.

deutliches Bild der globalen Erwärmung in Übereinstimmung mit dem wissenschaftlichen Verständnis des Klimasystems. Beobachtungen über die Erwärmung der Ozeane und des Meeresspiegelanstiegs deuten darauf hin, dass es aufgrund eines kontinuierlichen Anstieges der Treibhausgaskonzentrationen zu einer weiteren Erwärmung des globalen Ozeans über tiefere ozeanische Schichten unterhalb von 700 Metern Wassertiefe gekommen ist. In Übereinstimmung mit dieser globalen Veränderung steht die Erfassung von meteorologischen Messergebnissen und die Beobachtung mehrerer La Niña-Ereignisse im letzten Jahrzehnt. Es ist daraus zu schließen, dass eine kurzzeitige verstärkte Wärmeaufnahme durch den Ozean nicht den langfristigen Trend der globalen Mitteltemperatur ändern kann. Die Erdatmosphäre und die Ozeane stehen in einem ständigen Wärmeaustausch miteinander, sodass die Ozeane einen Teil der aufgenommenen Wärme wieder abgeben.<sup>242</sup>

Neben der in den letzten Jahren im Hinblick auf den prognostizierten Klimawandel wichtiger gewordenen Überwachung des Austausches von Treibhausgasen zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre ist die Bestimmung der einzelnen Terme der Energiebilanzgleichung an der Grenzfläche zwischen Erde und Atmosphäre ein besonders wichtiges Untersuchungsgebiet der Mikrometeorologie, wobei insbesondere auch die Untersuchung der Abhängigkeit der verschiedenen Terme von der Beschaffenheit der Erdoberfläche von Bedeutung ist. Die Energiebilanz für eine ideale Oberfläche (eben, horizontal homogen, großflächig und undurchlässig für Strahlung) gehen nur vier Energieflüsse ein. Neben der Nettostrahlung sind diese der fühlbare und der latente Wärmestrom sowie der Bodenwärmestrom.<sup>243</sup>

Die instationären Einflüsse, die das Klima an einem Standort auf der Erde bestimmen, werden als Klimafaktoren<sup>244</sup> bezeichnet. Ernst Neef unterteilt auf der Basis von wissenschaftlichen Untersuchungen die Klimaklassifikation in Klimazonen und Klimatypen ein.<sup>245</sup> Genetische Klimaklassifikationen sind ableitbar aus der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre. Ein Ort wird anhand seiner Lage in einem bestimmten Windgürtel einer bestimmten Klimazone zugeordnet. Effektive Klimaklassifikationen beruhen auf Zusam-

---

<sup>242</sup>Ebd.: S.6ff. (Trenberth 2013, Rahmstorf 2013)

<sup>243</sup>Steinfeld, Gerald: Die Beurteilung von Turbulenzmess- und Analyseverfahren der Mikrometeorologie durch virtuelle Messungen innerhalb von Grobstruktursimulationen, von der Fakultät für Mathematik und Physik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Dissertation, Hannover 2009, S. 2ff.

<sup>244</sup>Freie Universität Berlin: Das Lernportal zur Einführung in die physische Geographie. Klimageographie, Information aus dem Internet unter <http://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/klimageographie> (Stand2015).

<sup>245</sup>Vgl.: Klimatypen der Erde von Ernst Neef. Information im Internet URL <http://klima-der-erde.de> (2010).

menhängen zwischen Klimaelementen und der Vegetation. Die ökologische Klimaklassifikation wird somit definiert.<sup>246</sup>

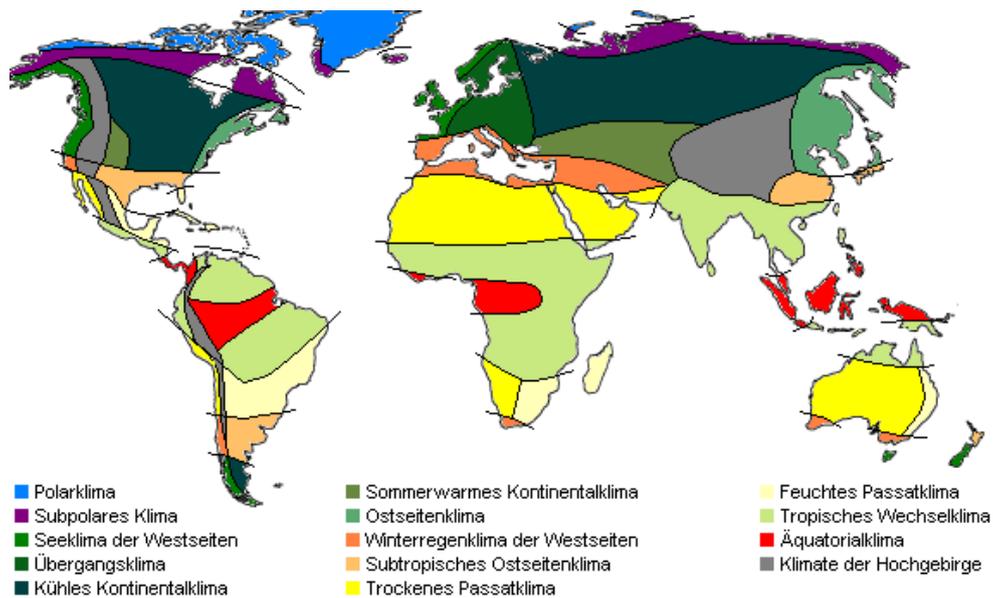


Abbildung 34: Darstellung der Klimatypen der Erde nach Neef

Die Kontinentalfläche Europas wird nach E. Neef in Klimatypen des Seeklimas der Westseiten, Übergangsklima und Winterregenklima der Westseiten eingestuft. Die geographische Lage Europas ist durch verschiedene Klimazonen<sup>247</sup> gekennzeichnet, in denen erhebliche Temperaturunterschiede zwischen den atmosphärischen Lufttemperaturen und den Niederschlagsmengen festzustellen sind. Im Norden Europas ist das Seeklima der Westseiten von einem kurzen und kühlen Sommer, einem langen und sehr kaltem Winter geprägt. Dieser Klimatyp wird durch die Einflüsse der Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter bestimmt und setzt sich aus dem Seeklima, Übergangsklima und Landklima zusammen. Die vorherrschende Windströmung gelangt von Westen nach Osten und transportiert im Sommerhalbjahr kühle und feuchte Luftmengen nach West- und Mitteleuropa. Diese klimatischen Veränderungen sind von der geographischen Breite, der Geländehöhe und der Bodenreliefstruktur abhängig.

<sup>246</sup>Lauer, W.: Klimatologie - Klimaklassifikationen geben das vielschichtige Ineinander der Klimaelemente und Klimafaktoren sowie deren Wirkungen auf die Erdoberfläche in Klimatypen wieder, die ihrerseits als Klimagürtel, Klimazonen, Klimagebiete usw. ihren kartographischen Niederschlag finden. 1995, S. 188.

<sup>247</sup>Vgl.: Karte der WMO-Regionen, Europa VI. Informationen aus dem Internet unter (<http://www.wmo.int/images/squares/nature/regions.jpg>)

Meteorologische Forschungsergebnisse zeigen, dass die geographische Breite<sup>248</sup> verantwortlich ist für die Entstehung der atmosphärischen Lufttemperaturen an einem geographischen Standort. Temperaturmessungen der atmosphärischen Lufttemperaturen an Messstationen am Nordpol, in Mitteleuropa und am Äquator bestätigen diese Annahme. Die Erhöhung der atmosphärischen Lufttemperaturen am Äquator wird durch den steileren Einfallswinkel der solaren Strahlung verursacht, da folglich ein geringeres Luftvolumen erwärmt werden muss als an den Polkappen. Küstenstandorte haben in der Regel dadurch mehr Niederschlagsmengen zu verzeichnen als Standorte im Binnenland. In den Höhenlagen der Gebirgsregionen nehmen die atmosphärischen Lufttemperaturen im Verhältnis zur Geländehöhe kontinuierlich ab. An den Luvseiten der Gebirgshänge werden mehr Niederschlagsmengen gemessen als an den Leeseiten der Gebirge.<sup>249</sup>

Die regionale Einstufung der Niederschlags- und Temperaturveränderungen vom Atlantik bis nach Sibirien wird als Kontinentalität bezeichnet und stützt sich auf die klimatischen Auswirkungen der Wärmespeicherfähigkeit von Oberflächengewässern. Das Meerwasser nimmt in der Sommerperiode die solare Strahlungsenergie auf und gibt diese dann in der Winterperiode wieder an die atmosphärische Umgebungsluft ab. Der Kontinentalitätsgrad einer Region wird durch die Berechnungsgleichung wie folgt ermittelt:<sup>250</sup>

$$(1) \quad K = 260 \times \Delta T / \text{geogr. Breite}$$

$$(2) \quad \Delta T = T_{\max} - T_{\min}$$

Aufgrund der spezifischen Temperaturwerte  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$  und Niederschlagsveränderungen in den Regionen wird der Kontinentalitätsgrad ermittelt. Die klimatologische Situation in Regionen ist nach dem Kontinentalitätsgrad  $K < 100$  als maritim/ozeanisch,  $100 < K < 200$  als kontinental und  $K > 200$  als hochkontinental bestimmbar. Die Deutung der Klimaklassifikation ist so zu erklären: „Ein kontinentales oder hochkontinentales Klima ist durch starke Temperaturschwankungen geprägt. Das Klima der Erdoberfläche ist der langfristig gemittelte Atmosphärenzustand mit seinen Wechselwirkungen an der Erdoberfläche. Der räumliche meteorologische Wandel ist kontinuierlich. So ist jede Klassifikation des irdischen Klimas ein Konstrukt zum besseren Verständnis eines an sich grenzenlo-

---

<sup>248</sup>Vgl.: Definition der geographischen Breite: Information aus dem Internet URL <http://klima-der-erde.de/klimatologie.html>.

<sup>249</sup>Vgl.: Europas Landschaftsgürtel beeinflussen unsere Lebensweisen. Das Klima in Europa, Nr.10, Information aus dem Internet URL <http://www.cornelsen.de> (2009).

<sup>250</sup>Vgl.: Definition Kontinentalität,  $K$  = Kontinentalitätsgrad;  $\Delta T$  Temperaturamplitude; Differenz zwischen Maximum und Minimum der Temperatur nach Iwanow.

sen Wandels.<sup>251</sup> Die wissenschaftlich internationale Forschung der Klimavariabilität ist seit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Hochleistungsrechner in Verbindung mit modularen Softwarelösungen durch die Anwendung von geographischen Informationssystemen beschleunigt worden.<sup>252</sup>

Bauphysikalische klimabereinigte Berechnungsprogramme<sup>253</sup> generieren zum Beispiel Daten von standortbezogenen Klimadatenbanken auf der Basis von Klimafaktoren für Standardberechnungen des Heizwärmebedarfs von Gebäuden. Die Festlegung von Klimazonen und Klimaregionen in Deutschland ist nach DIN V 4108 eingestuft.<sup>254</sup> Langjährig erfasste meteorologische Datenreihen werden in Datenbanken des Deutschen Wetterdienstes gespeichert und für die Vorhersage der globalen Erwärmung genutzt.

#### 4.1.1. Wettermessdatennetze und Klimadiagramme

In der wissenschaftlichen Fachliteratur wird die Darstellungsmethodik mit Temperatur-Niederschlagsdiagrammen<sup>255</sup>, Klimadiagrammen nach Walter-Lieth<sup>256</sup> und ökologischen Klimadiagrammen<sup>257</sup> zur Einstufung und Bewertung der meteorologischen Verhältnisse in Regionen beschrieben.

Die meteorologischen Messdatenreihen aus den Wettermessdatennetzen stehen über einen Zeitraum von circa 30 Jahren zur Verfügung und sind in geographischen Übersichtskarten dargestellt. 11.000 Wetterstationen und 1.723 Stationsmessungen in Europa erfassen meteorologische Messdaten. 1.040 globale Messstationen<sup>258</sup> registrieren Klimadaten zur Untersuchung des weltweiten Klimas. Die Messung von Erdbodentemperaturen wird über 287 Messstationen in den Regionen gewährleistet. Das meteorologische Stationsmessnetz

---

<sup>251</sup>Vgl.: Zitat nach Frankenberg, 1988, S. 6.

<sup>252</sup>Hogewind, Florian: „Raumzeitliche Analyse der Klimavariabilität anhand von hochaufgelösten interpolierten Klimakarten am Beispiel von Europa (Region VI der Weltorganisation für Meteorologie), Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2011, S. 6 ff. und S.64 ff.

<sup>253</sup>Vgl.: Bauphysikalisches Berechnungsprogramm der Universität Siegen CASAnova; Klima-bereinigtes Berechnungsprogramm auf der Basis von 12 Klimaregionen, 2007.

<sup>254</sup>Vgl.: DIN V 4108 - Festlegung der Klimazone für Deutschland mit 12 Klimaregionen.

<sup>255</sup>Vgl.: Niederschlagsdiagramm: Die Temperaturen werden als Linie dargestellt, die Niederschläge als Säule (Säulendarstellung) oder als Kurve. Informationen im Internet unter URL <http://klima-der-erde.de/klimadiagramm.html> (2010).

<sup>256</sup>Vgl.: Wikipedia: Klimadiagramme stellen Niederschläge und Temperaturen als Linie dar. Information im Internet unter URL <http://klima-der-erde.de/klimadiagramm.html>.

<sup>257</sup>Vgl.: Institut für Ökologie, TU Berlin. Information im Internet unter URL <http://lv-twk.oekosys.tu-berlin.de/project/lv-twk/035-abb05-klimadiagramm.htm> (2016).

<sup>258</sup>Vgl.: World Meteorological Organization (WMO). Information im Internet unter URL [https://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate\\_observation\\_networks\\_systems.php](https://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_observation_networks_systems.php) (Stand 2016).

des Deutschen Wetterdienstes im Land Bremen erfasst stündlich Daten von 34 Messstationen innerhalb und außerhalb des städtischen Gebietes.<sup>259</sup>

Die Wetterdatenbank des Deutschen Wetterdienstes<sup>260</sup> speichert die mittleren meteorologischen Messdatenreihen seit dem Jahr 1970 nach den Vorgaben der WMO<sup>261</sup>, die von den Wettermessstationen des Messnetzes in Regionen und Städten aufgezeichnet werden. Wetterwarten, Flugwetterwarten und Wetterstationen erfassen stündlich oder 24-stündig die meteorologischen Standortdaten. Die Daten der meteorologischen Parameter Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Bodentemperaturen, Niederschlag, Schneehöhe und solare Strahlungsleistung stehen dadurch am Messstandort zur Verfügung und werden in Datenbanken zur Archivierung abgelegt für die Modellierung von numerischen Wettervorhersagemodellen.

Im Gegensatz zur meteorologischen Datenerfassung und Beobachtung durch terrestrische Wetterstationen, die aufgrund der Standortdistanz und Anzahl der Stationen in Regionen und Städten Standortdaten erfassen, sind meteorologische Beobachtungen durch Wettersatelliten und geostationäre Wettersatelliten flächendeckend mit einer hohen zeitlichen Wiederholungsrate detaillierter nutzbar. Die Satellitendaten von METEOSAT 7-10, METOP A und B, NOAA 15-19, EOS Aqua und EOS Terra, Suomi-NPP und Jason 2 werden zur Analyse der numerischen Wettervorhersage in Datenbanken eingespeist.<sup>262</sup>

Das Portal der Wetterdatenbank GAISMA<sup>263</sup> registriert täglich weltweit standortbezogene Wetterdaten, die über Messstationen erfasst werden.<sup>264</sup> In der nachstehenden Abbildung 35 zeigt das Messdiagramm den zeitlichen Verlauf des Sonnenstandes mit Sonnenaufgang, Sonnenuntergang (gelber Bereich) und den Neigungswinkel der Sonne für den

---

<sup>259</sup>Vgl.: Deutscher Wetterdienst – Stationslexikon Messnetz nach Bundesländern, Information im Internet unter URL [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mnetzkarten/messnetz\\_eb.pdf](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mnetzkarten/messnetz_eb.pdf) (Erdbodentemperaturen des Nationalen Klimadatenzentrums), Stand 11.05.2016.

<sup>260</sup>Vgl.: Online-Wetterdatenbanken des Deutschen Wetterdienstes, Information aus dem Internet URL <http://wetter.com>. und <http://www.deutscher-wetterdienst.de>.

<sup>261</sup>Vgl.: World Meteorological Organization. Informationen im Internet unter URL <http://www.wmo.int/pages/> Stand (2016).

<sup>262</sup>Vgl.: Satellitendaten der Meteorologie, Information im Internet unter URL [http://users.met.fu-berlin.de/~HeinerBilling/picture/avhrr\\_archiv/noaa19tag.gif](http://users.met.fu-berlin.de/~HeinerBilling/picture/avhrr_archiv/noaa19tag.gif). (2016).

<sup>263</sup>Vgl.: GAISMA Datenbank: Darstellung von Sonnenaufgang und Sonnenuntergang (grün und orange) im Kalenderjahr, standortbezogene Sonnenstunden (gelb) in Städten Europas; Darstellung, Finnland, NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center New, M., Lister, D., Hulme, M. and Makin, I., 2002: A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research* 21; vgl.: Amante, C. and B. W. Eakins, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, March 2009. Information im Internet unter URL <http://Gaisma.com> (2010).

<sup>264</sup>Vgl.: GAISMA Wetterdatenbank: Information im Internet unter URL <http://www.gaisma.com>.

Standort Hannover. Die Messergebnisse sind für die Planung von städtischen Solarprojekten als Datengrundlage geeignet.

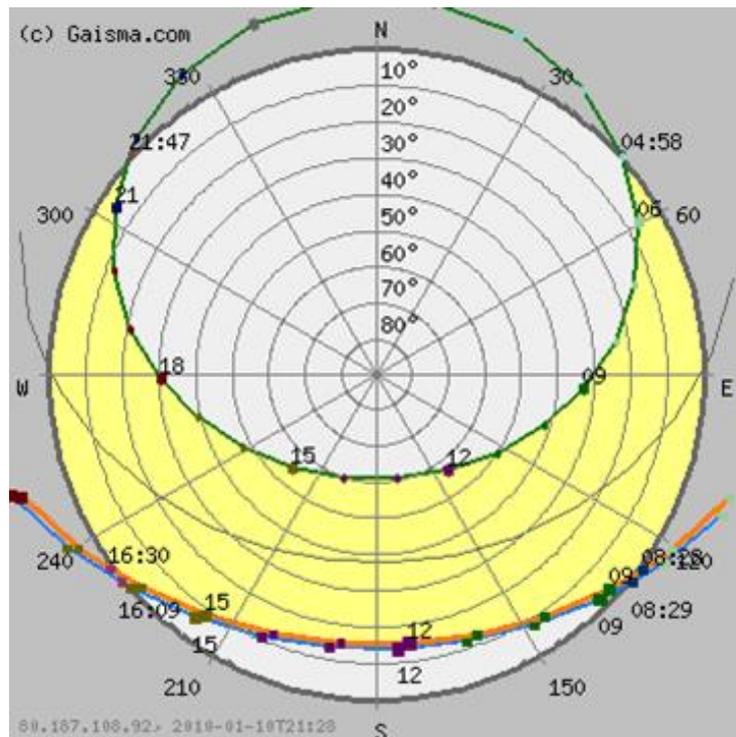


Abbildung 35: Sonnenstand am Standort Hannover (2014)

Das nachstehende Messdiagramm zeigt den jährlichen nach Monaten dargestellten Phasenverlauf der Sonne am Standort Hannover. Die Auswertung des Diagramms im Bereich des roten und blauen Messkurvenverlaufs zeigt den stündlichen solaren Strahlungszeitraum zwischen den Winter- und Sommermonaten.<sup>265</sup>

---

<sup>265</sup>Vgl.: GAISMA Wetterdatenbank. Information im Internet unter URL <http://www.gaisma.com/en/info/help.html>. (Stand 2016)

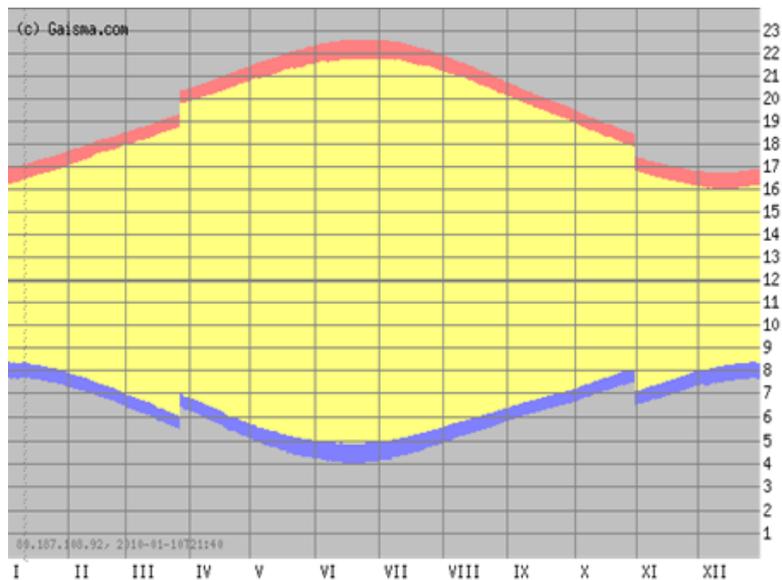


Abbildung 36: Phasenverlauf des Sonnenstandes am Standort Hannover

Der gelbunterlegte Flächenbereich stellt das jährliche solare Strahlungspotenzial ohne die Beeinflussung von meteorologischen Ereignissen am Messstandort dar.

Die standortbezogenen meteorologischen Messdaten sind in der nachstehenden Abbildung für den Messstandort dargestellt.

Variable (Daten)	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
<b>Insolation, kWh/m<sup>2</sup>/day</b>	0.65	1.29	2.29	3.63	4.71	4.79	4.75	4.15	2.77	1.56	0.78	0.51
<b>Clearness, 0 - 1</b>	0.31	0.35	0.38	0.43	0.45	0.42	0.43	0.45	0.40	0.35	0.30	0.29
<b>Temperature, °C</b>	1.04	1.55	4.23	8.23	13.50	16.23	18.67	18.88	14.60	10.28	4.79	1.82
<b>Wind speed, m/s</b>	7.10	6.05	5.96	4.92	4.77	4.73	4.90	4.88	5.28	5.65	6.19	6.60
<b>Precipitation, mm</b>	53	41	47	51	62	74	73	70	53	48	55	61
<b>Wet days, d</b>	15.6	12.8	14.3	14.4	14.4	15.5	15.3	15.0	13.8	13.4	15.5	16.7

Abbildung 37: monatliche meteorologische Mittelwerte der Wetterdaten

Die tabellarisch aufgeführten meteorologischen mittleren monatlichen Messdaten sind als Datengrundlage nutzbar für die Erstellung einer solaren Potenzialanalyse in Abhängigkeit von Bewölkungsgrad, Windgeschwindigkeit und Regenhäufigkeit für Regionen und Städte.

Die Erweiterung zur Messung des atmosphärischen Luftdrucks<sup>266</sup> präzisiert wetter- und klimawirksame Phänomene, atmosphärische Zirkulation und die Entstehung von Klimazonen am Messstandort. Luftdruck und atmosphärische Lufttemperaturen stehen umge-

<sup>266</sup>Vgl.: Wikipedia – Definition Luftdruck: Der Luftdruck ist der Druck, den eine atmosphärische Luftsäule aufgrund ihres Gewichtes auf ihre untere Begrenzungsfläche ausübt.

kehrt proportional zueinander. Die atmosphärischen Druckunterschiede in der Atmosphäre sind verantwortlich für die Entstehung von Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten. Druck- und Lufttemperaturdifferenzwerte an Berghängen bestimmen Luftströmungen mit Steig- und Fallwinden, dagegen Aufwinde erzeugen Föhnwinde.<sup>267</sup>

#### 4.1.2. Solare Strahlung

Die Energiequelle der Erde ist die solare Strahlung mit  $1.370 \text{ W/m}^2$  und ist die Solarkonstante<sup>268</sup>. Infolge der Bahnexzentrizität schwankt der Abstand zur Erde jahresperiodisch zwischen  $1,471 \cdot 10^8 \text{ km}$  und  $1,521 \cdot 10^8 \text{ km}$ . Die Bahnexzentrizität beeinflusst die solare Strahlung der Erdoberflächen mit maximaler Strahlungsleistung von  $1.325 \text{ W/m}^2$  bis  $1.420 \text{ W/m}^2$ . Die auf die Erdoberfläche auftreffende solare Strahlungsleistung schwankt je nach Regionen zwischen  $700 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  in Europa bis  $2.350 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  in afrikanischen Wüstenregionen<sup>269</sup>.

Umwelteinwirkungen, Klimabedingungen und die geographische Lage beeinflussen die solare Strahlungsleistung. Der rechnerische Durchschnittswert für die Globalstrahlung wird mit  $342 \text{ W/m}^2$  angenommen.<sup>270</sup> Die solare Strahlung trifft auf die Wolkenschichten und wird absorbiert oder reflektiert. Ein geringer Anteil diffundiert hindurch und erreicht die Erdoberfläche. Lichtanteile, die über die Reflexion der Wolkenschichten und über Feuchtigkeits- und Staubteilchen die Erdoberfläche erreichen, bilden schließlich die diffuse Strahlungsleistung. Anteile der diffusen solaren Strahlung und Anteile der solaren Direktstrahlung bilden zusammen die Globalstrahlung. Die auftretende solare Gegenstrahlung erzeugt den natürlichen globalen Treibhauseffekt und gewährleistet die Stabilisierung der atmosphärischen Durchschnittstemperatur von durchschnittlich  $15^\circ\text{C}$  auf der Erdoberfläche. Der reflektierte solare Strahlungsanteil von circa 51% wird von der Erdoberfläche absorbiert.<sup>271</sup>

---

<sup>267</sup> Vgl.: Schönwiese, 2003.

<sup>268</sup> Vgl.: Definition Solarkonstante: Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt  $3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$ , Information im Internet unter URL <http://wikipedia.de>.

<sup>269</sup> Vgl.: Sonnenenergie und Potenzial der Sonnenenergie (Stand 2011), Information im Internet unter URL <http://wikipedia.de>

<sup>270</sup> Vgl.: Definition solare Strahlung und Globalstrahlung: Zur Messung des Momentanwertes der Globalstrahlung dienen Pyranometer. Information im Internet unter URL <http://www.wikipedia.org> (2011).

<sup>271</sup> Ebd.: S. 2 ff.

Die solare Strahlung ist insbesondere abhängig vom Sonnenaufgang, Sonnenstand, Sonnenuntergang, Bewölkungsgrad und von den topographischen Verhältnissen der Regionen und Städte. In Mitteleuropa beträgt der Neigungswinkel der Mittagssonne in den Sommermonaten  $60^\circ$  bis  $65^\circ$  und erzeugt eine mittlere tägliche solare Strahlungsleistung von circa  $700 \text{ W/m}^2$  auf der Erdoberfläche. In den Wintermonaten erreicht die solare Strahlungsleistung circa  $247 \text{ W/m}^2$  bei einem Neigungswinkel der Sonne von  $13^\circ$  bis  $18^\circ$ . An hochgelegenen Bergstand-orten in 3.000 - 4.000 m Höhe wird eine maximale solare Strahlungsleistung durch Wettermessstationen von durchschnittlich  $1.000 \text{ W/m}^2$  gemessen. Statistische Datenauswertungen durch das Statistische-Regional-Modell -STAR<sup>272</sup> des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung belegen, dass temperaturbedingte Auswirkungen auf das regionale Klima bestehen.<sup>273 274</sup>

Die Auswertung der Messwerte der mittleren monatlichen und jährlichen Sonnenstundenwerte an den geographischen Standorten in Deutschland charakterisieren die Klima-veränderungen in den Regionen.<sup>275</sup> In den nördlich, östlich und südlich gelegenen Regionen sind mittlere jährliche Sonnenstunden von 1.700 bis 1.900 Stunden zum Beispiel an den Messstationen auf der Insel Helgoland, in der Region Freiburg und in der Region der Stadt Cottbus dokumentiert worden. Die Wettermessstation in der Stadt Hannover dokumentierte mittlere jährliche Sonnenstunden zwischen 1.500 und 1.700 Stunden. Die nachstehende Solarkarte von Deutschland für den Zeitraum von 1961 bis 1990 zeigt die mittlere jährliche Sonnenscheindauer in Stunden für die Länder und Regionen.

---

<sup>272</sup>Vgl.: Werner und Gerstengarbe, 1997, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Studie: Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel-Risiken und Handlungsoptionen, Berlin 2015.

<sup>273</sup>Vgl.: Wechsung et al., 2005; Stock et al., 2005.

<sup>274</sup>Orlowsky, Boris: Setzkasten Vergangenheit – ein kombinatorischer Ansatz für regionale Klimasimulationen, Dissertation, Hamburg, 2007.

<sup>275</sup>Vgl.: Deutscher Wetterdienst (DWD); Karte der durchschnittlichen Sonnenscheindauer in Stunden pro Jahr und Mittelwerte in dem Zeitraum von 1961 - 1990; Zonen von I - VI der jährlichen Energiezufuhr der Sonne auf  $1\text{m}^2$  Erdoberfläche in kWh, Referenzstandort Stuttgart.

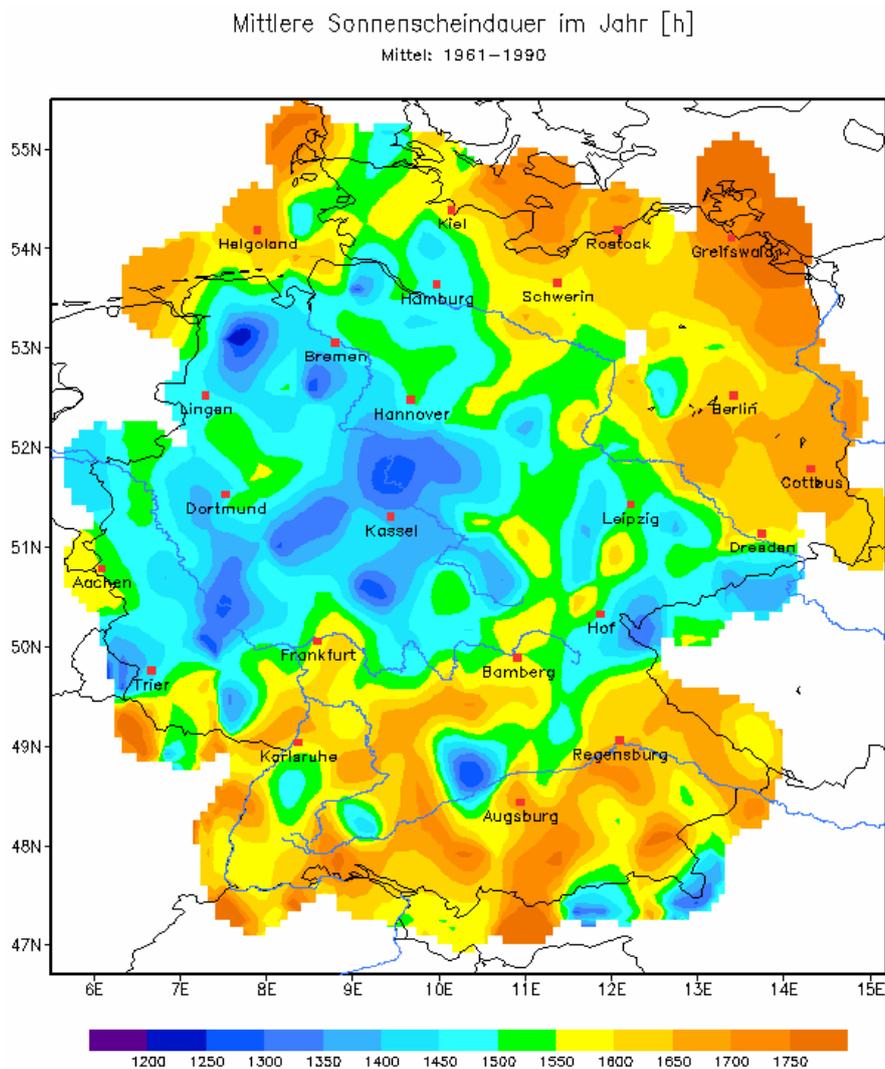


Abbildung 38: Solarkarte und mittlere jährliche Sonnenscheindauer

Maximalwerte der solaren Strahlungsdauer sind in den Nord- und Ostseeregionen zwischen Kiel und der Halbinsel Rügen, Helgoland und Sylt gemessen worden. Die Auswertung der mittleren Sonnenstunden an den Standorten in Deutschland zeigt, dass in Küstenregionen und insbesondere auf den vorgelagerten Inseln an der Nord- und Ostseeküste eine erhöhte solare Strahlung gegenüber dem Binnenland besteht.<sup>276</sup> Im Gegensatz zu den Regionen an der Nord- und Ostsee und in Ost- und Süddeutschland sind im Binnenland zwischen Münster, Aachen, Kassel und Hamburg deutlich geringere durchschnittliche solare Strahlungswerte gemessen worden.

Durch die ausgleichende Wirkung der Wassertemperaturen von Nord- und Ostsee in den Küstenregionen sind die atmosphärischen Temperaturwerte gegenüber dem Binnenland

<sup>276</sup>Vgl.: Witterungsverlauf an der Nord- und Ostsee. Die Witterung in den deutschen Küstengebieten, Deutscher Wetterdienst, Hamburg. Information aus dem Internet unter <http://www.dwd.de/DE/leistungen/witterungskueste/witterungskueste.html> (Stand 2016).

gemäßigt. Die atmosphärischen Tageshöchsttemperaturen sind dort im Sommer niedriger und die Tiefsttemperaturen im Winter höher. Die Jahresmittel der Lufttemperatur an Nord- und Ostsee nehmen nach Osten und Norden hin leicht ab.<sup>277</sup> Statistisch gesicherte Aussagen zur langzeitlichen Veränderung lassen sich für die Windrichtung und -geschwindigkeit aus langen und homogenen Messreihen ableiten.

Die Mess- und Beobachtungswerte der deutschen Küstenstationen während der letzten 110 Jahre zeigen, dass für die einzelnen meteorologischen Datenwerte unterschiedliche Messdiagrammverläufe festzustellen sind. Während bei der atmosphärischen Temperatur eine deutliche Zunahme insbesondere in den letzten Jahrzehnten feststellbar ist, weisen Niederschlag und Sonnenscheindauer keine wesentliche Veränderung auf. Insbesondere ist weder bei der mittleren Windgeschwindigkeit noch bei Stürmen ein deutlicher Langzeittrend ersichtlich.<sup>278</sup>

Ausreichend homogene Datenreihen der Sonnenscheindauer zur meteorologischen Trendbestimmung in Deutschland stehen seit Beginn der 1950er Jahre zur Verfügung. Die Datenreihen zeigen jedoch nicht nur zeitliche, sondern auch komplizierte räumliche Strukturen, die zudem jahreszeitlich beziehungsweise monatlich sehr unterschiedlich und zeitlich nicht stabil sind.<sup>279</sup>

Meteorologische Einflüsse des Klimawandels zeigen deutlich, dass Niederschläge in den letzten Jahren um 2% zugenommen haben und auch das Auftreten von extremen Wetterlagen sich um bis zu 4% gesteigert hat.<sup>280</sup> Ebenfalls ist ein Anstieg der atmosphärischen Lufttemperaturen zu verzeichnen mit einer Erwärmung der Meeresssoberfläche, wodurch von den Luftmassen größere Mengen an Wasserdampf aufgenommen werden. Die Hochwasserhäufigkeit wird somit mit der globalen Erwärmung weiter zunehmen. In den letzten Jahren ist eine Veränderung der großräumigen atmosphärischen Zirkulationsmuster in Bezug auf deren Ereignishäufigkeit beobachtet worden. Eine klimatische Änderung des Winterklimas in Deutschland und den Regionen ist daher zu erwarten. Meteorologische Auswertungen des Datenbestandes belegen, dass die winterlichen zonalen Wetterlagen zunehmen werden und verantwortlich sind für verstärkte Niederschläge in Süd-

---

<sup>277</sup> Vgl.: Lefebvre und Rosenhagen, 2008.

<sup>278</sup> Vgl.: Deutscher Wetterdienst Hamburg, Das Klima im Bereich der deutschen Küsten seit Beginn des 20. Jahrhunderts, Fachbeitrag: Auswirkungen des Klimawandels auf die Meere, Dipl.-Met. Gudrun Rosenhagen, S. 139-143.

<sup>279</sup> Vgl. Schönwiese & Janoschitz, 2005.

<sup>280</sup> Vgl. Kasang, 2008.

westdeutschland, wobei auch hier die Starkniederschläge mit einer Dauer von mehr als 24 Stunden zugenommen haben.<sup>281</sup>

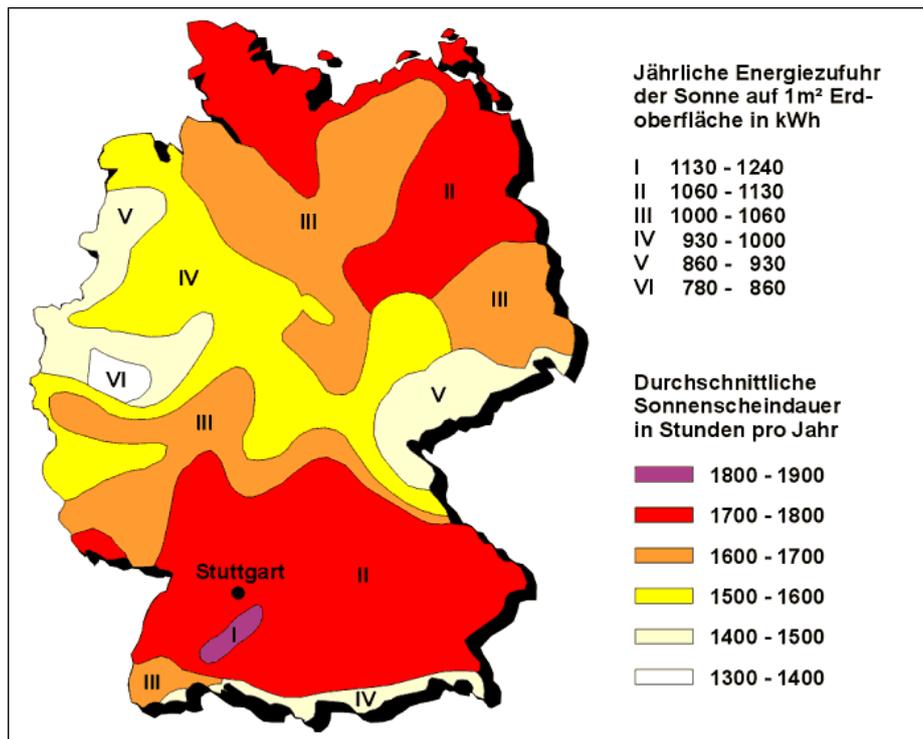


Abbildung 39: Zoneneinteilung der jährlichen Sonneneinstrahlung

Im Gegensatz zu der Abbildung 38 mit der Darstellung der mittleren jährlichen Sonnenscheindauer nach der Solarkarte ist in der Abbildung 39 die jährliche Energiezufuhr der Sonne auf 1m<sup>2</sup> Erdoberfläche in kWh zonal aufgeteilt in Abhängigkeit der durchschnittlichen Sonnenscheindauer in Stunden pro Jahr angegeben. Die höchsten Messwerte der jährlichen solaren Strahlung und durchschnittlichen Sonnenscheindauer sind in der südlichen Region der Stadt Stuttgart dokumentiert worden. Die zonale Aufteilung der Gesamtfläche zeigt scharfe Linienabgrenzungen zu den anderen Zonen mit einer höheren oder niedrigeren solaren Energiezufuhr in kWh pro m<sup>2</sup>. Der Vergleich zwischen den Werten der solaren Energiezufuhr und der Sonnenscheindauer in den Zonen I-VI zeigt, dass bei einer geringen solaren Energiezufuhr auch eine geringe solare Strahlungsdauer zu verzeichnen ist.

<sup>281</sup>Vgl.: Caspary, 2004.

## 4.2. Absorption solarer Strahlung über Bodenoberflächen

### 4.2.1. Solarer Strahlungsertrag

In der Fachliteratur der Klimatologie wird die durchschnittliche jährliche Globalstrahlung auf der Grundlage eines aufsummierten Zeitraumes (Tag, Monat, Jahr) ermittelt.<sup>282</sup> Die Gesamtstrahlungsbilanz<sup>283</sup> von kurzwelliger und langwelliger Strahlung auf der Erdoberfläche ist in der nachstehenden Summengleichung dargestellt:

$$(3) \quad (Q) = Q_K + Q_L = (S + H - R) + (A - E) \quad Q = (\text{Gesamtstrahlungsbilanz mit kurzwelligen } (Q_K) \text{ und langwelligen Bilanzen } (Q_L))$$

$$(4) \quad G = S + H \quad (G = \text{Globalstrahlung}; S = \text{direkte Sonnenstrahlung}; H = \text{gestreute Sonnenstrahlung})$$

$$(5) \quad R = (S + H) \cdot \alpha_K \quad (R = \text{kurzwellige Reflexstrahlung}; \alpha_K = \text{kurzwellige Albedo})$$

$$(6) \quad E = A \cdot \alpha_L + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (E = \text{langwellige Strahlungsemission der Fläche}; \alpha_L = \text{langwellige Albedo}; \varepsilon = \text{Emissionsvermögen der langwellig ausstrahlenden Oberfläche}; \sigma = \text{Stephan-Boltzmann-Konstante}; T = \text{Temperatur der Oberfläche}; A = \text{langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre})$$

$$(7) \quad \alpha_K = \frac{R}{G} \quad (\text{kurzwellige Albedo})$$

Im globalen Jahresmittel steht in Deutschland eine über das Jahr gemittelte solare Einstrahlleistung von circa 115 bis 137 W/m<sup>2</sup> zur Verfügung, die von versiegelten und unversiegelten Flächen aufgenommen und gespeichert werden kann. Die solare Strahlungsbilanz der Bodenoberfläche  $Q_s$  ist insbesondere von der Albedo abhängig. Die Summengleichung der solaren Strahlungsbilanz setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$(8) \quad Q_s = r(K\downarrow) - (K\uparrow) + (L\downarrow) - (L\uparrow)$$

- $K\downarrow$  einkommende kurzwellige Strahlung als „Globalstrahlung“
- $K\uparrow$  ausgehende kurzwellige Strahlung mit  $r \cdot K\downarrow$  ( $r$  = dimensionsloser Albedowert)
- $L\uparrow$  Strahlung als ausgehende langwellige Strahlung der Oberfläche
- $L\downarrow$  empfangene langwellige Strahlung als „atmosphärische Gegenstrahlung“

Die Strahlungskomponenten sind, bezogen auf eine horizontale Fläche in W/m<sup>2</sup>, festgelegt. Kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sind positive Größen in der Sum-

---

<sup>282</sup>Vgl.: Definition der solaren Strahlung, S. 3. Information im Internet unter URL <http://wikipedia.de>. (2010)

<sup>283</sup>Kessler, Albrecht: Anthropogene Änderungen des Strahlungshaushalts der Erdoberfläche, Universität Freiburg, Archiv für wissenschaftliche Geographie 39 (1985), S.175-179.

mengleichung. Die solare Strahlungsbilanz  $Q_s$  kann im Gesamtergebnis negative Werte annehmen, wenn an wolkenlosen Tagen der Bodenwärmestrom einen höheren Wert erreicht als der solare Wärmestrom ( $L_{\uparrow} > L_{\downarrow}$ ).

Die nachstehende Abbildung 40 zeigt die tägliche Ausstrahlung der kurz- und langwelligen solaren Strahlung über bewaldeten Flächen und oberhalb des Waldbodens. Die tägliche Strahlungsbilanz (rote Linie) stellt einen gleichen typischen Verlauf zur kurzwelligen solaren Einstrahlung dar (schwarze Linie). Die langwellige Ein- und Ausstrahlung (blaue Linie) zeigt einen parallelen Verlauf des Energieflusses während des Tagesverlaufs an den Messtagen. Der Kurvenverlauf mit einem Energiefluss zwischen 300 bis 400  $W/m^2$  nimmt an den Messtagen einen annähernd gleichen Verlauf ein.<sup>284</sup>

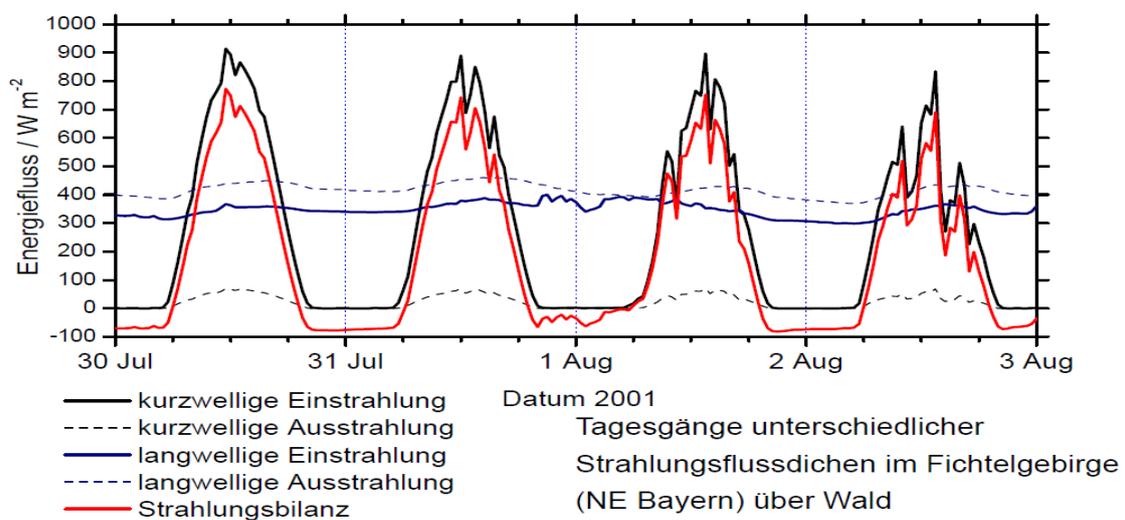


Abbildung 40: Strahlungsbilanz nach Tagesgängen über Waldbodenflächen

Die über den Tag verteilte solare kurzwellige Einstrahlung erzeugt eine gleichmäßige langwellige Wärmeausstrahlung des Waldbodens. Der tägliche Verlauf des Energieflusses zeigt typische Merkmale der solaren Einstrahlung und Ausstrahlung, die für die Gesamtbetrachtung zur Bewertung von Wärmepotenzialen von Oberflächen und Böden zu berücksichtigen sind.

Das Programm NASA CERES erfasst Daten über die kurz- und langwelligen ein- und ausfallenden Strahlungsflüsse am Oberrand der Atmosphäre (TOA; EBAF-TOA) und an der Erdoberfläche (EBAF-Surface). Wolkenparameter werden mittels zeitgleicher Messungen von dem Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) und dem Visible and Infrared Sounder (VIRS) abgeleitet. Messdaten über die Strahlungsverhältnis-

<sup>284</sup>Klemm, Otto: Umweltmeteorologie, 2. Energiebilanz an der Oberfläche, Folie 2 (Quelle: Kraus 2000), Universität Münster. Information aus dem Internet unter <http://www.uni-muenster.de/Klima> (Stand 2015).

se am Erdboden sind zusammengesetzt aus einer Kombination aus CERES Messungen, Daten zum atmosphärischen Profil (GEOS-4), Ozon (NCEP SMOBA) und Aerosol (MATCH) sowie Wolkenparametern von MODIS.<sup>285</sup>

#### 4.2.2. Langzeitvariabilität solarer Globalstrahlung

Die tageszeitlichen Variationen der Sonneneinstrahlung sind für verschiedene Breitenkreise unterschiedlich. Weltweite Messdatenreihen über die Globalstrahlung, die während eines Messzeitraumes von 1950 bis 2009 registriert wurden, bestätigen einen Rückgang der solaren Globalstrahlung von  $-1,6\text{W/m}^2$  in Regionen. Die Analyse der Messdauer der Globalstrahlung zeigt, dass Standardabweichungen von 5-7% innerhalb von 12 Monaten, 2-4% innerhalb von 10 Jahren und 2% innerhalb von 20 Jahren festgestellt worden sind.<sup>286</sup>

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik untersuchte in Feldversuchen<sup>287</sup> den Wärmetransportmechanismus der langwelligen Strahlung an Oberflächen in Abhängigkeit des Sonnenstandes und des Neigungswinkels der Sonne. Die Messergebnisse aus den Feldversuchen zeigen, dass die maximale aktive Nutzung der solaren Strahlung während der Tageszeit von 04:30 Uhr bis 19:00 Uhr (MEZ) aufgrund des Sonnengangs an den Standorten in Europa durch technische Solaranlagen gewährleistet ist. Die Auswertung der standortbezogenen Messergebnisse der Messstandorte in den Regionen zeigt, dass eine mittlere jährliche solare Strahlung zwischen 1.198 und 1.419 kWh/(m<sup>2</sup>a) nachgewiesen werden kann. Aus diesen Ergebnissen ist eindeutig abzuleiten, dass der solare auf einer Fläche gemessene Strahlungsertrag<sup>288</sup> vom geographischen Standort und von der geographischen Lage der Regionen<sup>289</sup> abhängig ist.

Die nachstehenden Abbildungen 41 und 42 zeigen die Differenz der mittleren jährlichen Globalstrahlungswerte während der Jahre 2002 und 2005. Der grobe Vergleich der solaren Strahlungskarten zeigt, dass in den südlich und nördlich gelegenen Regionen Deutsch-

---

<sup>285</sup>Universität Hamburg: Programm NASA CERES Strahlungseinflüsse. Clouds and Earth's Radiation Energy System. Information aus dem Internet unter <http://www.icdc.zmaw.de/daten/atmosphere/ceres-radiation> (2016).

<sup>286</sup>Vgl.: Genossenschaft Meteotest: Analysis of recent trends of global radiation ground measurements – Discription for final report of IEA SHC Task 36 -, Solar Heating & Cooling Programme, S. 1-30, Bern, April 2010.

<sup>287</sup>Fraunhofer Institut Bauphysik (Hrsg.): Wärmetransportmechanismus "langwellige Strahlung" Prinzip, Phänomene, Möglichkeiten; Vortrag von Klaus Sedlbauer.

<sup>288</sup>Abschlussbericht Solar 2000: Untersuchung Betrieb von Solaranlagen an verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg - Freiburg, Waldbronn, Holzgerlingen, Baden-Baden, Freiburg-Vauban, Mindelheim, Singen; Fachhochschule Offenburg. Information aus dem Internet <http://www.fgnet.fh-offenburg.de> (2010).

<sup>289</sup>a.a.O.: siehe Systemnutzungsgrad für die thermischen Anlagen auf Dächern von 41% bei einer Solarenergieausbeute von 41,7%.

lands ein Rückgang der Globalstrahlungswerte für das Jahr 2005 festgestellt werden kann. Die Intensität der jährlichen solaren Erwärmung von Bodenoberflächen ist daher sehr unterschiedlich zu bewerten und führt zu einem differenzierten Wärmepotenzial in Regionen und Städten.

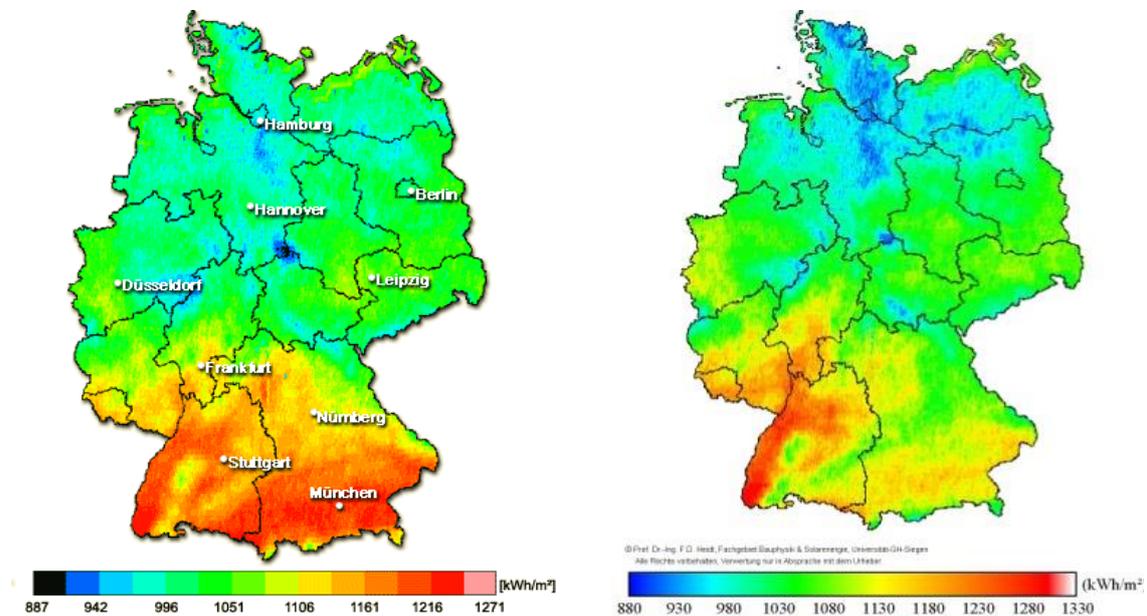


Abbildung 41: Jährliche mittlere Globalstrahlung von 2002

Abbildung 42: Jährliche mittlere Globalstrahlung von 2005

Messtechnische Untersuchungen durch das Bayerische Landesamt für Umwelt und dem Deutschen Wetterdienst über das Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer, Globalstrahlung und Oberflächenverdunstung in den Regionen Baden-Württemberg und Bayern bestätigen, dass eine zeitlich abhängige Abnahme und Zunahme der auftreffenden solaren Strahlung auf städtischen Oberflächen Oberflächentemperaturen beeinflussen.<sup>290</sup>

Im Gegensatz zur Auswertung von solaren Strahlungskarten und Einstufungen von solaren Messwerten sind Messmethoden zur genauen Bestimmung von solaren Strahlungsflussdichten erforderlich. Die Auslegung von Solarkraftwerken in der Planungsphase wird zum Beispiel mit ISIS-Datensätzen, die im Rahmen der Datenerfassungsmethode „Irradiance at the Surface derived from ISCCP cloud data“ die Global- als auch die Direktnormalstrahlungswerte speichert, durchgeführt. Anhand der ISIS-Datensätze ist die Analyse

<sup>290</sup>Vgl.: Arbeitskreis KLIWA: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG), Deutscher Wetterdienst (DWD), Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern, März 2008.

der Langzeitvariabilität zur Global- und Direktnormalstrahlung gegeben. ISIS-Daten setzen sich aus dreistündigen Werten der jeweiligen Strahlungsflussdichten über den Zeitraum von 21 Jahren (1984-2004) zusammen, die anhand der Messmethode aus den Wolken- und Satellitendaten des International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) durch eindimensionale Strahlungstransferrechnungen abgeleitet werden konnten. Infolge der ISIS-Datenbank stehen Mittelwerte von solaren Strahlungsflussdichten für alle Regionen zur Verfügung, die bisher in stationären Oberflächenbodenmessungen nicht vorhanden sind.<sup>291</sup>

Die Forschung an der Universität Oldenburg zur Berechnung der solaren Einstrahlung aus Satellitendaten konzentriert sich auf die Untersuchung von Methoden zur Übertragung von Daten auf geostationäre Satelliten. Die Planung und Simulation von intelligenten Stromnetzen mit einem hohen Anteil dezentral erzeugter regenerativer Energie erfordern die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Globalstrahlung in höchster Auflösung in Abhängigkeit von Bewölkung und Wetterlage. Das grundlegende Ziel des Projektes PROKLIMA ist die Bereitstellung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Bewertung des Energieertrages von Dünnschicht-Solarmodulen bei verschiedenen klimatischen Bedingungen. Die Forschungsergebnisse sind geeignet, Computerprogramme zur Ertragsberechnung bzw. -prognose zu verbessern.<sup>292</sup>

Forschungsarbeiten zur Validierung eines Transitionsmodells zur Schätzung von Sonneneinstrahlungswerten der solaren Direkt- und Diffusstrahlung zeigen, dass bei einer monatlichen Zeitauflösung für die Strahlungsarten der Global- und Direktstrahlung eine Überschätzung der simulierten Werte in den Wintermonaten und eine Unterschätzung in den Sommermonaten festgestellt worden ist. Die simulierten Wertereihen des Transitionsmodells sind mit den gewonnenen Wertereihen des Deutschen Wetterdiensts (DWD) gegenübergestellt und mit den abgeleiteten Strahlungswerten der NASA aus Satellitenmessungen verglichen worden. Die Analyse der Abweichungen der Strahlungswerte in stündlicher Zeitauflösung zeigte wesentlich unpräziser geschätzte Werte als in monatlicher Zeitauflösung. Zur Überprüfung der Wirksamkeit zukünftiger Optimierungen des Transi-

---

<sup>291</sup>Lohmann, Sina: Langzeitvariabilität der globalen und direkten Solarstrahlung für Solarenergieanwendungen, Dissertation, Maximilian-Universität München, 2006.

<sup>292</sup>Vgl.: Forschungsprogramm PVKLIMA - Energieertrag von Dünnschichtmodulen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen; Hochaufgelöste Daten für die Netzmodellierung, Carl von Ossietzky Oldenburg. Information im Internet unter [http://www.uni-oldenburg.de/physik/forschung/ehf/energiemeteorologie/forschung/solarenergie\(2017\)](http://www.uni-oldenburg.de/physik/forschung/ehf/energiemeteorologie/forschung/solarenergie(2017)).

tionsmodells kann auf die entwickelten Methoden zur Validierung zurückgegriffen werden.<sup>293</sup>

### 4.2.3. Klimatische Einflussfaktoren in Regionen

In Deutschland werden vier regionale Klimamodelle (REMO, CLM, STAR, WettReg) zur Erstellung von regionalen Klimaszenarien eingesetzt.<sup>294</sup> Die Untersuchung des bodennahen Klimas durch Feldversuche<sup>295</sup> zeigt, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren für die Modifikation des bodennahen Klimas verantwortlich ist.<sup>296</sup> Natürliche oder anthropogene Klimafaktoren sind: Flächennutzung, Flächenbeschaffenheit und Flächeneigenschaft, Exposition, Orographie, Dichte, Höhe und Art der Bebauung, Vegetation, natürliche Wasserspeicher und Wasserdampfquellen sowie geographische Höhenlagen.<sup>297</sup>

Der anthropogene Klimawandel ist in den Regionen unterschiedlich ausgeprägt. Die zukünftige Entwicklung der globalen Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen sowie Landnutzungsänderungen sind durch demographische, ökonomische, politische und technologische Faktoren bestimmt. Klimaszenarien werden als Projektionen verschiedener möglicher zukünftiger Veränderungen der Klimaparameter auf der Basis von Emissions-szenarien berechnet. Ein breites Spektrum von Klimaentwicklungen bis zum Jahr 2100 ist vom Intergovernmental Panel on Climate Change mit SRES-Szenarien<sup>298</sup> erarbeitet worden. Regionale Klimaszenarien sind aus den globalen Klimaszenarien ableitbar. Die räumliche Auflösung des General Circulation Model (GCM) ist durch dynamische und statistische Klimamodelle zu unterstützen. Es deuten Analysen regionaler Klimaszenarien darauf hin, dass bei monatlichen und jährlichen Mitteltemperaturen die Unsicherheit durch das regionale Klimamodell in Relation zum Emissions- und GCM Model eher klein ist.<sup>299</sup>

---

<sup>293</sup>Eberle, Benjamin Tim: Validierung von geschätzten Sonneneinstrahlungswerten anhand von Messdaten des Deutschen Wetterdienstes für die Standorte Potsdam und Weißenstephan, Bachelorarbeit, Universität München, 2015, S.73-74.

<sup>294</sup>Vgl.: Akademie für Raumforschung und Landesplanung(ARL) – Regionale Klimaszenarien für Deutschland, Eine Leseanleitung, Nr.6, E-Paper, Hannover, 2009.

<sup>295</sup>Vgl.: Geiger, Aron & Todhunter, (1995), OKE (1987).

<sup>296</sup>Vgl.: Stand der Forschung: S.7; Information aus dem Internet URL <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/02/02H216/t4.pdf>.

<sup>297</sup>Vgl.: VDI 1995, S.10; Jendritzky in: Deutscher Wetterdienst 1992, S.87, Gerth 1986, S.6.

<sup>298</sup>Nakicenovic et al. 2000.

<sup>299</sup>Vgl.: Akademie für Raumforschung und Landesplanung(ARL) – Regionale Klimaszenarien für Deutschland, Eine Leseanleitung, Nr.6, E-Paper, Hannover, 2009, S.10 ff.

Die Langzeiteinschätzung von klimatologischen Faktoren in Bezug zur solaren Strahlung und atmosphärischen Temperaturen in Regionen ist durch statistische Klimamodelle mit einer horizontalen Auflösung aus den Tageswerten der Klimavariablen vorzunehmen.<sup>300</sup>

Die Küstenregionen und Inselstandorte besitzen eine hohe Luftfeuchtigkeit und zeichnen sich aus durch ein ausgeglichenes Klimaverhalten.

Landschaftsformen wie Wüsten-, Gebirgs- oder Küstenregionen besitzen unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten und verursachen wechselnde Wettersituationen in Regionen. Großflächige unversiegelte Flächen beeinflussen das regionale und städtische Klima wegen des unterschiedlichen Verdunstungs- und Versickerungsgrades. Die Erwärmungs- und Abkühlungsgrade in Regionen führen zu Luftzirkulationen und -schichtungen, die für die Entstehung von Windströmen verantwortlich sind. Wüsten- und Prärielandschaften in flachen Tälern zeichnen sich durch starke Trockenheit in den Sommermonaten, Erd- und Lehmböden und eine geringe Bewuchsdichte aus. Im Gegensatz zu Wüstenregionen verfügen hügelige Landschaften und Talregionen über Grasbewuchs auf fruchtbaren Böden und zeichnen sich aus durch ein ausgeglichenes Tagestemperaturniveau sowie ein hohes Grundwasservorkommen.

Regionen mit einem dichten Baumbestand und fruchtbaren Waldböden geben einen Wind- und Wetterschutz durch den Schattenwurf der Baumkronen. Dichter Waldbestand mit vielseitigem Bewuchs bietet einen hohen Reflexionsschutz, sodass die atmosphärische Temperatur am Waldstandort gemäßigt ist. Lichte Waldflächen können sich im Gegensatz zu dichten Waldgebieten durch den schrägen Sonneneinfall tagsüber ebenfalls erwärmen und speichern in der Nachtzeit infolge des Reflexionsschutzes durch den Baumbestand die Bodenwärme. Dichte Waldgebiete besitzen in der Tages- und Nachtzeit niedrigere atmosphärische Temperaturen als lichte Waldflächen. Hanglagen werden mehr oder weniger je nach Orientierung und Böschungsneigung von der direkten solaren Strahlung erreicht. Die tägliche solare Strahlungswärme führt zu einer intensiven Erwärmung der Hangoberflächen, da eine starke Verdunstung von Nachtniederschlägen, wie sie an den Osthängen erfolgt, nicht stattfindet. Die optimale Hangneigung für solare Strahlung wird von dem jahreszeitlich abhängigen Zenit der Sonne bestimmt und beträgt in den Sommermonaten circa  $16^\circ$  und in den Wintermonaten circa  $60^\circ$ . Hanglagen mit einer Neigungsrichtung nach Süden und Westen werden von der solaren Strahlung besonders stark erwärmt. Oberflächentemperaturmessungen über den Bodenoberflächen in einer Höhe

---

<sup>300</sup>Ebd.: S.11 (STAR Modell)

von 2 m haben an Hanglagen Temperaturen von bis zu 80°C nachweisen können. Hügelige Geländeformen verursachen Veränderungen der Wind- und Luftströme mit der Folge, dass sie gebremst bzw. abgelenkt werden und eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten bewirken. Bereits geringe Geländeneigungen führen zu einer Änderung der lokalen Windgeschwindigkeiten.

In Regionen mit höheren Gebirgszügen erhalten die Luvseiten bedeutend mehr Regen und Schnee als die Leeseiten. Oberflächengewässer beeinflussen durch eine hohe Wärmeleit- und Wärmespeicherefähigkeit des Wassers das regionale und lokale Klima. Die phasenverschobene saisonale Erwärmung und Abkühlung des Wassers verhindert hohe Temperaturschwankungen im Gewässer.

Das "Wärmeaustauschvermögen" von Wasserflächen hat Wiepking-Jürgensmann<sup>301</sup> untersucht. Wasserflächen in unmittelbarer Nähe von Gebäudefassaden erzielen durch die reflektierte solare Strahlung ("Unterlicht") zusätzliche langwellige Strahlung. Die Reflexion der solaren Strahlung von Wasseroberflächen ist umso stärker, je tiefer der jahres- bzw. tageszeitliche Zenit der Sonne am Horizont steht. Oberflächengewässer mit West-, Ost- und Norduferflächen erzeugen durch die tiefe Morgen-, Abend- und Wintersonne zusätzliche langwellige Strahlung. Traditionelle Weinbaugebiete an den Hängen des Rhein-, Mosel- und Maingebietes nutzen diese Reflexionsstrahlung für den Weinanbau.

Grünflächen erreichen tagsüber je nach Oberfläche niedrigere Oberflächentemperaturen als versiegelte Oberflächen in bebauten Gebieten. Dieser Effekt ist auf das hohe Wärmespeichervolumen des unversiegelten Bodens, des Versickerungsgrades und der Oberflächenverdunstung zurückzuführen.

Die Klimafaktoren am Standort wirken sich je nach Vegetationsbewuchs unterschiedlich aus. Grünflächen - und begrünte Randzonen von Städten beeinflussen das Stadtklima und bewirken einen Klimaaustausch durch ein Netz von Vegetationsflächen. Während der Nacht verändern sich über den Grünflächen die Temperaturverhältnisse durch starke Abkühlung. Lichte bewaldete Stadtränder sind geeignet, die atmosphärische Temperatur in der Nachtzeit zu reduzieren. Baum- und strauchbewachsene Flächen kühlen tagsüber wesentlich mehr aus als Rasenoberflächen.

---

<sup>301</sup>Vgl.: Olschowy, G.: Die Erwärmung von 1 m<sup>3</sup> Wasser mit einer Wassertemperatur von 10° C ist vergleichbar mit der Erwärmung von 3.000 m<sup>3</sup> Luft von 10° C.

#### 4.2.4. Oberflächentemperaturen und Bodenwärmepotenzial

Die Berechnung der Energiebilanz von anstehenden Böden wird nach der Bowen - Ratio - Energy - Balance - Methode (BREB)<sup>302</sup> durchgeführt.<sup>303</sup>

Die Analyse der Energiebilanz bedingt, dass nach dem Prinzip der Grenzschichtmeteorologie und dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik zwischen den Luftschichten über der Bodenoberfläche und dem anstehenden Boden das Verhältnis zwischen dem sensiblen und latenten Wärmefluss im Gleichgewicht steht. Die Wärmeaufnahmekapazität des Bodens ist abhängig von dem prozentualen Anteil der Bodenfeuchtigkeit und den in den Bodenschichten vorhandenen organischen und anorganischen Elementen. Der Nachweis der Energiebilanz von Bodenoberflächen ist abhängig von der Streuung vertikaler Energieströme, temporären Wärmespeicherpotenzialen und sich verändernden saisonalen Luftströmungen. In der Energiehaushaltsgleichung ist der Term Wärmespeicherung daher mit aufzunehmen.

$$(9) \quad Q_o - B_o - H_o - E_o = S$$

Die Summengleichung von vertikal gerichteten Strömungen setzt sich aus den Termen solarer Strahlungsbilanz  $Q_o$  ( $W/m^2$ ), turbulenter Flussdichte, fühlbarer Wärme  $H_o$  ( $W/m^2$ ), turbulenter Flussdichte latenter Wärme  $E_o$  ( $W/m^2$ ), Bodenwärmestrom  $B_o$  ( $W/m^2$ ) und der Wärmespeicherung  $S$  ( $W/m^2$ ) zusammen. Das sich langsam aufbauende Wärmespeicherpotenzial ist abhängig von der Schichttiefe der anstehenden Böden oder von der Zusammensetzung der Bauteilschichten.

Die von Cattin<sup>304</sup> zur Nachweisführung des Verhältnisses zwischen sensiblen und latenten Wärmeströmen durchgeführten Feldversuche zeigen, dass am Tag die Bodenwärmestrombilanz, insbesondere an Standorten mit einem hohen Anteil an Bodenfeuchtigkeit, wesentlich schwankt. Die Nachweisführung des sensiblen Bodenwärmestroms zeigt, dass instationäre meteorologische Einflüsse aufgrund des täglichen Wechsels der atmosphärischen Außenlufttemperaturen der vorhandenen Wärmeleitfähigkeit der Luftschicht in den Grenzschichten über der Bodenoberfläche den Wärmestromfluss verändern. Die

---

<sup>302</sup>Cattin, 2000.

<sup>303</sup>Cattin, René: Bowen - Ratio – Energiebilanzmessungen - Testgebiete Leissingen - Spissbach mit unversiegelten Bodenflächen wie Grünfläche, Waldfläche und Waldboden. Diplomarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Betreuer Prof. Dr. H. Wanner, Bern, 2000; Seite 8.

<sup>304</sup>Ebd.: S.11ff.

Abschätzung der Wärmeaufnahmekapazität von Bodenschichten wurde von OKE 1999 wie folgt nachgewiesen:

$$(10) \quad C_s \sim 1,92x_{\min} + 2,5x_{org} + 4,18x_w$$

In Feldversuchen ist ebenfalls nachgewiesen worden, dass die „solare Eindringtiefe“ bis zu einer Bodenschichttiefe von 0,8 bis 1,0 m messtechnisch nachweisbar ist. Die Messergebnisse, die aus der Bowen-Ratio- Energy-Balance-Methode gewonnen wurden, sind mit einem Psychrometer zur Bestimmung von Parametern der Luftfeuchte in einem Versuchsfeld durch Messverfahren überprüft worden.<sup>305</sup>

Das meteorologische Institut der Universität Freiburg<sup>306</sup> führte Feldversuche mit ganzjährigen Messungen zur Bestimmung von atmosphärischen Lufttemperaturen über Graslandflächen und Waldgebieten durch. Die nachstehenden Temperaturmessdiagramme in der Abbildung 43 zeigen Temperaturganglinien von mittleren monatlichen Außentemperaturen über Graslandflächen. Die Auswertung der Temperaturtagesganglinien zeigt, dass von Oktober bis April im Zeitintervall von 06:00 bis 15:00 Uhr ein Anstieg der mittleren stündlichen atmosphärischen Außentemperaturen in den Monaten Oktober, Januar und April in den Luftschichten 2 m und 10 m im Gegensatz zur Lufttemperatur über Graslandböden nachgewiesen werden konnte.

---

<sup>305</sup>Ebd.: S.10 (solare Eindringtiefe, Bodenwärmestrom).

<sup>306</sup>Rost, Jutta: Vergleichende Analyse der Energiebilanz zweier Untersuchungsflächen der Landnutzungen, Grasland und Wald in der südlichen Oberrheinebene, Albert-Ludwigs Universität Freiburg.

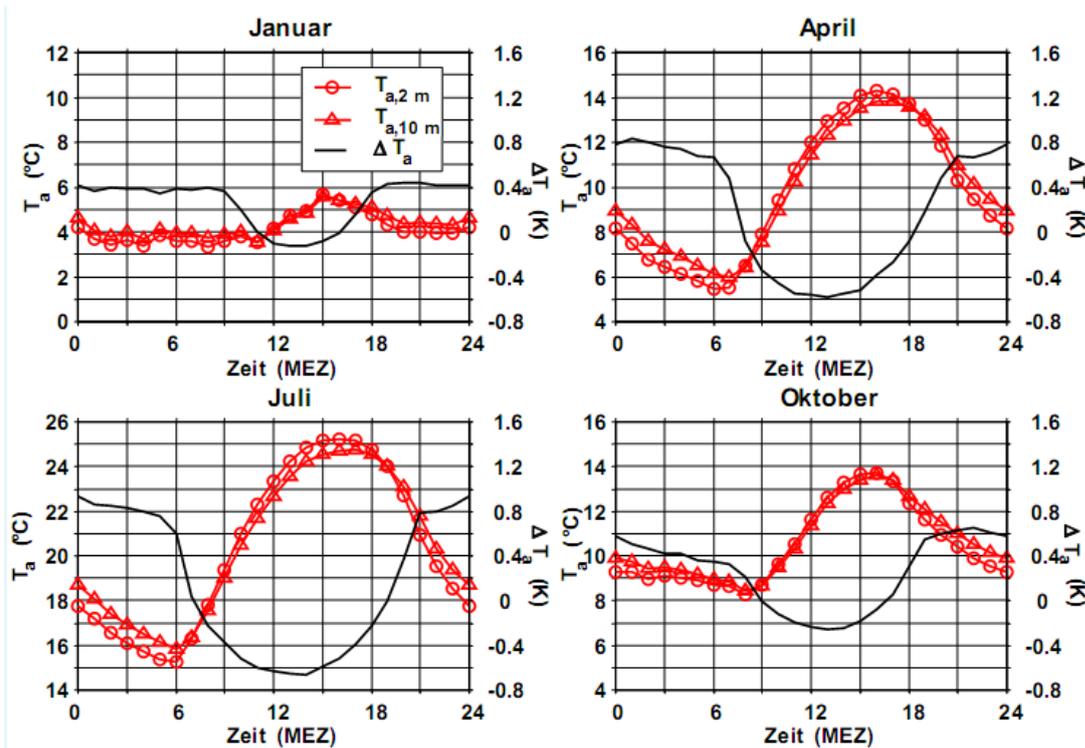


Abbildung 43: Temperaturtagesgänge der mittleren Lufttemperatur über Graslandflächen

Für den Sommermonat Juli zeigt der Temperaturverlauf in verschiedenen Messhöhen eine maximale Temperaturdifferenz von 12 K zur Lufttemperatur. Die Messergebnisse der Lufttemperaturwerte in den Luftschichten von 2m und 10m, bezogen auf das Waldbodenniveau, zeigen keine wesentlichen Unterschiede im Temperaturverlauf. Auffallend ist der Anstieg der atmosphärischen Lufttemperaturen in den Monaten April ( $6^{\circ}$  bis  $14^{\circ}\text{C}$ ), Juli ( $15^{\circ}$  bis  $25^{\circ}\text{C}$ ) und Oktober ( $8^{\circ}$  bis  $14^{\circ}\text{C}$ ) in dem Zeitintervall von 6:00 bis 18:00 Uhr. Den solaren Strahlungshaushalt in Waldgebieten untersuchte auch die Georg-August-Universität Göttingen im Jahr 2006. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse zeigt, dass die Vegetationsdichte von unversiegelten Böden einen starken Einfluss auf die tägliche solare Strahlungsleistung und auf die Lufttemperaturwerte in den über dem Boden befindlichen Luftschichten hat. Die kurzwellige solare Strahlung wird anteilig von den Bodenoberflächen reflektiert, zu 90% bis 95% absorbiert und in eine langwellige Strahlung als Wärmestrom umgewandelt. Das Lufttemperaturverhalten über Waldgebieten und Graslandflächen zeigt, dass sich instationäre Wärmeströme oberhalb der Bodenoberflächen durch die Einwirkung der solaren Strahlung und durch das Absorptionsverhalten der Bodenoberflächen bilden. Weitere Feldversuche und wissenschaftliche Untersuchungen zur Bestimmung des Bodenwärmestrompotenzials sind dem Verfasser zum derzeitigen Stand nicht bekannt.

Die Berechnung des Bodenwärmestroms in Bodenschichten wird über die thermische

Bilanzgleichung der Wärmeströme definiert:<sup>307</sup>

$$(11) \quad Q_{ges} = q_n + q_a + q_v + q_t \quad (\text{W/m}^2)$$

Der mittlere Wärmestromertrag  $Q_{ges}$  des anstehenden Bodens setzt sich aus dem natürlichen Bodenwärmestrom  $q_n$ , dem anthropogenen Wärmestrom  $q_a$  und dem resultierenden Wärmestrom  $q_v$ , aus dem Abbau des Abwärme-Energievorrates und der vom Temperaturjahresgang abhängigen Änderung, mit  $q_t$  zusammen. Der Bodenwärmestrom ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des anstehenden Bodens, der atmosphärischen Lufttemperatur und der Bodentiefe sowie der Anzahl und Art von anstehenden Bodenschichten.<sup>308</sup> In folgender Berechnungsgleichung ist der Wärmestrom B nach der Baustoffschicht definiert:

$$(12) \quad B = -k_B \frac{\delta T}{\delta z} \quad \begin{array}{l} \delta z = \text{Dicke der Baustoffschicht} \\ \delta T = T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}} \end{array}$$

Der  $k_B$ -Wert stellt den Wärmefluss in den Bodenschichten nach der Bodentiefe da, der pro Stunde und pro Quadratmeter Oberfläche bei einem Temperaturunterschied von 1K fließt.

$$(13) \quad k = \frac{B}{\Delta T} = -k_B \cdot \frac{1}{\Delta z}$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $k_B$  für unterschiedliche Materialien ist in  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  angegeben. Zum Beispiel ist für Stahlbeton der Wert  $2,60 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  und für Asphalt der Wert  $0,7 - 0,9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  in der Fachliteratur anwendbar.

Die Oberflächentemperaturwerte von verschiedenen versiegelten und unversiegelten Oberflächen sind im nachstehenden Temperaturmessdiagramm dargestellt.<sup>309</sup> Der Vergleich zwischen den Oberflächentemperaturen von versiegelten Asphaltflächen und unversiegelten Grasflächen zeigt, dass ein nach der Tageszeit vergleichbarer parabelförmiger Temperaturverlauf feststellbar ist. Das Temperaturmaximum der Messkurven versie-

---

<sup>307</sup>Kappelmeyer und Haenes, 1974.

<sup>308</sup>Klemm, Otto: Umweltmeteorologie, Energiebilanz an der Oberfläche Teil 2,

<sup>309</sup>Häckel, 1999.

gelter Flächen (Asphalt) zeigt einen deutlichen Anstieg. Grasflächen und unbewachsene unversiegelte Bodenflächen weisen einen ähnlichen Temperaturkurverlauf auf.

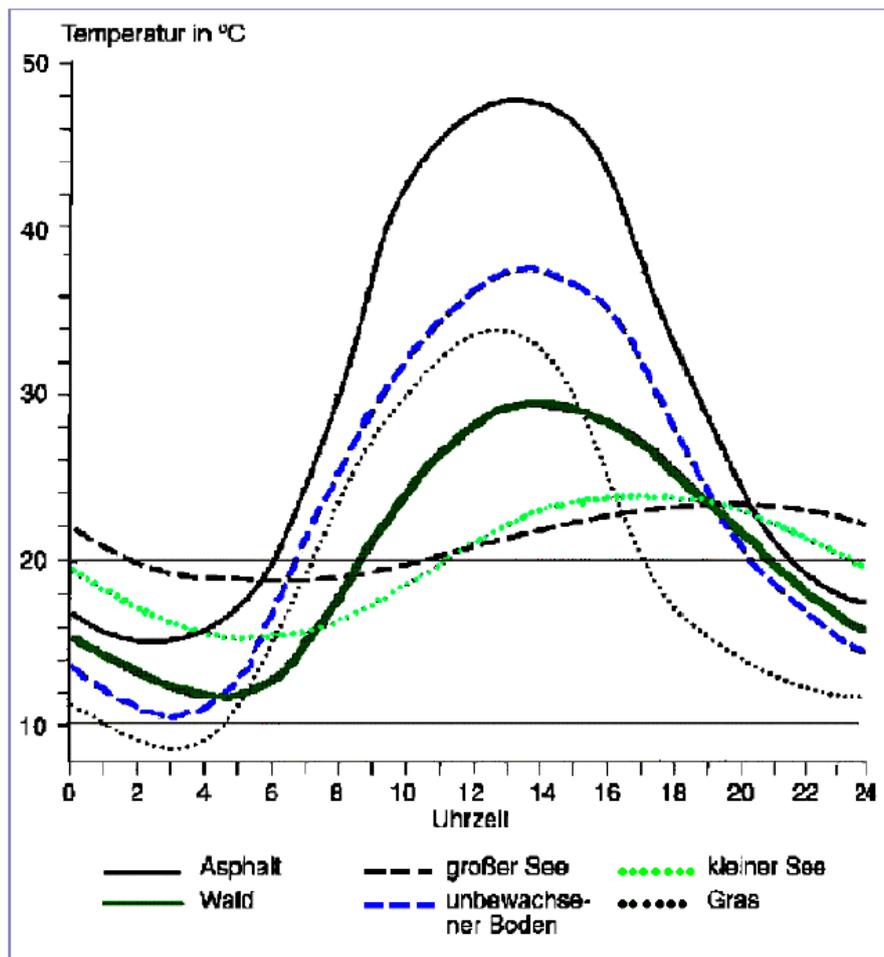


Abbildung 44: Oberflächentemperaturwerte aus Häckel, 1999

Die Wärmeleitfähigkeit von sandigen und tonhaltigen Böden wird nach dem Feuchtegehalt und dem Porenvolumen angegeben. Trockene und sandige Böden mit einem Porenvolumen von 40% haben eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,3\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Für nasse, tonhaltige Böden mit einem Porenvolumen von 40% ist die Wärmeleitfähigkeit mit  $1,58\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  in der Fachliteratur<sup>310</sup> angegeben. Der Wärmetransport im Boden ist an die mittlere Temperaturströmung gekoppelt.

Der konvektive oder advective Wärmetransport ( $\text{W m}^{-2}$ ) in den Bodenschichten ist das Ergebnis aus dem Produkt der spezifischen Wärmekapazität der Luft ( $1004\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), der Dichte der Luft ( $\text{kg m}^{-3}$ ), der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit ( $\text{m s}^{-1}$ ) und der potenziellen Bodentemperatur (K).

<sup>310</sup>Vgl.: Tabellenwerte von Arya, 1988 – Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Oberflächen und Böden.

Die Wärmezahl von Böden ist  $c_p$ . Der konvektive Wärmetransport  $H_{konv}$  ( $W/m^2$ ) im Boden wird mit der Gleichung berechnet:

$$(14) \quad H_{konv} = c_p \cdot \rho \cdot U \cdot \Theta$$

Der turbulente Wärmetransport  $H_{turb}$  ( $W/m^2$ ) wird unter Hinzunahme des vertikalen turbulenten Diffusionskoeffizienten für Wärme  $K_z$  ( $m^2 s^{-1}$ ) nach der Gleichung berechnet:

$$(15) \quad H_{turb} = c_p \cdot \rho \cdot K_z \cdot \frac{d\Theta}{dz}$$

Der latente Wärmefluss  $W$  ( $g m^{-2} s^{-1}$ ) wird über den vertikalen turbulenten Diffusionskoeffizient für Wasserdampf  $K_w$  ( $m^2 s^{-1}$ ), der spezifischen Feuchte  $p$  ( $g kg^{-1}$ ) wie folgt hergeleitet:

$$(16) \quad W = \rho \cdot K_w \cdot \frac{dq}{dz}$$

Mit dem Therme der spezifischen Verdampfungswärme des Wassers von  $L=2.5 \cdot 10^6 J kg^{-1}$  wird der latente Energiefluss  $E$  ( $W/m^2$ ) im Boden berechnet:

$$(17) \quad E = L \cdot \rho \cdot K_w \cdot \frac{dq}{dz}$$

Die im Rahmen des Forschungsprojektes des Bundesministeriums für Wissenschaft und Technologie<sup>311</sup> durchgeführten Feldversuche bestätigen, dass die Temperaturen des erdoberflächennahen Untergrundes in einer natürlichen, thermisch ungestörten Umgebung im Wesentlichen vom Jahresmittelwert der atmosphärischen Lufttemperatur bestimmt werden. Dem Maximum der atmosphärischen Lufttemperatur folgt circa 45 Tage verspätet das Maximum der Bodentemperaturen<sup>312</sup> wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit von unversiegelten Oberflächen und einem geringen Feuchtigkeitsgrad in den Bodenschichten während der Sommermonate. Periodische Schwankungen der Bodentemperaturen werden

---

<sup>311</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Balke, K.-D., Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen, S. 7, Februar 1981

<sup>312</sup>Ebd.: S.25 (Messung der Boden- und Lufttemperaturen unterhalb des Stadtgebietes der Stadt Köln, 1977)

vom Tagesgang der Lufttemperatur bis in etwa 0,8 m Tiefe beeinflusst und sind je nach Untergrundbeschaffenheit bis in Tiefen von 15 bis 20m noch nachweisbar.

Die Abbildung 45 stellt den Zusammenhang zwischen Bodenwärmestrom und Strahlungsbilanz dar. Der Bodenwärmestrom wird von der solaren Strahlung gering beeinflusst und bleibt im Energieflussverlauf kontinuierlich. Dagegen steigt der latente Wärmestromwert aufgrund der solaren Strahlung gleichermaßen an. Die Messergebnisse zeigen, dass in den Sommermonaten Juli und August sich täglich ein Energiepotenzial im Waldboden aufbaut und sich während der Nachtzeit wieder entlädt. Die Energiebilanz der Bodenoberfläche folgt der täglichen solaren Strahlungsbilanz. Der latente Wärmestrom verändert sich mit der solaren Strahlungsbilanz und erreicht höhere Energieflusswerte als der Bodenwärmestrom.

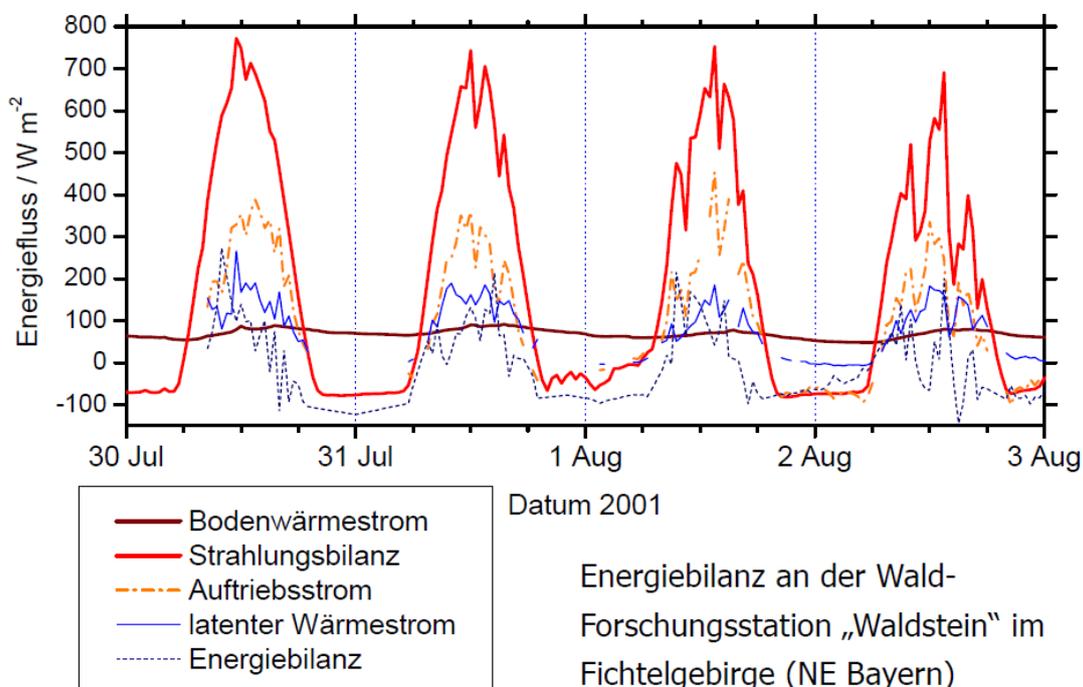


Abbildung 45: Wärmeflussdichte in unversiegelten Bodenoberflächen im Monat August

Die Temperaturänderung der Bodenschichten wirkt sich ab einer Bodentiefe von 20m nur noch schwach aus. Die Bodenschichttemperaturen ändern sich zu 0,1°C geringfügig.<sup>313</sup>

Die Studie der Arbeitsgemeinschaft Solar zeigt, dass unabhängig von den meteorologischen und saisonalen Bedingungen die Bodenarten unterschiedliche Temperaturleitfähigkeiten<sup>314</sup> aufgrund des Wasserprozentgehaltes besitzen.<sup>315</sup>

<sup>313</sup>Ebd.: S.14 (Untergrundtemperaturen, Abb.7 - Schema des Temperatur-Jahresganges nach Kappelmeyer & Haenel 1974)

Referenzwerte für die Temperaturleitfähigkeit von Böden sind mit  $0,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  und mit  $0,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  durch Feldversuche über einen gesamten Jahreszyklus in Feldversuchen diagnostiziert worden.<sup>316</sup>

Die Bodenwärmeströmung wird aufgrund der anstehenden Bodenschichten in seiner Wirkung gedämpft. Die Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Bodenwärme und Bodenschichttemperaturen zeigt, dass sich erst nach einem von den Bodeneigenschaften abhängigen variablen Zeitintervall eine Phasenverschiebung einstellt. Eine Abhängigkeit zwischen Bodenschichttemperaturen, Bodenwärmestrompotenzial und Bodenwärmeströmungsrichtung ist somit nachgewiesen worden.

Der Temperaturverlauf in anstehenden Bodenschichten während eines Tages kurz nach Sonnenaufgang bis Mitternacht wird in Abhängigkeit der Temperatur und Wärmeflussdichte in der Abbildung 46 dargestellt. Der Graph zeigt die tageszeitlich abhängigen Abkühlungs- und Erwärmungsphasen in Bodenschichttiefen bis zu 1,00m.

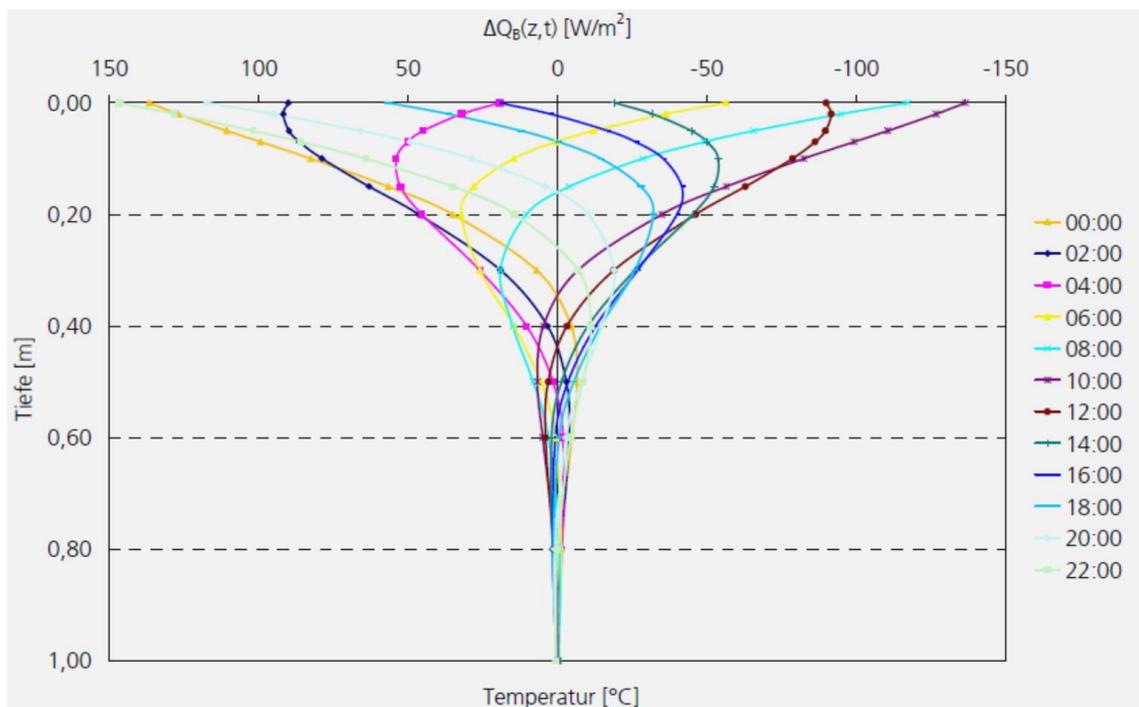


Abbildung 46: Bodenwärmestrom nach Bodentiefe und Tageszeit (Hillel, 2004)

<sup>314</sup>Vgl.: Grenzwerte für Temperaturleitfähigkeiten in Tabellen, Information aus dem Internet <http://de.wikipedia.org/wiki/Temperaturleitfähigkeit> (2011).

<sup>315</sup>Arbeitsgemeinschaft Solar NRW: Studie zur Ermittlung von Bewertungs-Kennzahlen von Luft-Erdwärmetauschern, Version 1.0, August 2005, S.33.

<sup>316</sup>Honarmand u. Dibowski.

Das Kurvendiagramm zeigt das Temperaturverhalten von 24:00 bis 22:00 Uhr am Folgetag sowie die Änderung des Temperaturkurvenverlaufs bis zu einer Tiefe von 60cm. Am Nachmittag ab 12:00 Uhr ändert sich die Richtung der Temperaturkurven und die Wärmeflussdichte nimmt im Boden langsam ab. Das WärmestromPotenzial entsteht innerhalb der Bodenschichten bis zu einer Tiefe von 40cm gleichmäßig und erreicht eine Wärmeflussdichte von bis zu 150W/m<sup>2</sup>.

Die nachstehende Abbildung 47 der Temperaturmessung in Böden bestätigt das Abkühlungs- und Erwärmungsverhalten in den Bodenschichten nach Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Die Wärmeflussdichte wird in einer Bodentiefe von 20 bis 60cm gespeichert und nach Dämpfungsgrad der Bodenschichten abgebaut. Das Temperaturverhalten im Boden verändert sich zwischen 15°C und 30°C während eines Zeitraums von 24 Stunden. Langzeituntersuchungen durch Feldstudien mit Schichttemperaturmessungen zeigen, dass die Temperaturwerte im Boden durchschnittlich um 3°C pro 100 m Tiefe zunehmen. Die abnehmende Wärmeflussdichte in Bodenschichten ab einer Bodenschichttiefe von 15m ist ein Indikator dafür, dass der Einfluss der solaren Strahlungsleistung deutlich in dieser Tiefe abnimmt.

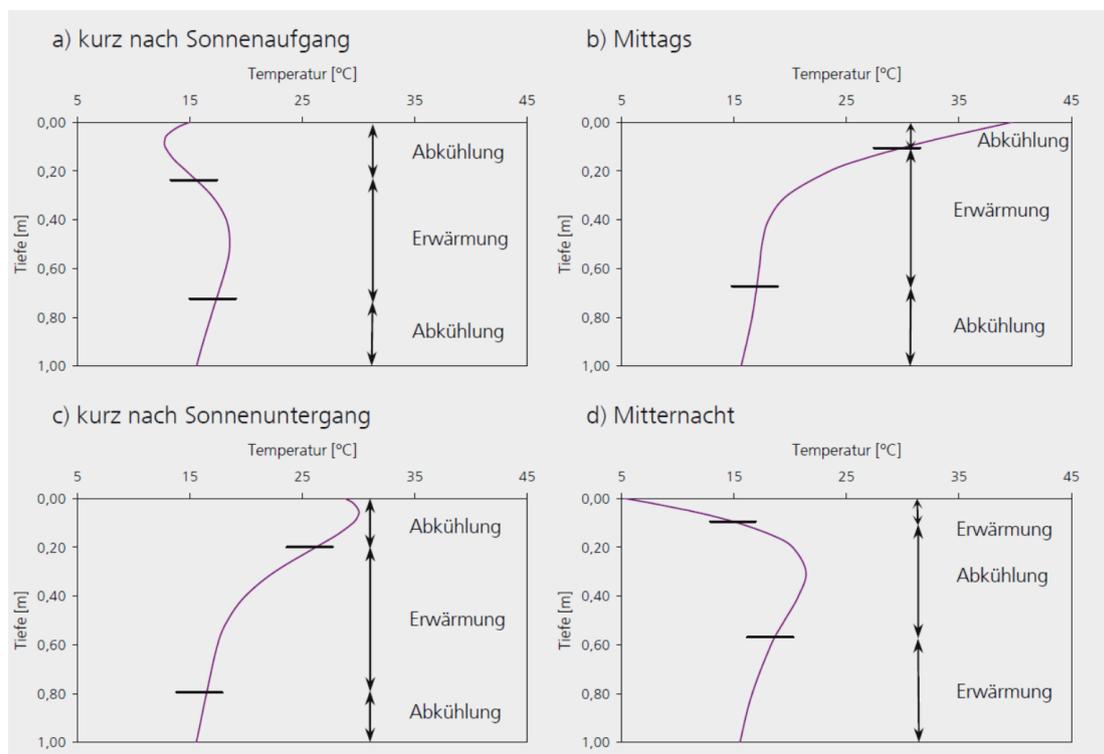


Abbildung 47: Temperaturverhalten in unversiegelten Böden nach Tageszeit

Die Arbeitsgemeinschaft Solar untersuchte durch Modellversuche die Wirkung der Bodentemperaturen an drei Standorten in Deutschland. Die Bodentemperaturwerte sind in

einer Tiefe von 1,5m an drei Referenzstandorten auf der Grundlage der Datenbasis der Wetterdatenbank Meteo – Norm simuliert worden.<sup>317</sup>

Die Analyse der Simulationsergebnisse beweisen, dass der meteorologische saisonale Einfluss der atmosphärischen Lufttemperaturen auf Bodentemperaturen in einer Tiefe von 1,5 m besteht. Das Temperaturminimum im Boden wird während der Heizperiode zwischen Oktober und April erreicht. Die Werte der Bodentemperaturen weisen an den unterschiedlichen Standorten eine Differenz von über 4 K auf. Die Standorthöhe<sup>318</sup> über N.N. wirkt sich auf die Bodentemperaturen am Standort deutlich aus. Die Sensitivitätsanalyse der untersuchten Standorte<sup>319</sup> zeigt, dass ein günstiger meteorologischer geographisch hoch gelegener Standort das Systemverhalten von solarthermischen Anlagen bei einem schlecht geeigneten Boden nicht ausgleichen kann. Ein mit guter Temperaturleitfähigkeit ausgestatteter Boden führt auch an „kalten“ Standorten zu einem guten Wärmeertrag.

Der Vergleich der Messstandorte zeigt, dass an den Standorten in den Städten Köln, Giessen und Oberstdorf die Bodentemperaturen in einer Bodentiefe von 1,50m an 1460 Stunden im Jahr temperaturversetzt gering unterschiedliche Bodentemperaturwerte prognostiziert. In Regionen und Städten ist ein vergleichbares Bodenwärmepotenzial aufgrund der meteorologischen Einflüsse in den Regionen daher zu erwarten. Außerhalb der Heizperiode nimmt der Temperaturverlauf in Böden den Kurvenverlauf ein, den der solare Strahlungsverlauf am Tag vorgibt. Die Temperaturwerte in Bodenschichten nehmen ein Temperaturmaximum von 17°C und ein Temperaturminimum von 5°C während des Jahres ein.

---

<sup>317</sup>Vgl.: AG Solar Nordrhein-Westfalen: Jahresbodentemperaturprofile für drei unterschiedliche Standorte innerhalb der BRD und meteorologische Basisdaten der Referenzstandorte, S.34 (Datenquelle für Außentemperaturen von der Wetterdatenbank Meteonorm).

<sup>318</sup>Vgl.: AG Solar Nordrhein-Westfalen: Jahresbodentemperaturprofile für drei unterschiedliche Standorte innerhalb der BRD und meteorologische Basisdaten der Referenzstandorte, Tabelle der mittleren monatlichen Außenlufttemperaturen an den Referenzstandorten Giessen, Köln und Oberstdorf.

<sup>319</sup>Ebd.: S.38 –Mögliche Abweichungen-.

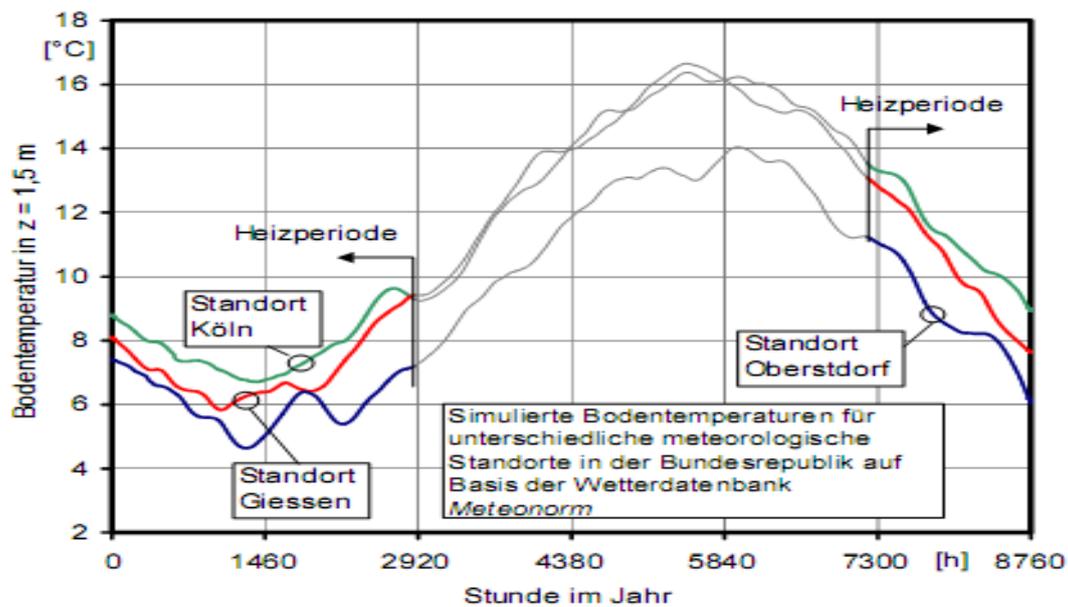


Abbildung 48: Simulierte Bodentemperaturmesswertprofile in der Heizperiode

Das Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen<sup>320</sup> führte Feldstudien zur Analyse von Bodentemperaturen durch und stellte fest, dass das natürliche unbeeinflusste Bodenwärmestrompotenzial in Bodenschichten unterhalb von versiegelten Flächen in Städten einen Wert zwischen  $0,054 < q_n < 0,085$  (W/m<sup>2</sup>) einnimmt. Langzeitmessungen von Bodentemperaturen im Stadtgebiet von Köln<sup>321</sup> bestätigen einen Bodenwärmestrom von 0,059 W/m<sup>2</sup>. Die Bildung des Bodenwärmestroms unter Stadtgebieten ist Ursache einer langjährigen Wärmespeicherung von anthropogenen Wärmelasten durch Industrieversorgungsleitungen, Abwasserleitungsnetzen etc.<sup>322</sup> Modellrechnungen zeigen, dass während des Bewertungszeitraums von 10, 20 und 50 Jahren ein Anstieg der Wärmespeicherkapazität<sup>323</sup> unter versiegelten Stadtflächen von bis zu 50% zukünftig erwartet

<sup>320</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Balke, K.-D., Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen, S. 72 (gesamte Wärmestromdichte  $q_{ges}$ .)

<sup>321</sup>Ebd.: S.80-82 (Abb. 57,58,59 Gewinnbare Wärmemengen aus dem Untergrund der Stadt Köln während 10, 20 und 50 Jahren).

<sup>322</sup>Ebd.: S. 78 (Abb. 55 und 56 Energievorrat im Untergrund der Stadt Köln bei Temperaturabsenkung von 10° C und 7° C.

<sup>323</sup>Ebd.: S. 73 (Wärmebilanz).

werden kann. Die Untersuchungsergebnisse sind für städtische Ballungsräume in regionalen Klimazonen in Deutschland repräsentativ.<sup>324</sup>

Der Forschungsbericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie über Grundwassertemperaturen in Ballungszentren<sup>325</sup> bestätigt, dass auch Grundwasservorkommen unter Oberflächen von Ballungsgebieten das Bodenwärmepotenzial ansteigen lässt. Die Auswertung der Grundwassertemperaturwerte<sup>326</sup> zeigt, dass insbesondere die Bodentemperaturen unterhalb des versiegelten Stadtgebietes wesentlich höher sind als im unversiegelten Gelände. Leitungsgebundene Nah- und Fernwärmenetze in städtischen Versorgungsgebieten stellen Linienquellen mit einem hohen thermischen Wärmepotenzialfeld dar und sind beteiligt am Zuwachs des Bodenwärmestrompotenzials. Das Wärmepotenzialfeld im Bereich einer unterirdisch verlegten Fernwärmeleitung zum Beispiel nimmt vom Rohrleitungsmittelpunkt seitlich bis zu einem Abstand von 3,5m um circa 50% ab.<sup>327</sup> Diese erdverlegten Rohrleitungsnetze verursachen eine indirekte Erwärmung der angrenzenden Bodenschichten und Grundwasservorkommen.

Der Deutsche Wetterdienst registriert an Messstationen zu den meteorologischen Daten ebenfalls Bodentemperaturwerte. In der folgenden Abbildung 49 ist das Wechselspiel zwischen den Wetterelementen und der solaren Einstrahlung zu erkennen. Die Bodentemperaturwerte werden durch die solare Strahlungsintensität direkt beeinflusst.

Das Temperaturmessdiagramm zeigt meteorologische Messdaten und Messdaten der Bodenschichtprofile am Standort Bremen während des Zeitraumes vom 13.11. bis 25.11..<sup>328</sup> Die Einflüsse der solaren Strahlung, die auf die unversiegelte Bodenoberfläche als kurzweilige solare Strahlung auftrifft, verändern langfristig die Bodenschichttemperaturen. Der Anstieg der Temperaturwerte in den Bodenschichten bis zu einer Tiefe von 0,2m ist durch die Einwirkung der täglichen solaren Strahlung messbar. Die Einwirkung der solaren Strahlung auf die Oberflächen erzeugt einen zeitlich verschobenen Temperaturanstieg

---

<sup>324</sup>Ebd.: S. 88 (Untergrundtemperaturen bis über 14° C in 15 bis 25 m Tiefe flächenhaft im Untergrund der Stadt Köln).

<sup>325</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Balke, K.-D., Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen, S. 7, Februar 1981

<sup>326</sup>Ebd.: S. 46 (Abb.32: Grundwassertemperaturen, 15 m unter Gelände)

<sup>327</sup>Ebd.: S. 64 (Fernwärmeleitungen).

<sup>328</sup>Vgl.: Deutscher Wetterdienst: Bodentemperaturprofil im Stadtgebiet Bremens im Monat November mit atmosphärischen Umgebungstemperaturen. Information aus dem Internet unter <http://www.dwd.de/DE/leistungen/bodentemperatur/bodentemperatur.html>. (Stand 2016).

ab einer Tiefe von 0,10 bis 0,80m. Das Temperaturverhalten im Boden verändert sich somit diskontinuierlich, aufgrund der Abnahme und Zunahme der solaren Strahlung.

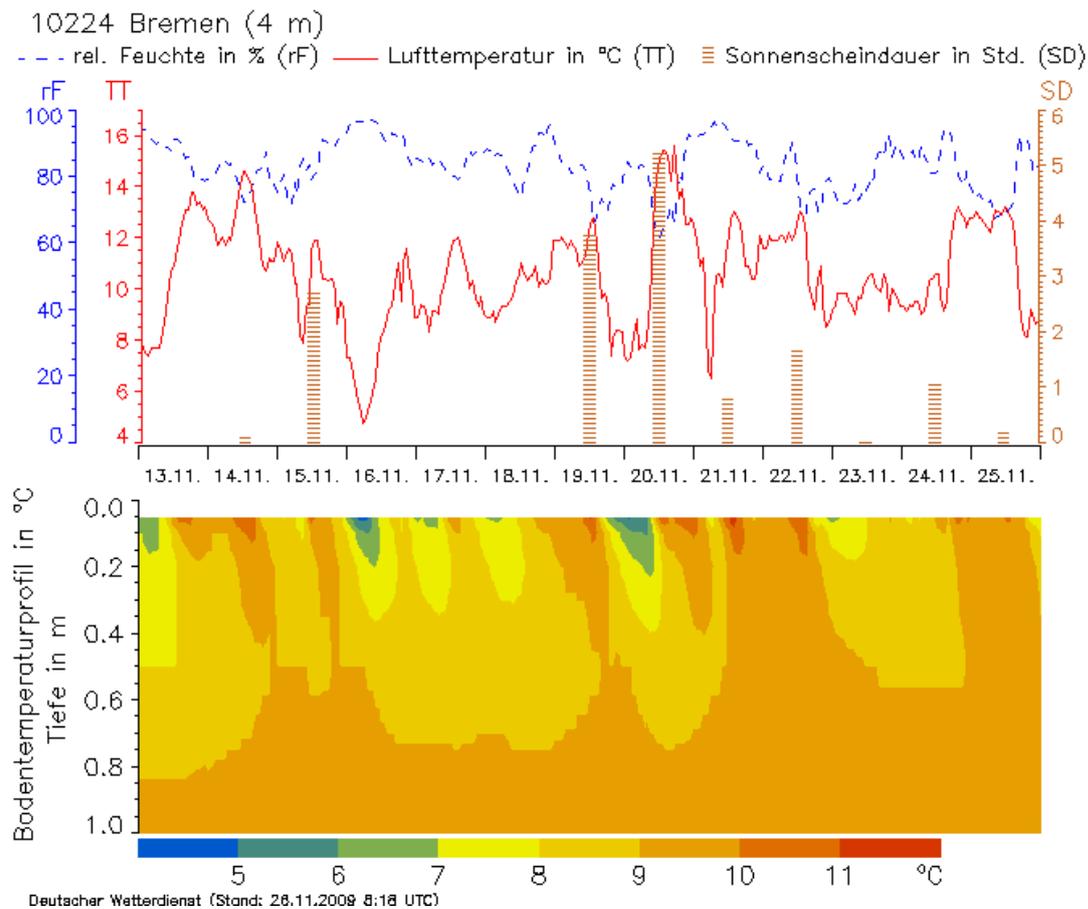


Abbildung 49: Bodenschichttemperaturprofil einer unversiegelten Fläche

Der abwärts gerichtete Wärmestrom<sup>329</sup> führt täglich zu einer Aufschichtung des Bodenwärmepotenzials. Das Bodentemperaturprofil der Abbildung 49 zeigt das vorhandene Bodenwärmepotenzial.

Feldmessungen von städtischen Oberflächentemperaturen in Langzeitprojekten zur Analyse der Abhängigkeit von Windverhältnissen im Bereich von Asphaltstraßen sind im Rahmen des Umwelt-Monitorings in Japan durchgeführt worden. Der Messbericht stellt eine Auswertung der Temperaturmesswerte von Fahrbahntragschichten und unversiegelten Randflächen dar.<sup>330</sup>

<sup>329</sup>Bundesamt geologischer Rohstoffe (BGR): Rohstoffe der Erde: Geothermische Energie, Kapitel 7: Wärme aus der Erde zur Energienutzung, S. 176 ff.

<sup>330</sup>Mariko Kumamoto: Field Experiment on the Effects of a Nearby Asphalt Road on Temperature Measurement, Meteorological Research Institute (MRI), Tsukuba, Japan, 2010-2011. Information im Internet unter URL [http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-109\\_TECO-2012/Session3/O3\\_05\\_Kumamoto\\_Aspphalt\\_Road\\_and\\_Temp\\_meur.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-109_TECO-2012/Session3/O3_05_Kumamoto_Aspphalt_Road_and_Temp_meur.pdf) (2016).

#### 4.2.5. Berechnung der Wärmeflussdichte von Flächen und Böden

Als Datengrundlage sind ganzjährige Bodenschichttemperaturwerte aus Bodentiefen erforderlich. Da die Wärmeströmung entlang des Temperaturgradienten von einer wärmeren Bodenschicht zu einer kälteren Bodenschicht fließt, entsteht ein deutlicher Temperaturunterschied an den Rändern der oberen und unteren Bodenschichtgrenzen. Die Temperaturwertdifferenz in einer Bodenschicht verändert sich in einem Zeitintervall und bewirkt die Bildung des vertikalen nach oben und nach unten gerichteten Bodenwärmestroms.

Die Berechnung des stationären Wärmestroms  $Q$  - wenn der Wärmestrom von der untenliegenden warmen Bodenschicht zur obenliegenden kalten Bodenschicht fließt – ist unter Hinzunahme eines Wärmeübergangskoeffizienten  $hc$  mit Gleichung 18 zu berechnen:<sup>331</sup>

$$(18) \quad hc = 1,73 \cdot (T_s - T_a)^{1/3} \quad (W/(m^2K))$$

Fließt der Wärmestrom von der obenliegenden warmen Bodenschicht zur untenliegenden kalten Bodenschicht, wird der Wärmeübergangskoeffizient mit Gleichung 19 zu:

$$(19) \quad hc = 0,59 \cdot (T_s - T_a)^{1/5} \cdot (U / A)^{2/5} \quad (W/(m^2K))$$

Der stationäre Wärmestrom wird aus der Bodenschichttemperaturdifferenz, den Wärmeübergangskoeffizienten und dem horizontalen Flächenmaß berechnet. Die Berechnungsmethode zur Quantifizierung des vertikalen Wärmestroms in einer Bodenschicht ist in der Fachliteratur als Wärmeleitfähigkeitsmethode oder Tautochronenmethode angegeben.<sup>332</sup>

Die Wärmeleitfähigkeit und der vertikale Temperaturgradient der oberen Bodenschicht sind zu bestimmen, damit der Wärmestrom, der die Bodenschicht durchströmt, rechnerisch berechnet werden kann. Die Wärmeflussdichte in Bodenschichten ist mit Hilfe von kontinuierlichen Zeitreihen in der Regel von mehreren Bodentemperatur-Vertikalprofilen zu bestimmen (Heterogenitätsproblem). Ist die zeitliche Änderung der Temperaturwerte in einer Bodenschicht aus Temperaturmessungen bekannt, so ist die Wärmestromflussdichte errechenbar nach der zeitlichen Temperaturänderung in dieser Bodenschicht.

---

<sup>331</sup>Willems, Wolfgang M.: Fakultät für Bauwesen an der Ruhr-Universität Bochum, Baukonstruktionen und Bauphysik, Scriptum zur Lehrveranstaltung, Themenbereich Wärmeschutz II, 26.Juli 2004.

<sup>332</sup>Universität Innsbruck – Institut für Ökologie: Simon Geißler und Paul Schmidt-Walter, Physikalische Prozesse in der Ökologie - Praktikum, Aufgabe 5, Universität Innsbruck – Institut für Ökologie, 1997.

Der Wärmestrom ist eine Funktion der Zeit und der Bodenschichttiefe in Abhängigkeit der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität.

$$(20) \quad G_{\Delta z} = \frac{dT_{\Delta z}}{dt} \cdot \rho_{\Delta z} \cdot c_{\Delta z} \quad \text{J/(m}^2 \text{ K)}$$

Die gesamte Wärmeflussdichte, die durch die Bodenoberfläche  $G$  strömt, wird in der Summe der Einzelflussdichten über alle Schichten bis hin zu einer Tiefe, in der die zeitlichen Temperaturschwankungen vernachlässigbar klein sind, berechnet.

Die Tautochronenmethode ist geeignet, die mittleren Wärmeflussdichten in Bodenschichten graphisch darzustellen. Durch die Auswertung der kontinuierlichen Zeitreihen von vertikalen Bodentemperaturmessprofilen ist eine Berechnung des Wärmestrompotenzials gegeben. Die Wärmespeicherkapazität in einer Bodenschicht ist abhängig von dem Wassergehalt, Gehalt an organischem Material und dem Porenvolumen.

Die thermische Eigenschaft von Bodenkomponenten und Böden ist in der Fachliteratur<sup>333</sup> angegeben.

Die Auswertung der Temperaturmesskurven der durchschnittlichen Wärmeflussdichte der Bodenschichten (DW 1 bis DW 6) in der nachstehenden Abbildung 50 zeigt, dass ein Wärmeflussmaximum (3-4 W/m<sup>2</sup>) zwischen 11:00 und 14:00Uhr sich einstellt. Nach der darauffolgenden langsamen Abkühlung der Bodenschichten bis 03:00Uhr am Morgen stellt sich die Wärmeflussdichte negativ zu -2W/m<sup>2</sup> ein. In tieferen Bodenschichten stellt sich ein kontinuierlicher Kurvenverlauf der Wärmeflussdichte von 1W/m<sup>2</sup> ein.

---

<sup>333</sup>Monteith and Unsworth, 1990. Thermal properties of soils and their components (after van Wijk and de Vries 1963).

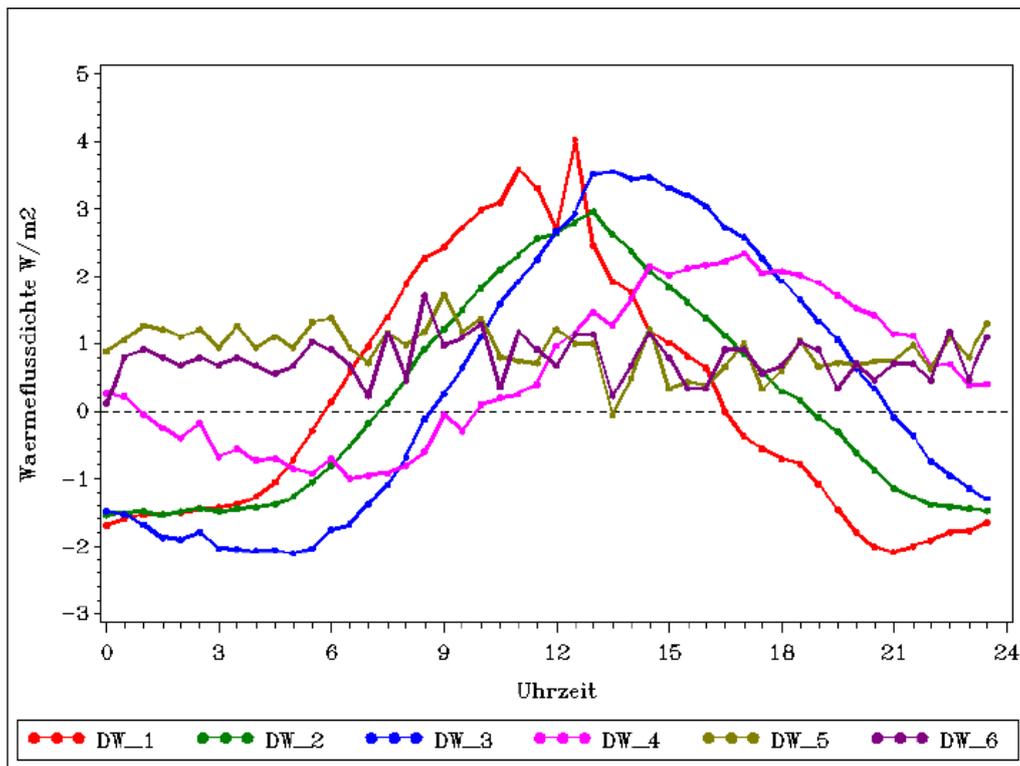


Abbildung 50: Wärmeflussdichte eines monatlichen Tagesganges

In Bodenschichten ab einer Tiefe von 0,50m ist der Verlauf der Wärmeflussdichte nicht abhängig von der solaren Strahlung. Die Auswertung der Wärmeflussdichten der Bodenschichten ist als gesamte Wärmeflussdichte des Bodenprofils im nachstehenden Graph der Abbildung 51 dargestellt. Der Maximalwert der Wärmeflussdichte steigt bis zu 13W/m<sup>2</sup> am Tag an. Der Kurvenverlauf der Abkühlungsphase wird durch die solare Strahlungsintensität abgelöst und steigt mit der Erwärmungsphase der Bodenoberfläche wieder an. Die Wärmeflussdichte wird in diesem Zeitintervall im Boden gespeichert.

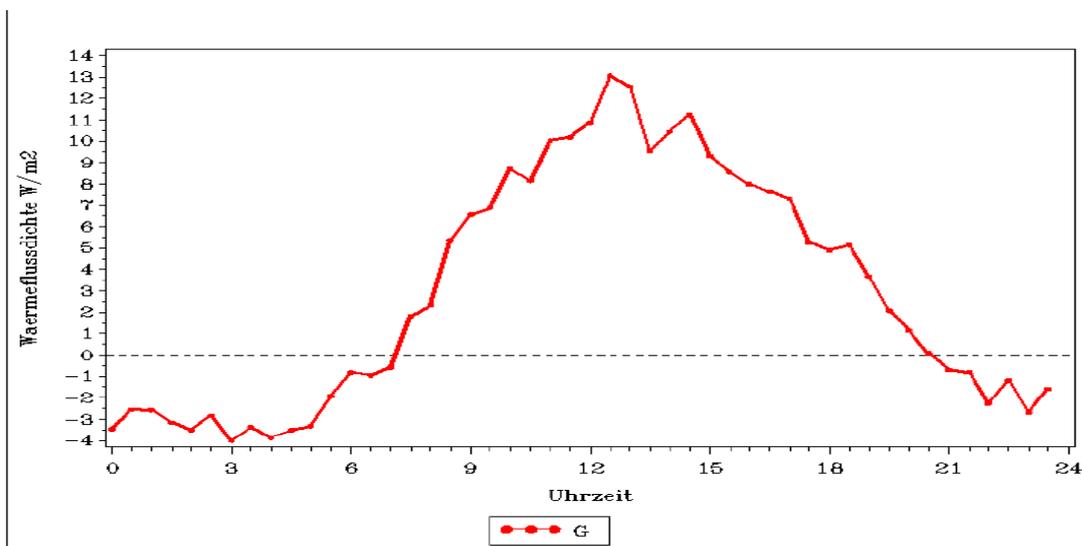


Abbildung 51: Gesamte Wärmeflussdichte eines Tagesganges

Der gesamte Bodenwärmestrom zeigt einen etwas breiteren Verlauf im Tagesgang, da er die Summe der Wärmeströme der einzelnen Schichten darstellt. Die Wärmeflussdichte ist von dem standortbezogenen Beschattungsgrad, der direkten Sonneneinstrahlung und dem Temperaturgradienten der nächsten Bodenschicht abhängig. Die Wärmeflussdichte einer Bodenschicht ist proportional zum Vertikalgradienten der Temperatur über dieser Bodenschicht. Theoretisch wird bei gleicher Wärmekapazität der Bodenschichten ein sinusförmiger Verlauf der Wärmeflussdichte erwartet, der bei der nächst tiefer liegenden Schicht nach rechts verschoben und gedämpft ist. In der Realität kommt es durch unterschiedliche Wärmekapazitäten in den Schichten zu leicht abgewandelten Wärmeflussdichten. Liegt eine Temperaturanpassung zwischen der unten liegenden Bodenschicht und der höher liegenden Bodenschicht vor, sinkt die Wärmeflussdichte. Der Vorgang wiederholt sich während des Tages von Bodenschicht zu Bodenschicht. Nimmt die Sonnenstrahlung tagsüber ab und gibt der Boden mehr Wärme an die Grenzschicht ab, als er durch Strahlungsabsorption gewinnt, nimmt die Wärmeflussdichte einen negativen Wert ein. Während der Sommermonate erwärmt sich der Boden gleichmäßig und erhält eine im betrachteten Zeitraum positive Wärmeflussdichtenbilanz. Die gespeicherte Wärme kann bei niedrigeren Bodenschichttemperaturen wieder an Bodenschichten abgegeben werden und trägt so zu einer Dämpfung der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen bei. Dabei nehmen die tiefer gelegenen Bodenschichten die Funktion als Wärmespeicherung ein. Die Proportionalitätskonstante  $k$  wird als Wärmeleitfähigkeit (thermal conductivity) in Gleichung 21 bezeichnet.

$$(21) \quad G = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad J/(m^2s) = J/m^4$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens wird in die Transportgröße der Wärmediffusivität  $k$  nach Berechnungsgleichung 22 umgerechnet.

$$(22) \quad G = -k \cdot \frac{\partial W}{\partial z} = -k \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot \partial T}{\partial z} \quad J/(m^2s) = J/m^4$$

Die Berechnungsgleichung 22 zeigt, dass die Wärmeflussdichte  $G$  proportional zum Vertikalgradienten der Wärmemenge steht.

Die Wärmediffusivität ist eine reine Transportgröße, d.h. sie enthält, anders als die Wärmeleitfähigkeit, keine Anteile der transportierten Größe mehr und wird in  $\text{m}^2/\text{s}$  angegeben.

Das Bodensystem ist ein Drei-Phasensystem. Die Bodendichte, die sich definiert aus der Festsubstanz und dem Wassergehalt, ist abhängig vom Porenvolumen.<sup>334</sup>

Die Wärmemenge, die dazu benötigt wird, ergibt sich aus dem Produkt der Wärmekapazität einer Schicht und der Temperaturänderung in einer Bodenschicht. Ebenso lässt sich die vorhandene Wärmemenge aus der Flussdivergenz - Differenz der Wärmeflussdichten an den Rändern zum Beispiel der Bodenschichten ( $G_o, G_u$ ) - berechnen. Folgende Differenzialgleichung ist die Berechnungsgrundlage:

$$(23) \quad \frac{dW}{dt} = G_u - G_o = -k \frac{\partial W_u}{\partial z} - \left( -k \frac{\partial W_o}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial W_o}{\partial z} - \frac{\partial W_u}{\partial z} \right) = k \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}$$

Wenn sich die Dichte und die spezifische Wärmekapazität im Boden nicht ändern, wird aus der obigen Differenzialgleichung durch Division beider Seiten mit  $\delta \cdot c$  die Differenzialgleichung in Abhängigkeit der zeitlichen Änderung.

$$(24) \quad \frac{dT}{dt} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Die Temperaturzusammenhänge in den Bodenschichten sind in dem Graph Temperatur zur Bodentiefe in der nachstehenden Abbildung 52 dargestellt.<sup>335</sup> Bei konstanter Bodentemperatur nimmt die Temperatur konstant mit der Bodentiefe ab und ein Ansteigen der Bodenschichttemperaturen nach Schichttiefe ist zu erwarten. Im weiteren Kurvenverlauf nehmen die Schichttemperaturwerte nach Bodentiefe ab und eine Auskühlung der Bodenschichten erfolgt.

Dieses Wechselspiel wiederholt sich im Verlauf der anstehenden Bodenschichten und bewirkt gleichzeitig ein Ansteigen des Wärmepotenzials im Boden.<sup>336</sup>

---

<sup>334</sup>Ibrom, Andreas: IbK - Physikalische Prozesse in der Ökologie, Wärmetransport, 09.09.2002. Information im Internet unter <http://www.gwdg.de> (Stand 2016).

<sup>335</sup>Monteith und Unsworth, 1990.

<sup>336</sup>Ebd.: SAS-Macro-Wärmemodell. Information im Internet unter [http://www.ufobi6\(trans\ppoe\ueb5\ waermemodell.sas. \(2016\)](http://www.ufobi6(trans\ppoe\ueb5\ waermemodell.sas. (2016))

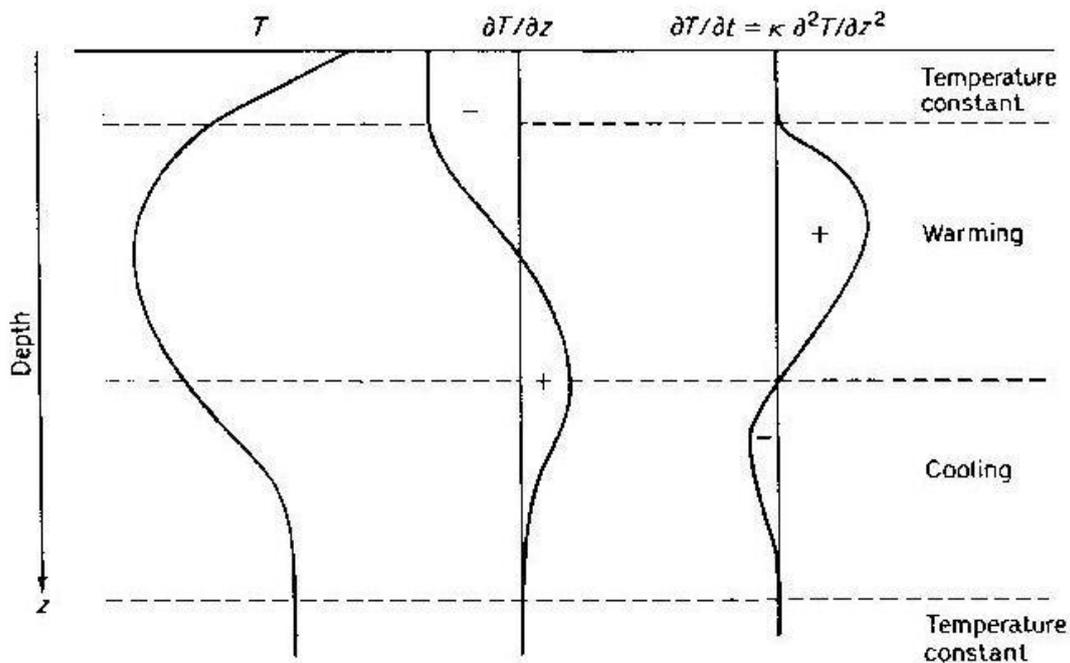


Abbildung 52: Phasen der Erwärmung und Abkühlung in Bodenschichten

#### 4.2.6. Energiebilanz und Wärmeentzugsleistung von Böden

Die Energiebilanz von verschiedenen Oberflächen hat entscheidenden Einfluss auf die thermischen und hygri-schen Zustände der städtischen atmosphärischen Luftschicht - Urban Canopy Layer (UCL).<sup>337</sup> Bei städtischen Oberflächenstrukturen mit geringer Vertikalstreckung, aber größerer horizontaler Reichweite, wie zum Beispiel Sand-, Wiesen-, Wasser- und Asphaltflächen, lassen sich die Komponenten der Energiebilanzgleichung einer Oberfläche über das Bowen Ratio-Energy Balance (BREB) Verfahren, der aerodynamischen Methode oder über das Eddy Correlation (EC) Verfahren bestimmen.<sup>338</sup>

Der Energieeintrag der solaren Strahlung einer versiegelten und unversiegelten Oberfläche wird mit der Energiebilanzgleichung 25<sup>339</sup> wie folgt berechnet:

$$(25) \quad Q_{net} = Q + B + H + V$$

<sup>337</sup>Matzarakis, Andreas: Die thermische Komponente des Stadtklimas, Habilitation an der Universität Freiburg, 2001. Definition UCL: vertikale Schicht von der Bodenoberfläche bis zur mittleren Hausdachhöhe in einer Stadt.

<sup>338</sup>Matzarakis, Andreas: Die thermische Komponente des Stadtklimas, Habilitation an der Universität Freiburg, 2001, S.1 ff.

<sup>339</sup>Ebd.: S.13 (Energiebilanzgleichung).

In der Berechnungsgleichung sind  $Q_{net}$  die Summe aller Energieeinträge einer Oberfläche,  $Q$  Strahlungsbilanz,  $B$  Bodenwärmestrom in tiefer liegenden Bodenschichten,  $H$  turbulenter Strom fühlbarer Wärme - ausgetauschter Wärmemenge zwischen Boden und Luft,  $V$  turbulenter Strom latenter Wärme -Energiefluss infolge von Kondensations- und Verdunstungsvorgängen.

$$(26) \quad Q = (1 - \alpha) \cdot G + (AG - A)$$

Die Berechnungsgleichung 26 setzt sich aus den Termen zusammen:  $Q$  Strahlungsbilanz einer Oberfläche,  $\alpha$  Albedo einer Oberfläche,  $G$  Globalstrahlung - Summe der auf eine Oberfläche auftreffenden solaren Strahlung-,  $AG$  atmosphärische Gegenstrahlung,  $A$  langwellige Ausstrahlung von der Erdoberfläche. Der überwiegende materialabhängige Einfluss auf die innerhalb einer Oberfläche aufgenommene Energie erfolgt über den solaren Strahlungsanteil. Die auf einer horizontalen Oberfläche auftreffende Globalstrahlung  $G$  wird direkt als kurzwellige Reflexionsstrahlung an die Umgebungsluft wieder abgegeben. Die Energiebilanz in Höhe der Gebäudedachflächen und der Grenze zwischen UCL und UBL wird mit folgender Summationsgleichung berechnet:

$$(27) \quad R_n + E_s + E_l + L + V + \delta B_e = 0$$

Die Summation<sup>340</sup> der Berechnungsgleichung 27 setzt sich aus:  $R_n$  Strahlungsbilanz,  $E_s$  anthropogen erzeugter fühlbarer Wärme,  $E_l$  anthropogen erzeugter latenter Wärme,  $L$  Änderung der Energiespeicherung unter der Energieumsetzungsfläche,  $V$  turbulenter Strom der fühlbaren Wärme und  $\delta B_e$  turbulenter Strom der latenten Wärme zusammen und wird gleich 0 gesetzt.

Der meteorologische saisonale Einfluss auf die Temperaturverhältnisse der Erdoberfläche ist durch Feldversuche in Regionen nachgewiesen worden.<sup>341</sup> Die Bodenmasse ist ein Drei-Phasengemisch, bestehend aus dem Feststoffanteil, der Feuchtigkeit und den mit Luft gefüllten Kapillaren.

Das Gesetz von Fourier<sup>342</sup> ist in der Berechnungsgleichung 28 mit

---

<sup>340</sup>Ebd.: S.30.

<sup>341</sup>Welpmann, Matthias: Bodentemperaturmessungen und -simulationen im Lötschental (Schweizer Alpen), Dissertation, mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2003.

<sup>342</sup>Vgl.: Wikipedia: Gesetz von Fourier. Die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung wird durch das Fouriersche Gesetz nach Jean Baptiste Joseph Fourier beschrieben. Die Berechnungsgleichung zur Berechnung der Wärmeleistung ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit und der Bauteildicke.

$$(28) \quad Q = \lambda / d \cdot A(T_{W1} - T_{W2}) \quad \text{W/m}^2$$

angegeben und zeigt, dass die flächenspezifische Wärmeleistung dem Temperaturgradienten und der materialspezifischen Wärmeleitfähigkeit proportional<sup>343</sup> ist.

Trockene Böden weisen demnach mit zunehmender Feuchtigkeit einen Anstieg der Temperaturleitfähigkeit auf. Die thermischen Eigenschaften von Böden bestimmen, mit welcher Geschwindigkeit und in welcher Tiefe sich tages- und jahreszeitliche Schwankungen der atmosphärischen Temperatur im Boden ausbreiten. In der Bodenschichttiefe beträgt die Temperaturamplitude nur noch etwa 5% des Oberflächentemperaturwertes der Erdoberfläche.<sup>344</sup>

In Gebirgsregionen, insbesondere an Sonnen- und Schattenhängen, sind die maximalsten Bodenoberflächentemperaturwerte an strahlungsbegünstigten und vegetationsfreien Standorten gemessen worden. Gesteinsanteile in den Bodenschichten erhöhen den Wärmeertrag und die Wärmespeicherung.<sup>345</sup>

Berechnungen zum Wärmeübergang in Feldversuchen beweisen, dass die tägliche bzw. jährliche meteorologische Beeinflussung des Bodens durch Veränderungen der atmosphärischen Lufttemperaturwerte besteht. Die maximale jährliche Eindringtiefe für einen "typischen Boden" unter Einwirkung der solaren Strahlungsenergie wird in der Fachliteratur mit 0,75m bis 14m angegeben.<sup>346</sup>

Die mineralische Zusammensetzung der Bodenschichten ist Grundlage für gute thermische Speicherbedingungen bei einer hohen spezifischen Wärmeleitfähigkeit<sup>347</sup>, spezifischen Wärmekapazität und Dichte des Bodens.

Die solare Strahlungsenergie trifft als kurzwellige Strahlung auf die Grenzschicht von Flächen und wird von der Oberflächenbeschaffenheit des anstehenden Bodens (Albedo) absorbiert. Der sich in Bodenschichten aufbauende instationäre Wärmestrom ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens und der solaren Einwirkzeit der angrenzenden Bodenschichten. Die Fachliteratur definiert eine nutzbare Bodentiefe für die Oberflächen-

<sup>343</sup>Welpmann, Matthias: Bodentemperaturmessungen und -simulationen im Lötschental (Schweizer Alpen), Dissertation, mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2003, S.11 (Wärmefluss).

<sup>344</sup>Ebd.: S.12.

<sup>345</sup>Ebd.: S. 122 (Zusammenfassung).

<sup>346</sup>Peixoto/Oort (S. 220 ff.) und OKE, 1987.

<sup>347</sup>Anmerkung durch den Verfasser: spezifische Wärmeleitfähigkeit von Erdreich (grobkiesig) beträgt 0,52 W/(mK), von Sandboden feucht 0,58 W/(mK) und von Tonboden 1,28 W/(mK).

thermie von 1,2 m bis 1,8 m, die den Erfahrungswerten aus Feldversuchen entnommen worden sind. Das Anlagensystem der Oberflächenthermie erfordert eine ausreichend große Energieerzeugungsfläche von einer zwei- bis dreifacher Größe der Gebäudeheizfläche, sodass eine ausreichende Ertragsfläche am Versorgungsstandort vorgehalten werden kann. Geologische Felduntersuchungen weisen eine Wirkung des solaren Strahlungseinflusses auf die Bodenschichttemperaturwerte bis zu einer Bodentiefe von 10m nach. Die mittlere Kollektorwärmeentzugsleistung für Flächenkollektoren wird in der Fachliteratur mit 10 bis 40W/m<sup>2</sup> für verschiedene Bodenarten angegeben. Die statistische Auswertung von Anlagensystemen zur Nutzung von Bodenwärme zeigt, dass eine Wärmeentzugsleistung für bindigen Lehmboden von 20 W/m<sup>2</sup> gegeben ist. Aufgrund der Sicherstellung eines effizienten Anlagenwirkungsgrades sind Temperaturschwankungen von -5°C bis +5°C bei der Verlegung der Rohrschlaufenregister im Erdreich zu beachten.<sup>348</sup>

Infolge der täglichen Entzugsleistung von Wärme aus den Bodenschichten während des Anlagenbetriebes entsteht eine Temperaturdifferenz von bis zu 10°C in der Heizperiode. Die kontinuierliche Temperaturabnahme in den tieferen Bodenschichten während des Wärmeentzuges kann langfristig zu einer Vereisung des anstehenden Bodens führen.

Die Leibniz Universität Hannover hat wissenschaftliche Untersuchungen von Bodenschichten unter Gebäudefundamenten in hoch verdichteten Baugebieten im Jahr 2009 initiiert, um langfristige Veränderungen von Temperaturschwankungen in Bodenschichten durch die Bereitstellung von Wärme- und Klimaraumenergie nachzuweisen.

Die Fachliteratur stellt Richtwerte zur Wärmeentzugsleistung von anstehenden Böden zur Verfügung:

<b>Bodenqualität</b>	<b>spezifische Wärmeentzugsleistung</b>
Kies, Sand trocken	20 - 25 W/m
Kies, Sand wasserführend	55 - 80 W/m
Ton, Lehm feucht	30 - 50 W/m
Kalkstein	45- 70 W/m
Sandstein	55 - 80 W/m
Gneis, Granit	55 - 85 W/m

Tabelle 2: Spezifische Wärmeentzugsleistung nach Bodenqualität

<sup>348</sup>Vgl.: VDI Richtlinie 4640.

Für die Einstufung der Wärmeentzugsleistung zum Beispiel für Erdwärmesonden nach VDI 4640 in Abhängigkeit der Jahresbetriebsstunden werden folgende Richtwerte für die Wärmeentzugsleistung in den Sommermonaten für Bodenarten und Betriebsstunden in der Tabelle 3 angegeben:

<b>Bodenqualität und spezifische Wärmeentzugsleistung mit Warmwasseraufbereitung in den Sommermonaten</b>	<b>Betriebsstunden 1800 h/a</b>	<b>Betriebsstunden 2400 h/a</b>
Schlechter Untergrund, trockenes Sediment	25 W/m	20 W/m
Normaler Festgestein-Untergrund wassergesättigtes Sediment	60 W/m	50 W/m
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit	84 W/m	70 W/m

Tabelle 3: Wärmeentzugsleistung von Erdwärmesonden nach VDI 4640

Die Temperaturwerte der Bodenoberflächen sind im Wesentlichen von den atmosphärischen Außenlufttemperaturen geprägt. Starke Veränderungen der Lufttemperaturwerte haben daher stets auch Veränderungen der Bodentemperatur zur Folge. Diese Temperaturschwankungen wirken sich auf die Bodenschichten aus und beeinflussen indirekt das erdoberflächennahe thermische Feld. Diese Veränderungen sind in den letzten Jahrzehnten in Ortschaften und Stadtgebieten durch Messungen<sup>349</sup> der Bodentemperaturen nachgewiesen worden.

### **4.3. Planungsinstrumente für die solare Stadtplanung**

#### **4.3.1. Solare Berechnungsprogramme**

Das Berechnungsprogramm STEMOD/UR berechnet aus den meteorologischen Standortdaten der mittleren Sonnenstunden im Monat, Orientierung und Neigung, der von den Sonnenstrahlen benetzten Flächen, den zu erwartenden passiven Energieertrag über

---

<sup>349</sup>Ebd.: S. 49 (Abb. 35 und 36: Lufttemperatur °C in Bonn und Kiel).

Fensteröffnungen und Wintergärten von Gebäuden. Die dynamische Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs der Modellgebäude wird mit berücksichtigt.

Die Weiterentwicklung dieses Berechnungsmoduls für die städtebauliche Planung und für die Stadtentwurfsplanung ist mit Hilfe des Berechnungsprogrammes GOSOL<sup>350</sup> (1986-1991) gegeben. Als Datengrundlage der Berechnungsschritte werden Wetterdaten des Standortes über Sonnenstundenzahl, Globalstrahlungsleistung, atmosphärischen Lufttemperaturen, Gebäudekennwerten bezogen auf den Gebäudetyp, städtebauliche Kennwerte wie Grundflächenzahl (GRZ) und Geschossflächenzahl (GFZ) verwendet. Bauleitplanerische Vorgaben aus dem rechtskräftigen Bebauungsplan unter Berücksichtigung der zukünftigen städtebaulichen Situation durch Schattenwurf, Gebäudeabstand, Gebäudehöhe und Gebäudeausrichtung erweitern die Berechnungsergebnisse für den städtebaulichen Bedarf. Vergleichsberechnungen an Gebäuden in Städten mit dem Programm GOSOL zeigen, dass durch die Aufnahme der passiven solaren Strahlung über Fassadenflächen der Gebäudeheizenergiebedarf bis zu 15 bis 30% gesenkt werden kann.

### **Sun Area - Solarertragsberechnung von Dachflächen**

Die Stadt Osnabrück hat das Projekt „Sun Area“ zur Berechnung des maximalen Stromertrages über solartechnische Anlagen für Städte unter Berücksichtigung von Gebäuden, Straßenwegenetz und Gebäudedachflächen entwickelt. Die Berechnungsgrundlage von Gebäudeflächen ist an Gebäudekategorien gebunden. Der maximale Solarertrag von technischen Solarsystemen, die auf Dachflächen von Gebäuden installiert werden könnten, ist mit Hilfe der Auswertung von Luftbildern ermittelt worden. Auf der Grundlage der von der Stadt Osnabrück zur Verfügung gestellten Laserscandaten stehen 95% aller Gebäudedachflächen nach Form, Neigung, Exposition und Verschattung zur Verfügung. Das im Jahresverlauf nutzbare Solarenergiepotenzial wird der Stadtplanung zur Verfügung gestellt. Das Berechnungsmodul prognostiziert bei einer effizienten Belegung der Dachflächen mit PV - Modulen<sup>351</sup> eine Kohlendioxideinsparung pro Jahr.

Die verlässliche Berechnung des technischen Solarstrahlungspotenzials stellt für die Öffentlichkeit einen wesentlichen Beitrag zur ortsbezogenen Integration von regenerativen Energiesystemen unter Nutzung von Umweltenergie zur Verfügung. Im Rahmen der Sen-

---

<sup>350</sup>Vgl.: BauÖKOpapiere 55: Passive Sonnenenergienutzung in der Bauleitplanung, Entwicklung des EDV-gestützten Programms GOSOL, S. 4-9, Stuttgart, November 1991.

<sup>351</sup>Ebd.: Startseite Sun Area, Kategorien der Solareignung: sehr gut >95%, gut 81-95%, bedingt 75-80% der nutzbaren Solarstrahlung, 2008.

sibilisierung und der Förderung des Energiedialoges zwischen Mieter und Vermieter<sup>352</sup>, insbesondere für Bestandsgebäude mit einem hohen Heizwärmebedarf, entwickelten die Stadtwerke Osnabrück dieses Projekt. Im Mittelpunkt steht die Reduzierung des Energieverbrauchs für die Heizung und Warmwasserbereitung mit dem Ziel der Energieeinsparung.<sup>353</sup>

Städtische Solardachkataster werden von den Stadtverwaltungen als Planungshilfen für Bürger, die technische Solaranlagen und Projekte der Solarenergie umsetzen, bereitgestellt. Landkreise, Stadtverwaltungen und Fördervereine stehen zur Projektförderung für eine Solarstadt und solartechnischen Anlagen mit Unterstützung durch Initiativen der Wirtschaft zur Förderung zur Verfügung. Die Kooperation mit dem städtischen Energieversorger, Anlagensystemhersteller, Energieberatern, Kreishandwerkerschaft, technischen Dienstleistern, Finanzierungsinstituten, Verbraucherzentrale, Energieagenturen des Landes etc. ist mit örtlicher Unterstützung der städtischen Baubehörde gewährleistet.

### **INSEL – solare Simulationsberechnung**

Das Programm der modularen Simulationsumgebung „INSEL“<sup>354</sup> ist ein Berechnungsmodul für die technische Planung von photovoltaischen und solarthermischen Anlagen, die auf Gebäudeflächen montiert sind. Betriebsdaten und solare Ertragsprognosen werden über die Fernüberwachung abgerufen und über Betriebsprogramme ausgewertet. Das Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. untersuchte Simulationsprogramme für die technische Auslegung von Solaranlagen.<sup>355</sup> Die solare Strahlungsdatenbank von etwa 2.000 Standorten ist für die Datenbereitstellung von Monatsmittelwerten der solaren Strahlungsdaten für die Planung von Solarkraftwerken erforderlich.

Der Fachbereich Physik an der Universität Oldenburg untersuchte die Wirksamkeit von Simulationsprogrammen zur technischen Auslegung von PV-Solaranlagen. Die meteorologische Datenbereitstellung und die Solarstrahlungsdaten stehen quantitativ unterschiedlich zur Verfügung, sodass Ertragsprognosen von Solaranlagen nicht vergleichbar zu be-

---

<sup>352</sup>Vgl.: Stadtwerke Osnabrück: Modellprojekt fördert den Energiedialog zwischen Mieter und Vermieter. <http://www.stadtwerke-osnabrueck.de/>, November 2008.

<sup>353</sup>Vgl.: Stadt Osnabrück: Dachflächen für Photovoltaik in Osnabrück, Projekt Sun Area der FH Osnabrück. <http://geodaten.osnabrueck.de>.

<sup>354</sup>Vgl.: Schuhmacher, Jürgen; Pietruschka, Dirk: Integrated Simulation Environment Language (INSEL 7.0); Modulare Simulationsumgebung für PV-Anlagen, Hochschule für Technik Stuttgart.

<sup>355</sup>Vgl.: Quaschnig, Volker; Zehner, Mike: Simulationsprogramme für PV-Anlagen, Sonnenenergie und Wärmetechnik, 5/99, S. 36-40, München.

werten sind.<sup>356</sup> Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass ein einheitliches Simulationsprogramm als Standard für Vergleichsrechnungen für die Planung von Solaranlagen nicht zur Verfügung steht.<sup>357</sup>

### **Stadtklimatische Berechnungsprogramme**

Die Planung von Gebäudestrukturen in Städten und die daraus folgenden Einflüsse aus der stadt- und humanbioklimatologischer Sicht sind mit digitalen Berechnungsmodellen wie "UBIKLIM", "Klimamichel/PMV" oder "Rayman" (Uni Freiburg) zu berechnen. Die Eignung dieser Modelle ist auf die flächenscharfe Übertragbarkeit und Verknüpfung zu Fachdaten z.B. Umweltatlas mit Modellierungsansätzen angewiesen. Die thermischen Charakteristika relevanter Stadtquartiere und Oberflächen sind flächenscharf und dreidimensional mit einem Hyperspektral-Thermalscanner "ARES" messbar. Die Untersuchung des städtischen Klimas ist durch Methoden der klassischen klimatologischen Forschung mit Messfahrten und Messgängen gewährleistet. Die Messung und Analyse von Oberflächentemperaturen und Oberflächenelementen wie Gebäudeflächen, Dächern, Straßen ist durch Thermal-Infrarot(IR) - Rasteraufnahmen gegeben. Gemessene Fernerkundungsdaten des ARES-Sensors geben die thermischen Eigenschaften von Grünflächen, Waldflächen, Parkbäumen und privaten Hausgärten wieder. Die Messmodelle sind geeignet, Vegetationseinheiten zur Minderung der thermischen Belastung sowohl am Tage (Schattenwurf) als auch in der Nacht (Kaltluftproduktion) zu quantifizieren.<sup>358</sup>

Die Stadtgrenzschicht stellt ein mikro- bis mesoskaliges Phänomen dar, dessen Eigenschaften durch die Stadtoberfläche determiniert sind.<sup>359</sup> An der luvseitigen Begrenzung des Stadtgebietes stellt sich die Wechselwirkung aufgrund der verschiedenen städtischen Oberflächenstrukturen ein und ist Ursache für die Ausbildung der Stadtgrenzschicht, deren Mächtigkeit erst schnell und dann langsamer in Strömungsrichtung zunimmt. An der leeseitigen Stadtgrenze entsteht analog die Ausbildung der Grenzschicht des Umlandes, wobei oberhalb dieser die Stadtgrenzschicht weiterhin existiert und sich erst langsam infolge vertikaler Durchmischung auflöst. Dieser "urban plume Effekt" ist nachgewiesen sowohl im Temperaturfeld als auch anhand der Konzentration von Luftemissionen und

---

<sup>356</sup>Vgl.: Schuhmacher, Jürgen: Status off PV System Simulation, Faculty of Physics, University of Oldenburg.

<sup>357</sup>Ebd.: S.8 (Zusammenfassung).

<sup>358</sup>Vgl.: Information aus dem Internet URL <http://www.stadtoekologie-berlin.de/Grakoll>.

<sup>359</sup>OKE, 1978.

stellt damit eine Modifikation der Grenzschicht nicht nur über dem Stadtareal, sondern auch bis zu 200 km leewärts dar. Es treten zwischen Stadt und Umland deutliche Temperaturanomalien in Richtung der Stadtgebiete auf. Die „Wärmeinsel Stadt“ ist in den Abend- und Nachtstunden bei solarem Strahlungswetter am stärksten ausgeprägt. Charakteristisch sind der jahreszeitliche Gang der atmosphärischen Lufttemperatur sowie die durch die thermische Trägheit der Gebäudekörper verzögerte abendliche Abkühlung des Stadtgebietes. Die Entwicklung des positiven Temperaturanstiegs basiert auf:

- stärkere Absorption kurzwelliger Strahlung durch größere Oberflächen und Mehrfachreflexion in den Straßenschluchten,
- starken Einfluss der langwelligen Strahlung durch eine von der Dunstglocke vergrößerte Absorption und Gegenstrahlung,
- geringere langwellige Ausstrahlungsverluste durch Horizont einschränkung; anthropogene Wärmeemissionen von der Industrie, von Gebäuden und vom Straßenverkehr,
- höhere Wärmespeicherkapazität der bebauten städtischen Strukturen,
- stark reduzierten turbulenten Wärmeaustausch durch geringere Windgeschwindigkeiten.

Die atmosphärische Temperaturerhöhung in den urbanen Stadtgebieten beeinflusst die meteorologischen Parameter.<sup>360</sup>

### **Energiebedarf von Bestandsgebäuden und stadtklimatische Einflüsse**

Felduntersuchungen über die Einflüsse und Rahmenbedingungen des Standortes auf den Wärme- und Kältebedarf von Gebäuden<sup>361</sup> zeigen, dass erhöhte oder niedrige Temperaturen im Gebäudeumfeld, vermehrte oder verringerte Sonneneinstrahlung, saisonale Windgeschwindigkeiten, Kaltluftfelder und -ströme und meteorologische Situationen den Transmissionswärmeverlust von Gebäudekonstruktionen stark beeinflussen. Gebäudestandorte im ebenen Gelände, in einer Kaltluftsenke, an einem Südhang oder auf einer freien Geländeerhöhung sind für den Heizwärmebedarf von Gebäuden verantwortlich.<sup>362</sup> Gebäudestandorte und das nähere Wohnumfeld weisen unterschiedliche bioklimatische Voraussetzungen auf. Bestandsgebäude in Kerngebieten stehen in einem direkten Zu-

---

<sup>360</sup>Vgl.: DWD (Hrsg.): Promet – meteorologische Fortbildung, Thema des Heftes: Stadtklima, Fachbericht von H. Kraus, Bonn -Die Wärmeinsel-, 9.Jahrgang, Heft 4, 1979, S.7-11.

<sup>361</sup>Ranft, Fred; Frohn, Bernhard: Natürliche Klimatisierung, Energieagentur NRW (Hrsg.),Springer,Basel, 2004.

<sup>362</sup>Ebd.: S. 9, Abbildung 3.1.

sammenhang zum Stadtklima, sodass bioklimatische Besonderheiten im Vergleich zum Umland einer Stadt festzustellen sind. Bei einer weitgehend geschlossenen Stadtrandbebauung ist eine Durchlüftung des Stadtgebietes nicht gewährleistet.

Der Luftaustausch durch Flurwinde in städtischen Gebieten bedeutet die Zufuhr frischer, meist kühler Luftströme, die den Abtransport von verunreinigter und erwärmter Stadtluft unterstützen und die belastete Stadtluft verdünnen. Die erwärmte städtische Luft steigt an Sommertagen auf und Luftströme aus der städtischen Randzone strömen nach. Eine Verminderung des Luftaustausches in Städten ist wegen des erhöhten Strömungswiderstandes durch geschlossene Bebauung und einzelne Baukörper daher festzustellen. Der verringerte Windeinfluss trägt zu einer geringeren Auskühlung der Baukörper bei. In den Sommermonaten existiert häufig ein geringer Luftaustausch in der Stadt, der zu höheren Umgebungstemperaturen führt. Die Lufttemperatur in der Stadt ist gegenüber dem Umland erhöht, da die Absorption der tagsüber gespeicherten Wärme über die Flächen abgegeben wird. Eine natürliche Klimatisierung wird durch Frischluftschneisen, einer offenen und nicht zu hoher Bebauung mit großzügig breiten Straßenräumen erreicht.<sup>363</sup>

#### **4.3.2. Geodateninformationssysteme**

Geoinformationsdaten werden in Deutschland für den Aufbau der Geodateninfrastruktur über städtebauliche Modellprojekte erhoben. Eine umweltfreundliche Planung von urbanen Räumen erfordert eine umfangreiche Datenbasis über Geoinformationssysteme und Geodateninfrastruktur des städtischen Gebietes und der Umwelt.

Die Studie im Auftrag des Ministeriums des Landes Brandenburg untersuchte Maßnahmen zur infrastrukturellen Entwicklung des öffentlich-rechtlichen Geoinformationswesens im Land Brandenburg und der Region und stellt Modellaspekte des Geodatendaten-systems für die Anwendung in der GIB-Studie dar.<sup>364</sup>

Die Entwicklung des „GeoPortalBund“ durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) unter Beteiligung des interministeriellen Ausschusses für Geoinformationswesen stellt eine Datenplattform für die Regionalplanung und städtische Entwicklungsplanung zur Verfügung. Das Geoportal ist die zentrale Informations- und Kommunikati-

---

<sup>363</sup>Ebd.: S.11.

<sup>364</sup>Dr. Rolf Lessing und Dr. Falko Müller: GIB-Studie im Auftrag des Ministeriums des Inneren des Landes Brandenburg, Potsdam, 2003.

onsplattform für den gemeinsamen Aufbau der Geodateninfrastruktur von Bund, Ländern und kommunalen Spitzenverbänden.<sup>365</sup>

LISA ist ein Geoinformationssystem (Softwaresystem) zur Bestandsdokumentation im Rahmen des Liegenschaftsmanagements und zur Durchführung von Infrastrukturmaßnahmen von Liegenschaften der Bundeswehr. Das Geo-Informationssystem ALK-GIAP in Verbindung mit dem Datenbankmanagementsystem ORACLE bildet eine detaillierte Datenbasis. Das Fachinformationssystem Boden- und Grundwasserschutz wird im LISA zur zentralen Erfassung und Pflege von boden- und grundwasserschutzrelevanten Daten eingesetzt. Die Erfassung und Bereitstellung der Bestandsdaten für das Freiflächen- und Baumkataster basiert auf der Grundlage der LISA-Basissoftware und des Vermessungsdatenmodells.<sup>366</sup>

Das virtuelle 3D-Stadtmodell enthält Gebäudemodelle, die auf der Grundlage vorhandener amtlicher Datenbestände und Karten effizient abgebildet sind. Die Anbindung an Basisdaten der Liegenschaftskarten erfolgt im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben. Die Verbindung zur Liegenschaftskarte garantiert eine hohe Lagegenauigkeit des Modellvorhabens. Die Datennutzung ist für die Übersicht von Flächen für solartechnische Anlagen, Simulation von Verschattungen und Online-Präsentationen für Städte anwendbar. Das digitale 3D-Stadtmodell wird über ein Datenbanksystem geführt. Das 3D-Basismodell ist als universeller Grunddatenbestand für Anwendungen sowohl im technischen als auch im gestalterischen und planerischen sowie repräsentativen Bereich geeignet. Ausgehend von den Anforderungen der jeweiligen Anwendung wird das Basismodell erweitert für Geländemodelle, Bodenoberflächenstrukturen und im Bau befindliche Objekte.<sup>367</sup>

Das Netzinformationssystem NIS erfasst graphische Bestandsdaten von leitungsgebundenen Versorgungs- und Entsorgungsnetzen sowie die Topographie. Die Datenbank stellt Fachdaten wie Bild-, Office- und CAD-Dateien zur Verfügung.<sup>368</sup> Digitale Orthophotos von urbanen Gebieten mit einer Auflösung von 10x10cm liefern ein repräsentatives Abbild der Erdoberfläche und eignen sich zur Verschneidung mit anderen geotopographischen Daten. Die Aufbereitung der Orthophotos zu Infrarotbildern ermöglichen Räume

---

<sup>365</sup>Vgl.: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: Geo. Portal. Bund, <http://geoportal.bkg.bund.de>, 2008.

<sup>366</sup>Vgl.: Liegenschaftsinformationssystem Außenanlagen LISA – Stand und Systemweiterentwicklung, Bundesministerium für Verteidigung (Auftraggeber), September 2016.

<sup>367</sup>Vgl.: Geoinformation des Landes Bremen: Das Virtuelle 3D-Stadtmodell der Freien Hansestadt Bremen. Information IM Internet [http://www.geo.bremen.de/informationssysteme/3d\\_stadtmodell](http://www.geo.bremen.de/informationssysteme/3d_stadtmodell) (2017).

<sup>368</sup>Vgl.: Netzinformationssystem NIS der Universität Bremen. Information im Internet <http://www.geo.bremen.de/informationssysteme/nis> (2017).

der Vegetation, vegetationsfreie Flächen wie versiegelte Böden, unversiegelte Flächen und Gewässerflächen von Regionen und Städten auszuwerten.<sup>369</sup>

### **GEMIS-Datenbasis**

Aus der GEMIS-Datenbasis (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.6) sind Dateninformationen für die strategische Planung von fossilen Energieträgern, regenerativen Energien sowie nachwachsenden Rohstoffen, Anlagen zur Wärme- und Stromerzeugung etc. generierbar. Die GEMIS-Daten sind Voraussetzung für die Modellierung von Prozessen und Szenarien für die nachhaltige Planung von Lebenszyklen.<sup>370</sup>

Die Untersuchung und Analyse von Energiebilanzen und Treibhausgasemissionen führt das Öko-Institut aufgrund der GEMIS-Daten durch. Die Studie berücksichtigt die zukünftige strategische Entwicklung von Brennstoffketten und Stromerzeugungsprozessen für die Jahre 2000 und 2020.<sup>371</sup>

### **4.3.3. Potenzialerhebung für die städtische Wärmeversorgungsplanung**

#### **Geothermischer Ressourcenatlas**

Die mehrjährige intensive Forschungs- und Koordinationsarbeit des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben<sup>372</sup> unterstützt die Entwicklung des aktualisierten "Atlas of Geothermal Resources"<sup>373</sup>. Das Planungsinstrument über die geothermischen Ressourcenpotenziale in Europa ist Grundlage für die Beurteilung und den Vergleich zwischen Regionen und Standorten im Hinblick auf die Wahl geothermischer Lagerstätten. Technische Planungsdaten aus Tiefen-, Mächtigkeits-, Temperatur- und Lagerstättenkarten der Thermalwasserleiter stehen als Planungshilfen zur Verfügung.

Die Ressourcenanalyse von geothermischen Ressourcen ist insbesondere in der Schweiz und in Österreich durch das Bundesamt für Energie und der Schweizerischen Geophysi-

---

<sup>369</sup>Vgl.: Geotopographie des Landes Bremen: Information im Internet <http://www.geo.bremen.de> (2017).

<sup>370</sup>Vgl.: GEMIS – Systeme: <http://www.oeko.de> Basisversion 1.0 des Computerprogramms GEMIS, Öko-Institut und Gesamthochschule Kassel, Stand 2015.

<sup>371</sup>Institut für angewandte Ökologie e.V.: Energiebilanzen und Treibhausgas-Emissionen für fossile Brennstoffketten und Stromerzeugungsprozesse in Deutschland für die Jahre 2000 und 2020, - Bericht für den Rat für Nachhaltige Entwicklung -, Uwe R. Fritsche, August 2003.

<sup>372</sup>Vgl.: GGA Institut: Veröffentlichung Atlas der Geothermischen Ressourcen in Europa, Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft, Hannover, 2003.

<sup>373</sup>Geothermische Vereinigung: Bundesverband Geothermie e.V., Atlas der geothermischen Ressourcen, Atlas of Geothermal Resources in Europe (2002), Suzanne Hurter and Ralph Haenel, editors ISBN: 92-828-0999-4 CG-NA-17-811-EN-C, Office for Official Publications of the European Communities, L-2985 Luxembourg.

kalischen Kommission durchgeführt worden. Die geothermische Ergiebigkeit des Untergrundes im Schweizer Mittelland wurde untersucht. Die Datengrundlage setzt sich zusammen aus 3D-geologische, geothermische und hydrogeologische Datenanalysen. Die Ergebnisse des Untersuchungsberichts zeigen die Simulierung thermischer Verhältnisse in Bodenschichten aus Bohrlochdaten und seismischen Profilen von regionalen, geologischen Modellen für Regionen. Messtechnisch erfasste Temperaturverteilungen in Bodenschichten und die Aufnahme hydrogeologischer Begebenheiten sind als geothermische Ressourcen in verschiedene Ressourcenklassen eingeteilt. Die Aktualisierung der hydrogeologischen Datensammlung, die Erstellung von geologischen Modellen und die Potenzialanalyse für Regionen für geothermische Ressourcennutzung ist somit gewährleistet.<sup>374</sup> Der "Atlas of Geothermal Resources in Europe" ist seit dem Jahr 2002 durch die Europäische Union veröffentlicht worden. In diesem Atlas werden vor allem die geothermalen Ressourcen in den Ländern Mittel- und Osteuropas dargestellt. Für die Staaten, die sich schon an dem 1988 veröffentlichten "Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland" beteiligten, ist eine Aktualisierung der Geothermieressourcen gegeben.<sup>375</sup>

Das Potenzial der oberflächennahen Geothermie in den Regionen der Länder ist in den Ranglisten der Erdwärme-LIGA, Stand 2016, registriert. Die statistische Datenerhebung stellt die Installation und Gesamtleistung von Wärmepumpensystemen dar. Da die Nutzung der oberflächennahen Geothermie in ganz Deutschland auch für private Hausbesitzer auf dem eigenen Grundstück möglich ist, sind bis zu 318.000 Anlagensysteme realisiert worden. 26 Projekte der tiefen Geothermie sind im süddeutschen Molassebecken sowie auch im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben für die Wärmeversorgung von Gemeinden und Stadtteilen realisiert worden.<sup>376</sup>

### **Globaler Atlas für Solar- und Windenergiepotenzial**

Die lokalen Potenziale für die Solar- und Windenergie sind in der Vergangenheit durch eine lokale Standortdatenerfassung und durch Fachgutachten über die Standortbedingun-

---

<sup>374</sup>Vgl.: Bundesamt für Energie und der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission: Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz – Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potenzials der Schweiz, Schlussbericht, Dezember 2004, S.1-55.

<sup>375</sup>Vgl.: Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V.: Atlas of Geothermal Resources in the European Community, 2002. Information im Internet <http://www.geothermie.de>. (2016).

<sup>376</sup>Vgl.: Erdwärme-LIGA: Information im Internet <http://www.erdwaermeliga.de>. (Stand 2016).

gen wie Solarstrahlung und Windverhältnisse für die Anlagenplanung aufgenommen worden. Weltweite Datenbanken zu Solar- und Windpotenzialen verfügen über eine Mega-Datenspeicherung zur Bereitstellung von detaillierten Standortdaten über meteorologische, klimatische Situationen und solare Strahlungs- und Windverhältnisse.

Der globale Atlas für Sonnen- und Windenergie stellt den politischen und in der Wirtschaft tätigen Entscheidungsträgern Fachdaten zur Verfügung, um für die Anlagenplanung lokal verfügbare regenerative Quellen und die Wahl der geeigneten Technologien zu nutzen. Die Internationale Organisation für Regenerative Energien (IRENA) beabsichtigt, den globalen Atlas unter Beteiligung der Forschungsinstitute Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Akteure des UN-Umweltprogramms etc. weiter zu entwickeln und weltweit zur Verfügung zu stellen.<sup>377</sup>

IRENA stellt den Global Atlas for Renewable Energy und den Global Solar Atlas - ES-MAP in Verbindung mit dem Earth Geodatennetz für weltweite Standorte digital für den Zeitraum 1985 bis 2005 zur Verfügung.<sup>378</sup>

### **Bundesweite digitale Wärmekarte für Nah- und Fernwärme**

Die Potenzialanalyse zur Planung von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale ist durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. untersucht worden. Entscheidend für die Durchführbarkeit einer bundesweiten, räumlich und thematisch hoch detaillierten Auswertung siedlungsstruktureller Gegebenheiten zur Berechnung des Wärmenetzpotenzials ist die Verfügbarkeit geeigneter raumbezogener Daten sowie die Nutzung einer zeit- und kosteneffizienten Methodik zur Erstellung der notwendigen Geoinformationsprodukte. Die Untersuchung zeigt, dass eine Erfassung des Wärmenetzpotenzials anhand der Auswertung von bundesweit verfügbaren Geobasisdaten über die digitale Wärmekarte gewährleistet ist. Die passive und aktive Erdbeobachtung stellt standortbezogene Datensätze von Aufnahmeplattformen und Messsensoren zur Verfügung, um die raumbezogene regionale Planung abwägen zu können. Ein weiterer Forschungsbedarf zur Entwicklung von Methoden zur Erfassung des lokal vorhandenen Potenzial erneuerbarer Energien wird für erforderlich erachtet.<sup>379</sup>

---

<sup>377</sup>Vgl.: Bundesministerium für Umwelt (BMU): Potenziale für Sonnen- und Windenergie weltweit erkennen: aus BMU-Pressedient Nr. 056/12, Berlin, 25.04.2012.

<sup>378</sup>Vgl.: IRENA: Global Atlas for renewable Energy, 2016. Information im Internet <https://irena.masdar.ac.ae>. (2017).

<sup>379</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik e.V.: Endbericht zum Vorhaben: Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale, Oberpfaffenhofen, Februar 2011.

Das „Bremer Energieinstitut (BEI)“ untersuchte in fernwärmeexponierten städtischen Gebieten Fern- und Nahwärmepotenziale und entwickelte eine bundesweite digitale Wärmekarte.<sup>380</sup> Die digitale Wärmekarte enthält Einzeldaten von 614 fernwärmewürdigen Städten. Die Studie bezieht sich auf die Annahme, dass alle Städte in Deutschland mit mindestens 20.000 Einwohnern und mehr als 2.000 Wohneinheiten (WE) in Mehrfamilienhäusern als „fernwärmewürdig“ eingeschätzt werden. Diese Prognose stützt sich auf einen kommunalen Mindest-Wärmebedarf und auf eine Umsetzung der wirtschaftlichen Perspektive für die Fern- und Nahwärmeversorgung in Städten.

Die digitale Wärmekarte fokussiert sich auf Energie-Modellrechnungen zur Strukturentwicklung von Kraftwerken nach 2010 für den regionalen Fernwärmeausbau. Die Untersuchung der städtischen Nah- und Fernwärmenutzung mit Kraft-Wärme-Kopplung bezieht sich auf den Stellenwert der Wärmeversorgung und auf die damit verbundenen Marktchancen.<sup>381</sup> Die Berechnungsgrundlage stützt sich auf Gebäudetypologien nach ROTH. Der aktuelle Wohnungsbestand in Deutschland ist anhand der Gebäudetypologie aus dem Jahr 2000 berechnet worden.<sup>382</sup>

### **Thermal-Nachtaufnahmen - LANDSAT**

Satellitengestützte Thermalaufnahmen sind Stand der Technik und messen die Oberflächentemperaturwerte der Erdoberfläche. Die Vor- und Nachteile der Aufnahmetechnik von Oberflächentemperaturen sind durch messtechnische Verfahren untersucht worden.<sup>383</sup>

Das Oberflächenwärmepotenzial von städtischen Flächenstrukturen ist mit Hilfe von Nachtaufnahmen und Landsat - Satellitenbildern gemessen und nach Flächenstrukturen katalogisiert worden.<sup>384</sup>

Der Beobachtungssatellit Landsat-5 der USA, in dem sich das multispektrale Aufnahmesystem "Thematic Mapper" (TM) befindet, umkreist die Erde in einer annähernd polaren

---

<sup>380</sup>Eikemeier,B.,Schulz.W.: „Digitale Wärmekarte Deutschlands“, Aufbereitung, Konvertierung und Ergänzung von Gebäude- und Siedlungsdaten durch ein auf Statistiken und örtlichen Daten beruhendes Verfahren, bremer energie institut, 2003.

<sup>381</sup>Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW 2000): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien, Schlussbericht der AGFW-Studie, Frankfurt 2000.

<sup>382</sup>Vgl.: Bremer Energie institut: bundesweiter Wärmeatlas, S. 14 ff.

<sup>383</sup>C. Triebning, 1993 / Löffler, 1992.

<sup>384</sup>H.-J. Rosner (1993), E. Parlow (1998,2000), C. Reich (1999).

Umlaufbahn in 705 km Höhe.<sup>385</sup> Die Aufnahme der digitalen Daten wird durch Funk zur Erde gesendet und auf Magnetbändern gespeichert. Die von dem Satelliten aufgenommenen Bildstreifen des Thermalkanals setzen sich aus Zeilen von je etwa 1.500 einzelnen Bildpunkten, die eine Aufnahmefläche von 120m x 120m darstellen, zusammen. Die Daten von Nachtaufnahmen städtischer Flächen sind Grundlage für eine flächendeckende Analyse der thermischen Potenziale eines Modellgebietes durch Landsat.<sup>386</sup>

Die Tag- und Nachtflugrichtung zur Aufnahme von Bodentemperaturwerten ist nicht identisch, sodass sich im thermischen Kartenbild unterschiedliche Temperaturwertbereiche als Ausschnitte ergeben. Die insgesamt sieben Spektralkanäle von Landsat-TM reichen von einer Wellenlänge von 0,45 µm (blau-grünes Licht) bis zu 12,5 µm (Wärme-Infrarot). Die Darstellung der Oberflächentemperaturen erfolgt über den langwelligen Wellenlängenbereich zwischen 10,4 bis 12,5 µm. Die Auswertung der Oberflächentemperaturwertbereiche aufgrund der solaren Strahlungsintensität ist aus Gründen der nicht nachgewiesenen Berechnungsgrundlage wenig aussagekräftig.

Die standortbezogenen Thermalaufnahmen während der Abend-, Nacht- und Morgenstunden bilden in Thermalkarten, auch Klimatopkarte genannt, die Oberflächentemperaturen der Erwärmungs- und Abkühlungszeitintervalle ab. Aus den thermischen Messdaten kann die mittlere atmosphärische Lufttemperatur während der Nachtzeit und das Abkühlverhalten der Oberflächen während des Tages abgeleitet werden. Um die aus den Thermalaufnahmen berechneten atmosphärischen Temperaturwerten mit den Ist-Temperaturwerten vergleichen zu können, ist eine Temperaturwertkorrektur erforderlich. Die Datenwerte sind dahingehend zu korrigieren, dass in erster Linie die standortbezogene Wetterlage und somit die atmosphärischen Lufttemperaturwerte die Daten der Thermalaufnahme beeinflussen.

Die städtische Klimauntersuchung mit Hilfe der Thermalaufnahmetechnik von Bodenoberflächen bedient sich einer standardisierten multitemporalen Klassifikation von Oberflächen. Landschaftsoberflächen sind aufgrund des individuellen Oberflächentemperaturverhaltens in Kategorien eingeteilt. Das Thermalaufnahmeverfahren von städtischen Oberflächen dient als Bewertungsgrundlage zur Darstellung der Zusammenhänge zwi-

---

<sup>385</sup>Vgl.: Rosner, H.-J.: Landsat-5 Aufnahmen; bei jedem der etwa 1,5 Stunden dauernden Erdumläufe nimmt der Satellit auf der Tagseite der Erde einen 185 km breiten Streifen auf. Innerhalb von 16 Tagen wird die gesamte Erdoberfläche einmal erfasst; der Bereich des Verflechtungsraumes Berlin wird in etwa 20 Sekunden überflogen.

<sup>386</sup>Institut für Geographie und Raumforschung: Thermalaufnahme wird Karte, Universität Graz, 17.09.2008, <http://www.uni-graz.at> (30.Mai 2006).

schen der Oberflächennutzung, dem thermischen Verhalten von Flächen<sup>387</sup> sowie der Einstufung in Flächenkategorien.<sup>388</sup>

### **Thermalaufnahmen Infrarot (IR)**

Die IR-Thermalaufnahmen messen die adsorbierte langwellige Strahlung während eines Überfliegszeitraums. Von Bedeutung ist der Grad der räumlichen Auflösung der Bildelemente in einem Raster von 120m x 120m. Die Bildpunkte werden durch die Bodenstation der ESA in Rasterfelder von 30m x 30m umgerechnet. Die Überfliegszeitpunkte in den frühen Morgenstunden und am frühen Abend erfassen nicht die maximale Erwärmung bzw. Abkühlung von Flächen. Die Oberflächentemperaturwerte der städtischen Flächen werden aus den IR-Datenmengen berechnet. Die Differenz der Datenwerte zwischen der von dem Satelliten erfassten Strahlungstemperatur und der berechneten Oberflächentemperatur ist somit in der Regel vernachlässigbar. Auswertungen von Thermalaufnahmen bestätigen den funktionalen Zusammenhang zwischen den solaren Strahlungstemperaturwerten und den Oberflächenstrukturen von städtischen Flächen. Das Gesetz von Stefan-Boltzmann<sup>389</sup> ist für die Berechnung der solaren Strahlungstemperaturen von Flächen aus den IR-Daten anzuwenden. Die Berechnungsgleichung 29 stellt den funktionalen Zusammenhang zu den Oberflächentemperaturwerten und zu der Oberflächenstruktur dar.

$$(29) \quad P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Der funktionale Zusammenhang ist gewährleistet, wenn die Oberflächenstruktur annähernd den Emissionswert von 1 erreicht.

---

<sup>387</sup>Steinicke & Streifeneder: Klimauntersuchung Nachbarschaftsverband Heidelberg-Mannheim, Juni 2002, S. 7 (Tabelle 3: Zusammenhang Nutzung - Oberflächentemperaturverhalten).

<sup>388</sup>Steinicke & Streifeneder: Klimauntersuchung Nachbarschaftsverband Heidelberg-Mannheim (Tabelle 3: Zusammenhang zwischen Nutzung - Oberflächentemperaturverhalten), Juni 2002, S. 7.

<sup>389</sup>Vgl.: Berechnungsgleichung: Gesetz von Stefan-Boltzmann mit der Stefan-Boltzmann-Konstante  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ .

#### 4.4. Absorption solarer Strahlung von Gebäudeflächen in Städten

Die Absorption der solaren Strahlung in Städten von Gebäudebauteilen setzt ein zusätzliches Wärmepotenzial in urbanen Räumen frei, das in der Gesamtbetrachtung der Potenzialanalyse von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen zu berücksichtigen ist. Die effektive Speicherung von solarer Wärme in Gebäudebauteilen zur Niedrigenergie-wärmenutzung von Gebäuden unter Berücksichtigung der Klimaveränderung ist ein weiterer aufzunehmender Forschungsansatz. Bei einer senkrechten Gebäudeaußenwand aus Beton erhöht sich der Wärmeübergang zum Beispiel auf 25,8 W/(m<sup>2</sup>K) bei einer Windgeschwindigkeit von 5,0 m/s aufgrund der Oberflächenaus Kühlung. Bei Windstille reduziert sich der Wärmeübergang auf 7,8 W/(m<sup>2</sup>K). In Feldversuchen ist untersucht worden, dass Bauteile aus Normalbeton eine spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt von 0,8 bis 1,25 kJ/(kg K) aufweisen. In der Fachliteratur sind Verfahren zur Berechnung von Temperaturfeldern in Bauteilen, die aus mehreren Schichten bestehen, untersucht worden. Das Differenzenverfahren wird zur näherungsweisen Lösung von Differenzialgleichungen verwendet. Der mathematisch physikalische Berechnungsansatz der Formel (30) bezieht sich auf einen homogenen Halbraum, der im Anfangszustand die Temperatur  $T_o$  hat. Zum Zeitpunkt von  $t=0$  wird die Oberfläche auf die Temperatur  $T_1$  gebracht. Im Gegensatz zur Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung wird der rechnerische Ansatz der Wärmestrombilanz für eine Bauteilschicht mit einer Schichtdicke  $d$  umgesetzt.<sup>390</sup>

$$(30) \quad Q_o = \lambda \cdot \frac{T_1}{\sqrt{3\alpha t}} - \frac{T_o}{\sqrt{3\alpha t}} \quad \text{W/m}^2$$

Eine weitere Berechnungsmethode ist die Laplace-Transformation, die die Beschreibung des Temperaturfeldes in Abhängigkeit der Zeit  $t$  und der Tiefe  $z$  vornimmt. Die Anfangstemperatur  $T_o$  beträgt 0° C und die Ebene  $z=t$  wird für  $t>0$  auf eine konstante Temperatur  $T$  erwärmt. An den Schichtgrenzen ist  $T_1$  gleich  $T_2$ .<sup>391</sup>

Die Wärmespeicherkapazität  $S$  [J/(m<sup>3</sup> K)] eines Bauteils ist definiert als Wärmemenge in J bei einer Temperaturzunahme von 1 K bei 1 m<sup>3</sup> Volumen eines Stoffes. Die Wärme-

---

<sup>390</sup>Vgl.: TU Dresden: Lehrveranstaltung Instationäre Wärmeleitung, Eckert, 1966.

<sup>391</sup>Scapozza, Ingitta: Untersuchungen zum Verhalten einer Kombinationsbarriere aus Asphalt auf mineralischer Trag- und Dichtungsschicht, Dissertation ETH Nr. 13827, Zürich 2000, S.124 ff.

speicherkapazität ist definiert als Produkt von  $c_p$  als spezifische Wärme in (kJ/kg K) und mit  $\rho$  als Rohdichte in (kg/m<sup>3</sup>).

$$(31) \quad S = c_p \cdot \rho \quad [\text{J/m}^3]$$

Der Nachweis der Auskühlzeit<sup>392</sup> von Bauteilflächen ist gegeben, wenn durch einen konstanten Wärmeenergieentzug ein Bauteil in allen Schichten auf das ursprüngliche Temperaturniveau abgekühlt wird.

Das Fraunhofer Institut untersuchte in Feldversuchen das Verhalten von Absorption und Reflexion von Farbfeldern auf Gebäudeoberflächen mit dem Ergebnis, dass der Fassadenbaustoff unterhalb des aufgetragenen Farbanstrichs während der Einwirkzeit der solaren Strahlungsenergie das aufnehmende Wärmeenergiepotenzial variiert. Die Farbgebung von Bauteiloberflächen beeinflusst insbesondere im kurzwelligen Bereich das Absorptions- und Reflexionsvermögen von Oberflächen. Das Reflexionsvermögen von farbigen, zum Beispiel roten Oberflächen, wird durch den kurzwelligen Bereich von 2  $\mu\text{m}$  bis 9  $\mu\text{m}$  reduziert.<sup>393</sup>

Der durch die Reflexion oder Absorption entstehende gesamte Wärmestromfluss in den Gebäudebauteilen unter Einfluss der regionsabhängigen Strahlungsintensität der Sonne  $I_{solar}$  und der Farbgestaltung wird nach der Gleichung 32 berechnet:<sup>394</sup>

$$(32) \quad Q = a_k \cdot I_{solar} \quad \text{W/m}^2$$

Der dimensionslose Beiwert  $a_k$ <sup>395</sup> ist in der Fachliteratur für hellfarbige Oberflächen mit 0,25 bis 0,40 und für dunkelfarbige Oberflächen mit 0,60 bis 0,80 angegeben. Zur Nachweisführung der Entstehung von instationären Wärmeströmen in Gebäudebauteilen ist die Oberflächentemperaturveränderung<sup>396</sup>  $T_o$  an der Fassadenußenwand ganzjährig durch

<sup>392</sup>Vgl.: Österreichische Norm B 8180: Definition der Auskühlzeit - Die Auskühlzeit ist eine Kenngröße, mit der die Wärmeträgheit und das sommerliche Klimaverhalten von Bauteilen beurteilt wird. Sie ist definiert als  $z$  [h] = Wärmespeicherzahl [Wh/(m<sup>2</sup> \* K)] geteilt durch  $U$  [W/(m<sup>2</sup> \* K)] und beziffert jene Zeitspanne  $z$  [h], nach welcher ein einseitig abfließender spezifischer Wärmestrom eines Querschnitts gerade noch einen Restinhalt an Speicherwärme von  $e^{-1}$  (36,78%) der ursprünglichen Wärmemenge aufweist.

<sup>393</sup>Fraunhofer Institut (Hrsg.): Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Strahlungsabsorption, Institut für Bauphysik, Wärmetransportmechanismus "langwellige Strahlung", Klaus Sedlbauer; Ergebnisse Modellversuch an einem Multifunktionshaus (Südseite): Absorptionszahl im Bereich 0,25-2,5  $\mu\text{m}$  mit 0,56, Emissionszahl im Bereich 2,5 - 50  $\mu\text{m}$  mit 0,49 (Oberflächenfarbe Blau).

<sup>394</sup>Vgl.: Fraunhofer Institut: Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Strahlungsabsorption. Institut für Bauphysik, Wärmetransportmechanismus "langwellige Strahlung", Klaus Sedlbauer, 2009.

<sup>395</sup>a.a.O.: S. 17 ff. (Einfluss durch Strahlungsabsorption).

<sup>396</sup>Weinmann: Handbuch Bautenschutz Bd 2, Bauphysik und Bauchemie; Bagda, Engin: Punkt 4 Instationäre Wärme- und Feuchteströme durch Baustoffe, Expert Verlag 1992, S.55-57; Meyer, Günter und Schiffner, Erich: Technische Thermodynamik 2. Aufl. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1983, S. 369.

Temperaturmessungen zu dokumentieren. Die Veränderung der Temperaturwerte in den Gebäudefassadenbauteilen, ausgehend von der Temperatur  $T_o$  - Temperatur der Bauteiloberflächen vor dem Iterationsschritt [K] - der Außenwand, sind abhängig von den Parametern<sup>397</sup>:

- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in W/(mK),
- spezifische Wärmekapazität  $c$  in J/(kgK),
- Dichte  $\rho$  in kg/m<sup>3</sup>,
- kurzwelligen Absorptionszahl  $\alpha_s$  und der langwelligen Emissions- und Absorptionszahl der Oberflächen  $E_o$ ,
- Einflussgrößen der Wärmestromlast im Baustoff in Abhängigkeit des atmosphärischen Lufttemperaturwertes  $T_L$ .

Die Veränderung der Temperaturwerte von Fassadenoberflächen ist abhängig von der Wärmeübergangszahl nach Einfluss der Windgeschwindigkeit  $\alpha$  [W/(m<sup>2</sup> K)], der Strahlungsintensität der Sonne  $I_s$  (W/m<sup>2</sup>) und dem Neigungswinkel der Sonne zur senkrechten oder horizontalen Fassadenoberfläche  $\alpha_s$ . Der gesamte Wärmestromfluss wird zusätzlich durch den dimensionslosen Beiwert  $\varepsilon$  in Abhängigkeit des solaren Standortes in der Berechnungsgleichung 33 korrigiert:

$$(33) \quad Q = \varepsilon \cdot I_{solar}$$

Die Gesamtwärmebilanz eines Gebäudebauteils bildet sich aus den anteiligen temperaturabhängigen Wärmeströmen der Gebäudebauteilschichten. Die Berechnungsgleichung 35 berechnet den anteiligen Wärmestromfluss nach dem atmosphärischen Lufttemperaturwert und dem Oberflächentemperaturwert in Abhängigkeit des Faktors der Windgeschwindigkeit:

$$(34) \quad q_1 = \alpha \cdot (T_L - T_o)$$

Die Berechnung des Wärmeaustauschs zwischen der Oberflächenschicht der Bauteiloberfläche und der Bauteilschicht mit der Dicke  $x$  sowie der darunter befindlichen Bauteilschicht mit der Temperatur  $T_x$  ist von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und von dem Baustofffeuchtegrad abhängig:

$$(35) \quad q_2 = \lambda \cdot (T_x - T_o) / x \quad \text{W/m}^2$$

---

<sup>397</sup>Meier, C.: Dämmen und Speichern? Ist eine nachträgliche Wärmedämmung von Außenwänden erforderlich? Eingespeicherte Solarenergie bei einer Außenwand Temperaturmessung in der Zeit vom 11.12 bis 13.12.2002-. Ingenieurbüro Arbeitsgestaltung und Baubiologie Peter Rauch, Leipzig, 2001, S. 1-4.

Die durch die Oberfläche absorbierte solare Strahlungsleistung ist von dem Absorptionsgrad der Oberfläche  $\alpha_s$  und vom Neigungswinkel des Sonnenstandes am Standort abhängig:

$$(36) \quad q_3 = \alpha_s \cdot I_s \cdot \cos \alpha_s \quad \text{W/m}^2$$

Bei einer über einen längeren Zeitraum auftreffenden solaren Strahlungsenergie auf Oberflächen von Fassadenbauteilen ist nachgewiesen worden, dass der Oberflächentemperaturwert  $T_o$  ansteigt und einen höheren Wert annehmen kann als die atmosphärische Außenlufttemperatur. Mit dem Anstieg des Oberflächentemperaturwertes  $T_o$  bildet sich der Wärmestrom aus der Stefan–Boltzmann-Konstante mit:

$$(37) \quad q_4 = \sigma \cdot E_o \cdot T_o^4 \quad \text{W/m}^2$$

an. Der gesamte Wärmestromertrag des Bauteils  $q_4$  wird berechnet mit dem Produkt aus der Stefan–Boltzmann-Konstante  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$  und dem Emissionskoeffizienten  $E_o$  sowie aus der Oberflächentemperatur  $T_o^4$ . Für Gebäudebauteiloberflächen sind Emissionskoeffizienten  $E_o = 0,95$  für horizontale unversiegelte Flächen und  $E_u = 0,90$  für die Materialbeschaffenheit anzusetzen. Der anteilige Wärmestromfluss  $q_u$  als Produkt der Oberflächentemperatur  $T_u^4$  und dem Emissionskoeffizienten  $E_u$  nach Materialbeschaffenheit ist:

$$(38) \quad q_u = \sigma \cdot E_u \cdot T_u^4 \quad \text{W/m}^2$$

Die Berücksichtigung der nicht linearen Abhängigkeit von Oberflächentemperaturen wird durch die lineare Taylorreihenentwicklung korrigiert. Als Basiswert für die Taylorreihenentwicklung ist der momentane Wert der Oberflächentemperatur der Bauteile<sup>398</sup> mit dem dimensionslosen Beiwert  $\varepsilon$  in Abhängigkeit des solaren Standortes zur Berechnung der linearen Emissionsstrahlung  $I_{e,lin}$  wie folgt anzusetzen:

$$(39) \quad I_{e,lin} = \varepsilon T_0^4 + 4\varepsilon T_0^3 \cdot (T - T_0) \quad \text{W/m}^2$$

Die Validierung der Berechnungsergebnisse ist mit den gemessenen Oberflächentemperaturwerten zu vergleichen und zu bestätigen.<sup>399</sup> Die solare Ausrichtung der Flächen und

---

<sup>398</sup>Kehrer, Manfred; Schmidt, Thomas: Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen, - Validierung von Berechnungsergebnissen mit WUFI durch Vergleich mit Freilandmessungen am Institut-Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen (2010), Information aus dem Internet <http://www.hoki.ibp.fhg.de> (2011), S. 2 (Gleichung 10).

<sup>399</sup>a.a.O.: S.3 (Validierung).

Bauteile hat wesentliche Auswirkungen auf die Wärmestromflussdichte und auf die Temperatureinflüsse in den Materialschichten infolge der auftretenden solaren Strahlung.

Die sich bildende Temperaturdifferenz ( $T_2 - T_1$ ) zwischen der atmosphärischen mittleren Lufttemperatur und der Bauteiltemperatur unter dem Einfluss der Zeit bestätigt, dass instationäre Wärmeströme sich vorliegen. Die Veränderung der Umgebungstemperaturwerte infolge der solaren Strahlung und der täglichen Sonnenstunden<sup>400</sup> wärmen und kühlen Gebäudebauteile und Fassadenflächen aus und sind für die Entstehung von instationären Temperaturverhältnissen verantwortlich.

Der instationäre Wärmestromfluss ist abhängig von der Wärmeeindringtiefe  $b$ , der Fläche  $A$ , der Schichttiefe  $t^*$ , der atmosphärischen Lufttemperatur  $\vartheta_s$  und der Bauteiltemperatur  $\vartheta_0$  und wird nach der mathematischen Gleichung 41 berechnet.

$$(40) \quad Q(t^*) = A \frac{2}{\sqrt{\pi}} b \cdot (\vartheta_s - \vartheta_0) \cdot \sqrt{t^*} \quad \text{W/m}^2$$

In Abhängigkeit vom Flächenquerschnitt, Bauteilschichttiefe  $x$ , der Zeit  $t$  und der atmosphärischen Außentemperatur  $\vartheta_s$  wird der instationäre Wärmestromfluss zu:

$$(41) \quad Q(x, t) = \frac{b(\vartheta_s - \vartheta_0)}{\sqrt{\pi t}} \exp(-x^2 / 4at) \quad \text{W/m}^2$$

Die Wärmeeindringtiefe<sup>401</sup> ist von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und der Materialrohddichte  $\rho$  abhängig und nach der mathematischen Gleichung 43 berechnet.

$$(42) \quad b = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho} = \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \quad \text{Wärmeeindringtiefe in cm}$$

Beim Vorliegen einer solaren Wärmespeicherphase bildet sich der Wärmestromfluss von der warmen zur kalten Bauteilschicht, wird "gestapelt" und steht als Wärmeenergiereserve für die Entladungsphase in der Nacht im Bauteil wieder zur Verfügung.

Der gesamte stationäre Wärmestromfluss<sup>402</sup> eines Gebäudebauteils wird berechnet nach der mathematischen Gleichung 44 in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz, der Bauteildicke  $s$  und der konstanten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ :

---

<sup>400</sup>Vgl.: Fraunhofer Institut: Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Strahlungsabsorption. Institut für Bauphysik, Wärmetransportmechanismus "langwellige Strahlung", Klaus Sedlbauer, 2009.

<sup>401</sup>Baehr. H.D., Stephan.K: Wärme- und Stoffübertragung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 4. Auflage, 2003.

<sup>402</sup>Vgl.: stationäre Wärmeübertragung durch Bauteile aufgrund der Differenz zwischen Innentemperatur und Außentemperatur.

$$(43) \quad Q = (g_{sa} - g_{se}) / (s / \lambda) \quad \text{W/m}^2$$

Die Wärmeübergangswiderstände<sup>403</sup>  $R_{si}$  und  $R_{se}$  einer Fläche oder eines Bauteils geben den Widerstand an, den die Grenzschicht von dem umgebenden Medium (Luft) dem Wärmestrom beim Wärmeübergang entgegensetzt.<sup>404</sup>

Der Wärmedurchgangskoeffizient<sup>405</sup>  $u$  ist ein Maß für den Wärmestromdurchgang durch eine ein- oder mehrlagige Bauteilschicht, wenn eine Temperaturdifferenz besteht und aus einem konvektiven und strahlungsbedingten Anteil besteht:

- $1/R = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für außenliegende Schichten und mit
- $1/R = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für innenliegende Schichten

Die Wärmeübertragung<sup>406</sup>, die durch ein mehrschichtiges Bauteil strömt, wird nach der Berechnungsgleichung für ein- und mehrschichtige Bauteile berechnet:

$$(44) \quad Q = \frac{(g_i - g_e)}{R_{si} + \frac{s}{\lambda} + R_{se}} \quad \text{einschichtige Bauteile}$$

$$(45) \quad Q = \frac{(g_i - g_e)}{R_{si} + \sum \frac{s_n}{\lambda_n} + R_{se}} \quad \text{mehrschichtige Bauteile}$$

Der stationäre Wärmestrom, der von der warmen Bauteilinnenfläche zur innenliegenden kälteren Fassadeninnenwandfläche strömt, ist der Wärmeleitfähigkeit des Bauteils, der Wandflächengröße und dem Schichttemperaturgefälle proportional. Der Temperaturverlauf in den Bauteilen ist bei einer konstanten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  geradlinig abnehmend. Der stationäre Wärmestrom wird unter Berücksichtigung der Einflussparameter berechnet mit:<sup>407</sup>

$$(46) \quad Q = \lambda \cdot A / s (T_1 - T_2)$$

<sup>403</sup>Fraunhofer Institut (Hrsg.): Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Strahlungsabsorption, Institut für Bauphysik, Wärmetransportmechanismus "langwellige Strahlung", Klaus Sedlbauer, 2009.

<sup>404</sup>Ebd.: (Berechnung des Wärmestroms von unten nach oben mit einem Wärmeübergangswiderstand von 0,13 bei einer Temperaturdifferenz von 5 K). (Erdreichtemperatur misst ca. 10° C, Kellerbodentemperatur 15° C). Es würde ein Wärmestrom von circa 35 W/m<sup>2</sup> fließen.

<sup>405</sup>Vgl.: Wärmedurchgangskoeffizient, Wärmedämmwert, U-Wert, ehemals k-Wert. Information aus dem Internet URL <http://wikipedia.de>.

<sup>406</sup>Fraunhofer Institut (Hrsg.): Thermisches Verhalten von Außenbauteilen: Strahlungsabsorption, Institut für Bauphysik, Wärmetransportmechanismus "langwellige Strahlung", Klaus Sedlbauer, 2009.

<sup>407</sup>a.a.O.: S. 17 ff. Wärmestrom in W/m<sup>2</sup>, Wärmeleitfähigkeit in W/mK, Fläche in m<sup>2</sup>, Temperaturdifferenzbetrag in K, Wandstärke in m.

Die Energiebilanz eines Gebäudes wird ganzjährig beeinflusst durch die Absorption und Reflexion der direkten und indirekten solaren Strahlung über ein- oder mehrschichtige Außenwände, Fassadenflächen, Fensterflächen und Dachkonstruktionen. Während des Tages ist ein „Aufheizen“ der Umfassungsflächen in den Sommermonaten mit Oberflächentemperaturen von mehr als 30°C gegeben.

Die Wärmedämmtechnik wie auch die Wärmedämmverbundsysteme<sup>408</sup> verhindern die Speicherung der solaren Strahlungswärme in den Fassadenflächen und Gebäudebauteilen aufgrund des einseitig beschichteten oder sehr dichten Wärmedämmmaterials. Der sich bildende solare Wärmestrom wird durch die Wärmedämmung gehindert durch die Fassadendämmung von außen zu den innenliegenden Wänden zu strömen. Oberflächentemperaturen der Gebäudeaußenflächen<sup>409</sup> werden durch die thermische Abstrahlung von Bauteiloberflächen beeinflusst.

Das Forschungsinstitut der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie (VÖZFI) untersuchte das Erwärmungsverhalten der Baustoffe Asphalt und Normalbeton. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass die Oberflächentemperaturkurven von Asphalt und Beton abweichen und ein deutlicher Temperaturunterschied im Wärmespeicherhalten besteht. Die messtechnische Untersuchung von Stahlbetonplatten in Gebäuden mit thermischer Bauteilaktivierung ergab, dass die flächenbezogene Wärmeabgabeleistung einer Betondecke bei einer Unterbrechung der Raumwärmezufuhr in Abhängigkeit der Plattendicke unterschiedlich zu bewerten ist. Dünnschichtige Stahlbetonplatten besitzen eine geringere Wärmespeicherfähigkeit als dickschichtige Platten. Zusammenfassend ist festgestellt worden, dass die Dicke der Stahlbetonplatte keine gravierende Auswirkung auf das thermische Verhalten der aktivierten Geschoßdecke hat, wenn das Rohrregister zur thermischen Erwärmung oberflächennah positioniert ist.<sup>410</sup> Der Energietransport zurück aus den Bauteiloberflächen in die angrenzende Atmosphäre erfolgt durch den fühlbaren Wärmestrom und durch den latenten Wärmestrom.

---

<sup>408</sup>Verein zur Förderung energieeffizienter wirtschaftlicher Bausysteme (FEWB e.V): Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit, Fachbeitrag über Wärmeschutz und EnEV, S.1-10; Information aus dem Internet <http://www.fewb.de> (2010).

<sup>409</sup>Kehrer, Manfred; Schmidt, Thomas: Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen, - Validierung von Berechnungsergebnissen mit WUFI durch Vergleich mit Freilandmessungen am Institut-Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen (2010), Information aus dem Internet <http://www.hoki.ibp.fhg.de> (2011).

<sup>410</sup>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Berichte aus der Energie- und Umweltforschung, Energiespeicher Beton, Forschungsprojekt, 2/2016, S.149 ff.

Die relevanten solaren Strahlungsanteile, die zu einer Erhöhung bzw. Reduzierung der Oberflächentemperaturwerte von Gebäudebauteilen beitragen, sind mit dem Planungstool WUFI zu berechnen. Das Tool stützt sich auf die realitätsnahe instationäre Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen.<sup>411</sup>

Die langwellige Wärmeabstrahlung von Bauteiloberflächen wird für die Berechnung vernachlässigt oder durch eine pauschale Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten nach DIN EN ISO 6946 wiedergegeben.<sup>412</sup>

---

<sup>411</sup>Künzel, H.M.: WUFI: Berechnungsprogramm für die hygrothermische Simulation von Bauteilen, Fraunhofer Institut, Information aus dem Internet <http://www.hoki.ibp.fhg.de> (2012).

<sup>412</sup>Vgl.: DIN EN ISO 6946: Wärmeübertragung durch Bauteile (k-Wert).

## 5. These

Der Verfasser stellt die These auf, dass das solare Wärmepotenzial aus den unversiegelten und versiegelten städtischen Flächen generiert und in dezentralen Langzeitwärmespeichernetzen als Niedrigtemperaturwärme für die Wärme- und Klimakälteversorgung von Gebäuden vorgehalten werden kann. Die in den Sommermonaten zur Verfügung stehende, in städtischen Oberflächen und Böden gespeicherte solare Wärme ist als Nutzenergie für die Gebäudeversorgung verwendbar. Diese Arbeit stützt sich auf den derzeitigen Stand der Forschung in den Forschungsfeldern Regionalentwicklung mit regenerativen Energien, solare Stadtversorgungsplanung, technische Infrastrukturentwicklung, städtische dezentrale städtische Energieversorgung, regenerativer Energien wie Geothermie, Solarthermie unter Berücksichtigung des Klimaschutzes, Meteorologie, Ressourcenschutzes und der Anlagensystemtechnik zur Wärmespeicherung und Wärmeversorgung mit Niedrigtemperaturwärme. Die Wärmepumpentechnologie zur Umwandlung der erzeugten Wärme aus Oberflächen und Bodenschichten in Nutzenergie ist Stand der Technik.

### Argumente zur Unterstützung der These

- Eine solarunterstützte regionale Energieversorgung bedingt im Rahmen der Regional- und Landesplanung die Entwicklung von Energieregionen mit Leitbildern, die den fossilen Primärenergiebedarf reduzieren, regenerative Energiesysteme und Potenzialanalysen für Regionen zur gezielten Nutzung der solaren Strahlung fördern.
- Eine nachhaltige städtische Energieversorgung mit Strom und Wärme ist durch eine gezielte nachhaltige Versorgungsstrategie mit dezentralen Anlagenkonzepten wie Geothermie, Kraft-Wärme-Kopplung, Biomasse, Photovoltaik und solarthermischen Anlagen zu fördern. Wärmepotenziale, die aus der solaren Strahlung über städtische Flächen von versiegelten und unversiegelten Flächen und über die Bodenwärme bereitgestellt werden, unterstützen den kommunalen Energiemix mit regenerativen Energien.
- Städtebauliche energetische Forschungsvorhaben untersuchen Ansätze und Ziele einer klimagerechten Stadtentwicklungsplanung mit dezentralen Versorgungsstrategien. Das innovative Forschungsprojekt INSEL<sup>413</sup> zum Beispiel prognostiziert die Entwick-

---

<sup>413</sup>Fachhochschule Landshut: Innovatives skalierbares Energiekonzept der Hochschule Landshut (INSEL), dezentrale Energiesysteme, Energiespeicher und System- und Netzintegration, Landshut, Information im Internet URL <http://www.fh-landshut.de/tze/netzintegration.de> (2012).

lung von dezentralen Energieversorgungskonzepten unter Berücksichtigung der Anlagentechnik mit ausschließlich regenerativen Energietechnologien. Der experimentelle Wohnungs- und Städtebau (ExWoSt) zeigt anhand von Feldstudien des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR<sup>414</sup> die Auswirkungen einer kohlendioxidarmen Energieversorgung für eine klimagerechte Stadtentwicklung auf der städtischen Quartiersebene<sup>415</sup> auf. Weitere Studien des BBSR Instituts<sup>416</sup> prognostizieren, dass für die städtische Energieversorgung deutscher Städte langfristig ein abnehmender Gesamtenergiebedarf für die Gebäudewärmeversorgung erwartet wird. Die Städte und Gemeinden leisten dabei einen unverzichtbaren Beitrag zur Umsetzung der klima- und energiepolitischen Zielsetzung mit der Erhöhung des Anteils an regenerativen Energien in Deutschland bis zum Jahr 2050.

- Die Stadtentwicklungsplanung fokussiert sich insbesondere auf solare Stadtentwicklungskonzepte unter Berücksichtigung des solaren und energieeffizienten Städtebaus. Die Solararchitektur von Bestandsgebäuden erhält mit der solarunterstützten Energieversorgung mit regenerativen Energien neue Impulse für den solaren Stadtumbau. Die nachhaltige städtische Energieversorgung trägt zur Reduzierung von CO<sub>2</sub> Emissionen, zum Klima- und Umweltschutz und zum Ressourcenschutz bei.
- Das solare Wärmepotenzial steht dem Endverbraucher über ein dezentrales Versorgungssystem zur Wärme- und Klimakälteversorgung von städtischen Kerngebieten mit Gebäuden im Bestand ganzjährig zur Verfügung. Die ganzjährige Versorgung mit Niedrigenergiewärme und Klimakälte wird über Kollektorsysteme in versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen und Gebäudeflächen des urbanen Raumes gewährleistet und in Langzeit-Speicheranlagen bereitgestellt.
- Städte mit einem hohen Versiegelungsgrad stellen ein ganzjähriges Wärmepotenzial zur Speicherung der solaren Strahlung in asphaltierten, betonierten Verkehrsflächen sowie in unversiegelten Bodenflächen zur Verfügung. Der technische Stand der Materialforschung für Kollektorsysteme zur Erzeugung von Niedrigtemperaturwärme ist

---

<sup>414</sup>Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): abgeschlossene Studien seit 2006. Information im Internet URL <http://www.bbsr.bund.de> (2012).

<sup>415</sup>a.a.O.: Information im Internet URL <http://www.bbsr.bund.de> (ExWoSt/Studien/2011 / EnergieeffizienteQuartiere), 2012.

<sup>416</sup>Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): abgeschlossene Studien seit 2006. Information im Internet URL <http://www.bbsr.bund.de> (2012).

erst in den letzten Jahren aufgrund der materiellen Technologieentwicklung und Wärmespeichersystementwicklung intensiviert worden.

- Forschungsergebnisse aus Langzeitprojekten des Energieversorgungsmanagements zeigen, dass die Umstellung auf eine kommunale dezentrale Strom- und Wärmeversorgung mit einer optimalen Systemintegration und einem hohen Anteil von regenerativen Energien - mit Effizienzsteigerung in der Energieverteilung - langfristig einen Rückgang des Endenergieverbrauchs erzielen kann. Eine ganzjährige nachhaltige Versorgungssicherheit für Regionen und Städte ist aber nur durch eine unterstützende zentrale fossile Energieversorgung zur Sicherstellung der Grundlast zu gewährleisten.
- Die Netzübernahme durch die Kommune erschließt weitere Potenziale für die Strom- und Wärmeversorgung durch regenerative Energien und profitiert zusätzlich von den Erträgen des Netzbetriebes.
- Forschungsvorhaben, die die globalen Auswirkungen einer fossilen Energieversorgung auf die Umwelt und den Menschen untersuchen, zeigen, dass insbesondere die globalen klimatischen Veränderungen, der Ressourcenverbrauch und die Reduzierung von städtischen Umweltbelastungen eine Energie-(Wärme)wende erfordern. Aus diesen Gründen wird von den Bundes- und Umweltverbänden und Bürgerinitiativen eine Umstrukturierung von der zentralen fossilen Versorgung zu einer dezentralen Versorgung und somit zu einer umweltfreundlichen und ressourcenschonenden Energieversorgung mit einem hohen Anteil an regenerativen Energien (Energemix mit Solarenergie, Biomasse, Windenergie, Wasserkraft) gefordert.
- Leitungsgebundene Fern- und Nahwärmenetze sind einzubinden, die aus den städtischen Flächen und Böden erzeugte Niedrigtemperaturwärme und Bodenwärme aufnehmen und über das Wärmeversorgungsnetz den Endverbrauchern zur Verfügung stellen. Anlagensysteme der Kraft-Wärme-Kopplung, betrieben mit nachwachsenden Rohstoffen, sind als Energieerzeuger zur Sicherstellung der Grundlast für Wärme und Strom einzubinden. Eine dezentrale städtische Quartiersversorgung mit solarer Wärme und Klimakälte wird durch regenerative Energieanlagensysteme wie Geothermie unterstützt. Die Nutzung der dezentralen Niedrigtemperaturwärme führt zu einer Reduzierung des städtischen Primärenergiebedarfs.
- Der Wechsel von einer durch Konzessionsverträge versorgten Kommune zu einer „Energie-Kommune“ schöpft die kommunalen Handlungsmöglichkeiten beim Ausbau der Erneuerbaren Energien kreativ und innovativ aus. Dadurch profitiert sie von Wertschöpfungseffekten und steigert die Akzeptanz und Beteiligung der Bürger. Mögliche

Handlungsspielräume beziehen sich auf den Bau von Solar-, Biogas-, Windkraft-, Geothermie- und Wasserkraftanlagen.

- Analysen und Ergebnisse der Studie des Fraunhofer Instituts „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Stand 2015“ belegen die schrittweise Umsetzung des politischen Ausbauziels und die Sicherstellung der Energieversorgung durch solare Anlagenkonzepte.<sup>417</sup> Insgesamt sind bis zum Jahr 2012 etwa 145.000 solarthermische Systeme mit einer gesamten Kollektorfläche von 1,15 Mio. Quadratmetern installiert worden. Der Anstieg von 149.000 thermischen Solaranlagen verursacht eine Vergrößerung der Kollektorfläche auf 1,27 Mio. Quadratmeter innerhalb eines Jahres.<sup>418</sup>
- Durch die Erfahrung der technischen Anwendung von Warmwasser-Kollektoranlagen in Fahrbahnflächen ist erwiesen, dass die ganzjährige Haltbarkeit von versiegelten Asphalt- und Betondecken verbessert wird, da in den Wintermonaten durch die Schichterwärmung der Deckschicht mit der Rückführung von Wärme eine Eisbildung an der Oberfläche verhindert wird. Die Wärmeübertragung erfolgt in der Asphalt-schicht oder Betondeckenfahrbahn zum Beispiel über ein Sammelkollektor als Röhrensystem, der mit einem künstlichen oder natürlichen Speichersystem über wasserführende Sandschichten in ausreichender Bodentiefe verbunden ist. In den Sommermonaten wird das von der solaren Strahlung erwärmte Wasser in künstliche oder natürliche Sammel-speicheranlagen geleitet, wo es bis zur Winterjahreszeit zwischengelagert wird. Während der kalten Jahreszeit wird mit einem Wärmepumpenanlagensystem die Nutzenergie bereitgestellt. Das nach der Nutzung abgekühlte Warmwasser wird anschließend wieder in einen Sammel-speicher geleitet und zwischengespeichert. Die Ressource steht in der Sommerjahreszeit zur Klimatisierung von Bestandsgebäuden zur Verfügung.
- Dem Forschungsfeld der solaren Wärmespeicherung in Flächen und Bodenschichten<sup>419</sup> wird eine hohe Bedeutung beigemessen und erfordert in diesem Kontext weitere Forschungsansätze auf dem Gebiet der dezentralen thermischen Speicherung und

---

<sup>417</sup>Vgl.: Fraunhofer Institut: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 25.12.2015. Zusammenge-stellt von Dr. Harry Wirth, Bereichsleiter Photovoltaische Module, Systeme und Zuverlässigkeit, Fraunhofer ISE.

<sup>418</sup>Vgl.: Marktstatistik des Bundesverbandes Solarwirtschaft (BSW-Solar) und des Bundesindustrieverbands Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik (BDH), 01/2013, BSW-Solar, BDH.

<sup>419</sup>Bayerischer Forschungsverbund (FORETA): Energieeffiziente Technologien und Anwendungen, Teilprojekte, Juli 2010.

Speichertechnologie<sup>420</sup>. Es besteht ein Forschungsbedarf zur Effizienzerhöhung von Sammelkollektoren zur Generierung von Niedrigtemperaturwärme aus städtischen Oberflächen und Böden. Die technische Anwendung als sicheres und zuverlässiges Versorgungssystem für Endverbraucher ist über langjährig angelegte Modellvorhaben nachzuweisen.

- Die Tendenz in den Metropolen und Städten mit einem Bevölkerungszuwachs<sup>421</sup> von rund 3,5 Mrd. Einwohnern bis 2030 wird sich zukünftig auf den Anstieg des Endenergiebedarfs und schließlich auf die Veränderung des globalen Klimas auswirken. Der tägliche Gebrauch von fossilen Energieträgern zur Energieerzeugung und -bereitstellung verursacht je nach Energieträgerwahl hohe Emissionsfrachten und unterstützt die Bildung von Klimagasen. Szenarien über die Entwicklung des globalen Endenergiebedarfs<sup>422</sup> bis zum Jahr 2050 zeigen, dass die Zukunft der Energieversorgung sowohl von der Nachfrage des Endenergiebedarfs als auch von der Entwicklung des Wirtschaftswachstums abhängig ist und daher unterschiedlich beurteilt wird. Eine Abnahme des Endenergiebedarfs bis zum Jahr 2050 könnte sich durch die Auswirkungen des Energiesparens, der Heizanlageneffizienzförderung und Substitution von fossilen Energieträgern durch regenerative Energien langfristig einstellen.
- Die Bildung von Energiegenossenschaften in Kommunen fördert die verantwortliche Beteiligung der Endverbraucher und Anlageneigentümer von regenerativen Anlagen an der Strom- und Wärmeversorgung.

### **Bedenken und Hemmnisse**

- Die kommunale Versorgungssicherheit mit Energie ist durch Dienstleistungsangebote der Energieversorgungsunternehmen ganzjährig gewährleistet, da Strom, Fern- und Nahwärme oder Stadtgas den Endenergieverbrauchern und Haushalten zuverlässig zur Verfügung gestellt wird. Grundlage der leitungsgebundenen Energieversorgung sind langjährige Konzessionsverträge zwischen den Kommunen und den Energieversorgungsunternehmen. Die Bereitstellung von Strom und Gas für Endenergieverbraucher

---

<sup>420</sup> Büro für Technikfolgen-Abschätzung (Tab) beim Deutschen Bundestag (Hrsg.): Energiespeicher –Stand und Perspektiven, Sachstandbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“, Oertel, Dagmar. Arbeitsbericht 123, Februar 2008.

<sup>421</sup> Hamacher, Thomas: Energiemix der Zukunft und Herausforderung für die Energieversorgung durch das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik der Technischen Universität München, 2012.

<sup>422</sup> Vgl.: Climate Solutions; IPCC (2000); Greenpeace (2010); Shell (2008); van Vuuren (2007); WEO (2009).

erfolgt über in Verkehrsflächen verlegte Leitungsnetze. Kommunen erhalten von den Energieversorgern eine Konzessionsabgabe. Konzessionsverträge laufen erst nach 20 Jahren Vertragslaufzeit aus.

- Die Umsetzung der Netzübernahme ist wirtschaftlich belastend für die Kommunen. Wirtschaftliche Versorgungskonzepte fokussieren sich auf die Gründung von Stadtwerken mit einem eigenen Vertrieb von Strom und Gas oder einer eigenen Netzgesellschaft.
- Fossile und nukleare Primärenergieträger werden in Großkraftwerken in Nutzenergie umgewandelt. Die Standortwahl erfolgt strategisch durch Energieversorgungsmonopole in Regionen. Strom, Erdgas und Fernwärme werden über großflächige lange Leitungsnetze den Kommunen sicher zur Verfügung gestellt. Die Umweltbelastungen durch Verkehr, Luftschadstoffen und Abfall sind hoch.
- Politische Ziele favorisieren immer noch den strategischen Ansatz der ganzjährigen Versorgungssicherheit für Regionen, Städte und Gemeindegebiete mit einer zentralen fossilen Energieversorgung. Den Endenergieverbrauchern, die nicht an ein leitungsgebundenes Energieversorgungsnetz im Umland von Städten angeschlossen sind, stehen für eine sichere Energieversorgung nur fossile leitungsfreie Energieträger wie Heizöl, Kohle und Flüssiggas zur Verfügung. Unterstützend zur fossilen zentralen Energieversorgung sind Einzelanlagen, Großanlagen wie Solarkraftwerke, KWK-Anlagen und Windkraftanlagen einzubinden. Eine Anlagenförderung durch Bund und Länder ist erforderlich.
- Auf Bundesebene ist mit dem Raumordnungsgesetz die Leitvorstellung einer nachhaltigen Raumentwicklung fest verankert. Das Raumordnungsgesetz fordert die Gewährleistung des Grundsatzes der Raumordnung für eine „kostengünstige, sichere und umweltverträgliche Energieversorgung. Die räumlichen Voraussetzungen für den Ausbau von regenerativen Energien sind zu schaffen“. Kommunen sind in der Verantwortung, Vorgaben aus den regionalen Energieleitbildern zur Integration von regenerativen Energien im Rahmen ihrer Möglichkeiten umzusetzen.
- Gesetzliche Regelungen des Bundes und der Länder weisen der Planung von regenerativen Energien eine entscheidende Bedeutung zu und wirken sich auf alle Planungsebenen aus. Energieversorgungsrechtliche und planungsrechtliche Grundlagen sind für die Umsetzung nicht flexibel genug, um den Entscheidungsträgern nach vorgegebenen regionalen und kommunalen Szenarien und Leitbildern die Ziele für eine umweltfreundliche Energieversorgung umsetzen zu können. Regionale und kommunale

Planungshilfen für die Etablierung von regenerativen Energieanlagen sind umfassender den Investoren, Planern und Bürgern bereitzustellen.

- Die Rechtsgrundlage für eine Festsetzung in Bebauungsplänen nach § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes oder zu deren Vermeidung oder Minderung zu treffenden baulichen und sonstigen technischen Vorkehrungen besteht. Diese Festlegung bezieht sich auf die zentrale Wärmeerzeugung mit CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verursachung von schädlichen Umweltauswirkungen. Die Umsetzung des „Niedrigenergiestandards“ und die damit verbundenen baulichen und technischen Vorkehrungen sind nach dem BauGB zu erfüllen. Die Praxis weicht in der Regel auf andere Umsetzungsmodalitäten wie zum Beispiel auf einen städtebaulichen Vertrag oder einen Grundstückskaufvertrag mit Bauwilligen aus, damit eine freie Wahl der Energieversorgung erfolgen kann.
- Die nach dem EEWärmeG vorgegebene Wahlmöglichkeit für regenerative Energien ist zu prüfen, ob eine bauplanungsrechtliche Festlegung auf eine bestimmte Form der regenerativen Energien städtebaulich rechtfertigbar ist. In einigen Bundesländern gibt es landesrechtliche Vorschriften, die es den Gemeinden ermöglichen, durch Satzung den Einbau von Solarkollektoren zur anteiligen Deckung des Wärmebedarfs von Gebäuden vorzuschreiben. Im Hinblick auf den Klimaschutz zur Reduzierung der Treibhausgase ist es fraglich, ob eine Gemeinde ein Verbot der Verwendung von fossilen Brennstoffen bei der Deckung des Wärmebedarfs der Gebäude in Verantwortung für den allgemeinen Klimaschutz festsetzen kann. Die Anforderungen des EEWärmeG zur Aufnahme von weitergehenden Festsetzungen im Bebauungsplan sind nicht eindeutig.
- Der verpflichtende Anschluss an eine Nah- oder Fernwärmeversorgung kann in den Bauleitplänen noch nicht festgesetzt werden, denn eine solche Festsetzungsmöglichkeit ist im BauGB nicht geregelt. Allerdings können im Bebauungsplan Festsetzungen getroffen werden, die den Anschluss an eine Fern- oder Nahwärmeversorgung unterstützen. Der Standort für ein Blockheizkraftwerk mit Kraft-Wärme-Koppelung kann durch die Festsetzung einer Versorgungsfläche mit einer entsprechenden Zweckbestimmung planungsrechtlich in Bauleitplänen geregelt werden.
- Sowohl städtebauliche Sanierungsmaßnahmen nach §§ 136 ff. BauGB als auch Stadtumbaumaßnahmen nach §§ 171a ff. BauGB sollen u.a. zum kommunalen Umweltschutz beitragen. Die Anwendung knüpft allerdings an andere Voraussetzungen an,

sodass Maßnahmen der klimagerechten Stadterneuerung nur aus Anlass der Durchführung von Sanierungs- oder Stadtumbaumaßnahmen durchgeführt werden können, nicht jedoch umgekehrt als Begründung für die Ausweisung entsprechender Maßnahmegebiete des besonderen Städtebaurechts herangezogen werden können. Vielmehr bieten sich gebietsbezogene Maßnahmen wie die Umstellung auf eine städtische Wärmeversorgung mit dezentralen Blockheizkraftwerken mit Kraft-Wärme-Koppelung an. Auch können je nach den örtlichen Verhältnissen zum Beispiel im Rahmen von Stadtumbaumaßnahmen gebietsbezogene Anlagen zur Nutzung von Solar- oder Geothermie in Betracht kommen.

- In der urbanen Siedlungsstruktur ist eine autarke Energieversorgung erschwert. Simulationsrechnungen bestätigen, dass zusätzlich zu den privaten Verbrauchern, auch der Strombedarf von Industrie, Handel und Gewerbe modelliert und in die Betrachtungen mit einbezogen werden müssen. Die Sicherstellung des Strombedarfs aller kommunalen Verbraucher ist durch eine autarke Stromversorgung auch in ländlichen Siedlungen nicht mehr umsetzen.
- Das Konzept der lokalen Autarkie für Wärme und Strom ist langfristig nur in Einzelfällen unter günstigen Bedingungen umgesetzt werden, wenn ein regeneratives Energiepotenzial ganzjährig vorhanden ist. An netzfernen Standorten wie entlegenen Ortschaften oder Inseln ist die Umsetzung zu prüfen.

## 6. Methodik

### 6.1. Vorüberlegungen zur Methodik des Vorhabens

Die Methodik des Vorhabens stützt sich auf Ergebnisse von Forschungsvorhaben und wissenschaftlich begleiteten Projekten im Bereich der Bauphysik, Geothermie und der experimentalen Niedrigtemperaturwärmeversorgung unterstützt durch solare Strahlung. Ergebnisse von Forschungsvorhaben zur solaren Potenzialanalyse von städtischen versiegelten und unversiegelten Flächen sind dem Verfasser nicht bekannt. Das Ergebnis dieses Vorhabens trägt zur Grundlagenforschung der regenerativen Energien bei und zeigt modellhaft dezentrale Versorgungsmöglichkeiten zur ganzjährigen Nutzung der Niedrigtemperaturwärme für die städtische Wärmeversorgung. Zur Untersuchung des solaren Strahlungspotenzials von Städten und Stadtquartieren ist die Auswertung des Versiegelungsgrades, Siedlungstypologie, Gebäudestruktur unter Berücksichtigung von Zeitreihen meteorologischer Daten erforderlich.

Die Befragung von Kommunen erfolgt mit einem Fragenkatalog über die Wärmeversorgung mit regenerativen Energien. Das Ziel der Befragung ist die Untersuchung des Erfahrungsstandes von städtebaulichen Planungen unter Berücksichtigung des solaren Strahlungspotenzials mit regenerativen Energien. Die Internetrecherche und Auswertung der wissenschaftlichen Fachliteratur über regenerative Energien und Niedrigtemperaturwärme in Städten unterstützt den methodischen Ansatz der Befragung.

Forschungsvorhaben zu örtlichen und regionalen Energieversorgungskonzepten für Regionen und Städte sind durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung<sup>423</sup> durchgeführt worden, insbesondere mit dem Ziel, die „klimawandelgerechte Stadtentwicklung“ und Schadstoffreduzierung in Ballungsräumen und Städten zu untersuchen.

Dieser methodische Ansatz wird in dieser Arbeit nicht aufgenommen, da bereits die Verbrennungstechnik von Heizkraftwerken und Heizungsanlagen effizienter geworden ist und die Emissionsfrachten und Abgaswerte reduziert worden sind.

Die Analyse von Energieversorgungskonzepten in Regionen und Städten zeigt ebenfalls, dass zur strategischen Ausrichtung der Wärmeversorgung Energie- oder Klimaschutzleit-

---

<sup>423</sup>Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): Vorstudien für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung - Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte. Entscheidungsunterstützungshilfe und Erprobung in Testkommunen. vgl. ExWoSt-Vorstudie "Klimawandelgerechte Stadtentwicklung". Entwicklung eines integrierten Konzeptes "Kommunales Strategie- und Aktionsset". Information aus dem Internet URL <http://www.bbsr.de> (2010).

bilder in den Vordergrund gerückt sind. Die Erstellung eines Energieleitbildes erfolgt in der Regel mit der Erhebung von Energieversorgungsdaten, die die regionale oder städtische Energieversorgungssituation abbilden.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zur Untersuchung des passiven solaren Wärmegewinns in Bebauungsplanvarianten zeigen, dass der methodische Ansatz über die Klassifizierung von Gebäuden und Siedlungstypologien zusätzlich zu berücksichtigen ist.<sup>424</sup> Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) veröffentlicht die Systematik und Klassifizierung der Gebäudetypologie nach Baualter<sup>425</sup> von Bestandsgebäuden in Deutschland und ermöglicht somit die Abschätzung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden im Bestand für die Analyse der Modellgebiete in Regionen und Städten. Die Datengrundlage von Wärmeatlanten mit der Angabe von Wärmebedarfsdichten (GWh/km<sup>2</sup>) in Regionen und Städten nach Siedlungskategorien sind in die Untersuchung einzubeziehen. Zur detaillierten Datenaufnahme von urbanen Räumen eignen sich GIS-Daten, die städtische Flächendaten und Katasterdaten vorhalten.

Rechnerische Verfahren zur Ermittlung des Wärmebedarfs und des Fern- und Nahwärmepotenzials von Siedlungen und städtischen Räumen sind für die Auswertung der Modellgebiete nach ganzjährigen Energieverbrauchsdaten erforderlich. Die Aufnahme von Daten zum tatsächlichen Primärenergie- und Endenergieverbrauch ist nur über die Abfrage bei den Energieversorgungsunternehmen gewährleistet oder durch die eigene Befragung über den Energieverbrauch bei den Endverbrauchern.

Die kommunalen GIS-Daten<sup>426</sup> nach Gebäudetypologie und Siedlungstypologie aus dem Wärmeatlas sind bei den Kommunen abrufbar für eine detaillierte Berechnung der Wärmebedarfsdichten für das zu untersuchende städtische Gebiet.<sup>427</sup> Der Nutzenergiewärmebedarf ist Grundlage zur Planung und technischen Auslegung von Fern- und Nahwärme-

---

<sup>424</sup>Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung: Mannheim Seminar, örtliche und regionale Energieversorgungskonzepte -Teil der Entwicklungs- und Bauleitplanung, Roth und Ueli (1981), Fachvortrag von Ueli Roth, Architekt, Büro für Raumplanung, Umweltforschung, Städtebau und Architektur, energie- und klimabewusstes Planen und Bauen, Zürich, 1981, S.6-9, 11.1-11.2.

<sup>425</sup>Institut für Wohnen und Umwelt (IWU): Deutsche Gebäudetypologie, Systematik und Datensätze, Darmstadt, 2005.

<sup>426</sup>Vgl.: Universität Stuttgart - Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER) - S. Kempe, M. Ohl, M. Blesl, U. Fahl, C. Kruck, M. Härdtlein, L. Eltrop; Wärmeatlas Baden-Württemberg - Praxisanwendung des Leitfadens für die Stadt Rottenburg am Neckar, 11. März 2009.

<sup>427</sup>Anmerkung des Verfassers: Die Siedlungsfläche in km<sup>2</sup> dividiert durch den spezifischen Wärmebedarfskennwert des Siedlungstyps in MWh/km<sup>2</sup> führt zum Nutzenergiewärmebedarf für Raumwärme und Brauchwarmwasser in MWh.

netzen, solarthermischen Anlagen, geothermischen Anlagen, Biomasseanlagen sowie Biogasanlagen.

Die Solarpotenzialanalyse von städtischen Flächen stützt sich auf digitalgeführte Solarkataster und Solarstrahlungskarten, die Datenangaben zur Abschätzung des solaren Strahlungspotenzials für die Regionen zur Verfügung stellen. Eine grobe Abschätzung des Nutzenergiewärmebedarfs zur Untersuchung der Modellgebiete in Regionen und Städte im Rahmen dieser Arbeit erfolgt über die energetische Berechnungssoftware der Universität Kassel, da städtische Energieversorger aus Datenschutzgründen Verbrauchsdaten nicht zur Verfügung stellen und eine Befragung der Endverbraucher im Rahmen dieser Arbeit nicht leistbar ist.

Die Befragung von Fachbehörden der Stadtverwaltungen Hannover, Bremen, Leipzig, Magdeburg, Meiningen und der Inselgemeinden Helgoland und Sylt durch den Verfasser zeigt, dass dort bereits eine Potenzialanalyse über die städtische Energieversorgung als Plangrundlage für die städtische Bauleitplanung und Infrastrukturplanung aus Gründen des Klimaschutzes besteht. Entscheidungsträger und Experten der kommunalen Stadtplanungs-, Umwelt- und Bauämter sowie der Energieagenturen bekunden durch die Befragung ein erhebliches Interesse an den Ergebnissen dieses Vorhabens, da innovative Ansätze zur stärkeren Nutzung des solaren Strahlungspotenzials für urbane Räume in der solaren Stadtentwicklungsplanung benötigt werden.

Aus den genannten Vorüberlegungen sind folgende methodische Ansätze zur Aufnahme der solaren Potenzialanalyse von städtischen Flächen für die Auswertung der Modellgebiete abzuleiten:

- Städte in Regionen mit einem hohen Versiegelungsgrad (kreisfreie Städte, Gemeinden, Städte) sind auszuwählen. Stadtquartiere mit einer hohen Baudichte sind als Modellgebiete auszuwählen.
- Aufnahme der städtischen Flächennutzung mit Versiegelungsgrad, insbesondere der versiegelten und unversiegelten Flächen, sowie Flächen in städtischen Quartieren, Verkehrsflächen, Flächen mit besonderer Zweckbestimmung, Abstellflächen Fahrzeuge, Grünflächen mit Freizeit- und Sportanlagen, landwirtschaftliche Nutzflächen, Brachflächen aus digitalen Stadtplänen (Flächennutzungs- und Bebauungsplänen, Nutzflächenkataster, Brachflächenkataster)
- Erhebung und Auswertung von geographischen Daten auf der Grundlage von GIS-Portalen.

- Erhebung der Siedlungstypologie, Gebäudetypologie, Gebäudebualter, etc. aus den rechtskräftigen Bebauungsplänen auf der Datengrundlage von digitalen geographischen Karten.
- Entnahme von Daten über die Zuordnung und Einstufung der Siedlungs- und Gebäudetypologie, Flächen- und Gebäudemaße über die 3D-Modellierung aus digitalen Karten.
- Der Gesamtenergiewärmebedarf von Wohngebäuden im Bestand kann aufgrund der Auswertung von Luftbildern und über klimabereinigte bauphysikalische Berechnungsprogramme nur grob abgeschätzt werden.
- Die meteorologische Datenerfassung über den Versorgungsstandort, insbesondere die jährlichen solaren Strahlungsdaten, stehen aus Klimazeitreihen des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung. Die Daten der atmosphärischen Lufttemperaturwerte bodennaher Grenz und Bodenschichten sind den Datenbanken der Wettermessstationen des Deutschen Wetterdienstes zu entnehmen.
- Die Datenlage über die regionale und städtische Wärmeversorgung ist aus Energie- und Klimaschutzkonzepten, Potenzialanalysen und Studien über regenerative Energien zu entnehmen. Die Energieversorgungsstruktur mit Fern- und Nahwärmeleitungsnetzen ist Bestandteil von städtischen Wärmebedarfsatlanten.

## 6.2. Literaturrecherche

### Web-Internetseiten

Die systematische Internetrecherche wird zur Feststellung des Standes der Technik und zur Integration von regenerativen Energien in Regionen und Städten durchgeführt. Potenzialstudien und Stadtentwicklungskonzepte sind unter dem Suchbegriff „*kommunale Energiekonzepte zu den Themengebieten des globalen Klimawandels und des kommunalen Klimaschutzes*“ zu finden. Die Abfrage bezieht sich auf die konzeptionelle Planung von erneuerbaren Energien in regionalen und kommunalen Energiekonzepten in Europa auch unter Berücksichtigung der gesetzlichen Förderprogramme. Circa 2.100.000 Mio. Eintragungen stellen eine umfangreiche Daten- und Informationsgrundlage im Netz dar.

Kommunale Entwicklungskonzepte zum „*städtischen Leitbildprozess Klimaschutz und zu den regionalen Klimaschutzzielen*“ sind aufgrund der komplexen Datenlage sehr aufwendig auswertbar und stellen Gesamtdaten über den Energieverbrauch, Klima, Primärenergieeinsatz zur Verfügung. Mit circa 94.500 Einträgen zu den regionalen Klimaschutzzie-

len sind energetische Versorgungskonzepte mit regenerativen Energien geringfügig im Netz angegeben.

Die Fachbegriffe „*städtische Leitbilder für kommunale Energieversorgungsmodelle und Energieversorgungskonzepte*“ geben Aufschluss über die Kraftwerksversorgung, Substitutionsanteil von fossilen Energieträgern durch regenerative Energien für Strom und Wärme am Versorgungsstandort. Indikatoren zur Reduzierung des Anteils an fossilen Energieträgern, zur Reduzierung von Primärenergie und zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind insbesondere für eine ressourcenschonende regionale und städtische Energieversorgung durch die Entscheidungsträger festgelegt.

Die Auswertung der Ergebnisse von „*kommunalen Modellvorhaben für eine klimagerechte Energieversorgung*“ zeigt eine Vielzahl von Siedlungsprojekten im Umland von Städten, die für eine Auswertung der Energieverbrauchsdaten und Abgasemissionen von Heizungsanlagen zur Verfügung stehen.

Der Suchbegriff zu den Themengebieten „*Umweltschutz und Energieversorgung*“ gibt Aufschluss zum Fachthema „*Wärmepotenzial, Wärmespeicherung*“. Die Recherche<sup>428</sup> zu folgenden Keywords zeigt folgende Eintragungsbilanz (Stand 2016)<sup>429</sup>:

- „*solarer Wärmeertrag aus städtischen Flächen*“ circa 24.900 Ergebnisse,
- „*Versorgungskonzepte und Wärmepumpenanlagen*“ circa 700 Ergebnisse,
- „*Pufferspeicher für Wärmepumpen*“ circa 156.000 Ergebnisse,
- „*Potenzialerhebung Wärme*“ circa 2.320 Ergebnisse,
- „*Wärmeineffekte*“ circa 7.030 Ergebnisse,
- „*Wärmeversorgung und Wärmespeicher*“ circa 46.400 Ergebnisse,
- „*Kommunale Projekte und Wärmespeicher*“ circa 56.200 Ergebnisse,
- „*Wärmespeicher und Gebäudebestand*“ circa 14.200 Ergebnisse,
- „*Nahwärmekonzepte mit regenerativen Energien*“ circa 2.520 Ergebnisse,
- „*Niedrigtemperaturwärme*“ circa 2.160 Ergebnisse,
- „*städtische Niedrigtemperaturwärmekonzepte*“ circa 198 Ergebnisse,
- „*regenerative Energien und städtische Versorgungskonzepte*“ circa 3.700 Ergebnisse,
- „*regenerative Energien und regionale Energieversorgungskonzepte*“ circa 12.900 Ergebnisse.

---

<sup>428</sup>Anmerkung des Verfassers: Die Internetrecherche wurde 2016 stichprobenartig über die Google Suchmaschine durchgeführt (Stand Mai 2016).

<sup>429</sup>Vgl.: Eintragungen unter der Suchmaschine Google (2017).

– „*Stadtentwicklung und Solarstadt*“ circa 26.800 Ergebnisse.

Die Ergebnisse zeigen, dass anlagen- und betriebstechnische Daten über den wirtschaftlichen Betrieb von Heizungsanlagen, Wärmepumpenanlagen, solarthermischen und PV-Anlagen im Netz bilanziert werden. Daten von städtischen Niedrigtemperaturwärmekonzepten stehen nur aus Modellvorhaben zur Verfügung. Regenerative Energien und regionale Versorgungskonzepte schließen die Windkraft, Geothermie und Solarenergie mit ein. Städtebauliche solare Konzepte der Stadtentwicklung sind als Leitbilder festgelegt. Die Recherche zum solaren Wärmeertrag über städtische Flächen führt ausschließlich zu den solartechnischen Anlagen auf Dachflächen und Gebäudefassaden.

Der Fachbegriff „*Wärmequelle*“ wird meist im Zusammenhang mit der Wärmepumpentechnologie nach Art des Mediums genutzt. Weitere Themen sind der Heizungskostenvergleich und die Vorteile von Anlagenkombinationen mit Gasheizung und Solarthermischen Anlagen. Der begriffliche Zusatz „Forschung“ zeigt 197.000 Eintragungen zu

Eine Vielzahl von statistischen Auswertungen zu den energetischen Modellvorhaben zur Versorgung von Einzel-Wohngebäuden mit solaren Wärmespeicheranlagen und regenerativen Energien steht im Netz zur Verfügung. Zu der saisonalen Strom- und Wärmeerzeugung durch regenerative Energien stehen Bilanzrechnungen aus Modellvorhaben zur Verfügung.

Die Wärmepumpentechnologie ist zur Versorgung von kommunalen und privaten Leuchtturmprojekten für den Gewerbe- und Wohnungsbau besonders berücksichtigt. Auswertungen von Wärmepumpenkonzepten zur Gebäudeversorgung sind in zukunftsorientierten Modellvorhaben zu finden.

„*Solare Modellvorhaben*“ in den europäischen Mitgliedstaaten, die Wärmespeicheranlagen mit Wärmepumpentechnologie einsetzen, nutzen überwiegend eine Anlagenkombination - Heizungsanlage mit solarthermischen Anlagen - primär zur ganzjährigen Erzeugung von Warmwasser. Insbesondere ist die Luft-Wasser-Wärmepumpe im Rahmen der Energiewende für die energetische Sanierung von Gebäuden im Bestand im Netz hervorgehoben.

„*Modellprojekte zur Nutzung von Meerwasser mit Wärmepumpenanlagen und Anlagen zur Nutzung der solaren Strahlung zur Erzeugung von Wärme und Kälte*“ sind überwiegend in den mediterranen Regionen der Länder Frankreich, Griechenland, Spanien und der Türkei evaluiert worden. Daten über den saisonalen Betrieb stehen in einigen Vorhabenbeschreibungen nur zur Verfügung.

Im internationalen Vergleich dominieren die technisch ausgereiften „kommunalen Wärmeversorgungskonzepte zur Bereitstellung von Raumwärme und Brauchwasser“ durch geothermische Anlagen sowie zur Nutzung der thermischen Quellen insbesondere in Island. Am Beispiel der kommunalen Wärmeversorgung in Island ist erkennbar, dass die Primärenergieerzeugung, insbesondere durch Thermalvorkommen, Wasserkraft und Geothermie gewährleistet ist.<sup>430</sup>

Die Fachbegriffe „Wärmeinsel, Wärmeinseleffekte“ stehen mit dem Schutz des globalen Klimas wie auch mit der Stadterwärmung während der Sommermonate in Verbindung. Die Fachbegriffe „urbaner Wärmeinseleffekt, bodennahe Windfelder, urbane Luftfeuchtigkeitsverhältnisse und Luftqualität -Luftverschmutzung-,“ sind im Rahmen der Gesamtuntersuchung des Stadtklimas mit städtischen Klimakonzepten zu finden. Aus den Begutachtungen der untersuchten Projekte sind Phänomene der Wärmebelastung in Städten, die Erzeugung von Hitzestress für die Stadtbevölkerung dargestellt. Die Begründung bezieht sich auf Ursachen der dichten Bebauung, eines hohen Versiegelungsgrades und Raumdefizit für Grün- und Wasserflächen.

Unter dem Betriff „bauphysikalische Berechnungsprogramme für Energie, Gebäude und Stadtquartiere“ stehen eine Vielzahl von Berechnungstools zur Verfügung.<sup>431</sup> Der Vergleich zeigt, dass die Programme meteorologische Daten als Berechnungsgrundlage vorhalten.

Im Gegensatz zu der regionalen und städtischen Wärmeversorgung mit regenerativen Energien sind Ergebnisse und Informationen im Netz zu der städtischen Wärmeversorgung mit fossilen Energien im Rahmen der Energiewende, Zukunft und räumlichen Energieplanung in Verbindung mit regenerativen Energien abrufbar.

Aus den Ergebnissen der Internetrecherche sind anlagentechnische, betriebswirtschaftliche und konzeptionelle Ansätze für eine solare regionale und städtische Energieversorgung ableitbar.

---

<sup>430</sup>Vgl.: National Energy Authority (Orkutolur): What are the sources for the energy used in Iceland?, Energy-statistics und Primary Energy, Information im Internet URL <http://www.nea.is/the-international-energy-authority/energy-statistics/primary-energy/sources> (12.04.2012) und <http://www.nea.is/.media/orkutolur/primary-energy-use-1940-2012.xls>.

<sup>431</sup>Vgl.: Bauphysikalische Berechnungsmodelle für die Jahresheizwärmebedarfsermittlung für Wohngebäude z. B. Valentin Software (Internetbasiert), Schweizer BfE (Excelbasiert), Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt (Excelbasiert), CasaNova Berechnungstool der Universität Siegen, Berechnungstool der Firma RovaSoft, Information im Internet URL <http://bauphysikalische-berechnungsmodelle.de>.

## Systematische Literaturrecherche und Gesetzgebung

Die systematische Literaturrecherche<sup>432</sup> im Netz zum „*europäischen und nationalen Energierecht*“<sup>433</sup> zur Gewährleistung einer sicheren regionalen und kommunalen Versorgungssituation führt zu dem Ergebnis, dass die zentrale Energieversorgungsstruktur mit der Erzeugung von Strom und Wärme in zentralen Kraftwerken von Politik, Wirtschaft und Energieversorgern primär unterstützt und gefördert wird.

Die energiepolitische Strategie der Europäischen Union gibt mit Europäischen Richtlinien einen Katalog an Umsetzungs- und Regulierungsmaßnahmen für die Energieversorgung in Europa vor. Politische Entscheidungen für die nationale Energieversorgung stützen sich auf die strategischen Ziele Europas und leiten Strategien für die regionale und städtische Energieversorgung in Deutschland ab. Die deutsche Energiepolitik wird maßgeblich von den politischen Vorgaben der Bundesregierung und von den Interessen der vier Energieversorger<sup>434</sup> bestimmt, die die Grund- und Spitzenlast für die Endenergieverbraucher in Regionen und Städte ganzjährig bereitstellen.

Zur Förderung und Etablierung der regenerativen Energien sind seit dem Jahr 2000 Europäischen Richtlinien wie die Europäische Gebäuderichtlinie zur Gewährleistung der Gesamtenergieeffizienz und nationale Gesetze sowie Verordnungen erlassen worden. Auf der Ebene der Europäischen Union werden übergreifende klima- und energiepolitische Ziele und Leitlinien formuliert. Die konkrete Ausgestaltung des Energiemix und die Umsetzung des Ausbaus der erneuerbaren Energien zur Erreichung dieser Ziele fallen jedoch nach wie vor in den Kompetenzbereich der einzelnen Nationalstaaten.

Seit dem Jahr 2008 sind verbindliche Ziele für die europäische Energie- und Klimapolitik bis 2020 festgelegt worden:

- eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 20 % gegenüber 1990,
- ein Anteil von 20 % erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch, sowie
- eine Verringerung des Energieverbrauchs um 20 % mittels verbesserter Effizienz.

Das 20 %-Ziel für den Anteil erneuerbarer Energien ist in der EU-Richtlinie zur Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen verbindlich festgeschrieben und eine europäische

---

<sup>432</sup>Vgl.: Fachzeitschriften und Branchenmagazine: Erdgas, Flüssiggas, Umwelt, Regenerative Energien, Solarstrom-Magazine, Solarmagazine etc. Fraunhofer Institut: Forschungsverbund Regenerative Energien IWES, ISE etc.

<sup>433</sup>Vgl.: URL <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht> (2012).

<sup>434</sup>Vgl.: Energieversorger in Deutschland - Konzerne Vattenfall Europe, EOn AG, Energie Baden-Württemberg AG, Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk (RWE). Informationen aus dem Internet URL <http://www.wikipedia.de> (2011).

Gesamtregelung für die erneuerbaren Energien für Strom, Wärme, Kälte und Transport eingeführt worden. Für Deutschland liegt die Zielmarke bei 18% des Bruttoenergieverbrauchs bis 2020.

Für den Energiebinnenmarkt ist eine verbesserte Integration der nationalen Übertragungsnetze notwendig. Das Programm Transeuropäische Netze Energie (TEN-E) identifiziert Netzausbauprojekte im Rahmen der Kofinanzierung der Gemeinschaft. Weiterhin werden durch den Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber, ENTSO-E, die Netzausbaupläne in den Mitgliedstaaten unverbindlich koordiniert. Mittel- bis langfristig ist die Vision des EU-Supergrids denkbar. Das übergreifende Übertragungsnetz unterstützt den grenzübergreifenden Stromhandel und eine optimierte Integration erneuerbarer Energien in den Strommix.<sup>435</sup> Die Europäische Gesetzgebung für den Sektor Energie bezieht sich auf die Themenbereiche rationelle Energieverwendung und Energieeinsparung, Kohle, Elektrizität, Kernenergie, Kohlenwasserstoffe und andere leitungsgebundene Energieträger.

In erster Linie ist das Bundesministerium für Wirtschaft und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit für Fragen der Energieversorgungsstrategie, der Energieversorgungssicherheit und des Umwelt- und Klimaschutzes zuständig. Für die Bereiche Wärmeversorgung und Verkehr ist das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung in Deutschland federführend. Für den Ausbau von zentralen Energieversorgungsstrukturen mit fossilen Energieträgern ausgerichtete Strategie sind nationale Energiegesetze wie das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG, 2005), Atomgesetz (AtG, 1959, geändert 2012) und Energiesicherungsgesetz (EnSiG, 1975) erlassen worden. Zweck des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) ist, dass eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas, die zunehmend auf regenerativen Energien beruht, zu gewährleisten. Die Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität soll aufgrund der Regelungsanpassung im Atomgesetz geordnet beendet und bis zum Zeitpunkt der Beendigung mit einem sicheren und geordneten Kraftwerksbetrieb sichergestellt werden.

Die Einführung von regenerativen Energien in Regionen wird durch den Suchbegriff im Netz über „*regionale Förderprogramme und Technologieprogramme*“ erläutert und zeigt einen Zuwachs der regenerativen Energien am Bruttoenergiebedarf in Deutschland.

---

<sup>435</sup>Vgl.: Information im Internet URL <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE> (2017).

Die Umsetzung wird durch nationale Gesetze wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), Erneuerbare Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG), Biomasseverordnung, Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWK), Energieeinsparverordnung (EnEV) und Energieeinsparungsgesetz (EnEG)<sup>436</sup> gefördert. Insbesondere das 2010 erlassene EEWärmeG wird die Sicherstellung des nationalen Ziels unterstützen, bis zum Jahr 2020, mindestens 14% des Gesamtenergiewärmebedarfs aus regenerativen Energien bereitzustellen. Bestandsgebäude sind in diesem Gesetz ebenfalls berücksichtigt und sind verpflichtet, den Anteil an der Wärmeversorgung bis zu 50% unter Hinzunahme einer effizienten Wärmespeicherung zu erfüllen.

In der öffentlichen Diskussion wird die Versorgungssicherheit und Verlässlichkeit der Energieversorgung mit fossilen Energieträgern weiterhin überzeugend vor einer nachhaltigen umweltfreundlichen Energieversorgung mit regenerativen Energien präferiert.

Die selektive Auswertung der wissenschaftlichen Fachliteratur zeigt, dass die Veränderungen aufgrund des liberalisierten Strommarktes die Fortführung der zentralen Energieversorgungsstruktur in Deutschland unter Betrachtung der fossilen Energieträger Uran, Kohle und Erdöl weiterhin unterstützt.

Die leitungsgebundene Wärmeversorgung mit Fern- und Nahwärmenetzen, die in den ehemaligen ostdeutschen Ländern aufgrund der dort ansässigen Kohlekraftwerke dominierte, wird in der Fachliteratur als mögliche Versorgungsvariante unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit für Westdeutschland zum Beispiel für die Städte Hamburg, Kiel, Bremen, Berlin, Köln etc. mit einer hohen Baudichte empfohlen. Aufgrund dieses Planungsansatzes sind erste städtische Energieversorgungskonzepte mit einer Nahwärmeversorgung entwickelt worden, die eine leitungsgebundene Wärmeversorgung in der Gesamtversorgungsstrategie zum Klima- und Umweltschutz berücksichtigen. Wissenschaftlich begleitete Modellprojekte mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sind in Anlehnung an bestehende regionale und städtische Fern- und Nahwärmeversorgungsnetze geplant worden.<sup>437</sup>

---

<sup>436</sup>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Hrsg.: Energie in Deutschland, Trends und Hintergründe zur Energieversorgung, Aktualisierte Ausgabe August 2010, S. 14 Übersicht der Energiegesetzgebung.

<sup>437</sup>Pfaffenberger, W.: Pluralistische Strategien zur Fernwärmeversorgung, Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, AGFW-Hauptstudie – Zweiter Bearbeitungsabschnitt, Band 3 – Zukunft der KWK und der Fernwärme. Modellgestützte Hochrechnungen. Vergleichende Betrachtungen. Zukünftige Anforderungen, AGFW (Hrsg.), ISBN-Nr.3-89999-006-4, Frankfurt, März 2004.

Die Portale der Internationalen Energieagentur, der Europäischen Union, der Europäischen Energieagentur und der freien Energieinstitute der Mitgliedstaaten Europas bestätigen, dass aufgrund des Grün- und Weißbuches der Europäischen Kommission eine Vielzahl von Modellvorhaben und Einzelprojekten mit dem Schwerpunkt „Wärmespeicheranlagen“ unterstützt wurden.<sup>438</sup>

Zur Stabilisierung einer gezielten Förderung der regenerativen Energien entwickelt die Europäische Kommission langfristig einen Strategieplan.<sup>439</sup> Als strategisches Mindestziel für das Jahr 2020 ist vorgesehen, dass ein Anteil von 20% regenerativer Energien am Energieverbrauch in der Europäischen Union bis zum Jahr 2020 erreicht werden soll. In den Versorgungssektoren Wohnen, Industrie, Transport und Verkehr, Dienstleistungen werden bis zu 50% des Endenergieverbrauchs für die Wärme- und Kälteerzeugung benötigt, sodass das Potenzial der regenerativen Energien noch zu wenig in die Gesamtstrategie der Länder berücksichtigt wird.

### **Innovative Forschungs- und Modellprojekte in Städten**

Die Sichtung und Auswertung von Forschungsvorhaben zur Planung und Realisierung von Modellprojekten mit Wärmepumpentechnologie zur Nutzung der solarer Strahlung, Grundwasserquellen und atmosphärischer Außenluft<sup>440</sup> zeigt, dass in der Vergangenheit bereits eine intensive Grundlagenforschung auf dem Gebiet der dezentralen Wärmeversorgung mit regenerativen Energien durch das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung von 1970 bis 1985 erfolgt ist. Die solare Strahlung ist mit solarthermischen Anlagen in einigen Projekten mit einem ineffizienten Nutzungsgrad genutzt worden. Die Bereitstellung nationaler Forschungsprogramme zur Entwicklung von energetischen Gebäudekonzepten ist aufgrund von wirtschaftlichen und energiepolitischen Krisen durch die Abhängigkeit von den erdölexportierenden Ländern entwickelt worden. Die darauf gestützten Forschungsvorhaben konzentrieren sich insbesondere auf die Themenbereiche der dezentralen städtischen Wärme- und Gebäudeversorgung und Nutzung von Wärmepumpentechnologien mit Wärmespeicheranlagen der Außenluft, Grundwasser, Boden,

---

<sup>438</sup>Vgl.: Grünbuch der Kommission: Eine europäische Strategie für nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Energie, [KOM(2006)], 105 endgültig vom 8.März 2006.

<sup>439</sup>Vgl.: Europäische Union: Gesetzgebung [KOM (2006) 848]: „Fahrplan für Regenerative Energien. Regenerative Energien im 21. Jahrhundert: Größere Nachhaltigkeit in der Zukunft“, Brüssel, 2007.

<sup>440</sup>Vgl.: Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Datenbank Forschungsvorhaben und Universitätsbibliothek der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Suchkatalog: Energie- und Energieversorgung.

Abwasser und industriellen Abwärme. Der Übergang zum Forschungsfeld Langzeitwärmespeichertechnologien zur Speicherung des Wärmepotenzials für eine ganzjährige Versorgung von Gebäuden im Bestand oder für Stadtquartiere mit einer hohen Wohndichte erfolgt erst durch Forschungsprogramme, die der Energietechnologieforschung<sup>441</sup> förderlich ist.

Forschungsvorhaben zur Wärmepumpentechnik sind durch die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweizer Energieagentur und des Schweizer Bundesamtes für Energie ab dem Jahr 2000 in den Ländern Österreich und der Schweiz eingeleitet worden. Der Vergleich der Anlagen- und Betriebsergebnisse aus Modellprojekten von Wärmepumpenanlagen und Wärmeversorgungskonzepten bestätigen die Forschungsergebnisse des Deutschen Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung von 1970 bis 1985. Meteorologische Daten wie die solare Strahlungsdichte, Solarstunden, Bewölkungsgrad etc. sind in den Projekten nicht berücksichtigt worden. Die Untersuchung der Wirkung von solarer Strahlung in städtischen Oberflächen und Bodenschichten ist in der Vergangenheit als Forschungsgegenstand nicht präferiert worden. Daher ist die Forschung zur Geothermie weiter geführt worden. Die Erweiterung des Anwendungsbereichs der Wärmepumpentechnik in Verbindung mit der solaren Strahlung ist über solarthermische Anlagen auf Dachflächen realisiert worden. In diesem Zusammenhang stieg der Handlungsdruck zur Entwicklung und Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen für Städte und Gemeinden deutlich. Die städtische solare Bauleitplanung ist in die Stadtentwicklungsplanung integriert worden.

Der Klimawandel fordert in den Städten und Stadtregionen strategische Ansätze für eine nachhaltige umweltfreundliche Stadtentwicklung. In der ExWoSt -Vorstudie "Klimawandelgerechte Stadtentwicklung" sind Stadtentwicklungsmodelle für den Klimaschutz und Klimawandel während der Projektlaufzeit von 2009 bis 2011 als Forschungsgegenstand untersucht worden. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich insbesondere auf die Stadtentwicklungsplanung zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>442</sup>

Das Forschungsprojekt "Klimaschutz in der integrierten Stadtentwicklung" ist vom Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert und vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie und vom Institut für Landes- und Stadt-

---

<sup>441</sup>Vgl.: Fraunhofer Institut: Institut für rationelle Energietechnologien an der Universität Stuttgart, Information im Internet URL [http://fraunhofer-institut.de/rationelle Energietechnologien](http://fraunhofer-institut.de/rationelle_Energietechnologien).

<sup>442</sup>Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): ExWoSt - Vorstudie für klimawandelgerechte Stadtentwicklung, 2011.

entwicklungsforschung begleitet und durchgeführt worden. Die Ziele des Forschungsprojektes beziehen sich insbesondere auf die Einbindung der kommunalen Akteure in der Stadtplanung und -entwicklung. Die Akteure des Forschungsfeldes - Innovation von nachhaltigen Energieversorgungskonzepten – beteiligen den Forschungsverbund Sonnenenergie und die Fachministerien sowie wissenschaftliche Institute. Die Analyse der Projekte zeigt die Auswirkungen und die Wirksamkeit von solargestützten Energiekonzepten aus der Sicht der kommunalen Energiebilanz.<sup>443</sup>

Die Erfahrung, die durch eine aktive Beteiligung des Verfassers während der Jahre 2001 bis 2003 in Modellvorhaben der Landkreise Bad Kissingen und Rhön-Grabfeld in der Region Unterfranken zur Planung, Entwicklung und Umsetzung von regionalen und kommunalen Versorgungsstrategien sowie Energie- und Gebäudeversorgungskonzepten gewonnen wurde, zeigt, dass die Planung von solaren Siedlungskonzepten für die dezentrale Wärmeversorgung aufgrund der fossilen Energieversorgungsdominanz keine Unterstützung fand. Einzelvorhaben konzentrierten sich auf energetische Gebäudeprojekte mit dem Energieträger Biomasse in Verbindung mit der KWK-Technologie. Regionale Energieversorgungskonzepte bezogen sich im Schwerpunkt auf die Nutzung des Energieholzmarktes, Herstellung von Holzpellets und Holzfeuerungsanlagen für Pellets. Die solare Strahlung ist in Einzelprojekten mit der Aufbereitung von Warmwasser in solarthermischen Anlagen und zur Stromerzeugung von Gebäuden in städtischen Energiekonzepten genutzt worden.<sup>444</sup>

### **Ergebnisse aus Fachveranstaltungen**

Im Rahmen der Vorbereitung des Vorhabens nahm der Verfasser an Fachsymposien, Seminaren und Fachmessen zu den Forschungsgebieten teil. Als Lehrbeauftragter an der Carl von Ossietzky Universität lehrte der Verfasser zu den Themenschwerpunkten der Stadtentwicklung, regionalen und städtischen Energieversorgung, Raumordnung, und des Städtebaus. Ergänzend zu den außeruniversitären Fachveranstaltungen ist die Teilnahme des Verfassers an themenbezogenen Veranstaltungen des ZENARIO-

---

<sup>443</sup>Vgl.: Ministerium für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Klimaschutz in der integrierten Stadtentwicklung – Handlungsleitfaden für Planerinnen und Planer, 2008, S. 1-64.

<sup>444</sup>Vgl.: Biosphärenreservat Rhön: Erster integrierter Umweltbericht für das länderübergreifende UNESCO-Biosphärenreservat Rhön, B8 Energiewirtschaft, Information im Internet URL <http://www.biosphaerenreservat-rhoen.de>. (2017).

Vortragsprogramms<sup>445</sup> und an der Ringvorlesung zur Postwachstumsökonomie des Lehrstuhls für Produktion und Umwelt an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg erfolgt.

Aus den Fachveranstaltungen fließen der Stand der Technik und der Stand der Forschung zur energetischen Stadtentwicklung und Regionalplanung mit regenerativen Energien sowie die Grundlagen der Wärmepumpentechnik und Wärmeversorgungstechnik ein.

### **6.3. Methodik der Potenzialanalyse**

Die Auswahl der Modellgebiete bezieht sich primär auf die geographisch definierten Klimaregionen<sup>446</sup>, Regionen und Gebietskörperschaften<sup>447</sup> mit zentralen Energieversorgungsstrukturen. Die Klimaregionstypisierung ist nicht identisch zu den Regionsgrenzen, Landkreisen, Städten und Gemeinden. Als methodischer Ansatz ist daher die Auswahl von Städten und Gemeinden in den definierten Klimaregionen in Deutschland gewählt worden.<sup>448</sup> Die Städte werden hinsichtlich des Versiegelungsgrades und der Baudichte von städtischen Quartieren (Modellgebiete) untersucht. Die Auswahl berücksichtigt die meteorologische Datenlage des Deutschen Wetterdienstes und insbesondere die mittleren monatlichen und jährlichen solaren Strahlungswerte und solare Stunden. Die Sonnenkarte Deutschlands<sup>449</sup> und die digitale Berechnung des solaren regionalen Ertrages von solarthermischen und PV-Anlagen ist Berechnungsgrundlage zur Auswertung der Modellgebiete. Die für Deutschland nach der DIN festgelegte Heizperiode vom 01.10. bis 30.04. ist anzuwenden, da der Grenzwert für die mittlere Außentemperatur und die Heizgrenze von 15° C festgelegt ist.

Die Methodik dieser Arbeit stützt sich ebenso auf die Befragungsergebnisse der kommunalen Umfrage und Empfehlungen.

Die Arbeit berücksichtigt im Hinblick auf eine dezentrale Wärmeversorgung die rechtlichen Anforderungen des Kommunalrechts zur Verpflichtung der Versorgung des städti-

---

<sup>445</sup>Vgl.: ZENARIO: Vortragsprogramm des Zentrums für nachhaltige Raumentwicklung in Oldenburg, Vorstellung wissenschaftlicher Programme aus der Nachhaltigkeitsstrategie, Oldenburg, 2009 bis 2012.

<sup>446</sup>Quelle: DIN V 4108-6; 2003: Zuordnung von Städten nach Klimaregionen.

<sup>447</sup>Vgl.: Gemeindeordnungen der Länder: In Deutschland liegt die Zuständigkeit zur Regelung der Gemeindeverfassung nach Art. 70 des Grundgesetzes (GG) bei den Ländern. Informationen im Internet URL <http://www.gesetze-im-internet.de>.

<sup>448</sup>Eigene Anmerkung: Städte und Gemeinden am Fluss, in Gebirgsregionen, an der Küste, auf der Insel etc.

<sup>449</sup>Photovoltaik Sonnenkarte Deutschland: Yearly sum of global irradiation. Autoren: M. Suri, T. Cebecauer, T. Huld, E.D.Dunlop. European Communities 2001 bis 2008.

schen Gemeindegebietes durch die Kommunen. Städte und Gemeinden sind Gebietskörperschaften, besitzen Rechtspersönlichkeit und haben Gebietshoheit und Allzuständigkeit, sodass sie grundsätzlich für alle Belange<sup>450</sup> ihres Gebietes zuständig sind, auch für die Versorgung der Bevölkerung mit Wärme und Strom.

Die zentrale Energieversorgungs- und Netzstruktur ist territorial in Deutschland und aktuell auf vier Energieversorgungsunternehmen verteilt. Ober- und Mittel- und Grundzentren, Ballungsräume und Metropolregionen werden von den zuständigen Energieversorgern mit Strom, Wärme und mit leitungsgebundener Energie versorgt. Die Abgrenzung der örtlichen Verteilernetze zu den Netzebenen der Umlandgemeinden erfolgt über das festgelegte Konzessionsgebiet, über die Elektrizitäts- und Gasversorgung<sup>451</sup> und durch das örtliche Verteilernetz, das überwiegend der Belieferung von Endenergieverbrauchern mit Energie dient.

Die Potenzialanalyse von städtischen Quartieren mit unversiegelten und versiegelten Flächen gliedert sich in folgende methodische Schritte:

- I. Bestandsaufnahme der Daten der Klimaregionen, Städte und Gemeinden
  - Geographische Daten und geographische Lage,
  - Meteorologische Datenlage wie die mittlere monatliche solare Strahlungswerte in kWh/m<sup>2</sup>, monatliche und jährliche Solarstunden in h, mittlere Lufttemperaturwerte, Messhöhe bis 2,00m über NN.,
  - Berechnung der solaren Strahlung durch digitale Berechnungstools,
  - Lage der Wettermessstationen in der Region,
  - Regionales Leitbild zum Klimaschutz, regenerative Energien,
  - Regionales Wärmeversorgungssystem.
  
- II. Bestandsaufnahme von standortbezogenen Daten der Stadt oder Gemeinde
  - Gemeindeschlüssel,
  - Geographischer Standort und Standortkoordinaten,
  - Bilanz der städtischen Flächen und Versiegelungsgrad,

---

<sup>450</sup>Weissmüller, Gerhard: Die Bedeutung der Gemeindeordnung für den Ausbau Regenerativer Energien am Beispiel Rheinland-Pfalz. Artikel in der Fachzeitschrift Solarzeitalter 3/2009, Kapitel: Stadtwerke mit Regenerativen Energien 2009, S. 76-79.

<sup>451</sup>Vgl.: Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (EnWG) vom 07.Juli 2005; §48 EnWG – Konzessionsabgaben -; Informationen im Internet URL <http://www.gesetze-im-internet.de>.

- Aufnahme der meteorologischen Daten nach der örtlichen Wettermessstation wie die mittlere solare Strahlungsstärke, mittlere atmosphärische Jahrestemperatur,
- Flächenbilanz (versiegelte und unversiegelte Flächen, Versiegelungsgrad),
- Städtisches Klimaschutzkonzept, städtisches Leitbild der Energieversorgung,
- Städtisches Wärmeversorgungssystem (Fern- und Nahwärmenetz), solare Energieversorgungsstrategie,
- Bauleitpläne (Flächennutzungsplan, rechtskräftiger Bebauungsplan mit Satzung) des städtischen Quartiers.

### III. Datenaufnahme der Modellgebiete in Städten der Klimaregion

- Versiegelungsgrad von Flächen und Flächenbilanz (unversiegelt, versiegelt),
- Meteorologische Daten wie Solarstunden, atmosphärische Lufttemperatur, Bodenmesswerte nach DWD-Messdaten, Solarrechner für PV-Anlagen,
- Bebauungsdichte,
- Rechtskräftiger Bebauungsplan mit Satzung des städtischen Quartiers,
- Gebäudeklassen und Gebäudetypologie nach IWU Katalog.

### IV. Abschätzung des solaren Strahlungspotenzials von städtischen Flächen in den Modellgebieten

- Bestimmung des solaren Strahlungseintrages gemäß digitalem Photovoltaikrechner,
- Bestandsaufnahme der unversiegelten und versiegelten Flächen,
- Versiegelungsgrad,
- Oberflächenstruktur,
- Verschattung.

### VI. Abschätzung des Wärmebedarfs und des Klimakältebedarfs der Wohngebäude im Modellgebiet nach der Berechnungssoftware der Universität Kassel, Professor Heidt.

### VII. Vergleich der Daten des solaren standortbezogenen Wärmepotenzials von versiegelten und unversiegelten Flächen und Wärme- und Klimakältebedarf von Gebäuden in den Modellgebieten.

## VII. Datenvergleich der Modellgebiete nach Klimaregionen

- Meteorologische und geographische Daten
- Mittlere monatliche solare Strahlung in kWh/m<sup>2</sup>
- Monatliche und jährliche Solarstunden in h
- Mittlere Lufttemperatur Messhöhe 2 m über Oberfläche
- Mittlere Bodentemperatur von 5 cm bis 100 cm Bodentiefe
- Versiegelungsgrad von versiegelten und unversiegelten Flächen,
- Solares Wärmepotenzial aus versiegelten und unversiegelten Flächen,
- Gebäudewärme- und Klimakältebedarf nach Gebäudekategorie.

## VIII. Prognose zur Potenzialanalyse für Regionen und Städte in Deutschland

### 6.3.1. Bestandsaufnahme durch Befragung kommunaler Akteure

#### Befragungskollektiv und Methode

Die Datenabfrage wurde im Rahmen der Dissertation mit einem selbst entwickelten Fragebogen für n=61 Städte und Gemeinden durchgeführt. Parallel zu der Datenabfrage sind n=10 Gemeindeverwaltungen<sup>452</sup> auf west- und ostfriesischen Inseln fermündlich und mit Hilfe des gleichen Fragebogens, der als Online-Fragebogen umgestellt worden ist, befragt worden. Das Kollektiv der Städte wurde aufgrund der für die geographische Fläche Deutschlands definierten 15 Klimaregionen ausgewählt, da langjährige meteorologische Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung stehen. Die Fragestellungen sind aus den Kontaktgesprächen unterstützend entwickelt worden. Die ausgewählten Städte und Gemeinden sind in den Standortlisten der meteorologischen Messstationen des Deutschen Wetterdienstes und in internationalen Wetterdatenbanken (GAISMA) aufgeführt und stellen online standortbezogene Wettermessdaten zur Verfügung. Das zur Berechnung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden ausgewählte klimabereinigte bauphysikalische Berechnungsprogramm<sup>453</sup> bezieht sich auf langjährige meteorologische Messdatenreihen.

---

<sup>452</sup>Verfasser: Zusätzliche Online Befragung von Städten und Gemeinden. Fragebogenerstellung für 10 Inselstandorte der west- und nordfriesischen Inseln mit dem Internet Tool 2ask, Information im Interner URL <http://www.2ask.de> (2010).

<sup>453</sup>Institut für Wohnen und Umwelt (IWU): Bauphysikalische Berechnungsprogramme und meteorologische Stationen in Städten, CasaNova, Universität Siegen, AG Solar NRW, 1999 bis 2007.

## **Studiendesign der Befragung**

Die Datenerhebung mittels Fragebogen bezieht sich insbesondere auf die Untersuchung der regionalen und städtischen Situation der Energieversorgung mit regenerativen Energien. Aus den Ergebnissen der Befragung soll ermittelt werden, ob das ganzjährig zur Verfügung stehende solare Strahlungspotenzial in der Regionalplanung und Stadtentwicklungsplanung Berücksichtigung findet. Zusätzlich sollen Daten und Informationen über die energetischen Stadtentwicklungskonzepte mit Energieversorgungsstruktur, Stand der nachhaltigen Energiesysteme, Stadtumbau und Gebäudeoptimierung sowie über die energetische städtische Bauleitplanung aufgenommen werden. Zur Unterstützung und Hilfestellung sind mit den zuständigen kommunalen Fachverwaltungen Telefoninterviews durchgeführt worden. Die Fragestellungen sind so gewählt worden, dass ein Abbild der städtischen Versorgungssituation mit einer umweltfreundlichen Strom- und Wärmeversorgung erstellt werden kann.

## **Erhebungsinstrument Fragebogen**

Der Fragebogen<sup>454</sup> untersucht anhand von 23 Fragen die Situation der regionalen und städtischen Energieversorgung. Postalisch wurden n=61 Kommunalverwaltungen beteiligt. Die Befragung richtet sich an Entscheidungsträger von Stadt- und Gemeindeverwaltungen, Fachabteilungen für Energie, Regional- und Stadtplanung, Umweltressorts sowie an Energieagenturen. Eine Erweiterung der Beteiligung an der Befragung durch Energieagenturen und Energieversorgungsunternehmen ist teilweise durchgeführt worden.

Die Fragenkomplexe sind mit Ausschlussantworten (Ja/Nein) und mit Freitextfeldern versehen worden. Von einer großflächigen bundesweiten Online-Befragung ist abgesehen worden, da Anforderungen der Datenschutzgesetze der Länder eine Datenabgabe der Kommunen aus rechtlichen Gründen nicht zu lassen. Die direkte Kontaktaufnahme zu den Entscheidungsträgern im Rahmen der Befragung ist daher erforderlich geworden.

## **Statistische Auswertung des Fragebogens**

Die Rückläufe der Fragebögen sind von den Befragten an das Sekretariat des Fachbereichs Raumplanung der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg gesandt worden. Die statistische Auswertung der Fragebögen erfolgte durch den Verfasser. Die Befragungser-

---

<sup>454</sup> Vgl.: Eigene Fragebogenaktion zur Erhebung des Umweltquellenpotenzials in deutschen Städten der Klimaregionen 1 bis 12, Fragebogen im Anhang dieser Arbeit.

gebnisse aus dem Fragebogenkollektiv sind geeignet, dass eine Einschätzung zur kommunalen Versorgungssituation im Kontext einer umweltfreundlichen Energieversorgung mit regenerativen Energien vorgenommen werden kann. Die Auswertung der Befragungsergebnisse nach Themen wird zusammenfassend im Anhang der Arbeit dargestellt.

### **6.3.2. Auswahlkriterien der Modellgebiete in Klimaregionen**

Die Auswahlkriterien der Modellgebiete an den ausgewählten Standorten in den Städten Deutschlands sind in Abhängigkeit der Regionen und Klimaregionen festgelegt worden. Die Kartenübersicht über die graphische Darstellung der 15 Klimaregionen<sup>455</sup> nach Testreferenzjahren (TRY) zeigt Regionen, die durch ganzjährige Datenmessreihen von Wetterstationen charakterisiert sind. Die Klimaregionen präsentieren für eine bestimmte Region den typischen Wetter- und Witterungsverlauf. Die meteorologischen Daten der Wetterstationen an deutschen Stadtstandorten sind den Messstationsberichten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der meteorologischen Datenbank GAISMA der Universität Oxford in England<sup>456</sup> entnommen worden. Die Datensätze der meteorologischen Datenbanken stellen die jahreszeitabhängigen Wetterdaten wie Regen- und Schneetage, mittlere monatliche Sonnenscheindauer, atmosphärische Außentemperatur, mittlere solare Strahlungsleistung, Niederschlagstage und Bewölkungsgrad über einen Erfassungszeitraum von circa 45 Jahren von 1960 bis 2005 zur Verfügung. Die Datenlage der Wettermessstationen an den Standorten der Städte ist daher für die wissenschaftliche Auswertung des Forschungsthemas als ausreichend anzusehen. Weitere meteorologische Messreihen sind durch das NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center<sup>457</sup> ebenfalls für Europa vorhanden.

Ein weiteres Kriterium zur Auswahl der Städte und Modellgebiete in den Regionen ist die geographische Lage in der Region zum Beispiel die Stadt an der Küste, die Stadt am Fluss, die Stadt in der Gebirgsregion, die Stadt im Vorgebirge, die Stadt mit ländlichem Umland, die Stadt in der Waldregion und die Gemeinde auf einer Insel. Detaillierte Aus-

---

<sup>455</sup>Vgl.: Handbuch Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Information im Internet unter URL [http://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/TRY\\_Handbuch.pdf](http://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/TRY_Handbuch.pdf). BBR und DWD. Kartenübersicht der TRY-Regionen des Deutschen Wetterdienstes über den Zeitraum von 1988 bis 2007. (Stand 2014)

<sup>456</sup>GAISMA: Meteorologische Daten aus Städten in Europa. Information im Internet URL <http://www.gaisma.com>. Daten von U.S. Geological Survey. Science for a changing world. Information im Internet URL <http://www.usgs.gov>. Climate research. University of oxford, United Kingdom, August 2009.

<sup>457</sup>New, M., Lister, D., Hulme, M. and Makin, I.: A high-resolution data set of surface climate over global land areas, *Climate Research* 21, 2012.

wahlkriterien zur Bestimmung des solaren Potenzials in städtischen Quartieren sind der gesamtstädtische Versiegelungsgrad, die Bau- und Wohndichte sowie die regionale und städtische leitungsgebundene Versorgungsstruktur als Fern- und Nahwärmeversorgung<sup>458</sup>.

### 6.3.3. Auswahl und Untersuchung der Modellgebiete in Städten

Die Modellgebiete<sup>459</sup> in Städten sind im Rahmen der städtischen Bauleitplanung, die durch rechtskräftige Bebauungspläne genehmigt worden sind, ausgewählt worden. Die Daten zur Energieversorgung werden den regionalen Klimaschutzkonzepten und städtischen Energieleitbildern entnommen. Die digitalen Satellitenaufnahmen<sup>460</sup> der Internettools Google-Maps und Google-Earth<sup>461</sup> stellen Daten zur Verfügung, die Gebäude- und Flächenstrukturen verifizieren lassen und Flächenmaße zur Verfügung stellen. Die Bestandsaufnahme der versiegelten und unversiegelten Flächen sowie Gebäudeflächen erfolgt maßstabsgerecht über das Internettool Digital Globe 2010. Die mit einer hohen Auflösung aufgerufenen Satellitenaufnahmen ermöglichen die Erfassung der Gesamtflächen der Modellgebiete mit einer tolerierbaren Messtoleranz<sup>462</sup>, die bis zu 10% abweichen kann. Dreidimensionale Gebäudeabmessungen wie Gebäudehöhe, Geschosszahl und Dachflächen sind über Bildnachweise und über Google-Earth<sup>463</sup> generierbar. Die Daten der Modellgebiete werden aus den Begründungen der Flächennutzungspläne und der rechtskräftigen Bebauungspläne entnommen.

---

<sup>458</sup>Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW 2000): Pluralistische Wärmeversorgung, Titel: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien, Schlussbericht der AGFW - Studie, Wissenschaftliche Projektleitung: Pfaffenberger, W., bremer energie institut, Bremen, Band 2, Teil 1: Wärmeversorgung des Gebäudebestandes, Teil 2: Technologienentwicklung und- bewertung, Frankfurt im August 2001.

<sup>459</sup>Vgl.: Winkens 1994 u. Roth 1980: Ausgewählte Baugebiete nach BauNVO und erweiterte Siedlungstypen nach Besiedlungsstruktur.

<sup>460</sup>Vgl.: Plattform Earth: Es handelt sich um eine Funktion in Google Maps, mit der dieselben hochauflösenden Bilder, Geländeformationen und 3D-Gebäude angezeigt werden, die in der Desktopversion von Google Earth zur Verfügung stehen (Versionen 2009-2011).

<sup>461</sup>Vgl.: Information aus dem Internet URL <http://maps.google.de/maps>, Grafiken©2012 TerraMetrics Kartendaten©2012 Geobasis DEBKG©2009 Google; earth.google.com/intl/de/ URL <http://www.google.de/intl/de/earth>. Version 6.2 (2012).

<sup>462</sup>Anmerkung des Verfassers: Vergleich der Gebäudemaße am Standort mit Entnahme der Abmessungen aus den Luftbildern. Die Toleranz für die Genauigkeit der Streckenlängen beträgt ca. 10% aufgrund der Bildvergrößerung.

<sup>463</sup>Vgl. Google Maps: Information aus dem Internet URL <http://maps.google.de/maps>, Grafiken©2012; Auswertung von Flächen, Gebäudestruktur, Infrastruktur, Geographische Lage etc. der Modellgebiete in Regionen und Städten aus Luftbildern.

Die Bewertung der Gebäudeensembles und Gebäudetypen erfolgt durch den standardisierten Siedlungs- und Gebäudetypologiekatalog<sup>464</sup> und nach Baualter. Die monatlichen und ganzjährigen Heiztage und Gradtagszahlen sind über den tabellarischen Katalog<sup>465</sup> des Instituts für Wohnen und Umwelt Darmstadt für Klimaregionen<sup>466</sup> in Deutschland vorhanden.

#### **6.3.4. Abschätzung des Wärmeenergiebedarfs des Gebäudebestandes**

Die Berechnung<sup>467</sup> des Wärme- und Raumklimaenergiebedarfs von Gebäuden, in den vom Deutschen Wetterdienst definierten Klimaregionen in Deutschland<sup>468</sup>, bezieht sich auf digitale Daten wie geometrische Abmessungen von Gebäuden, Straßenflächen, Dachflächen etc. Die Berechnung des Gebäudeenergiebedarfs in den Modellgebieten kann daher nur eine grobe Abschätzung darstellen.

Detaillierte Datenangaben zum Ist-Zustand des Gebäudeenergiebedarfs sind über den Gebäudetypologie-Katalog des Instituts für Wohnen und Umwelt für Deutschland zu generieren, da die Gebäudetypologie, Baualtersklassen und bauphysikalische Parameter von Gebäuden nach den Anforderungen der jeweils gültigen Wärmeschutzverordnungen zur Verfügung stehen. Der Katalog zu den Baualtersklassen von Bestandsgebäuden enthält wesentliche Daten zur Berechnung, da sich in jedem Gebäudebauzeitalter Konstruktionsweisen (Beton- und Ziegelbauweise, Flach- und Satteldach), aber auch typische Konstruktionen von Bauteilflächen (Vorsatzschalen, Glasfassadenflächen, Fensterflächen) etabliert haben, die den ganzjährigen Raumwärme- und Raumklimaenergiebedarf beeinflussen. Die Daten der Baualtersklassen orientieren sich an der Architektur, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und den Veränderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvor-

---

<sup>464</sup>Ebd.: Fachbeitrag vom Institut für ADV-gestützte Entwicklungsplanung, Analyse von Informations- und Methodengrundlagen für örtliche Versorgungskonzepte, Siedlungstypkatalog und Siedlungstypologie 1 bis 9, S.6, 1981.

<sup>465</sup>Vgl.: Tabelle des Instituts für Wohnen und Umwelt: Heizgradtage und Gradtagzahlen nach den gemittelten monatlichen atmosphärischen Außenlufttemperaturen des Deutschen Wetterdienstes.

<sup>466</sup>Vgl.: Klimaregionen in Deutschland: TRY Karte, Graphische Darstellung der 15 TRY Regionen in Deutschland. Information im Internet URL <http://www.dwd.de/> (2011).

<sup>467</sup>Heidt, F.D., Clemens, J., Braeske, T., Benkert, St.: Berechnungssoftware CASAnova ist ein Berechnungsprogramm zur Bestimmung des Heizwärme- und Kühlbedarfs von Gebäuden in europäischen und weltweiten Klimaregionen. Die Zusammenhänge zwischen Gebäudegeometrie, Dämmung, Verglasung, solaren Gewinnen, Heizwärme- und Kühlbedarf wird durch Berechnung nachgewiesen. Universität Siegen, April 2006.

<sup>468</sup>Vgl.: Klimabereinigtes Berechnungsprogramm CasaNova, Klimadatenbank und Klimaregionen, Universität Siegen, April 2006.

schriften. Die Gebäudeklassen sind dem Gebäudetypologiekatalog so zugeordnet, dass Bestandsgebäude mit den Referenzgebäuden vergleichbar ist.<sup>469</sup>

Der Raumwärme-, Raumklima-, und Warmwasserheizwärmebedarf sowie der Gesamtenergiebedarf der betrachteten Bestandsgebäude in den Modellgebieten wird mit dem bauphysikalischen Berechnungsprogramm nach ENEC Wärme & Dampf von Rowa-Soft Bauphysik<sup>470</sup> und dem Berechnungstool CASAnova der Universität Siegen<sup>471</sup> berechnet. Beide Berechnungsprogramme sind klimabereinigt und geben den Gesamtenergiebedarf, bezogen auf die Klimaregion in Deutschland aufgrund von meteorologischen Jahresmittelwerten, wieder. Die Anforderungen für Klimaregionen des Normblattes DIN V 4108-6 aus 2003 finden in der Gesamtberechnung des Jahresheizwärmebedarfs Berücksichtigung. Die Berechnungsprogramme nutzen das Monatsbilanz- und Heizperiodenbilanzverfahren.<sup>472</sup>

Von der Tarifräummethode zur Erhebung des tatsächlichen Endenergieverbrauchs von Raumwärme, Raumklima- und Warmwasserbedarf durch den Endverbraucher ist durch den Verfasser abgesehen worden, da die Abfrage der Energieverbrauchsdaten beim regionalen und örtlich zuständigen Energieversorger oder Gebäudeeigentümer am Modellstandort aus logistischen und zeitlichen Gründen sowie aus Datenschutzbedingungen nicht zu realisieren war. Die Abfrage von Endenergieverbrauchsdaten unterliegt dem Datenschutz der Länder, sodass eine Datenerfassung nur im Rahmen von öffentlichen Forschungsprojekten des Bundes oder der Länder zugelassen ist.

---

<sup>469</sup>Vgl.: Institut für Wohnen und Umwelt (IWU): Gebäudetypologiekatalog - Systematik und Datensätze, Darmstadt, Stand 2005.

<sup>470</sup>Vgl.: Bauphysikalisches Berechnungsprogramm, Software Firma ROWA-Soft, Information im Internet URL <http://www.rowasoft.de> (2010).

<sup>471</sup>Prof. Dr. Ing. F.-D. Heidt: Universität Siegen, CASAnova: Berechnungsprogramm für Heizwärme- und Kühlbedarf von Gebäuden und Temperaturverhalten, Version 3.3.0.2, Gefördert durch die AG Solar NRW.

<sup>472</sup>Vgl.: DIN V 4108-6 aus 2003: Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs hält die unter Berücksichtigung der DIN EN 832 zwei Berechnungsverfahren bereit: das Heizperioden-Bilanzverfahren und das Monatsbilanzverfahren. Die Länge der Heizperiode und die Heizgrenztemperatur sind beim Monatsbilanzverfahren vorher nicht festgelegt, sondern ergeben sich aus der Bilanzierung. Der jährliche Heizwärmebedarf errechnet sich durch Summierung der ermittelten monatlichen Werte, sofern diese positiv sind. Im Heizperiodenbilanzverfahren ist die Länge der Heizperiode durch die Annahme einer Heizgrenztemperatur von 12°C festgelegt. Sollten die nutzbaren Wärmegegewinne 50% der Wärmeverluste übersteigen, so ist der Heizwärmebedarf nach dem Monatsbilanzverfahren zu ermitteln.

## 6.4. Auswertung der Modellgebiete

Die Datensätze der Modellgebiete sind nach Klimazonen, geographischer Lage und Gemeindeschlüssel auszuwerten. Die erhobenen statistischen Daten und standortbezogenen Daten sowie die Ergebnisse der Jahresheizwärmeberechnung von Gebäuden in den Modellgebieten werden nach folgenden Kriterien analysiert und ausgewertet:

- Auswertung der statistischen Grunddaten nach Region, Stadt, Stadtgröße, Siedlungs- und Gebäudetypologie, Gebäudebaualter etc. der Modellgebiete,
- Auswertung der Bebauungsstruktur nach Siedlungs- und Gebäudetypologie, Baualterstruktur, Gebäudedachflächen,
- Auswertung der standortbezogenen Daten nach Versiegelungsgrad, Flächenbilanz,
- Auswertung des Energiebedarfs von Gebäuden im Quartier nach Jahresheizwärmebedarf, Klimakältebedarf, Verbrauch fossiler Energieträger, CO<sub>2</sub>-Bilanz.

Die Abschätzung des Gebäudeenergiebedarfs in den Modellgebieten stützt sich auf die Klimaregionen, Geostandortdaten, meteorologischen Wetterdaten (DWD, GAISMA), textlichen Festsetzungen der rechtskräftigen Bebauungspläne, Wärme- und Raumklimabedarfsberechnung. Geo- und Raumdaten werden von den Landesämtern<sup>473</sup> und Landesbetrieben für Geoinformation und Vermessung für Ober- und Mittelzentren<sup>474</sup> und für die Metropolregionen digitale zur Verfügung gestellt.

Das berechnete Gesamtwärmepotenzial von Gebäuden des städtischen Quartiers wird einem Datenblattcode zugeordnet, der eine Auswertung und Analyse der Gesamtdaten in Bezug zu den Klimaregionen zulässt. Die Merkmale des Modellgebietes sind in einem Datensatz zusammengestellt. Die Ergebnisse der Wärmepotenzialabschätzung aus den Modellgebieten werden nach Klimaregionen ausgewertet.

Der nachstehend tabellarische Datenerfassungsbogen stellt beispielhaft die Auswertung von Datensätzen von den zu untersuchenden Modellgebieten dar. Der frei gewählte Datensatz für ein Modellgebiet in der Region Friesland zeigt die methodische Auswertung eines städtischen Quartiers der Stadt Jever.

---

<sup>473</sup>Vgl.: Eurostat Home (Europa): Information im Internet URL <http://www.ec.europa.eu/eurostat>; Statistisches Bundesamt Deutschland, <http://www.destatis.de> (2016); Statistische Landesämter unter <http://www.statistikportal.de/>.

<sup>474</sup>Vgl.: Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Stadt Hamburg, Geodatenanwendungen – Stadt Hamburg: Geoportal, Digitaler Atlas Nord, Stadt- und Landschaftsplanung - online, Solaratlas, Information im Internet URL <http://www.hamburg.de/gdi-anwendungen> (2014).

Merkmale eines Modellgebietes	Datensatz*
<b>Statistische Daten eines Datensatzes</b>	
Modellgebiet für Potenzialanalyse	1
Region	Friesland
Klimaregion - Einstufung	4
Stadt	Jever
Gemeindeschlüssel nach destatis	4567890
Stadtgröße – Einstufung nach Einwohnerzahlen	II
Geographische Lage des Modellgebietes	°N °S
Städtisches Quartier - Straße	Buchenstraße
Bebauungsplan Nr.	234a
Baugebietsausweisung nach BauNVO	MI
Siedlungstyp nach Roth	4a
Gebäudetyp nach Katalog IWU	RH
Baualterklasse nach Katalog IWU	A
Baualter Gebäude / Quartiersgebäude/ Siedlung	1980

Merkmale eines Modellgebietes im städtischen Quartier	Standortbezogene Daten eines Datensatzes*
<b>Nr. Modellgebiet für Potenzialanalyse nach B-Plan</b>	
	1
<b>Gesamtfläche Modellgebiet (m<sup>2</sup>)</b>	
	10.000
<b>Unversiegelte Fläche (m<sup>2</sup>)</b>	
	8.000
<b>Versiegelte Fläche (m<sup>2</sup>)</b>	
	2.000
<b>Versiegelungsgrad (%)</b>	
	20
<b>Oberflächenmaterial</b>	
	Beton
<b>Albedo</b>	
	0,7
<b>Gebäudetypologie / Quartier</b>	
	EFH
<b>Anzahl der Modellgebäude – sortiert nach Gebäudetyp</b>	
	4
<b>Jahresheizwärmebedarf für 4 Modellgebäude (MWh/a)</b>	
	60
<b>Klimakältebedarf für 4 Modellgebäude (MWh/a)</b>	
	1
<b>Gesamtenergieverbrauch an fossilen Energieträgern (kWh) – (1 l Heizöl/ 1m<sup>3</sup> Erdgas = 10 kWh)</b>	
	6.000
<b>Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Bilanz (t/a)</b>	
	20.000
<b>Flächenbezogene Wärmebedarfsdichte (MWh/m<sup>2</sup>)</b>	
	0,006
<b>Berechnungsgrundlage des Anteils an solarem Wärmepotenzial von städtischen Flächen</b>	
<b>Solares Wärmepotenzial städtischer Flächen incl. Dachflächen gem. Berechnungstool (kWh/a)</b>	
Davon: solares Wärmepotenzial aus Dachflächen mit solarthermischen Anlagen gemäß Berechnungstool (kWh/a)	
Davon: solares Wärmepotenzial aus versiegelten Flächen nach (kWh/a)	
Davon: solares Wärmepotenzial aus unversiegelten Flächen nach (kWh/a)	
Berechnungsergebnis (prozentualer Anteil in %): Solares Wärmepotenzial städtischer Flächen im städtischen Quartier incl. Dachflächen / Jahresheizwärmebedarf von Gebäuden	

\*Die Daten sind beispielhaft ausgewählt und dienen als Vorlage für die Auswertung von städtischen Quartieren.

Die Berechnung des Wärmepotenzials von Flächen in den Modellgebieten bezieht sich auf meteorologische Daten für den geographischen Standort. Insbesondere sind Daten der mittleren jährlichen solaren Strahlungsleistung, jährlichen Solarstunden und meteorologische Einflüsse zur Abschätzung des Wärmepotenzials als Berechnungsgrundlage Grund-

lage. Die Berechnung der solaren Strahlungsleistung für die standortbezogenen Flächen erfolgt über den PV-Anlagen-Solarrechner. Der Nachweis zur Überprüfung der theoretischen Abschätzung des Wärmepotenzials von städtischen Flächen ist unter Laborbedingungen oder im Rahmen von Feldversuchen nachzuweisen.

Die Vergleichsergebnisse der Modellgebiete aus den Stadtquartieren der jeweiligen Klimazonen sind auf das städtische Versorgungsgebiet der Gesamtstadt zu übertragen. Die vom Bremer Energie-Institut für das Bundesgebiet entwickelte digitale Wärmekarte<sup>475</sup> dient als Datengrundlage.

#### **6.4.1. Abschätzung der solaren Strahlung von städtischen Flächen**

Die Abschätzung des flächenbezogenen solaren Strahlungspotenzials von städtischen Flächen ist mit digitalen Berechnungstools zum Beispiel des Photovoltaik-Planungsrechners<sup>476</sup> gegeben. Die technische Anlagenauslegung einer Photovoltaikanlage wird anhand von Referenzanlagen berechnet und eignet sich für die Abschätzung des solaren Strahlungspotenzials von städtischen Flächen. Zur Berechnung der ganzjährigen solaren Strahlung in Regionen steht eine Vielzahl von digitalen Solarrechnern für die Solaranlagenplanung zur Verfügung, die von Hersteller- und Handwerksfirmen zur Verfügung gestellt werden. Die Berechnungstools geben die Ertragsfläche, installierte Gesamtleistung und Globalstrahlungswerte wieder.<sup>477</sup> In Abbildung 53 ist ein Berechnungstool zur technischen Planung von PV-Anlagen dargestellt.

Solare Einstrahlungsdaten für die horizontale und diffuse Einstrahlung stehen aus der satel-light Datenbank<sup>478</sup> zur Verfügung. Die Datenbasis enthält kumulierte Werte aus den Satellitenaufnahmen von Meteosat (1996-2000). In den letzten zehn Jahren sind keine nennenswerten Strahlungsveränderungen aufgetreten, sodass die Datenbasis den aktuellen Stand wiedergibt.

---

<sup>475</sup>Eikmeier B. und Schulz W.: Digitale Wärmekarte Deutschlands. Aufbereitung, Konvertierung und Ergänzung von Gebäude- und Siedlungsdaten durch ein auf Statistiken und örtlichen Daten beruhendes Verfahren, Teil 3 methodische Vorgehensweise und Ergebnisse; bremer energie institut.

<sup>476</sup>Vgl.: Photovoltaik Rechner - Berechnung Photovoltaikanlage, Information aus dem Internet über <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/sonnenenergie/basiswissen-solarenergie/pv-solar-rechner.html> (Stand 2016).

<sup>477</sup>Vgl.: Rechner Photovoltaik. Information im Internet URL <https://www.rechnerphotovoltaik.de/photovoltaik>. (2017).

<sup>478</sup>Vgl.: Satel-light – The European Database of Daylight and Solar Radiation. Information im Internet URL <https://www.uni-oldenburg.de/physik/forschung/ehf/energiemeteorologie/forschung/abgeschlossene-projekte/satel-light>. (2016).

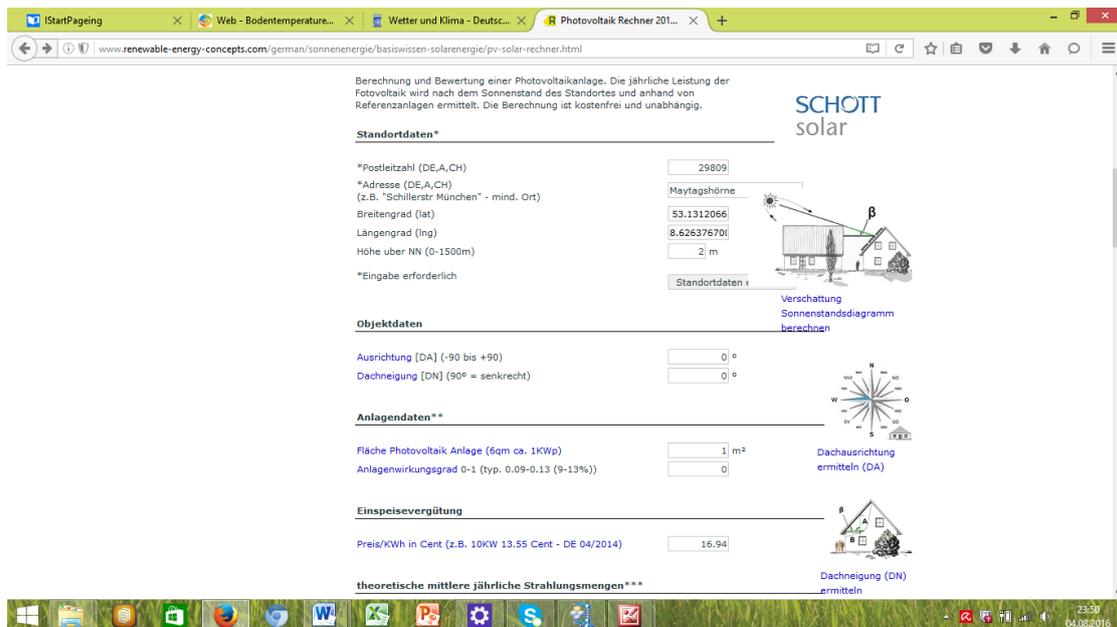


Abbildung 53: Tool zur Berechnung von Photovoltaik-Anlagen

Das Internetportal zur Sonnenenergie „Solarserver“ nutzt die regionalen Geoinformationsdaten und prognostiziert den solaren Ertrag einer PV-Anlage zur Stromversorgung von Gebäuden, sowohl für die Netzeinspeisung als auch für den Solareigenstromverbrauch.<sup>479</sup>

Der Modulvergleich digitaler Solarrechner zeigt, dass die meteorologische Datenbasis von Datenbanken des Deutschen Wetterdienstes Grundlage für die Berechnung ist. Die Auswertung der solaren Potenzialanalyse von städtischen Quartieren stellt eine grobe Abschätzung über das am Versorgungsstandort zur Verfügung stehende Wärmepotenzial für die Niedrigtemperaturwärmeversorgung dar.

#### 6.4.2. Nachweis des solaren Wärmespeicherpotenzials in Böden

Die Berechnung des solaren Wärmespeicherpotenzials am Versorgungsstandort wird nach physikalischen und bauphysikalischen Gesetzmäßigkeiten über den Wärmetransport in Bodenschichten unter Berücksichtigung der Wärmediffusivität des Bodens durchgeführt. Da überwiegend instationäre Wärmestromverhältnisse durch meteorologische Veränderungen in den Bodenschichten vorliegen, sind zur Berechnung des standortbezogenen Wärmespeicherpotenzials Feldversuche zur Nachweisführung durchzuführen. Die hydrologischen Rahmenbedingungen des Erdreichs an Standorten von natürlichen Wärmespei-

<sup>479</sup>Vgl.: SolarServer: Das Internetportal zur Sonnenenergie. Information im Internet URL <http://www.solarserver.de/service-tools/online-rechner>. (2017).

chersystemen in Böden sind zu untersuchen.<sup>480</sup> Die technische Systemauslegung bedarf der Langzeitwärmespeicherung, damit für die jährliche Heizperiode eine ausreichende Wärmelast zur Versorgung von Gebäuden bereitgestellt werden kann. Die durch solare Strahlung erzeugte Niedrigtemperaturwärme ist über eine leitungsgebundene Wärmeversorgung den Endverbrauchern zur Verfügung zu stellen. Der Wärme- und Kälteenergiebedarf von Gebäuden wird nach den technischen Regeln berechnet, die den Anlagen 1 und 2 zur Energieeinsparverordnung zugrunde gelegt werden. Soweit diese Anlagen keine technischen Regeln für die Berechnung bestimmter Anteile des Wärme- und Kälteenergiebedarfs enthalten, wird der Wärme- und Kälteenergiebedarf nach den anerkannten Regeln der Technik berechnet.<sup>481</sup> Die gesetzlich festgelegte Raumtemperatur in öffentlichen und privat genutzten Wohngebäuden während der Heizperiode ist mit 19° C festgelegt. Die Anforderungen des Gesetzes zur Förderung Regenerativer Energien im Raumwärmebereich und des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmG) stellen für die Planung von Versorgungssystemen technische Grenzwerte und Mindestanforderungen zur Verfügung.<sup>482</sup> Forschungsvorhaben, die am Versorgungsstandort das realistische Wärmepotenzial von natürlichen Wärmespeichern durch Feldversuche abschätzen und berechnen, sind im Rahmen der Grundlagenforschung weiter zu fördern.<sup>483</sup>

## 6.5. Korrelationsanalyse

### Regionen und regenerative Energien

Im Norden Deutschlands sind Windenergie und Biomasse vorherrschend, dagegen im Süden Deutschlands Wasserkraft-, Bioenergie- und Solaranlagen. Interessanterweise weist der Osten Deutschlands relativ wenige Biogasanlagen auf, obwohl die naturräumlichen Potenziale als naturwachsende Rohstoffe der Landwirtschaft gegeben sind. Ein möglicher Grund ist die fehlende Nutzung der Abwärme aufgrund der geringeren Siedlungsdichte. Die Verlagerung von einer zentralen Energieversorgung auf eine dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien in Regionen bedarf einer umfangreichen Umstrukturierung der fossilen Energieversorgung unter dem Anspruch der Gewährleistung

---

<sup>480</sup>Bundesamt für Energie (Hrsg.): Saisonale Speicherung von Sonnenenergie im Erdboden zur Wärmeversorgung von größeren Überbauungen, Programm Wärmespeicherung, Lausanne, Oktober 1999.

<sup>481</sup>Vgl.: EEWärmG §2 Abs.2 Nr.9.

<sup>482</sup>Vgl.: EEWärmG: Gesetzliche Anforderungen über die Nutzungspflicht regenerativer Energien nach §§ 3, 5, 6 EEWärmG.

<sup>483</sup>Bundesamt für Energie (Hrsg.): Saisonale Speicherung von Sonnenenergie im Erdboden zur Wärmeversorgung von größeren Überbauungen, Programm Wärmespeicherung, Lausanne, Oktober 1999.

ganzjähriger Versorgungssicherheit. Ein Vergleich der zentralen fossilen Wärmeversorgung mit der dezentralen Wärmeversorgung durch regenerative Energien zeigt, dass ein verstärkter Zu- und Ausbau von städtischen Wärmeleitungsnetzen und ein Netzverbund erforderlich ist. Regionen mit einem Leitbild „Solarenergie und Wärmeversorgung“ fördern Nahwärmenetze in Städten zur Erhöhung der Einspeisung von Wärmepotenzialen aus thermischen Solaranlagen, Erdwärmeanlagen und KWK-Anlagen.

### **Fossile Energieversorgung und Erneuerbare Energien im Kontext der Regional- und Stadtentwicklung**

Die Energiepolitik in Deutschland stützt sich auf die Energieversorgung von Regionen und Städten mit zentralen Kraftwerkstandorten zur Erzeugung von Strom und Wärme. Die politischen Ziele zur Umsetzung der Energiewende und der damit verbundene Ausbau der erneuerbaren Energien haben eine Reihe von Folgewirkungen für die Raum- und insbesondere für die Regionalplanung. Der zunehmende Raumanspruch der regenerativen Energien führt zu Raumnutzungskonflikten, insbesondere im Bereich der Freiraumstruktur. Es entstehen unterschiedliche Konflikte bei der Planung von Anlagen zur Nutzung von Biomasse, Erdwärme, Windenergie oder großflächigen solarthermischen- und Photovoltaikanlagen. In diesem Zusammenhang kommt der Raumordnung und Regionalplanung die Aufgabe zu, im Sinne eines Interessenausgleichs bei divergierenden Nutzungsansprüchen planerisch einzugreifen und negative Auswirkungen und Konflikte, die durch Veränderungen der Raumstruktur im Zuge des Ausbaus auftreten können, abzufedern. Die Beurteilung einer Raumbedeutsamkeit der verschiedenen Formen der regenerativen Energien ist in der Fachliteratur nicht einheitlich.<sup>484</sup>

Raumplanerische Festlegungen für solartechnische Anlagen bestehen zum Beispiel in 36 Regionalplänen in Deutschland (Stand 2012). Festlegungen zur Solarenergie betreffen in der Regel sowohl gebäudegebundene Anlagen als auch großflächige solarthermische wie auch Photovoltaikanlagen im Außenbereich nach § 35 BauGB, wenn öffentliche Belange nicht entgegenstehen und die Erschließung gesichert ist. Der Ausbaustand und die Verteilung von regenerativen Energien in den Regionen stehen nicht in Zusammenhang mit der Frage, ob eine regionalplanerische Steuerung stattfindet, sondern eher, wie die Steuerung inhaltlich ausgestaltet wird.

---

<sup>484</sup>Vgl. BMVBS (Hrsg.) (2011b): Strategische Einbindung regenerativer Energien in Regionale Energiekonzepte – Folgen und Handlungsempfehlungen aus Sicht der Raumordnung, in: BMVBS Onlinepublikation, Heft Nr. 23 2011. S. 53.

Als Raumordnungsgebiete werden nach § 8 Abs. 7 ROG a. F. drei Arten unterschieden: Vorranggebiete, Vorbehaltsgebiete und Eignungsgebiete. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bindungs- sowie in ihrer Steuerungswirkung deutlich.<sup>485</sup> Ein Raumordnungsverfahren (ROV) kann grundsätzlich für alle raumbedeutsamen Einzelvorhaben von überörtlicher Bedeutung in Frage kommen und ist grundsätzlich projektbezogen gemäß § 1 Abs. 1 RoV. Das „Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden“ ist über die „Klimaschutzklausel“ bindend. Als Maßnahmen sind insbesondere die planungsrechtliche Absicherung und Unterstützung des Einsatzes regenerativer Energien mit einer dezentralen und zentralen Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus regenerativen Energien oder der Kraft-Wärme-Kopplung genannt. Kommunale Teilflächennutzungspläne zur Festlegung von Flächen für regenerative Energien regeln die Anlagenplanung.

Im Bereich regenerativer Energien für Städte sind städtebauliche Verträge besonders dann attraktiv, wenn die Nutzung einer Technologie in einem bestimmten Gemeindegebiet oder für bestimmte Nutzungen beabsichtigt ist. Zu den Regelungsgegenständen eines städtebaulichen Vertrages sind Anlagen zur „Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus regenerativen Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung“ zu zählen. Der Gebäudewärmebedarf ist Grundlage für die Planung von städtischen Nahwärmeleitungsnetzen und erfordert eine konkrete Abschätzung des standortbezogenen solaren Wärmepotenzials von versiegelten und unversiegelten Flächen.

### **Städtebauliche Planung und Planzeichen**

Die Erzeugung des solaren Wärmepotenzials aus versiegelten und unversiegelten Flächen erfordert nach der Planzeichenverordnung detaillierte Planzeichen wie „städtische Energieerzeugungsfläche durch regenerative Energien“ und „Flächen zur solaren Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme“. Die geltenden Planzeichen nach der Planzeichenverordnung sind für die solare Energieversorgung zu erweitern. In Bebauungsplänen sind die Flurstücke mit ihren Grenzen und Bezeichnungen in Übereinstimmung mit dem Liegenschaftskataster festzulegen.

---

<sup>485</sup>Reddmann, Pascal: Auswirkungen des Ausbaus der regenerativen Energien auf die Freiraumstruktur Deutschlands – Konflikte und Steuerungsbedarf durch die Regionalplanung-Arbeitspapiere zur Regionalentwicklung Elektronische Schriftenreihe des Lehrstuhls Regionalentwicklung und Raumordnung, Band 15, Hrsg: Technische Universität Kaiserslautern, Mai 2013, S.99ff.

## **Schutz der Umwelt und fossile Energieversorgung**

Im Gegensatz zur Energieversorgung mit fossilen Energieträgern wird der Primärenergieressourcenverbrauch, der durch Erdöl- und Erdgasimporte bereitgestellt wird, erheblich reduziert. Fossile Energieträger wie Heizöl, Erdgas, Kohle und Flüssiggas sind zur ganzjährigen Versorgungssicherheit für die öffentlichen und privaten Endenergieverbraucher erforderlich. Leitungsgebundene Transportleitungen oder Tankfahrzeuge, die fossile Energieträger für die direkte Wärmeerzeugung für Heizungsanlagen am Standort bereitstellen, sind für die Bereitstellung ausreichender Kapazitäten zur Sicherstellung von Grund- und Spitzenlasten notwendig. Zentrale Kraftwerksanlagen zeichnen sich aus durch ein umweltbelastetes Emissionsverhalten.

Zum Schutz des globalen Klimas und der Umwelt ist der Anteil der regenerativen Energien zur Wärme- und Stromerzeugung in Regionen und Städten zu erhöhen, damit der Primärenergieverbrauch durch fossile Energieträger langfristig reduziert werden kann. Inversionswetterlagen in städtischen Gebieten, insbesondere in der Heizperiode, erzeugen eine erhöhte Immissionsbelastung von anthropogenen Emissionen.

## **Städtischer Versiegelungsgrad und solares WärmePotenzial**

Das solare Wärmepotenzial von versiegelten und unversiegelten Flächen nutzt den hohen Versiegelungsgrad von städtischen Quartieren. Als städtische Bodenversiegelung wird die permanente Abdeckung einer Landfläche und des entsprechenden Bodens mit einer wasserundurchlässigen Schicht aus Asphalt oder Beton bezeichnet. Das Phänomen der Bodenversiegelung ist in der thematischen Strategie für den Bodenschutz (KOM (2006) 231) der Europäischen Kommission und im neuesten Bericht der Europäischen Umweltagentur über den Zustand der Umwelt in Europa (EUA, 2010b) als einer der wichtigsten Prozesse zur Verschlechterung der Bodenqualität beschrieben. Die Bodenversiegelung beeinflusst wichtige Ökosystemdienstleistungen sowie die biologische Vielfalt. Die Nutzung von Dach- und Fassadenflächen von Gebäuden erweitert die Ertragsleistung des solaren Strahlungspotenzials.

## **Dezentrale und zentrale städtische Wärmeversorgung**

Die Umstellung von einer zentralen auf eine dezentrale Energieversorgung für Strom und Wärme mit Unterstützung von Langzeitwärmespeichern und Nahwärmenetzen in Städten erfordert eine strukturelle Anpassung an die städtische Energieversorgungsnetzstruktur und städtische Infrastruktur. Städtische Insellösungen zur Versorgung von Stadtquartie-

ren, die freie solare Wärmelasten zum Beispiel aus benachbarten Stadtgebieten mit thermischen Solaranlagen effektiv verteilen und überschüssige gespeicherte Wärmepotenziale wieder bereitstellen, erfordern ganzjährig zur Verfügung stehende Wärmespeicherkapazitäten und intelligente Lastmanagementsteuerungssysteme. Grundstücksübergreifende Nahwärmenetze, die mit Stationen zur Wärmeverteilung mit Wärmespeicherung (Insellösung) untereinander verbunden sind, sind für Agglomerationen, Ballungsräume und verdichtete Baugebiete mit einer hohen Wärmebedarfsdichte bereitzustellen.

### **Städtische Wärmespeichernetze und thermische Einspeisung**

Großvolumige versorgungsstandortnahe Langzeitwärmespeicheranlagen sind insbesondere in städtischen Quartieren zur Aufnahme des solaren WärmePotenzials vorzuhalten. Die städtebauliche Genehmigungsfähigkeit für Anlagen zur Langzeitwärmespeicherung ist durch das städtische Bau- und Planungsrecht zu gewährleisten mit der Ausweisung von städtischen Flächen. Ein Energiemix mit einem hohen Anteil an regenerativen Energien fördert die Steigerung der Attraktivität des Wohnstandortes, da die freie Energieträgerwahl mit einem ausreichenden Spielraum für die individuelle Energieerzeugung gegeben ist. Die energiesparende Gebäudebauweise ist Voraussetzung für regenerative Anlagensysteme mit Solarenergie. Wärmepumpensysteme sind zur Erzeugung von Niedrigtemperaturwärme energiesparend einzusetzen. Die Nutzung von solarer Wärme ist in Einzelprojekten umgesetzt worden. Eine Ausschöpfung aller solaren Potenziale zur Erzeugung und Speicherung von solarer Wärme in urbanen Räumen ist nicht erfolgt. Angestrebt wird ein Energiemix mit dem Schwerpunkt auf fossiler Energie.

### **Meteorologie und solare Wärmepotenzialabschätzung**

Die meteorologischen Situationen in den Regionen sind instationär geprägt und lassen eine sichere ganzjährige Wärmeversorgung ohne fossile Energieträger nicht zu. Vorhersagemodelle der meteorologischen Situationen für Regionen aufgrund von Satellitenbildern unterstützen die Anlagenplanung regenerativer Energien und solare Potenzialabschätzung. Die Wetterdatenbanken des Deutschen Wetterdienstes stellen meteorologische Monats- und Jahresmittelwerte für einen Zeitraum von 40 Jahren bereit und geben eine grobe Abschätzung über die jährliche solare Strahlungsleistung, Solarstunden, Regenhäufigkeit und Bewölkungsgrad, Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Die Abschätzung des solaren Wärmepotenzials aus versiegelten und unversiegelten Flächen ist gegeben, wenn Planungsinstrumente wie städtische Solaratlanten, meteorologi-

sche Standortdaten und Daten aus Modellprojekten und Feldversuchen zur Verfügung stehen. Eine Berechnungshilfe für die Abschätzung solarer Erträge ist durch Modellberechnungen von photovoltaischen und solarthermischen Anlagen auf Dächern von Gebäuden gegeben. Webbasierte Simulationsprogramme zur Auslegung von technischen Solaranlagen liefern als „Solartoolbox“<sup>486</sup> ausreichende Datenmengen, die sich zum Beispiel standardgemäß auf meteorologische Daten von Meteonorm der Version 6<sup>487</sup> beziehen. Die atmosphärischen monatlichen Temperaturmittelwerte aus einer 15-jährigen Messperiode und Messergebnisse aus über 8.000 Messstandorten sowie Daten von Satellitenbildern von Meteonorm stehen für jeweils ein Referenzjahr zur Verfügung. Die Bewertung des standortbezogenen solaren Wärmepotenzials von Flächen erfordert eine hinreichend genaue Abschätzung der meteorologischen Situation und eine Oberflächenbewertung des Materials am Versorgungsstandort.

Die Auswertung der Standorte von Wettermessstationen zeigt eine Unterrepräsentanz in Regionen und Städten. Es ist ein engmaschiges städtisches Wettermessstationennetz, das stündlich Wetterdaten erfasst, zu gewährleisten. Die Gebäudesteuerung des Wärme- und Kälteenergiebedarfs ist an die meteorologische Situation zu koppeln. Das in Deutschland bestehende Wettermessstationennetz ist für eine GRID-Steuerung des täglichen und wöchentlichen Heizwärme- und Klimakältebedarfs von Gebäuden und Stadtquartieren noch unzureichend.<sup>488</sup>

---

<sup>486</sup>Vgl.: Solar Campus GmbH, Online solar Simulation –Solartoolbox-. Institut für Solartechnik SPF HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Rapperswil, Schweiz (<http://www.solarenergy.ch>) 2011.

<sup>487</sup>Hoyer-Klick, Carsten; Beyer, Hans Georg; Lorenz, Elke; Heinemann, Detlev: Bereitstellung gütebewerteter Datenbasen und Modelle zur Einstrahlungsklimatologie im Rahmen des Europäischen Projekts MESoR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg und Fachbereich Physik, Universität Oldenburg, Oldenburg, 2009.

<sup>488</sup>Eigene Anmerkungen des Autors: Im Rahmen von Modellrechnungen an ausgewählten Stadtstandorten und Abfrage von Wetterdaten besteht ein grobmaschiges Wettermessstationennetz. Überwiegend befinden sich höchstens 2 Messstationen in einem städtischen Versorgungsgebiet.

## 7. Meteorologie und Stadtklima

### 7.1. Meteorologische Prognosemodelle

Die Vorhersage von klimatischen Einflüssen wie Bewölkungsgrad, solare Strahlung etc. ist durch mathematisch-meteorologische Modelle gegeben. Warnecke<sup>489</sup> führt dazu aus, dass der Beginn der Wettervorhersage grundsätzlich unvollständig ist und sich prinzipielle Unsicherheiten in den Wetterprognosen darstellen. Prinzipielle Unsicherheiten auf Grund der meteorologischen Annahmen führen zu Ungenauigkeiten in den Rechenmodellen, sodass sich eine maximale Vorhersagbarkeit von 10 bis 14 Tagen nachgewiesen werden kann. Das Institut für Physik und Meteorologie der Carl von Ossietzky Universität in Oldenburg erforscht mit dem Forschungsprojekt KLIM<sup>490</sup> die Vorhersage von meteorologischen Situationen an Standorten für Photovoltaik- und Windenergieanlagen. Gemeinsame Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens ist, Strategien und konkrete Maßnahmen zu entwickeln, mit denen Küstenregionen im Nordseeraum ihre Probleme bei der Bewältigung der Folgen des Klimawandels und Aufgaben ihrer strukturellen Entwicklung meistern und wichtige Beiträge zum Klimaschutz leisten können. Wesentlich ist der Austausch mit Partnerregionen in Europa und das Zusammenwirken mit anderen Forschungseinrichtungen. Im Rahmen des Programmbereichs INTERREG der Europäischen Union sind im Anschluss an die abgeschlossenen Projekte POWER und COMCOAST in dem Projektcluster „Europas nachhaltige Küstenregionen“ drei Forschungsvorhaben COAST, Climate Proof Areas und POWER-Cluster durchgeführt worden.

Der Deutsche Wetterdienst setzt für die numerische Wettervorhersage eine Modellkette mit sukzessiv höherer Auflösung ein. Das Globalmodell ICON berechnet weltweit die zeitliche Entwicklung von Wetterparametern wie Luftdruck, Wind, Wasserdampf, Wolken und Niederschlag. Für Europa stellt das im globalen ICON-Modell eingebettete ICON-EU detaillierte, fünftägige Vorhersagen bereit. Die Berechnungen innerhalb des ICON-EU-Gebiets sind direkt mit den Berechnungen des globalen ICON-Modells gekoppelt. Das hochauflösende Regionalmodell COSMO-DE für Deutschland erstellt achtmal täglich 27-stündige Vorhersagen, vor allem für die Warnung vor gefährlichen Wettersystemen wie Gewittern und Stürmen. Die Basisdatengrundlage ist das Modell ICON-EU.

---

<sup>489</sup>Warnecke, Günter: Meteorologie und Umwelt, Springer Verlag, 1991, S.29-34.

<sup>490</sup>Vgl.: Heinemann: Forschungsprojekt KLIM, Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg.

Als wesentliche Ergänzung und Erweiterung der deterministischen Modellkette ICON, ICON-EU und COSMO-DE ist das Ensemble-Vorhersagesystem COSMO-DE-EPS für zwanzig verschiedene 27-stündige Modellrechnungen nutzbar.<sup>491</sup>

Die Modellierung der solaren Global- und Direktstrahlung stützt sich auf METEONORM der weltweiten Klimadatenbank für die Solarplanung.<sup>492</sup>

## 7.2. Urbane Klimamodelle

Da sich während der Nachtstunden die Tagestemperaturwerte in den Stadtgebieten bis zum darauffolgenden Morgen kontinuierlich abgekühlt haben, entwickelt sich ein Wärmepotenzial aufgrund der Temperaturwertedifferenz im urbanen Raum. Ein Anstieg der thermischen Potenziale in urbanen Arealen entsteht bei kompakter Bebauung, hohem Versiegelungsgrad und geringer Durchlüftung.

Das Forschungsvorhaben "Stadtklima im Wandel" entwickelt ein innovatives Stadtklimamodell. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden klimatischen Änderungen stehen die Kommunen vor der Herausforderung, sich an den Klimawandel anzupassen. Das Stadtklimamodell ist geeignet, die kommunalen Akteure bei der Stadtentwicklungsplanung zu unterstützen und atmosphärische Prozesse zu simulieren.<sup>493</sup> Das „Urbane Klimamodell“ -UBIKLIM- bewertet das thermische Empfinden von Menschen und setzt physiologische Belastungsstufen in Städten fest. Die Stadtverwaltung Berlin hat zur Bewertung des ganzjährigen Bioklimas dieses Modellverfahren angewandt. Der numerische Ansatz des Klimamodells bezieht sich auf Regionaldaten, die in dem vorgegebenen Klimaraum die meteorologischen Bedingungen und Klimafaktoren sowie die Art der Landnutzung bzw. Siedlungsstruktur, Siedlungsdichte, den Wechselwirkungen zwischen benachbarten Strukturen und der Topographie berücksichtigen. Umweltinformationssysteme sind mit dem Bioklimatool verknüpft, damit Parameter der Flächennutzung und Daten der topographischen Lage einbezogen werden können. Als Ergebnis der Untersuchung zum Bioklima in Städten ist festzustellen, dass als wesentliches Merkmal die Abhängigkeit

---

<sup>491</sup>Vgl.: Deutscher Wetterdienst: Numerische Modellierung und numerische Vorhersagemodelle, Umweltvorhersage, Ensemble-Methoden, Information im Internet URL <http://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage> (Stand 2017).

<sup>492</sup>Remund, Jan: Meteotest – Modellierung der Unsicherheit in meteonorm 7, Vortrag auf der 2.Fachtagung Energiemeteorologie, Bremerhaven, 06-08.04.2011. Solarleistungsvorhersage, Solare Systeme und Standardisierung, Solare Eingangsdaten für die Ertragsprognose. Information im Internet URL <https://www.uni-oldenburg.de/physik/forschung/ehf/energiemeteorologie>. (4., 6. und 7. Session, 2013).

<sup>493</sup>Vgl.: BMBF-Fördermaßnahme: Stadtklima im Wandel – Urban Climate under Change, Leibniz Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie, 2016.

von der Gebäudehöhe zum Versiegelungsgrad der städtischen Flächen besteht.<sup>494</sup> Ein hoher Versiegelungsgrad im Bereich von hohen Gebäuden erzeugt bei sommerlichen Temperaturen vermehrt Wärmeinseln und Wärmestauzonen in den Straßenschluchten über versiegelte Flächen.

Das urbane Klimamodell MUKLIMO\_1 ist eine Berechnungsgrundlage, unabhängig von der Topographie für jede Stadtstruktur, die meteorologischen Größen sowie kurz- und langwellige Strahlungseinflüsse zu bestimmen. Zur Abschätzung der Niederschlagsmengen und der Wärmebelastung in den Städten werden Modelle wie REGNIE, UBIKLIM und MUKLIMO\_3 genutzt. Das Modell UBIKLIM basiert auf eindimensionaler Rechnung mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO\_1 für typische städtische Bebauungen und Landnutzungen.<sup>495</sup> Das numerische Simulationsmodell ist ein diagnostisches Gitterpunkt-Strömungsmodell zur Berechnung stationärer Windfelder in kleinskaligen Modellgebieten.

Das Forschungsprogramm KliMoPrax untersucht Module der Modellentwicklung, Modellevaluation und Überprüfung der Praxistauglichkeit für urbane Klimamodelle. Ziel ist es, die Nutzer und Praxistauglichkeit und somit die Anwendbarkeit des zu entwickelnden Klimamodells sicherzustellen und zusammen mit kommunalen Praxispartnern und späteren Anwendern eine bedarfs- und anforderungsgerechte Umsetzung zu ermöglichen.<sup>496</sup> Für die regionale und städtische Entwicklungsplanung sind regionale und urbane Klimamodelle im Rahmen des globalen Klimaschutzes in der Erforschung.

In der wissenschaftlichen Arbeit von Püttmann (2002) sind die stadtklimatischen Belange in Planungsprozessen und das Zusammenspiel des klimatischen Wirkungsgefüges sowie die Empfindung und Bewertung des Klimas für den Menschen untersucht worden. Aufgrund der Klimadiskussion sind verschiedene Modelle entwickelt worden, die sich unter dem Begriff „human-biometeorologische Bewertungsverfahren“ zusammenfassen lassen. Grundlagen für das Verfahren zur Bewertung des thermischen Wirkungskomplexes gibt die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2 (VDI 1996) vor.

---

<sup>494</sup>Vgl.: Stadtentwicklung Berlin: Umweltinformationssystem Berlin, Fachtext Nr. 04.09 Bioklima bei Tag und Nacht (Ausgabe 1998), Tabelle 2: Zuordnung von mittleren Bebauungsparametern zu den Stadtstrukturtypen des UIS Berlin.

<sup>495</sup>vgl. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG): Funktion des Mikroklimatischen Simulationsmodells –MUKLIMO\_3- von U. Sievers, 1986 am Deutschen Wetterdienst, Wien

<sup>496</sup>Deutsches Institut für Urbanistik: KliMoPrax – Klimamodelle für die Praxis, BMBF (Auftraggeber), Projektträger DLR, Laufzeit von 2016 bis 2019. Information im Internet URL <https://difu.de/projekte/2016>.

Das Modellvorhaben bezieht sich auf Aufzeichnungen und Messergebnisse von klimatischen Verhältnissen der betrachteten Regionen und Städte. Im Rahmen der Untersuchung des städtischen klimatischen Wirkungsgefüges sind insbesondere die Datenwerte Luftfeuchtigkeit, Wind- und Lichtverhältnisse und Außentemperaturen ausgewertet worden. Püttmann räumt als Ergebnis der Untersuchung ein, dass die Einbindung von Darstellungen und Analysen klimatischer Verhältnisse aus Regionen und Städten in der Planungspraxis gerade für den urbanen Raum zu wenig in Betracht gezogen werden und das stadtklimatische Effekte auch bei allochthonen Wetterlagen auftreten können. Sommerliche Warmwetterlagen weisen einen maximalen Energieumsatz durch solare Strahlungsenergie auf. Eine wesentliche Beeinflussung stellen geringe Windströmungen mit einem minimalen Luftaustausch in urbanen Gebieten dar.

Weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Klimamodifikation durch das Stadtklima geben Kuttler und Dosch (1993).<sup>497</sup> Geiger, Aron & Todhunter (1995) und OKE (1987) untersuchten die Einflussfaktoren zur Modifikation des bodennahen Klimas. Einflussfaktoren zur Veränderung des städtischen Klimas basieren auf der städtischen Flächennutzung, Flächenbeschaffenheit und Materialeigenschaften. Die Bebauungsdichte, Höhe und Art der Bebauung sowie die Vegetation, anthropogene Abwärmepotenziale und die geographische Höhenlage des betrachteten Raumes sind maßgebend.<sup>498</sup> Zur Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse in der städtebaulichen Planungspraxis sind den Akteuren exakte Daten aus Standortuntersuchungen über Wetter- und Klimawerte sowie Ergebnisse von meteorologischen Analysen bereitzustellen. Zur klimatischen Bewertung des urbanen Raumes stehen Daten von Klimaparametern zur Verfügung, die über einen langjährigen Zeitraum von mehr als 30 Jahren die Veränderung des Ortsklimas aufgenommen haben. Eine fundierte städtische Klimaanalyse erfordert demnach eine große Datenmenge von zeitlich und räumlich hochaufgelösten meteorologischen Daten, die als kontinuierliche Datenreihen von Messstationen zur Verfügung stehen müssten.

Das Oberflächentemperaturverhalten von versiegelten und unversiegelten Flächen, dargestellt in Thermalscanner-Aufnahmen, stellt dagegen nur einen mikroklimatisch repräsentativen Zeitpunkt dar. Die Messergebnisse aus Thermalscanner-Aufnahmen und langjährige meteorologische Messdaten über das Ortsklima sind in einer städtischen Klimafunk-

---

<sup>497</sup>Kuttler / Dosch: Wissenschaftlicher Bericht in den Veröffentlichungen Sukopp & Weber 1993, S. 5 ff, S. 113 ff., VDI 1997, S.87 ff.

<sup>498</sup>JENDRITZKY: Berichte des Deutschen Wetterdienstes 1992, S.87; GERTH 1986, S.6., VDI 1995, S.10.

tionskarte, Bewertungskarte Klima/Luft, regionale meteorologische Planungskarte zusammenzuführen und in einem digitalen geographischen Informationssystem als städtebauliche Planungsinstrumente zu verorten.<sup>499</sup>

### 7.3. Meteorologische Datenwerte

Die Nutzung von Klimaprojektionen auf der regionalen und lokalen Skala ist in einem regionalen Downscaling Workshop in Hamburg 2008 durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) thematisiert worden.<sup>500</sup> Der DWD verwendet Ergebnisse von mehreren regionalen Klimamodellen zur Abschätzung der zu erwartenden Klimaänderung auf regionaler und lokaler Skala. Die Möglichkeiten und Grenzen zur Verfeinerung von regionalen Modelldaten wurden unter Anwendung der Hydrometeorologie und der Stadtklimatologie untersucht. Die möglichst genaue Abschätzung zukünftiger Klimaänderungen basiert im Wesentlichen auf der Kenntnis der im vergangenen und gegenwärtigen Klima ablaufenden Prozesse. Dafür ist eine ausreichende Datenbasis notwendig, die nur durch den Erhalt und die Fortführung langer Beobachtungsreihen gegeben ist.<sup>501</sup>

Das Standardwerk für die Datengrundlage der Solarstrahlung in Europa ist der Europäische Strahlungsatlas (European Solar Radiation Atlas, E.S.R.A.), überarbeitet im Jahr 2000. Für 340 Standorte in Europa enthält dieser Atlas Monats- und Jahressummen der solaren Globalstrahlung, diffusen Strahlung und solare Datenwerte für Flächen. Als Datenbasis dienen gemessene Mittelwerte von Wetterstationen aus den Jahren 1981 bis 1990. Ein in der Schweiz entwickeltes Berechnungsprogramm „Meteonorm“<sup>502</sup> stellt regional solare Strahlungsdaten und meteorologische Parameter wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte oder Luftdruck zur Verfügung. Das Simulationsprogramm ermöglicht das Generieren von meteorologischen Stundenwerten aus den Monatswerten von jedem beliebigen Standort. Die Untersuchung des Simulationsprogramms zeigt, dass für Regionen keine ausreichenden meteorologischen Datenwerte zur Verfügung stehen und Abweichungen von den Globalstrahlungswerten zu den realen Messwerten vorliegen.

---

<sup>499</sup>Vgl.: SPACETEC: Steinicke & Streifeneder, Umweltuntersuchungen und gesamtstädtische Klimauntersuchungen, 2008.

<sup>500</sup>Koßmann, M: Regionales Downscaling Workshop, Möglichkeiten und Grenzen der Verfeinerung von regionalen Modelldaten, Thema: Nutzung von Klimaprojektionen auf der regionalen und lokalen Skala, 7.11.2008, Hamburg.

<sup>501</sup>Vgl.: Deutsche Meteorologische Gesellschaft: Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG) zum Erhalt langjähriger Klimamessreihen - Lange Klimareihen - unerlässlich für die Klimaforschung, Autoren: Martin Claussen, Peter Hupfer, 21.02.2002, Berlin.

<sup>502</sup>Vgl.: Strahlungswerte aus der Solarstrahlung - Datenbank Meteonorm 6.0, 2011, s. Abbildung 57

Die weltweite CD-ROM Klimadatenbank Climate1 der Universität Flensburg stellt neben monatlichen Sonnenscheinstunden und Globalstrahlungswerten auch Sonnenbahn-Diagramme zur Verfügung.

Weitere zu erwähnende Datenbanken<sup>503</sup> sind das S@tel-Light zur Bereitstellung von strahlungs- und lichttechnischen Parametern aus Satellitenbildern, das STEPS-System des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums und die in den USA am National Renewable Energy Laboratory (NREL) mit dem World Radiation Data Center (WRDC) entwickelte internetbasierte Solarstrahlungsmesswertedatenbank. Das Simulationstool der Fachhochschule München stellt für beliebige europäische Standorte Stundenwerte für die Solarstrahlung und Außentemperaturen aus Monatsmittelwerten digital zur Verfügung. Die Daten über die Solarstrahlungsjahressummen weichen jedoch in den Datenbanken stark voneinander ab, sodass verschiedene Datenquellen für einen Standort zu berücksichtigen sind.<sup>504</sup>

Das Projekt MESoR<sup>505</sup> stellt zukünftig den qualitativen Zugang zu den solaren Einstrahlungsdaten, die über einen zentralen Server bereitgestellt werden, zur Verfügung.

## 7.4. Stadtklima

Das Stadtklima wird beeinflusst durch die Tendenz der langfristigen globalen Erwärmung, des Klimawandels und des Ozonabbaus. Die energetische Gebäudeplanung in Städten und im Umland von Städten erfordert eine darauf abgestimmte Regionalplanung und städtischen Bauleitplanung. Die Planung von regenerativen Energien und insbesondere die Solarenergie sind von meteorologischen Situationen abhängig.

An solaren Strahlungstagen erwärmen sich die atmosphärischen Luftschichten über den versiegelten urbanen Flächen und die urbanen Räume werden tagsüber „aufgeheizt“. Die direkt auftreffende kurzwellige solare Strahlung wird über das Oberflächenmaterial absorbiert. Insbesondere großflächig versiegelte Oberflächen in Stadtzentren und Stadtquartiere speichern die solare Strahlung. Die gespeicherte Wärme in versiegelten und unversiegelten Oberflächen und Gebäudeaußenflächen wird infolge der Abkühlung in den spä-

---

<sup>503</sup>Quaschnig, Volker: Datenbanken für Solarstrahlung, erschienen in Sonne Wind & Wärme 8/2001, S. 39-41, [www.bva-solar.de](http://www.bva-solar.de) (2010).

<sup>504</sup>Ebd.: S. 39-41, [www.bva-solar.de](http://www.bva-solar.de) (2010).

<sup>505</sup>Hoyer, Klick; Beyer, Georg; Heinemann, Detlev et al.: Bereitstellung gütebewerteter Datenbasen und Modelle zur Einstrahlungsklimatologie im Rahmen des europäischen Projekts MESoR, European Commission, Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italien, <http://project.mesor.org> und <http://www.mesor.org> (2011).

ten Abendstunden der Sommermonate von den Flächen an die atmosphärische Außenluft abgegeben. Der urbane Raum wird durch die Wärmeabgabe von Gebäudeflächen und versiegelten Flächen erwärmt. Im Gegensatz zum städtischen Umland mit unversiegelten Flächen erfolgt eine Zunahme der bodennahen Oberflächentemperaturen in Städten. Das Temperaturverhalten der Bodenschichten kehrt sich um während den Nachtstunden in Richtung zur versiegelten städtischen Oberfläche.

Städtebauliche Modellkonzepte wie die Entwicklung von emissionsfreien Städten, Solarstädten, virtuellen Städten und CO<sub>2</sub>-freien Städten sind bereits in kleinräumigen Modellvorhaben erprobt worden. Die Entwicklung von innovativen Versorgungs- und Energiesystemmodellen und Versorgungskonzepten erfordert weiterhin die detaillierte Aufnahme von Standortdaten und deren Analyse. Meteorologische, geologische, hydrologische und demographische Standortdaten des Versorgungsgebietes bestimmen den ganzjährigen oder saisonalen solaren Energieertrag. Das kleinräumige Klima in städtischen Gebieten wird insbesondere durch das Meso- und Mikroklima<sup>506</sup> geprägt. Bei einer starken Überwärmung des städtischen Kernbereichs in Metropolen entsteht ein Flurwind, der vom Umland in das Stadtgebiet einströmt. Das Mikroklima in städtischen Gebieten wird durch die unmittelbare Umgebung von Gebäuden und durch den Gebäudestandort beeinflusst. Das Mikroklima steht im direkten Einfluss zum Großklima nach Kuttler<sup>507</sup>. Bei einer autochonen Witterung bei Strahlungswetter mit windschwachen Sommertagen und geringem Bewölkungsgrad sind hohe solare Einstrahlungs- und Ausstrahlungswerte<sup>508</sup> festzustellen. Folgende Parameter haben positive oder auch negative Auswirkungen auf den Endenergiebedarf von Gebäuden:

- Kaltluftschichten in Tallagen,
- Verschattung und Windschutz durch Baumbestand,
- strahlenreflektierende Wasserflächen,
- exponierte Höhenlagen,
- besonnte ruhige Flachlagen mit lichtem Wald,
- offene Süd- und Hanglagen.

---

<sup>506</sup>Brand, Silke: Das Meso- und Mikroklima, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geographisches Institut, Leitung: PD Dr. Stefan Klotz, Semesterarbeit, 2008.

<sup>507</sup>Vgl.: Kuttler, 2005, S. 315.

<sup>508</sup>Brand, Silke: Das Meso- und Mikroklima, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geographisches Institut, Leitung: PD Dr. Stefan Klotz, Semesterarbeit, 2008, S. 3.

In verschiedenen europäischen Ländern ist eine Zunahme von hitzebedingter Morbidität und Mortalität zu verzeichnen. Das IPCC (2001) geht davon aus, dass auf der Nordhalbkugel eine Zunahme von Hitzewellen "sehr wahrscheinlich" ist, weil davon ausgegangen werden muss, dass sich die globale Oberflächentemperatur bis zum Jahr 2100 um 1.4 - 5.8K erhöhen wird. Meehl und Tebaldi (2004) beweisen, dass «Vollzitat: future heat-waves in these areas (Chicago 1995; Paris 2003) will become more intense, more frequent, and longer lasting in the second half of the 21st century» sich dieses Phänomen zukünftig in Ballungsräumen fortsetzen wird.

Untersuchungen von Oke (1973) zeigen, dass die Intensität städtischer Wärmeinseln eng mit der Größe einer Stadt bzw. eines Ballungsraumes verknüpft ist und dass der "Urban Heat Island Index" als Differenzgröße zwischen Stadt und Umland Werte von über 10K annehmen kann. Auch hier liegt ein anthropogen induzierter Klimawandel vor, der allerdings mesoskalig ist und durch die Veränderung des Lokalklimas infolge von Bebauung hervorgerufen wird.

Die Einbeziehung klimatologischer Gesichtspunkte in die Bewertung der Umweltsituation städtischer Ballungsgebiete und deren räumlicher Planung setzen zunächst eine Definition des Stadtklimas<sup>509</sup> voraus. Das Stadtklima umfasst das gesamte Luftvolumen der bodennahen Schicht oberhalb und in unmittelbarer Umgebung der Stadt bzw. der städtischen Grenzschicht. Das Stadtklima wird durch Art und Dichte der Bebauung, Wärmespeichervermögen von Gebäuden, Bodenversiegelungsgrad, Vegetationsarmut, Wasserhaushalt und anthropogene Wärmespeicher sowie durch industrielle Abwärmeströme beeinflusst. Der Zustand des Stadtklimas unterliegt der Beurteilung durch Einhaltung von Grenzwerten der ausgestoßenen Schadstoffe von Industrie, Energieversorgung, Haushalt und Verkehr. Extreme Zustände des Stadtklimas<sup>510</sup> müssen für die Bewohner von Städten grundsätzlich vermieden werden. Nachstehend werden die versiegelten und unversiegelten Flächen des Umlandes und der Städte hinsichtlich der Auswirkungen auf das Stadtklima und des Klimawandels betrachtet.<sup>511</sup>

---

<sup>509</sup>Vgl.: Umweltatlas Nr. 04.06, Oberflächentemperatur bei Tag und Nacht Unter Stadtklima versteht man nach Schirmer et al. (1987) "das gegenüber dem Umland stark modifizierte Mesoklima von Städten und Industrieballungsräumen". Stadtentwicklung Berlin, Informationen im Internet URL <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umweltatlas> (Ausgabe 1993).

<sup>510</sup>Vgl.: Deutsche meteorologische Gesellschaft, Der Klimawandel: Sichtweisen und Interpretation, "The Perspectives of Climate Scientists on Global Climate Change", Ergebnisse des Projektes, Fragebogen, 1999.

<sup>511</sup>Simperl, Wintschnig: Magisterarbeit an der Karl-Franzens-Universität Graz, Anpassungsstrategien für Graz im Zuge des Klimawandels, Graz, 2016.

Freie Wasserflächen unterscheiden sich in ihrem thermischen Verhalten deutlich von erdbedeckten Oberflächen. Der ausgeglichene Temperaturgang zwischen der Tages- und der Nachtzeit und auch zwischen den Jahreszeiten ist kleiner als bei der Erdoberfläche. Die kurzweilige solare Strahlung ist insbesondere bei klaren Gewässern bis in große Tiefen messbar. Infolge des Windes und der Wasserströmungen werden die Oberflächengewässer durchmischt, sodass die aufgenommene solare Strahlung auf ein großes Speichervolumen trifft. Wasser besitzt ein extrem hohes Wärmespeichervermögen und kann daher mehr solares Wärmepotenzial aufnehmen als im Vergleich zum Erdbodenvolumen. Die Folge dieser Eigenschaften bewirkt, dass die Wassertemperaturen in Seen und Flüssen an heißen Sommertagen abkühlen. In der Nachtzeit steigen die Oberflächentemperaturen der Wasserflächen. Kleinere Flüsse und Teiche mit geringer Wassertiefe und Trübung weisen während der Nachtstunden niedrige Temperaturen auf.

Die Temperaturen der Erdbodenoberfläche von landwirtschaftlichen Nutzflächen erhöhen sich während den Tagesstunden. Eine Abkühlung der Oberfläche erfolgt ohne solare Strahlung während eines kurzen Zeitraums. Die Vegetation der Bodenoberfläche hat einen Einfluss auf das thermische Verhalten von landwirtschaftlichen Nutzflächen. Insbesondere die Erdbodenoberflächen ohne Vegetation sind Temperaturschwankungen durch die solare Strahlung unterworfen. Pflanzen sind ausgesprochen schlechte Wärmeleiter und können selbst wenig solare Strahlungswärme aufnehmen. Dem darunterliegenden Erdboden wird dadurch weniger Wärme zugeführt. Die Größe der Temperaturschwankungen ist von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens, der Bodenart, der Bodenfeuchte und dem Luftgehalt des Bodens abhängig. In Lehmböden erfolgt eine direkte und zügige Leitung der Wärmeströme als in Sand- oder Torfböden. Feuchtigkeitshaltige und verdichtete Böden leiten die Wärmeströme flinker als trockene und lockere Böden. Je größer die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist, umso geringer sind die Temperaturschwankungen an der Bodenoberfläche und umgekehrt. Grünflächen sind sowohl tagsüber als auch nachts kühler als Bodenflächen ohne Vegetation. Wiesenflächen kühlen nach Sonnenuntergang sehr rasch aus.

Der Luftraum unterhalb von Baumkronen wird von der solaren Strahlung abgeschirmt und im Kronendach der Bewaldung gespeichert. Waldflächen an Hängen speichern die solare Wärmestrahlung und haben daher ein höheres Wärmespeicherpotenzial vorzuweisen als horizontale Flächen oder Flussauen. Das Geländere relief wie auch die Waldflächengröße, die Baumartenzusammensetzung, die Höhe und Dichte des Baumbestandes und dessen Vitalität sind Einflussfaktoren für das Wärmespeicherverhalten.

Befestigte und versiegelte Oberflächen in urbanen Gebieten nehmen nach Oberflächenmaterial die solare Strahlungsenergie an Sommertagen auf. Bebaute Oberflächen weisen wärmeabsorbierende Materialien auf, und sind zusätzlich wasserundurchlässig. Das ablaufende Niederschlagswasser steht der Verdunstung nicht zur Verfügung und somit ist auch eine Reduzierung der Verdunstungskühle vorherrschend. Insbesondere in dicht bebauten städtischen Gebieten speichern die städtischen versiegelten Oberflächen die solare Wärmeenergie. Großflächige Dächer von Industrie- und Gewerbebetrieben nehmen die solare Strahlung über technische Solaranlagen und Dachmaterial wie Aluminiumelemente auf. Die Flach- und Sheddachflächen reflektieren die solare Strahlung und werden als langwellige Strahlung in die Luftatmosphäre wieder abgegeben.

Die Wärmespeicherung der solaren Strahlung erfolgt über die Grenzschicht der städtischen versiegelten und unversiegelten Oberflächen. Die urbane Atmosphäre wird somit durch die Wärmeabgabe der städtischen Flächen erwärmt und ein Anstieg der atmosphärischen Temperaturen ist die Folge. Verantwortlich für die Wärmeeinwirkung auf das Stadtklima sind großflächig asphaltierte und versiegelte Oberflächen in Abhängigkeit des Albedowertes. Stadtklimatische Untersuchungen weisen nach, dass die während den Tagesstunden in den Oberflächen gespeicherte Wärme in den Nachtstunden an die urbane Atmosphäre abgegeben wird. Die Veränderung des thermischen Temperaturspektrums reicht vom Umland zum Randbereich der Städte und bis zum Stadtkern. Die Folge ist die Entstehung von Wärmeinseleffekten.

Gebäude von Wohngebieten, die an südlich gelegenen Hangzonen liegen, weisen ein hohes Wärmespeicherpotenzial über die Gebäudeflächen auf. In windschwachen, warmen Nachtstunden strömen die Kaltluftmassen hangabwärts und sammeln sich in Mulden und Talbecken in Hanglage. Die Temperaturwerte nehmen ab. Am Oberhang dagegen werden die abfließenden Kaltluftmassen durch wärmere Luftpakete ersetzt, sodass eine deutliche Erwärmung der Luftmassen erfolgt als in den Tieflagen.

Das solare Potenzial in Stadtgebieten wird über Gebäudeflächen und Bodenoberflächen aufgenommen und als Wärmeenergie gespeichert. Dieser thermische Prozess unterliegt einem temporären instationären Zustand beginnend durch Erwärmung und endend bis zur Abkühlung. Die Grenzschicht über den städtischen Oberflächen beeinflusst diesen physikalischen Prozess. Die Streuung der Tages- und Nachttemperaturen erfolgt über versiegelte und unversiegelte Flächen wie Gebäudeflächen, Straßen, Wälder, Parkanlagen und Kleingärten. Ein hoher Versiegelungsanteil von Flächen und Gebäudeflächen aus Beton,

Mauerwerk und Asphalt führt in den städtischen Kerngebieten der Innenstadt und in Industrie- und Gewerbegebieten zu einem Anstieg der Oberflächentemperaturwerte.

Feldversuche mit Bodentemperaturmessungen an frei liegenden Flächen wie abgeerntete Äcker, Wiesen und vergleichbare Nutzungen zeigen, dass eine schnelle Erwärmung der Bodenoberflächen auf ein geringes Wärmespeichervermögen zurückzuführen ist. Das vergleichsweise hohe Luftvolumen der trockenen Böden isoliert die Bodenoberfläche von den tieferen Bodenschichten. Temperaturdifferenzwerte zwischen der Tag- und Nachtzeit von mehr als 20° C sind in Feldversuchen gemessen worden.

Die Abbildung 54 stellt das Temperaturverhalten von städtischen Flächen in einem urbanen Gebiet mit Randzonen dar. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass unversiegelte Oberflächen in der Nachtzeit schneller abkühlen (Nr. 10, 11a, 12, 13). Dagegen steigt die Oberflächentemperatur über versiegelten Flächen an (Nr. 15, 16, 17) während der Tagzeit an und kühlt langsam während den Nachtstunden bis zu 10K ab. Im Bereich der Oberflächengewässer (Nr. 1, 2, 3, 4, 5) ist ein mäßiger Oberflächentemperaturgradient festzustellen, der bei geringen Wassertiefen einen erhöhten Wärmeumsatz zwischen Tag und Nacht von 2-3° C vorhält. Bewaldete Parkanlagen und Wälder (Nr. 6, 7, 8) kühlen im Laufe der nächtlichen Abkühlungsphase aus bis in den Kronenbereich, der durch die einsetzende Evaporation der Begrünung (Verdunstungskälte) noch verstärkt wird. Die Messergebnisse zeigen, dass die solare Wärme in versiegelten und unversiegelten Flächen während der Tagzeit gespeichert wird.<sup>512</sup>

---

<sup>512</sup>Horbert: Oberflächentemperaturverhalten ausgewählter Flächentypen und Einzelstandorte aus den Abend- und Morgenaufnahmen, Institut für Ökologie, TU Berlin, 14. / 15.9.1991; Information im Internet URL <http://stadtentwicklung.berlin.de/umweltatlas>.

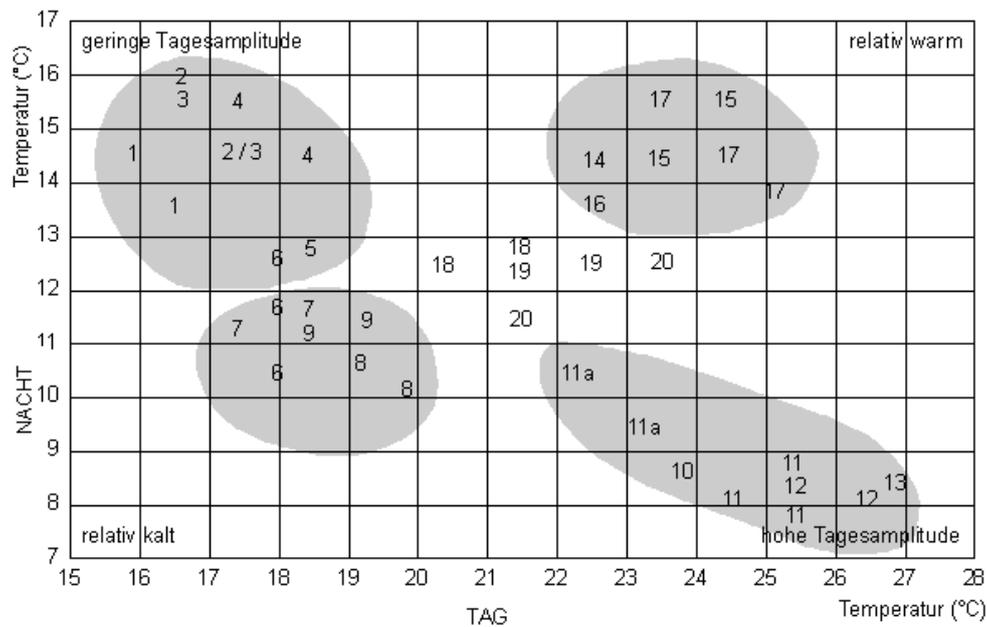


Abbildung 54: Oberflächentemperaturen Stadtgebiet und Umland von Berlin

## 7.5. Urbane Flächen und solare Strahlung

Als Steuerungsgröße für den Wärmehaushalt der Erdoberfläche kommt der Wärmestrahlung und damit der Oberflächentemperatur von Flächen eine wichtige Bedeutung zu. Während tagsüber die kurzwellige Strahlung als direkte solare Einstrahlung auf städtische Flächen trifft und Absorption bzw. Reflexion eintritt, beeinflusst in den Nachtstunden die langwellige Strahlung das Stadtklima. Das Absorptionsverhalten von Oberflächen bestimmt das Oberflächenmaterial und die Albedo. Die Albedo einer Oberfläche wird durch das Verhältnis von kurzwelliger Ein- und Ausstrahlung definiert und ist materialabhängig. Der Vergleich von in Feld- und Laborversuchen untersuchten Albedowerten zeigt keine deutlichen übereinstimmenden Ergebnisse. In der nachstehenden Übersicht sind die kurzwelligen Albedowerte für Straßenoberbeläge und Gebäudeflächen aufgeführt:

Material	Kurzwelliges Albedo (Werte in %)			
	Quelle	Nefzger et al.	Helbig et al. 1933 und Matzarakis 2001	Fezer 1995
Asphalt gealtert trocken		19	5-20	10-20
Asphalt gealtert nass		13	k. A.	k. A.
Asphalt neu trocken		10	k. A.	k. A.
Asphalt neu nass		7	k. A.	k. A.
Beton unterschiedlichen Alters trocken		24	10-35	10-35
Beton unterschiedlichen Alters nass		17	k. A.	K. A.

Beton weiß	k. A.	71	k. A.
Wiese	k. A.	15-25	k. A.
Laubwald	k. A.	15-20 (25)	k. A.

Tabelle 4: kurzwelliger Albedo in % von Oberflächen

Die Konkretisierung der Albedowerte aus der Fachliteratur von (Nefzger et al.), (Helbig et al. 1933), (Matzarakis, 2001) (Fezer, 1995)<sup>513</sup> stützt sich auf wissenschaftlich begleitete Feldversuche und zeigt detaillierte Prozentwerte für unversiegelte Flächen: Sand trocken 30-45%, Sand nass 20-30 %, Schwarzerde unbewachsen 5-15%, Braunerde unbewachsen 7-11%, Wüste 25-30 %, Tundra 15-20%, Gras und Getreide 10- 25%, Savanne 15- 20%, Tropischer Regenwald 10-15%, Laubwald 10-20 %, Nadelwald 5-15 %, Wasserfläche 4-95%, Meer 25- 60%, Schneedecke neu 70-95%, Schneedecke alt 40-70%, Haufenwolken 70-90%, Schichtwolken 40-60%.<sup>514</sup> Je nach Art und Beschaffenheit der Oberflächen sind bei gleichen Einstrahlungs- und Ausstrahlungsbedingungen erhebliche Unterschiede in der Oberflächentemperatur von versiegelten und unversiegelten Flächen nachgewiesen worden.<sup>515</sup> Albedowerte für verschiedene Oberflächen und Böden, die der meteorologischen Forschung entnommen werden, geben für die kurzwellige Albedo für Stadtgebiete 18%, Ackerland mit 20%, Laubwald mit 16%, Nadelwald mit 12%, Regenwald mit 12%, Wüste mit 25%, Eisflächen mit circa 55% und Neuschnee mit 85% an.<sup>516</sup> In den Wintermonaten haben die schneebedeckten Oberflächen einen Albedowert von 80-85%. Jeder geographische Ort hat demnach eine andere solare Strahlungsbilanz.<sup>517</sup> In der folgenden Tabelle sind Reflexionsgrade und Absorptionsgrade nach dem Gesamt - Emissionsgrad für  $\epsilon = \epsilon(300K)$  verschiedener Oberflächenmaterialien<sup>518</sup> aufgeführt:

Material	$a_s$	$\epsilon$	$a_s/\epsilon$
Aluminium, poliert	0,20	0,08	2,5
Asphalt, Straßenbelag	0,93	k. A.	k. A.
Blätter, grün	0,71...0,79	0,86	0,83...0,92

<sup>513</sup>Fezer, F.: Die thermische Komponente des Stadtklimas, Habilitationsschrift an der Universität Freiburg, Freiburg, 2001, S.26.

<sup>514</sup>Vgl.: Albedowerte. Information im Internet URL <http://www.wetteronline.de/lexikon/albedo>.

<sup>515</sup>Vgl.: Das Klima der Städte, Perthes Geographie Verlag, Gotha, 1995. (Albedowerte nach Matzarakis,A.).

<sup>516</sup>Vgl.: Alles rund um das Wetter: Werte für Albedo, Informationen im Internet URL <http://wetteronline.de/lexikon/albedo.shtml>, 2009.

<sup>517</sup>Forkel, M: Das Klima der Erde: Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde; Informationen im Internet URL <http://www.klima-der-erde.de>; September 2009, S. 1-5.

<sup>518</sup>Gergely, Digo: Multitemporale Analyse der Strahlungstemperatur der städtischen Wärmeinsel von Basel, Universität Basel, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, September 2001.

Dachpappe schwarz	0,82	0,91	0,90
Erde gepflügt	0,75	k. A.	k. A.
Farben zinkweiß	0,22	0,92	0,24
Schwarze Ölfarbe	0,90	0,92	0,24
Marmor weiß	0,46	0,90	0,51
Schiefer	0,88	0,91	0,97
Schnee sauber	0,20...0,35	0,95	0,21...0,37
Ziegel rot	0,75	0,93	0,81

Tabelle 4: Absorptionsgrade und Materialkennwerte von Oberflächen

Die wissenschaftliche Literatur definiert die Albedo als Reflexionsgrad, der durch Messungen der kurzwelligeren Solarstrahlung auf Oberflächen ermittelt wird. Die Ergebnisse sind unter Angabe des Reflexionsgrades ( $r_s = 1 - a_s$ ) bei K.Y. Kondratyew<sup>519</sup> angegeben. In der Fachliteratur ist der Begriff „Albedo“ nicht einheitlich definiert. Einige Autoren<sup>520</sup> verwenden den Begriff Albedo explizit für die kurzwellige Reflexibilität. Die Albedo wird für Oberflächenmaterialien unterschiedlich in der Fachliteratur angegeben.

Die Ausführungen von Ranft et al. beziehen sich auf Feldversuche zur Untersuchung von Reflexion und Absorption der solaren Strahlung von städtischen Oberflächen. Das städtische Bioklima wird definiert nach Ranft et al. über die mittlere Anzahl der Frost- und Eistage, der zeitlichen Dauer der winterlichen Frostperiode und über das Jahresmittel der atmosphärischen Lufttemperaturen. Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen zeigen, dass das städtische Bioklima einen wesentlichen Einfluss auf das Kleinklima in einer Stadt hat. Je höher die Albedo der Oberfläche, desto geringer ist die von der Oberfläche aufgenommene Strahlungsenergie. Folglich wird ein Reflexionsanteil der solaren Strahlung insbesondere von den hellen Flächen zurück in die städtische Atmosphäre gegeben. Versiegelte städtische Oberflächen mit einem geringen Reflexionsanteil nehmen die solare Strahlungsenergie stärker auf. Die solare Strahlungsenergie wird von den Oberflächenmaterialien daher unterschiedlich absorbiert oder reflektiert.<sup>521</sup> Die solare Wärme wird im Oberflächenmaterial in Abhängigkeit des Reflexionsgrades gespeichert.<sup>522</sup> Die

<sup>519</sup>Kondratyev, K.Y.: Radiation in the Atmosphere. New York: Academic Press 1969.-: Radiation processes in the atmosphere. World Meteorological Organization, Nr. 309, 1972.

<sup>520</sup>Gergely, Digo: Multitemporale Analyse der Strahlungstemperatur der städtischen Wärmeinsel von Basel, Universität Basel, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, September 2001.

<sup>521</sup>Vgl.: Ranft, Fred: Natürliche Klimatisierung, S.13, Abbildung 3.5.

<sup>522</sup>a.a.O., S. 14, Abbildung 3.2.

Ergebnisse aus den Feldversuchen von Ranft et al. geben detaillierte Anhaltswerte für die Albedo von Oberflächen in Städten:

Oberflächen	Albedo in % als Reflexionsgrad der solaren Strahlung
Asphalt	14-16 %
Schotter	6-14 %
Ackerboden	14-16 %
Rasen	25 %
Gründach	25-30 %
Betonfläche	25-40 %
Erdreich grau und trocken	25-30 %
Sand hell	33-40 %

Tabelle 5: Albedo von Oberflächen

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Wärmespeicherpotenzial der horizontalen Flächen ist der diffuse Anteil der Globalstrahlung<sup>523</sup>, der je nach Bewölkungsgrad zunimmt. Folglich sind Südflächen mit einer Neigung von 55° bis 65° für die solare Strahlungsenergie in der Winterperiode geeignet. Flächenneigungswinkel von 30° bis 60° stellen in den Übergangsjahreszeiten ein hohes Potenzial zur Verfügung. In den Sommermonaten sind Flächen mit einer Neigung von 0° bis 30° vorteilhaft. Horizontale Dachflächen sind geeigneter, die solare Strahlung ungehindert aufzunehmen und als Wärmeenergie zu speichern.<sup>524</sup> Das nutzbare Wärmepotenzial kann durch eine vorgelagerte Wasserfläche an der Gebäudesüdseite noch gesteigert werden. In den Wintermonaten kann dadurch ein zusätzlicher solarer Wärmegewinn erzielt werden.<sup>525</sup>

Die Tagessummen der solaren Wärmestrahlung innerhalb eines Jahres sind durch Untersuchungen des Wuppertal Instituts<sup>526</sup> aus dem Jahr 1996 nachgewiesen worden.<sup>527</sup> Der tägliche solare Einstrahlungswert in den Monaten von Januar bis Juli erhöhte sich zum Beispiel von 0,5 W/m<sup>2</sup>d auf 8 W/m<sup>2</sup>d und reduzierte sich bis Dezember des Messjahres wieder auf den Ausgangswert von 0,5 W/m<sup>2</sup>d. Die Untersuchungen von KOBLIN<sup>528</sup> et al.

<sup>523</sup>a.a.O., S. 18, Abbildung 4.4.

<sup>524</sup>a.a.O., S. 17, Abbildung 4.3.

<sup>525</sup>Ranft, Fred: Natürliche Klimatisierung, S.22.

<sup>526</sup>Energiegerechtes Bauen und Modernisieren: Wuppertal Institut, Planungsbüro Schmitz, Birkhäuser Verlag, Basel, 1996.

<sup>527</sup>Ranft, Fred: Natürliche Klimatisierung, S.17, Abbildung 4.3.

<sup>528</sup>Vgl.: Einstrahlung der solaren Strahlungsenergie auf Flächen, Koblin, 1984.

(1984) zeigen, dass die solare Einstrahlung auf Flächen und mit einem Neigungswinkel von 30° hohe Wärmepotenziale erzielen kann.

### 7.5.1. Phänomen Treibhauseffekt und Wärmeinsel in Städten

Eines der wichtigsten Phänomene der Stadtklimatologie ist die Ausprägung eines zusätzlichen Treibhauseffektes in Städten als Wärmeinsel (Heat-Islands). Dieser Effekt ist besonders an heißen und windstillen Sommertagen wahrzunehmen, da zu der solaren Erwärmung das atmosphärische Temperaturniveau in urbanen Räumen noch erhöht wird. Diese atmosphärische Temperaturerhöhung ist bedingt durch Einflussparameter wie die städtische geographische Lage, Stadtgestalt, Größe des Stadtgebietes, Bebauungsgeometrie, Versiegelungsgrad etc.. Die Strömungsverhältnisse der Luftmassen in den urbanen Räumen werden beeinflusst und erhöhen die Windrauigkeit im Stadtgebiet. Die Entstehung und Ausprägung einer Wärmeinsel nutzt die gespeicherte Wärme von städtischen Oberflächen und Gebäuden in den Abendstunden.<sup>529</sup> Der solare Strahlungseintrag verursacht einen ganztägigen Temperaturanstieg in Straßen- und Gebäudeflächen mit einer gleichzeitigen atmosphärischen Temperaturerhöhung in urbanen Gebieten.

Die thermischen Effekte sind nicht nur auf das Stadtgebiet<sup>530</sup> bezogen, sondern werden durch Windströmungen häufig leewärts des urbanen Gebietes ausgedehnt. Feldmessungen zeigen, dass in der Haupt-Windrichtung leeseitig der Städte die Bodenoberflächentemperaturen geringfügig erhöht werden. Langzeittemperaturmessungen an Asphaltoberflächen zeigen, dass während der Sommermonate ein Temperaturanstieg von 30° C bis zu 52° C innerhalb eines Messzeitraumes von 8 Stunden nachgewiesen wurde. Die Auswertung der Messergebnisse ergab, dass Oberflächentemperaturen über der Asphaltoberfläche in ca. 1,20 m Höhe kontinuierlich im Laufe des Tages abnahmen.<sup>531</sup>

Feldversuche bestätigen, dass in Städten die durchschnittlichen Temperaturwerte in den Sommer- und Wintermonaten bis zu 2°C höher sind als im städtischen Umland. Die Temperaturdifferenz weist auf das Phänomen der städtischen Wärmeinsel (englisch: urban heat island UHI).

---

<sup>529</sup>Peyerl, Martin: Sommerliches Überhitzen städtischer Strukturen – helle Betonflächen regulieren, Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZfi), Abteilung Beton, Wien.

<sup>530</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Balke, K.-D., Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen, S. 7, Februar 1981, S. 51 ff. (Ursachen für die Entstehung von Wärmeinseln über Stadtgebieten, Temperaturmessungen verschiedener Oberflächen durch Dettwiller 1969, Heyer 1963, Landsberg 1970).

<sup>531</sup>Ebd.: S. 52 (Abb. 39 Tagestemperaturen über einer Asphaltstraße an der Oberfläche, in 30 cm, 120 cm Höhe und 10 m seitwärts der Straße im Schatten (Heyer 1963)).

Die Wärmekarte von solar erwärmten städtischen Oberflächen der Metropole New York zeigt die folgende Abbildung 55. Die Isothermen als Linien gleicher Temperatur auf einer Wetter- oder Wärmekarte zeigen die atmosphärischen Temperaturwerte der Stadt meist in Form von Kreisen um das betrachtete Zentrum. Die Wärmekarte stellt die Wärmepotenziale von Gebäude- und Straßenflächen in einem Satellitenbild dar. Ein Anstieg der atmosphärischen Temperaturen in urbanen Gebieten mit einem hohen Versiegelungsgrad erzeugt den Effekt zur Entstehung der Wärmeinsel.



Abbildung 55: Satellitenbild der Stadt New York mit städtischen Oberflächen

Die wissenschaftliche Fachliteratur<sup>532</sup> enthält eine Vielzahl von Hinweisen über den Einfluss der Stadtgröße auf die Intensität der urbanen Wärmeinsel. Dabei wird fast immer die Größe der Stadtbevölkerung als charakteristisches Maß verwendet.<sup>533</sup>

Das Departement Geographie der Universität Basel hat im Rahmen einer Diplomarbeit<sup>534</sup> die Analyse der Strahlungstemperaturen der städtischen Wärmeinsel von Basel unter-

---

<sup>532</sup>Bokwa, Anita und Jezioro, Pawel: Graphik über die zunehmende maximale Temperaturdifferenz zwischen Stadt und nicht städtischer Umgebung.

<sup>533</sup>Vgl.: OKE, 1973, GARSTANG et al., 1975; OKE, 1976; OKE, 1982; PARK, 1986.

sucht. Großflächige und hoch versiegelte Städte sind im Jahresdurchschnitt um 1° C bis 2° C wärmer als bebaute Flächen am Stadtrand oder in den benachbarten Regionen. Lokale Überwärmungen führen bei sonnigem Wetter bis zu 6° C bis 12° C höheren Temperaturen, die an hoch versiegelten Standorten in Stadtkernen noch ansteigen können. Die atmosphärischen Temperaturen steigen kontinuierlich nach Sonnenuntergang an und führen zu erhöhten Durchschnittstemperaturen der Stadtluft.

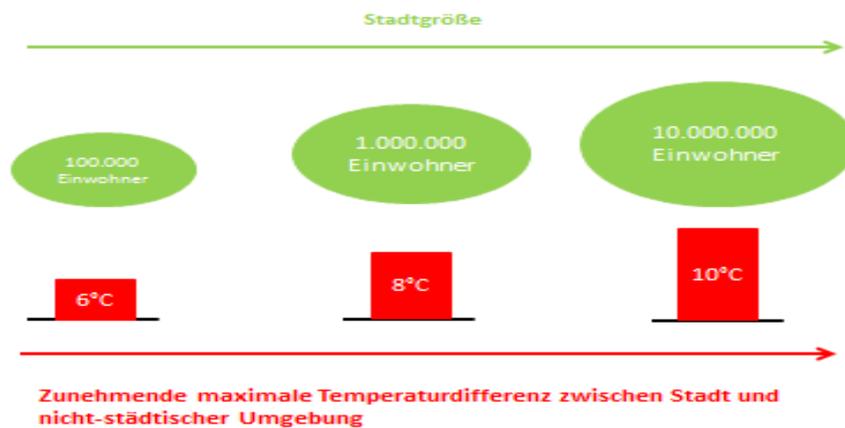


Abbildung 56: Anstieg der Einwohnerzahl und Temperaturdifferenz der Stadtfläche

Die Ursachen für einen Temperaturanstieg der atmosphärischen Luftmassen in Städten während der Nachtzeit sind im Wesentlichen<sup>535</sup>:

- hoher Versiegelungsgrad städtischer Flächen (Farbe, Struktur, Baustoff) ,
- hohe Wärmeabsorptionsfähigkeit der Gebäudeaußenflächen mit Abgabe von Wärmelasten (Baustoff, dunkle Oberfläche),
- erhöhte Wärmeaufnahme stark besonnener Flächen mit Strahlungsreflexion und -absorption (Baustoff, helle Oberfläche),
- Verminderung der Wärmeabstrahlung in der Nachtzeit durch Abschirmung und mangelnde Reflexion (Fassadenkonstruktion, Pflanzen),
- fehlende Vegetation (Absorption und Reflexion),
- fehlende Versickerung des Oberflächenwassers und mangelnde Oberflächengewässer (geringe Luftfeuchtigkeit),

<sup>534</sup>Gergely, Rigo: Departement Geographie der Universität Basel: Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung; Multitemporale Analyse der Strahlungstemperatur der städtischen Wärmeinsel von Basel, Prof. Dr. E. Parlow, Basel, 2001.

<sup>535</sup>Vgl.: Technische Hochschule Darmstadt: Architektur Powerhouse, Informationen im Internet URL [http://www4.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse/db/248,id\\_32,s\\_Papers.fb15](http://www4.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse/db/248,id_32,s_Papers.fb15).

- feststehende Luftkissen mit Verhinderung der Durchlüftung und Abkühlung durch Freilandwinde (geschlossene Bebauung),
- anthropogene Wärmelast durch Eigenwärmeproduktion der Stadt infolge Industrie, Verkehr, Hausbrand usw. (Erhöhung der Stadtlufttemperaturen um 2° C)

Die Abbildung 57 zeigt Ergebnisse von atmosphärischen Temperaturmessungen in ausgewählten Städten nach der Bevölkerungszahl. Oke (1973) und Danzeisen (1983) bewerten für europäische Städte und Kleinstädte die maximale Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland.<sup>536</sup> Die Auswertung des Diagramms zeigt einen Rückgang der Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland für Kleinstädte. Die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland steigt für europäische Großstädte aufgrund der Bevölkerungsstärke bis zu 10°C an.

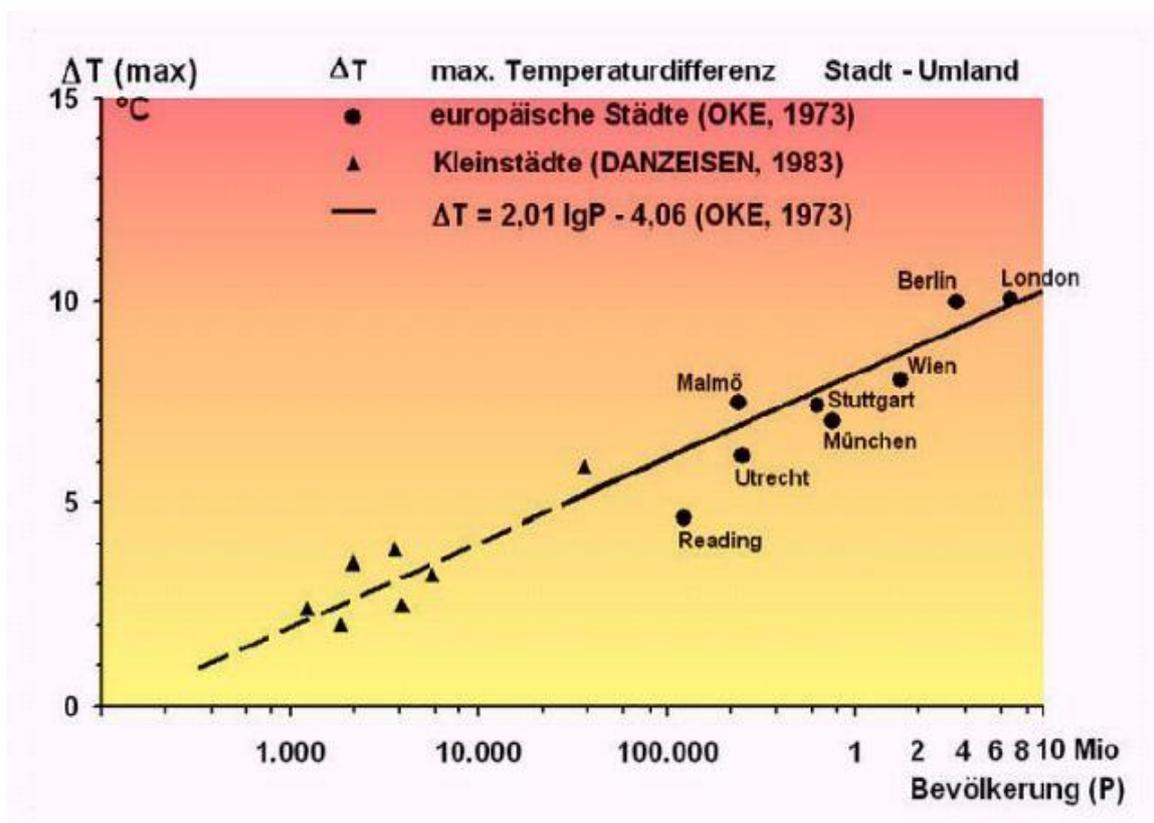


Abbildung 57: Temperaturen in Stadt und Umland nach Bevölkerungsstärke

Städtebauliche Merkmale für den Anstieg von atmosphärischen Temperaturen in Städten sind Versiegelungsgrad, Flächengrößen, Bebauungsstruktur und Gebäudehöhen. Eine Anhäufung der Wärme- und Stadtklimaveränderung durch Anstieg von atmosphärischen Temperaturen ist im Stadtkern von Metropolen mit einer dichten Bebauung und anthro-

<sup>536</sup>Vgl.: Untersuchungsergebnisse über Messdatenreihen von Temperaturentnahmen in Städten; (oke und Danzeisen), Information im Internet URL <http://www.geolinde.musin.de/klima/stadt/messfahrt/stadtklima.htm> (2010).

pogenen Wärmelast und Schadstoffemissionen gemessen worden. Durch die städtische Oberflächenversiegelung und damit verbundenen geringen Grünflächenanteil ist der Verdunstungsgrad reduziert. Ein Anstieg der Temperaturwerte in urbanen Räumen ist demnach zu erwarten. Über dem Stadtzentrum steigen die von der Sonne erwärmten Luftmassen auf und sinken über den Flächen des städtischen Umlandes als abgekühlte Luftmassen wieder ab. In Erdbodennähe bildet sich eine Ausgleichsströmung vom kalten zum warmen städtischen Gebiet. Über dem urbanen Gebiet entwickelt sich umgekehrt eine Ausgleichsströmung von wärmeren zu kälteren städtischen Flächen. Die Zusammenführung von warmen Luftmassen bildet die städtische Wärmeinsel mit der Entstehung von thermischen Windsystemen. Die Folge ist, dass über dem urbanen Gebiet kühle Luftmassen aus dem Umland in den Morgenstunden angesogen werden. Die Bewegung der atmosphärischen Luftmassen führt zu einem Aufsteigen der warmen Luftströmung über dem urbanen Gebiet und bewirkt ein Nachströmen von kühlen Luftströmungen aus dem städtischen Umland. Ein atmosphärischer Luftmassenaustausch ist im Stadtgebiet feststellbar.<sup>537</sup>

Die Abbildung 58 zeigt ein Temperaturmessdiagramm der atmosphärischen Lufttemperatur und akustischen Temperatur der Stadt Münster.<sup>538</sup> Die Temperaturmesskurve nimmt deutlich ab während des Messzeitraumes von 04:40 bis 06:00Uhr in den frühen Morgenstunden. Die Temperaturabsenkung hat demnach die Abkühlung von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen sowie der Bodenschichten zur Folge.

---

<sup>537</sup>Vgl.: Wärmeinseleffekt der Stadt Linz in Österreich, Information im Internet URL <http://stadt-linz.de>.

<sup>538</sup>Müskens, Andreas: Die Wärmeinsel der Stadt Münster -Ausdehnung, Intensität und Belüftungssituation-, Westfälische-Wilhelms-Universität, Münster 2004, S.38.

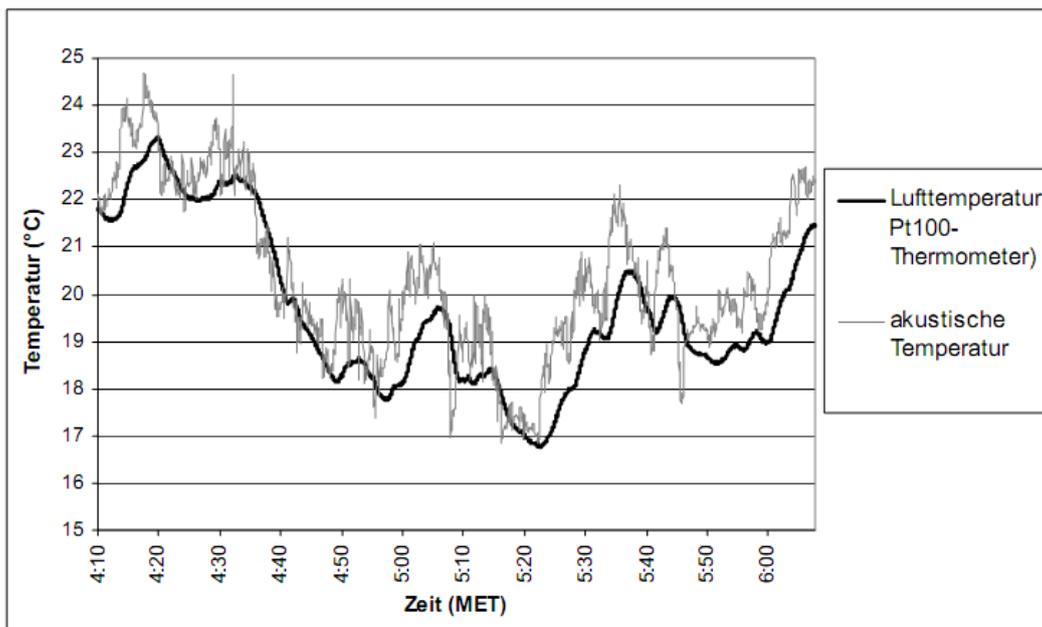


Abb. 9: Gemessene Lufttemperatur und akustische Temperatur am Morgen des 08.08.2003

Abbildung 58: Gemessene atmosphärische Lufttemperatur im August

Die atmosphärische Lufttemperatur wird über die virtuelle Lufttemperatur und in Abhängigkeit der spezifischen Luftfeuchte berechnet. Der Wasserdampfdruck und der Luftdruck bestimmen den spezifischen Luftfeuchtegehalt.<sup>539</sup>

$$(47) \quad T = T_v \div (1 + 0,61 \cdot s)$$

Die klimatischen Planungsfaktoren als thermische und als lufthygienische Komponenten des Stadtklimas sind für das Wohlbefinden und für die Gesundheit des in Städten lebenden Menschen in relevanter Weise zu berücksichtigen. Der Untersuchungsbericht des meteorologischen Instituts der Universität Freiburg von 2001 analysiert die thermischen Komponenten des Stadtklimas in Bezug zur Wärmebelastung des Menschen in Städten. Die Zielsetzung dieser Untersuchung ist eine anwendungsbezogene Analyse von Zuständen und Prozessen, durch die die thermische Komponente des Stadtklimas in unterschiedlichen räumlich-zeitlichen Ebenen charakterisiert wird.<sup>540</sup>

Zur Analyse der thermischen Vertikalkomponente des Stadtklimas hat OKE (1984) die Stadtatmosphäre in zwei relevante Schichten als Urban Canopy Layer und Urban

<sup>539</sup>Universität Freiburg (MI) (Hrsg.): Die thermische Komponente des Stadtklimas, Berichte des meteorologischen Instituts der Universität Freiburg, Andreas Matzarakis, Nr.6, 2001, Freiburg.

<sup>540</sup>Universität Freiburg (MI) (Hrsg.): Die thermische Komponente des Stadtklimas, Berichte des meteorologischen Instituts der Universität Freiburg, Andreas Matzarakis, Nr.6, 2001, Freiburg.

Boundary Layer unterteilt.<sup>541</sup> OKE (1976) zitiert die Modellvorstellung von SUMMERS (1964) zur Intensität<sup>542</sup> der urbanen Wärmeinsel in °C, die den Einfluss der Advektion berücksichtigt:

$$(48) \quad UHI = \frac{2 \cdot x \cdot Q \cdot \alpha}{\rho \cdot c_p \cdot v}$$

Die Parameter berücksichtigen die luvseitige Distanz zwischen der Stadtgrenze und dem Stadtzentrum in (m), die Wärmeemission der urbanen Flächen in (W/m<sup>2</sup>), die Differenz der Vertikalgradienten der potentiellen atmosphärischen Lufttemperatur im Umland und in dem urbanen Gebiet (K /100m), die Luftdichte (kg/m<sup>3</sup>), die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck (J/kgK) und regionale Windgeschwindigkeit (m/s). Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Windgeschwindigkeit und der bodennahen Vertikalgradienten der potentiellen atmosphärischen Außentemperatur besteht.

Ein vergleichbarer Berechnungsansatz ist von HANNA (1969)<sup>543</sup> entwickelt worden. Die Berechnungsparameter charakteristischer Durchmesser der Stadt in (m) und die Freisetzung von anthropogener Wärme (W/m<sup>2</sup>) in dem urbanen Gebiet sind anzuwenden. Parameter wie der Bewölkungsgrad und Windgeschwindigkeit sind in experimentellen Feldversuchen in der Stadt Barcelona durch MORENO – GARCIA (1994) als Grundlage für die Berechnung der Intensität einer urbanen Wärmeinsel<sup>544</sup> angesetzt worden. Die nachstehende Berechnungsgleichung gilt für den Radius (r=0,97).

$$(49) \quad UHI = -0.583 \cdot N - 0.077 \cdot v + 6.443$$

Das Berechnungsverfahren von OKE (1998) zeigt, dass eine Abschätzung der urbanen stündlichen Wärmeinselintensität für alle Städte und zu jeder Jahreszeit gegeben ist. Meteorologische Daten von Wetterstationen und die Aufnahme von städtischen Oberflächenstrukturen unterstützen diesen Ansatz. Der Berechnungsansatz von OKE ist ein empirischer und beruht auch auf physikalische Daten.<sup>545</sup>

---

<sup>541</sup>Ebd.: S.7: Definition: Urban Canopy Layer (UCL) und Urban Boundary Layer (UBL) bedeuten die Schicht von der Bodenoberfläche bis zur mittleren Hausdachhöhe. Die Schicht UCL wird wiederum in drei Schichten unterteilt: Roughness Sublayer (2-5 fach der Rauigkeitselemente, Inertial Sublayer (sehr dünne Schicht über der Stadt), Convective Mixed Layer.

<sup>542</sup>Ebd.: S.65-66 (Intensität der Wärmeinsel mit Berechnungsgleichung III.15).

<sup>543</sup>Ebd.: S.65-66 (Intensität der Wärmeinsel Berechnungsgleichung III.16).

<sup>544</sup>Ebd.: S.67 ff. (Intensität der Wärmeinsel Berechnungsgleichung III.22).

<sup>545</sup>Ebd.: S. 68 (Kapitel III.2.6 Integrale Abschätzung der stündlichen urbanen Wärmeinselintensität).

Der Einfluss der urbanen Versiegelung auf das Stadtklima ist korrelationsstatistisch sowohl durch die solare Strahlungsäquivalenttemperatur aus Thermalbildern als auch durch Temperaturmessungen der atmosphärischen Luft in der Standardmesshöhe von 2m über Grund nachgewiesen worden.

Ausgangspunkt für den methodischen Ansatz ist die maximale Wärmeinselintensität in der UCL, zu der es eine Vielzahl von klimatologischen Untersuchungen gibt. Die stündliche Intensität der urbanen Wärmeinsel UHI ist von  $UHI_{max}$  nach OKE (1998) wie folgt abhängig:

$$(50) \quad UHI_{max} = UHI_{max} \cdot (\Phi_m \cdot \Phi_w \cdot \Phi_t) \quad (\text{dimensionslos})$$

Der Einfluss der städtischen Versiegelung auf die atmosphärische solare Strahlungsäquivalenttemperatur ist durch OKE demnach nachgewiesen. Die räumlichen Auswirkungen des urbanen Wärmepotenzials stellen in Abhängigkeit der urbanen Flächennutzung näherungsweise einen Indikator für den städtischen Versiegelungsgrad dar.

### **7.5.2. Solare Strahlung und Oberflächentemperaturen**

Eine Abschätzung der atmosphärischen Lufttemperaturwerte und der bodennahen Lufttemperaturwerte ist durch Thermalbefliegungen des Stadtgebietes gegeben.<sup>546</sup> Die nachstehenden Thermalbildkarten zeigen die Aufnahme der Oberflächentemperaturwerte zur Tages- und Nachtzeit von versiegelten und unversiegelten Oberflächen im städtischen Gebiet München. Die Auswertung der Thermalbildkarten zu den Tagesstunden zeigt deutlich hohe Oberflächentemperaturwerte (34,1° C bis 37° C) der versiegelten Kerngebiete und Verkehrsflächen. Die Temperaturwerte nehmen in den Nachtstunden bis zu 8K ab.

---

<sup>546</sup>Vgl.: Baumgärtner et al, 1985: Ebd.: S.87, 88 Umweltatlas München (Thermalbildaufnahmen von München vom 8. Juli 1982); Information im Internet URL <http://www.stadt-muenchen.de/Umweltschutz>, Landeshauptstadt München (Hrsg.) Umweltschutzreferat, 1982.

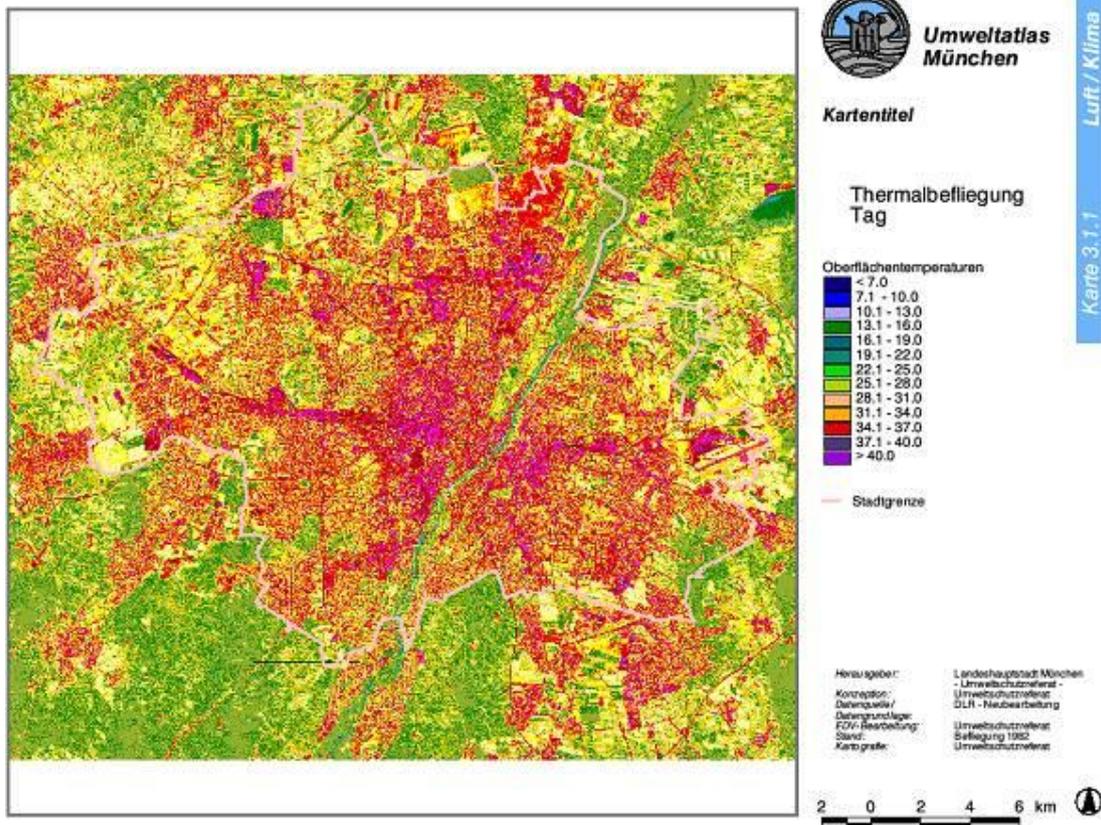


Abbildung 59: München am 8. Juli 1982 Oberflächentemperaturmesswerte Tagzeit

Die thermographische Auswertung zeigt eine Abnahme der Oberflächentemperatur von städtischen Flächen zum städtischen Umland. Ein Anstieg der Bodentemperaturwerte ist in hoch verdichteten urbanen Kerngebieten (rot) nachgewiesen worden. Temperaturwerte von unversiegelten Flächen sind im Gegensatz zu versiegelten Flächen geringer (grün).

Die nachstehende Abbildung 60 zeigt das Temperaturverhalten von städtischen Flächen in den Nachtstunden des Stadtgebietes Münchens. Aufgrund der solaren Erwärmung der städtischen Flächen während des Tages sind Oberflächentemperaturwerte von 20-25°C nachgewiesen worden. Die Oberflächentemperaturwerte nehmen geringfügig zum städtischen Umland ab.

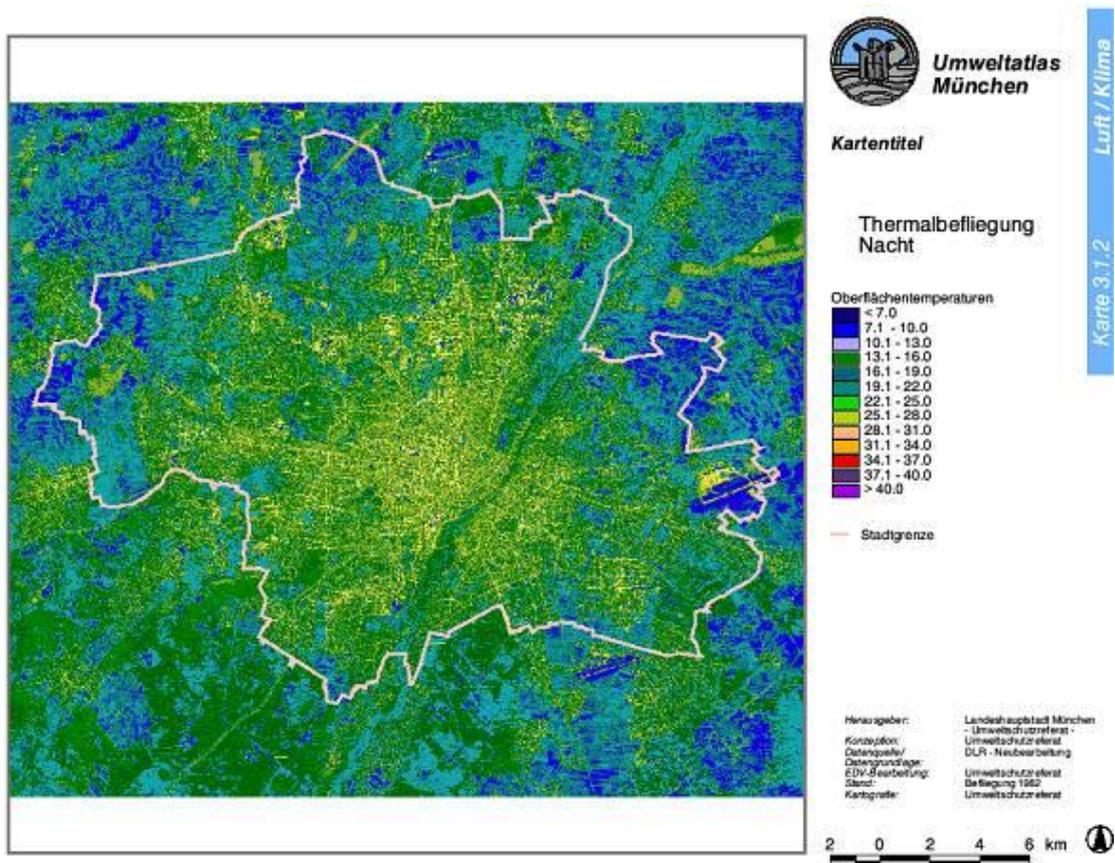


Abbildung 60: München am 14. Juli 1982 Oberflächentemperaturmesswerte Nachtzeit

Die Bilanzierung der Oberflächentemperaturwerte am Tag und zur Nachtzeit zeigt eine geringe Abnahme der Bodentemperaturwerte. Das Wärmepotenzial in städtischen Oberflächen entwickelt sich über die bodennahe Grenzschicht und ist durch thermographische Messungen in den Trag- und Bodenschichten im Rahmen von Feldversuchen nachzuweisen.<sup>547</sup>

Die Abbildung 61 zeigt das Oberflächentemperaturverhalten für städtische Nutzungsgebiete und Oberflächenstrukturen von städtischen Flächen in der Stadt München. Die solare Strahlung erzeugt die Erwärmung der Luftmassen in urbanen Gebieten und erzeugt Oberflächentemperaturwerte von 30° C bis 45° C während den Sommermonaten.

<sup>547</sup> Definition: Strahlungsäquivalenttemperaturen sind Temperaturwerte, die aus Thermalbildern entnommen werden. Eine Ableitung von den Strahlungsäquivalenttemperaturen auf die Lufttemperatur kann nicht erfolgen. Untersuchungen an Flächenstrukturen in München, Baumgärtner et. al, 1985.

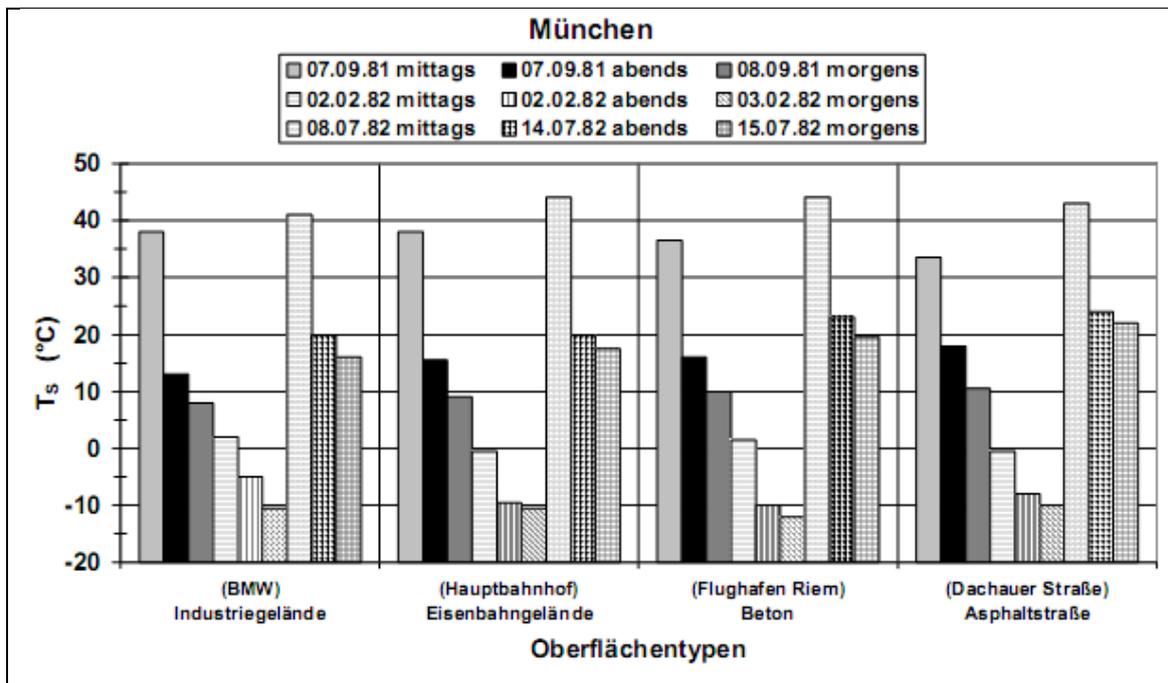


Abbildung 61: Mittlere Strahlungsäquivalenttemperaturwerte von städtischen Flächen

Der Vergleich der Strahlungsäquivalenttemperaturwerte während der Jahreszeiten einer Asphaltstraße (Dachauerstraße) im Stadtgebiet München zeigt, dass eine maximale Temperaturdifferenz zwischen den Monaten Februar und Juli von 62K nachgewiesen worden ist. Das Temperaturverhalten zwischen Betonoberflächen und Asphaltoberflächen ist während des Messzeitraumes als gering zu bewerten. Großflächige städtische Oberflächen weisen ein ähnliches Strahlungsäquivalenttemperaturverhalten auf. Die Messergebnisse zeigen tages- und jahreszeitliche Unterschiede in der Strahlungsäquivalenttemperatur zwischen den städtischen Nutzflächen auf. Die Baukörperstruktur in Industriegebieten<sup>548</sup> zeigt deutlich höhere Strahlungsäquivalenttemperaturen auf als die Situation in Baukörperstrukturen eines Stadtviertels mit hohem Anteil an Grünflächen. Baumgartner et. al.<sup>549</sup> konnte nachweisen, dass zwischen dem versiegelten Flächenanteil von Referenzflächen und den entsprechenden Flächenmittelwerten der Strahlungsäquivalenttemperatur ein linearer Zusammenhang besteht.

Aus den Messergebnissen ist abzuleiten, dass der Anstieg der Strahlungsäquivalenttemperaturwerte um 1,2°C erfolgt, wenn der versiegelte städtische Flächenanteil um 10% ansteigt. Weitere Untersuchungen des städtischen Versiegelungsgrads von Flächen und der Erhöhung der atmosphärischen Lufttemperaturwerte zeigen, dass bei einem versiegelten

<sup>548</sup>Ebd.: S.87, 88 Thermalbilder von München vom 8.Juli 1982); Information im Internet URL <http://www.stadt-muenchen.de>.

<sup>549</sup>Ebd.: S.101 (Versiegelung von Flächen und Strahlungsäquivalenttemperatur).

städtischen Flächenanteil von 10% die mittleren jährlichen Lufttemperaturwerte nur um 0,2°C ansteigen.

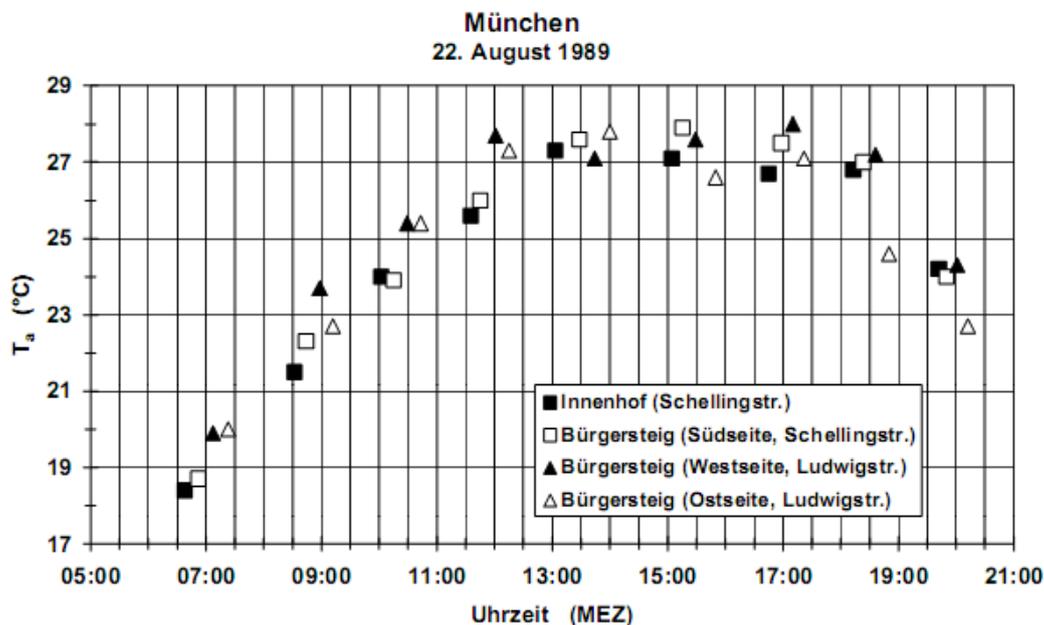


Abbildung 62: Atmosphärische Lufttemperaturmessung in 1,1 m Höhe über Flächen

Die Messergebnisse dieser Fallstudie zeigen in der Abbildung 62 einen deutlichen atmosphärischen Lufttemperaturanstieg von 07:00 bis 15:00 Uhr während eines Sommertages. Der Temperaturverlauf über den städtischen Flächen ist identisch zum Sonnenstandverlauf. Die atmosphärischen Lufttemperaturwerte in geschlossenen Innenhöfen mit angrenzender Bebauung weichen nicht von den Temperaturwerten in offenen urbanen Räumen ab. Messtechnische Untersuchungen zeigen, dass die atmosphärischen Lufttemperaturwerte in Straßenschluchten von Metropolen, die von Nord nach Süd gerichtet sind, bis zu 30°C ansteigen.

Das thermische Wärmepotenzial der Stadt Salzburg zeigt im Mittel Temperaturdifferenzen von 1,5°K vom Stadtgebiet zum Umland. In den Monaten Februar, Mai, Juli und August zeigt die Auswertung der atmosphärischen Lufttemperaturen und Oberflächentemperaturen die Entstehung des Effektes der städtischen Wärmeinsel. FEZER (1995, S 53ff.) untersuchte auf der Grundlage zahlreicher Fachpublikationen für den Raum München - Wien die thermischen Effekte von Stadtgebieten.

In der Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sind die meteorologischen Verhältnisse während zweier sommerlicher Episoden mit erhöhten Ozonkonzentrationen in Wien detailliert untersucht worden. Die Modellberechnungen sind

nach dem TAMOSW-Windmodell und angeschlossenem Präprozessor mit einer horizontalen Gitterdistanz von 500 m für Wien erfolgt.<sup>550</sup> Im Rahmen der Untersuchung sind Gitterzellen vorgegeben, die die Oberflächeneigenschaften, die Rauigkeitslänge, die Albedo, das Bowenverhältnis, ein Faktor zur Bestimmung des Bodenwärmestroms und der Blattflächenindex identifizieren.

Für die Landnutzungsklassen ist das Bowenverhältnis (Verhältnis zwischen fühlbarem und latentem Wärmestrom) mit 1 bis 1,5 angegeben bezogen auf die Albedo von 0,1 bis 0,3. Der Faktor zur Bestimmung des Bodenwärmestroms ist 0,15 und 0,25 für urbane versiegelte Gebiete.

Im Bereich der Grenzschichtmeteorologie<sup>551</sup> wurde das diagnostische Windfeldmodell TAMOSW um Ansätze zur Berechnung der charakteristischen Grenzschichtgrößen erweitert. Meteorologische Daten des geographischen Informationssystems (GIS) wie Temperatur, relative Feuchte und solare Globalstrahlung sind auf das Modellgitter interpoliert<sup>552</sup> und als Eingangsgrößen zur Berechnung der Grenzschichtparameter für jeden Gitterpunkt des Modellgebiets verwendet worden.<sup>553</sup>

Bei der Erwärmung der Erdoberfläche durch Sonneneinstrahlung findet ein Wärmetransport durch Thermikblasen vom Boden als freie Konvektion in die Atmosphäre statt.

Die Abbildung 63 zeigt die Entwicklung der atmosphärischen Lufttemperaturwerte im urbanen Gebiet der Stadt Salzburg zum Umland während eines Messjahres. Der Einfluss der solaren Strahlung auf den urbanen Raum ist unabhängig von der Bewölkung und dem Witterungsverlauf untersucht worden. Die Erwärmung der urbanen Luftmassen über dem Stadtgebiet wird über anthropogene Belastungen wie Gebäudeversorgung durch Wärmeversorgung und Wärmeabstrahlung in den Monaten der Heizperiode verstärkt. Eine deutlich Reduzierung der atmosphärischen Lufttemperaturen erfolgt über den Flächen außerhalb des urbanen Gebietes im städtischen Umland.

---

<sup>550</sup>Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Analyse der atmosphärischen Grenzschicht in Wien zweier Sommersmog-Episoden mit dem Windfeldmodell Tamasw und Grenzschichtparametrisierung, März 2000. Information im Internet URL <http://wien.gv.at/umweltschutz/pool/pdf>.

<sup>551</sup>Vgl.: Pechinger et al., 2000.

<sup>552</sup>Ebd.: S.12.

<sup>553</sup>Vgl.: Scheifinger und Kolb, 2000.

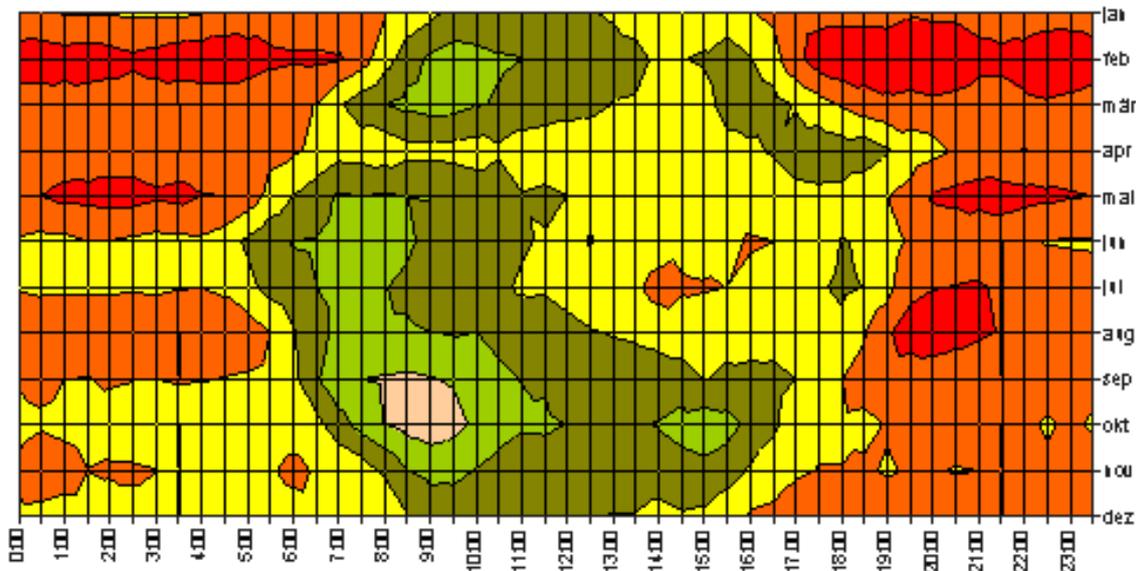


Abbildung 63: Thermische Grenzschichtbetrachtung Stadt Umland von Salzburg

Der solare Strahlungseinfluss erzeugt täglich eine Erwärmung der Luftmassen in urbanen Gebieten. Ganzjährige Messungen der solaren Strahlung zwischen den Jahren 1987 und 1998 an der Wettermessstation Freisaal<sup>554</sup> zeigen eine durchschnittliche solare Strahlung von 1710h im Jahr.

Jän.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
91.2	107.1	126.3	151.5	208.2	174.4	213.2	216.0	155.6	129.0	76.4	62.1

Tabelle 6: Messwerte der monatlichen Sonnenscheindauer in Freisaal von 1987-1998

Die Daten sind das Ergebnis eines mikroskaligen Stadtklimamodelles, das wiederum auf den Ergebnissen des existierenden regionalen Klimamodelles REMO (Läufe REMO\_UBA und REMO\_BFG) aufbaut. Sommertage sind jene Tage, an denen die Höchsttemperatur 25° C oder mehr erreicht. Die Änderung ihrer Anzahl ist ein geeigneter Parameter für die Abschätzung der Entwicklung der Wärmebelastung in urbanen Gebieten.<sup>555</sup>

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik hat im Kontext zur Untersuchung der Wärmeinsel die horizontale und die vertikale Temperaturverteilung im urbanen Gebiet Wien gemessen. In einer Höhe von 2 m bis 1500 m über Grund sind die Temperaturwerte der atmosphärischen Höhenschichten über dem Stadtgebiet und des Umlandes ge-

<sup>554</sup>Vgl.: Daten der Wettermessstation Salzburg-Freisaal. Information im Internet URL <http://www.wetter.orf.at/salzburg> (2016)

<sup>555</sup>Vgl.: Stadtklima Zukunft: Detaillierte Karten der mittleren Anzahl der Sommertage pro Jahr für fünf Städte Österreichs-heute und für Szenarien der Zukunft. Information im Internet URL <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel> (2017).

messen und analysiert worden. Die nachstehende Darstellung<sup>556</sup> der atmosphärischen Lufttemperaturverteilung über dem Stadtgebiet Wiens zeigt deutlich einen Anstieg der atmosphärischen Temperaturen bis 22°C über den städtischen Kerngebieten in einer Höhe bis zu 400m. Die atmosphärischen Lufttemperaturwerte der Luftmassen nehmen vom städtischen Kerngebiet bis zu den Randbereichen des Stadtgebietes stetig ab.<sup>557</sup>

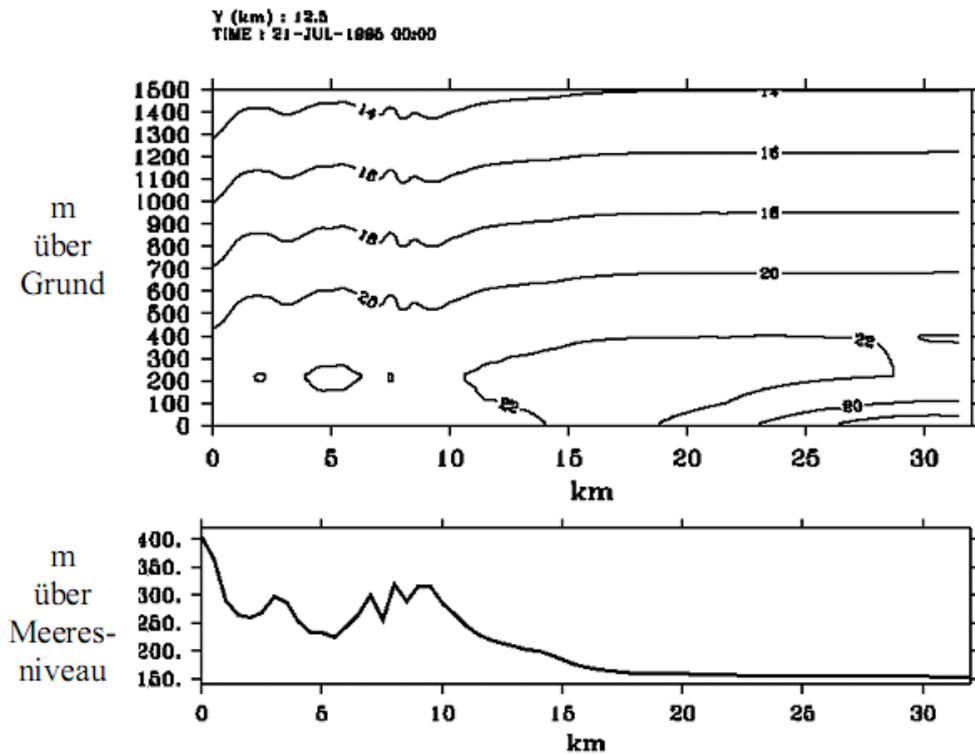


Abbildung 64: Darstellung der vertikalen atmosphärischen Lufttemperaturverteilung

Die Abbildung 65 zeigt die bodennahen Lufttemperaturwerte der Stadt Wien, die durch Thermalbildaufnahmen über den städtischen Flächen gemessen worden sind. Die räumliche Verteilung und Messung der Lufttemperaturwerte entsprechen den von Lufttemperatursonden meteorologischer Stationen. Untersuchungen in Städten bestätigen, dass die atmosphärischen Lufttemperaturwerte in einer Höhe von 2,00m über Grund als bodennahe Oberflächentemperaturen angenommen werden können.<sup>558</sup> Der Mittelwert von drei Temperaturmessungen der atmosphärischen Lufttemperaturen wird in den nachfolgenden Thermalbildaufnahmen farblich dargestellt. Die Temperaturmesswerte erreichen im Monat

<sup>556</sup>Stadt Wien: Darstellung der vertikalen Temperaturverteilung, Wärmeinseleffekte und Temperaturverteilung in einem West-Ost Querschnitt, 21.7.1995; 24:00 Uhr.

<sup>557</sup>Ebd.: S.28 (Vertikaler Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Entfernung zum Stadtzentrum).

<sup>558</sup>Vgl.: siehe Kapitel 7.4.2. S.244

Juli Maximalwerte von bis zu 30°C. Die Auswertung der Thermalbildaufnahmen vom 20.07.1995 um 13:00, 19:00 und 24:00Uhr zeigt das Temperaturverhalten der atmosphärischen Lufttemperaturen in einer Messhöhe von 2,00m über Grund. Die atmosphärischen Lufttemperaturwerte nehmen über den versiegelten städtischen Flächen des städtischen Kerngebietes (Koordinatenkreuz 12km / 17km) während den Messzeiten kontinuierlich ab.

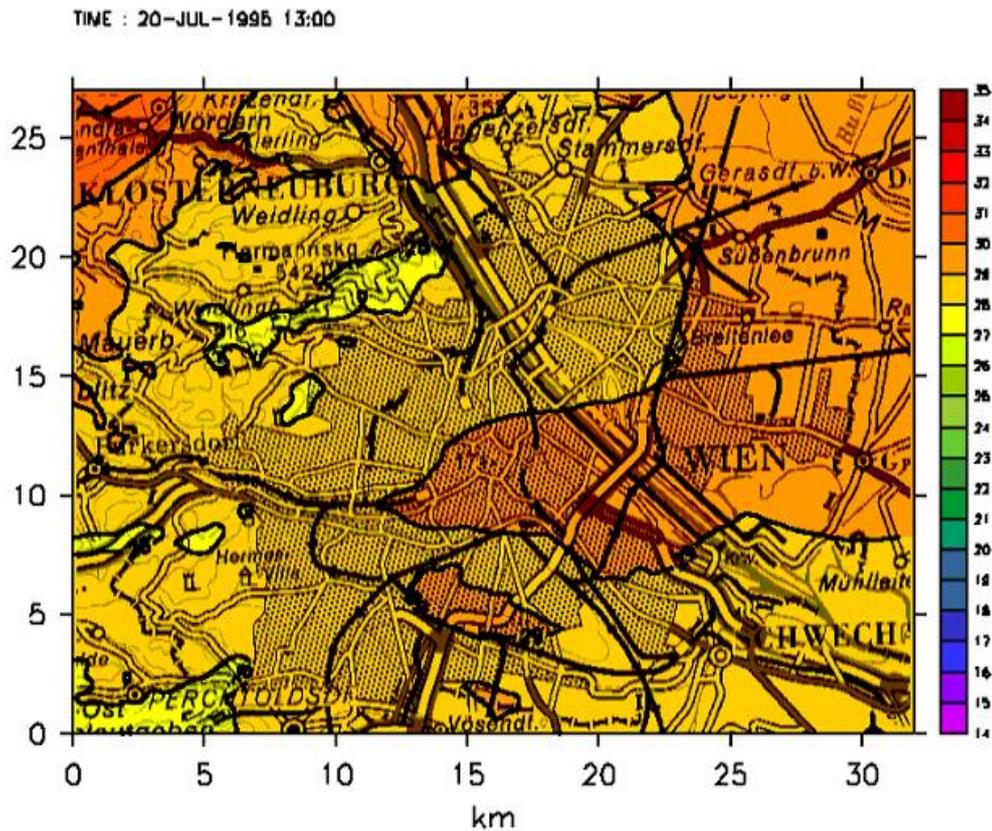


Abbildung 65: Lufttemperaturverteilung über 2 m ü.N.N. um 13:00 Uhr UTC

Die atmosphärischen Lufttemperaturmesswerte, die während des Messzeitraumes in der Thermalbildaufnahme abgebildet sind, nehmen in dem städtischen Kernbereich um 3K ab innerhalb des Zeitraumes von sechs Stunden. Außerhalb des betrachteten städtischen Kerngebietes ist eine Lufttemperaturveränderung zum Kerngebiet von bis zu 7k festzustellen. Eine deutliche Temperaturabnahme vom städtischen Kerngebiet hin zum städtischen Umland ist nachweisbar. Die maximale Lufttemperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland beträgt 10K.

Aus den Thermalbildaufnahmen kann gefolgert werden, dass sich der thermische Effekt zur Bildung einer Wärmeinsel bis in die Nachtstunden infolge der Erwärmung von Luftmassen über den versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen verstärkt. Der Beitrag der solaren Strahlung während den Tagstunden führt dazu, dass die Erwärmung von

versiegelten städtischen Flächen durch das Adsorptions- und Absorptionsverhalten den städtischen Wärmeinseleffekt unterstützt. FETZER hat in seiner Veröffentlichung „Das Klima der Städte“ die Klimaverhältnisse nach Stadtgestalt, spezifischer Bauweise, Baudichte, Gebäudehöhe und Oberflächenmaterialien auf den Wärmeinseleffekt hin unter Berücksichtigung der meteorologischen Bedingungen untersucht. Durch Feldversuche ist nachgewiesen worden, dass über die bodennahe Grenzschicht das Temperaturverhalten von städtischen Flächen und Bodenschichten verändert wird und eine zeitlich verzögerte Wärmeaufnahme über die städtischen Oberflächen erfolgt.<sup>559</sup>

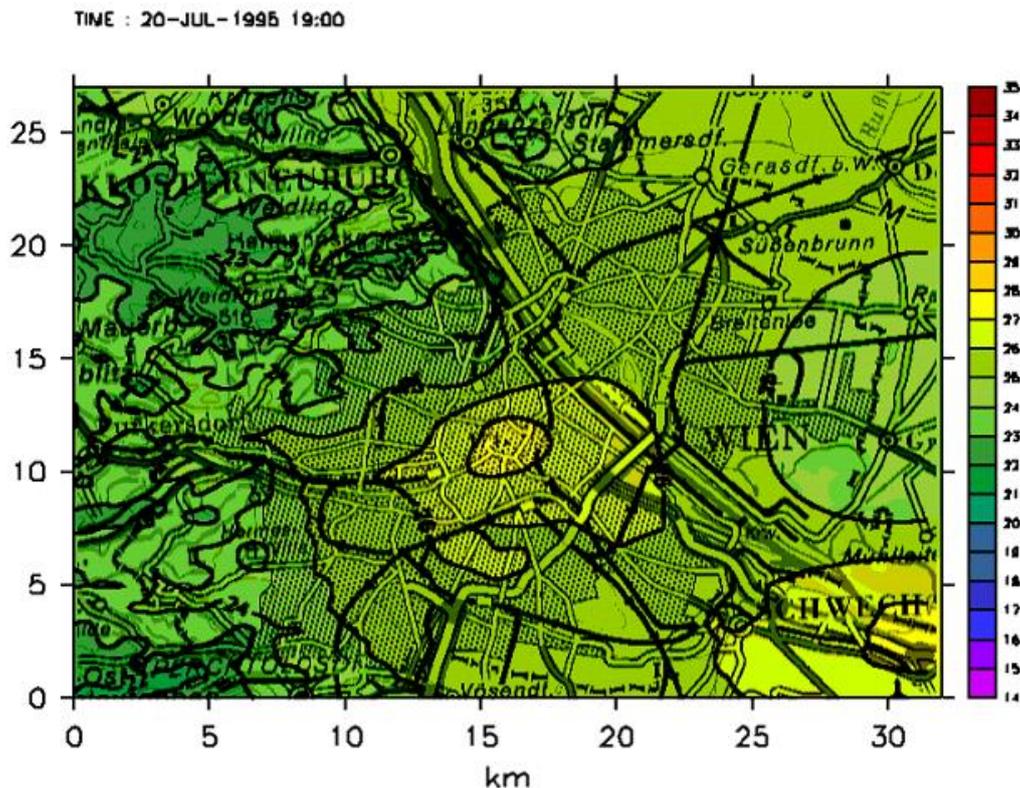


Abbildung 66: Lufttemperaturverteilung über 2 m ü.N.N. um 19:00 Uhr UTC

Die Abbildung 67 zeigt die Thermalbildaufnahme von 24:00Uhr über dem Stadtgebiet Wiens. Die Auswertung der Oberflächentemperaturwerte zeigt einen geringen Rückgang der Temperaturwerte über den Flächen des betrachteten Stadtkerngebietes zur Tageszeit. Die Temperaturdifferenz beträgt 4K zur Tagestemperatur, die insbesondere durch die solare Strahlung erhöht werden kann. Die Temperaturmessdatenreihen, die aus den Thermalbildaufnahmen generiert worden sind, zeigen deutlich eine Erwärmung der Luftmassen über den städtischen Flächen.

<sup>559</sup>Fetzer, F.: Das Klima der Städte; 1995; <http://www.städtebauliche-klimafibel.de> (2009).

TIME : 21-JUL-1995 00:00

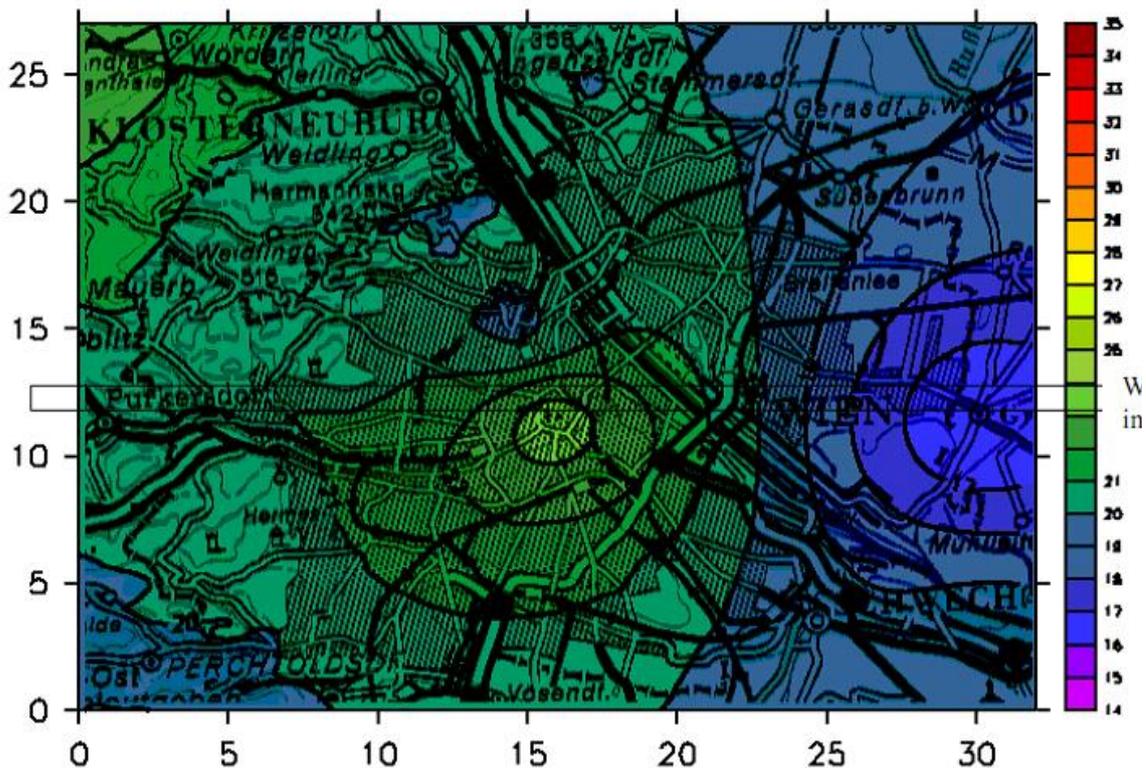


Abbildung 67: Lufttemperaturverteilung über 2 m ü.N.N. um 24:00 Uhr UTC der Stadt

### 7.5.3. Thermische solare Einflüsse in Straßenschluchten von Metropolen

In Feldversuchen durch OKE (1981) sind die atmosphärischen Temperaturen in Straßenschluchten von Metropolen zur Untersuchung von städtischen Wärmeineffekten gemessen worden. Ein Anstieg der atmosphärischen Lufttemperaturwerte in den Straßenschluchten von Metropolen ist nachgewiesen worden. Die solare Strahlung gelangt insbesondere während des Höchststandes der Sonne auf die städtischen Flächen und Gebäudeflächen von Straßenschluchten. Die Wärmelast schichtet sich innerhalb der urbanen Räume auf und wird von den versiegelten Oberflächen während den Nachtstunden an die städtischen Luftmassen wieder abgegeben. Bei mangelnder Durchlüftung der städtischen Gebiete führt die Wärmebildung zu einer starken Erwärmung der urbanen Räume. OKE entwickelte die mathematische Beziehung zwischen dem Verhältnis der Höhe (H) der Randbebauung und zur Breite (W) von Straßenschluchten. Dieser Faktor ist zur Beurteilung der thermischen Intensität in urbanen Gebieten anzusetzen. Für nordamerikanische und europäische Städte in mittleren geographischen Breiten, bei denen Raumheizung bzw. Kühlung keine dominierende Rolle spielen, ermittelte OKE (1981) folgende mathematische Beziehung:

$$(51) \quad UHI_{max} = 7.45 + 3.97 \cdot \ln(H/W)$$

Die Berechnungsgleichung stellt den Nachweis für trockene Jahreszeiten und windschwache Hochdruckwetterlagen dar.<sup>560</sup>

---

<sup>560</sup>Matzarakis, Andreas: GOH und CHANG, 1999,  $UHI_{\max}$  und H/W für die Stadt Singapore in den Tropen auf der Grundlage von Lufttemperaturmesswerten um 22.00 Uhr Ortszeit, Abb. III.3, S.57.

## 8. Energieversorgung und regenerative Energien

### 8.1. Energieversorgungsstrategien

Das Energiekonzept der Bundesregierung<sup>561</sup> stützt sich auf die Transformation des Energiesystems von einer zentralen, lastoptimierten Energieversorgung hin zu einer dezentralen, intelligenten, last- und angebotsorientierten Energieversorgungsstruktur. Die Energieversorgung in Deutschland ist in dem jährlichen Energiereport des Statistischen Bundesamtes „Energie auf einen Blick“<sup>562</sup> perspektivisch dargestellt. Die Untersuchung des Fraunhofer Instituts<sup>563</sup> über die Auswirkungen des visionären Energiekonzeptes der Bundesregierung für den Zeitraum bis 2050 bezieht sich in erster Linie auf die Begrenzung des weltweiten Temperaturanstiegs im Rahmen des Klimawandels und auf die Reduzierung der globalen Kohlendioxidemissionen. Ein zentrales Ziel ist auch, den Wärmebedarf des Gebäudebestandes konsequent zu senken, um einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand mit einer Verdoppelung der energetischen Sanierungsrate von Gebäuden von jährlich einem auf zwei Prozent zu erreichen. Der Primärenergiebedarf soll somit bis zu 80% in Deutschland reduziert werden. Um eine möglichst hinreichende Versorgungssicherheit und ein robustes Energiesystem zur Wärmeversorgung bereitzustellen, ist ein Energiemix aus regenerativen Energien der solaren Bereitstellung, der Biomasse-Reststoffnutzung und der Geothermie demnach erforderlich. Die Szenarien für eine nachhaltige Energieversorgung sind durch das WBGU - Gutachten aus 2008 und 2010<sup>564</sup>, das DLR - Leitszenario 2008 und 2009<sup>565</sup>, den Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU 2010<sup>566</sup> und die WWF-Studie 2009<sup>567</sup> nachgewiesen worden.

---

<sup>561</sup>Vgl.: Energiekonzept der Bundesregierung: Fragen und Antworten zum Energiekonzept für Deutschland; Information im Internet URL <http://www.bundesregierung.de> (2012).

<sup>562</sup>Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): DESTATIS: Energie auf einen Blick, 2009.

<sup>563</sup>Forschungsverbund Regenerative Energien: Energiekonzept 2050; Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% Regenerativen Energien, Fraunhofer Institut IBP, ISE, IWES, ISFH, IZES, ZAE Bayern und ZSW, Juni 2010, S. 10 ff.

<sup>564</sup>WBGU-Gutachten (Hrsg.): Transformation 2010 und Welt im Wandel - Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung 2008.

<sup>565</sup>Institut für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) Hrsg.: Leitstudien 2008 und 2009 des Bundesministeriums für Umwelt (BMU), Ausbaustrategie Regenerative Energien vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas, Dr. J. Nitsch, Stuttgart.

<sup>566</sup>Vgl.: Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.): 100 % regenerative Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, vorläufige Fassung vom 5. Mai 2010.

<sup>567</sup>Kirchner, A.; Matthes, F.: WWF Studie Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken; Basel/Berlin; Oktober 2009.

Die Deutsche Energie-Agentur (Dena) entwickelte den Deutschen Energiewende-Index<sup>568</sup> (DEX) als Indikator für die Energiewende. Die Energiewende stellt sich aus der Sicht der deutschen Wirtschaft in Bezug zu den rechtlichen und regulativen Rahmenbedingungen zur Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung und Versorgungssicherheit als schwierig umsetzbar dar. Die Analyse der DEX-Werte zeigt, dass verbindliche Rahmenbedingungen für den Ausbau regenerativer Energien erforderlich und mit dem Ausbau der Stromnetze zu koordinieren sind. Die Voraussetzung für Wirtschaftswachstum und Wohlstand ist, dass ausreichend Energie täglich bereitgestellt, zur Deckung des Energiebedarfs ständig zur Verfügung steht und die bereitgestellte Energie bezahlbar bleibt. Der Endenergieabnehmer erwartet eine permanente Versorgungssicherheit und fordert gleichzeitig den Schutz der Umwelt und des Klimas.

Die Studie der Royal Dutch Shell Gruppe<sup>569</sup> stellt in der Untersuchung des weltweiten Energieverbrauchs zwei Szenarien gegenüber: zum einen den Anstieg von 6 auf 9 Milliarden Menschen im Jahr 2050 und zum anderen ein jährliches Wirtschaftswachstum von 3%. In beiden Szenarien wird ein Wachstum des weltweiten Energieverbrauchs angenommen. Als Ergebnis ist festzustellen, dass der Anstieg des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums zu einer Vervierfachung der Weltwirtschaftsleistung und des Wirtschaftswachstums führen wird. Der Energieverbrauch wird sich weiter vom Wirtschaftswachstum entkoppeln und sich schließlich verdoppeln. Der Wechsel vom Mineralöl zu einem endlichen fossilen Energieträger wird in beiden Szenarien als Übergangslösung auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung bewertet. Der Energieträger Erdgas soll demnach in den nächsten zwanzig Jahren in jedem Szenario eine Schlüsselrolle darstellen. ««Im Fall „Dynamics as Usual“ bildet der Energieträger Erdgas die Brücke zu den regenerativen Energien, im Fall von „The Spirit of the Coming Age“ ermöglicht es hingegen den Übergang zur Brennstoffzelle und Wasserstofftechnologie.»»<sup>570</sup> Die Analyse zeigt, dass es zukünftig zu erheblichen Verschiebungen in der Energieträgerstruktur kommen wird und der Anteil der regenerativen Energien zu Lasten der konventionellen Energieträger steigt. Die Zukunft wird durch eine Vielfalt an Energieträgern geprägt sein

---

<sup>568</sup>Vgl.: Energie Kompakt - Das Fachmagazin unabhängiger Energieberater: Gemischte Zwischenbilanz für Energiewende, Ausgabe 6/2012, S. 16; ISSN 2192-3388.

<sup>569</sup>Vgl.: Royal Dutch Shell Gruppe: Shellenergie - Szenarien Kurzfassung „Energy Needs, Choices and Possibilities - Scenarios to 2050“. „Energy Needs, Choices and Possibilities – Scenarios to 2050“, Autorin Claudia Hedrys von Shell Switzerland, S. 1-5.

<sup>570</sup>a.a.O.: Zitat S. 3.

und es steigen die Auswahlmöglichkeiten zur Abnahme der Endenergie für den Verbraucher. Im Fall des deutlichen Anstiegs der regenerativen Energien wird der Anteil fossiler Brennstoffe bis 2050 weltweit auf 60% zurückgehen. Der Anteil von Wasserkraft, Kernenergie und modernen regenerativen Energien wie Sonnenenergie, Windkraft und Biomasse wird im Jahr 2050 40% erreichen.

Die Potenzialstudie des Bundeswirtschaftsministeriums zum Ausbau von Fern- und Nahwärmenetzen aus dem Jahr 2005 prognostiziert ein hohes Umsetzungspotenzial in Städten, wenn die städtischen Energieversorger systematisch den Versorgungsschwerpunkt auf die lokale Erzeugung von Strom durch Kraft-Wärme-Kopplung legen und die bereits vorhandenen Fernwärmenetzpotenziale gezielt erhöhen.<sup>571</sup> Die politischen Entscheidungsträger fordern zu Recht den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung zur Erzeugung von elektrischem Strom zu 25%, da dann eine effiziente Erzeugung von Strom und Wärme zur Deckung des Energiebedarfs möglich ist. Die Anlagennutzungsgrade erreichen bis zu 90%.<sup>572</sup> Als ein Beispiel ist die nationale Förderpolitik der Länder Dänemark und Niederlande zu nennen, da dort die Kraft-Wärme-Kopplung zu mehr als 50% die Stromproduktion unterstützt.

Die Studie des Bremer Energieinstituts und des Deutschen Instituts für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat für das Jahr 2020 prognostiziert, dass mindestens 57% der Stromerzeugung in Deutschland auf der Basis von Kraft-Wärme-Kopplung erzielt werden könnte.

Wissenschaftliche Studien der Institute EuTech, Wuppertaler Institut, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung und der Energie-Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages kommen einstimmig zu dem abschließenden Ergebnis, dass sich der Anteil an der Stromversorgung durch die Kraftwärmekopplung bis 2020 - 2030 verdoppelt oder sogar verdreifachen wird.<sup>573</sup> Analysen von Szenarien der Energieversorgung zeigen, dass nur eine Kombination von Effizienz- und Konsistenzstrategien durch den Ausbau von regenerativen Energien die Nachhaltigkeitsdefizite der heutigen Energie-

---

<sup>571</sup>Bundeswirtschaftsministerium (BMWi): Potenzialstudie zum Ausbau von Fern- und Nahwärmenetzen. In Deutschland wurde das Bremer Energie Institut und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Stuttgart beauftragt. Die Studie wurde im Jahr 2005 durchgeführt. Informationen im Internet URL <http://www.bmwi.de> (März 2010).

<sup>572</sup>Vgl.: Antrag der Fraktion Bündnis 90/die Grünen „Klimaschutz konkret“: Im Jahr 2020 müssen in NRW mindestens 25 % des Stroms in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen produziert werden, 2007.

<sup>573</sup>Eutech -Energie und Management GmbH-: Studie „Klimaschutz: Plan B. Nationales Energiekonzept bis 2020“, 2007; Informationen im Internet URL <http://www.eutech.de> (2010).

versorgung abbauen können.<sup>574</sup> Der Bundesverband Regenerative Energie e.V. empfiehlt, dass die regionalen und städtischen Energieversorger wie auch die kommunalen Entscheidungsträger die Konzessionsvertragsverhandlungen nutzen, um einen zukunftsorientierten Strukturwandel in der städtischen Energieversorgung herbeizuführen.<sup>575</sup>

Eine zukunftsweisende Versorgungsstrategie in Städten, die von einer zentralen Erzeugung von Strom in Großkraftwerken abweicht und zu einer hocheffizienten Stromerzeugung direkt am Versorgungsstandort in städtischen Quartieren durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) führt, ist durch die Energiewende förderbar. Die deutliche Forderung durch Wissenschaft und Politik, die Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zu erhöhen zeigt, dass die Energieversorger frühzeitige Untersuchungen im Rahmen der städtischen Versorgungsplanung für eine Nah- und Fernwärmeversorgung von geeigneten Siedlungsbereichen zur Förderung der Anschlussdichte durchführen. Die Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung für die städtische Wärmeversorgung erfordert daher ein geeignetes Planungsinstrument. Wärmeatlanten, die die Wärmebedarfsdichte des städtischen Versorgungsgebietes angeben und einstufen, sind zur Planung der Energieversorgung für größere Versorgungsgebiete und Ballungszentren einzufordern.

Der Fachausschuss „Nachhaltiges Energiesystem 2050“ des Forschungsverbunds Regenerative Energien hat unter Beteiligung des Fraunhofer Instituts die Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% regenerativen Energien für Deutschland entwickelt. Das Energiekonzept orientiert sich an die ökonomischen und politischen Weiterentwicklungen und unterstützt das Entwicklungsziel, bis zum Jahr 2050 die Energieversorgung vollständig auf regenerative Energien umzustellen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanz ist somit bezogen auf das Jahr 1990 um 80-95 % reduzierbar.<sup>576</sup>

Die Analyse der Versorgungsvarianten für Kommunen<sup>577</sup> zeigt für den Wärmesektor die Nutzung von Kurz-, Mittel und saisonalen Wärmespeichersystemen, die zentral in Gebäuden oder als dezentrale Langzeitspeicher in Wärme- und Kältenetze integriert werden

---

<sup>574</sup>Fischedick, Manfred: Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland, Forschungsvorhaben für das Umweltbundesamt, UFOPLAN FKZ 20097104, Wuppertaler Institut, Juni 2002.

<sup>575</sup>Bundesverband regenerative Energie e.V., Dachverband aller Sparten der Regenerativen Energien und seiner Mitgliedsverbände und Funktionsträger, 2010; Informationen im Internet URL <http://www.bee-ev.de> (2010).

<sup>576</sup>Schmid, Jürgen: Energiekonzept 2050, Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % Regenerativen Energien, Beitrag der Institute: Fraunhofer IWES, ISFH, IZES gGmbH und Fraunhofer ISE, Fraunhofer IBP, ZAE Bayern und ZSWBerlin, Juni 2010.

<sup>577</sup>a.a.O.: S. 10.

und eine vollständige regenerative Wärmeversorgung aus der Kraftwärmekopplung ermöglichen.

Die Studie des Umweltbundesamtes "Energieziel 2050 - 100% Strom aus regenerativen Quellen" stellt insbesondere die Stromerzeugung durch regenerative Energien dar und berücksichtigt gleichzeitig den Wärmeversorgungssektor von Wohngebäuden und Haushalten in Städten.<sup>578</sup>

Die Auswertung der Studie des Verbandes der Deutschen Energieversorger (VDE) über die Entwicklung einer zukünftigen dezentralen Wärmeversorgung für Städte bis 2020 zeigt, dass grundsätzliche Überlegungen der Energieversorger (EVU) bestehen, von einer zentralen zu einer dezentralen Energieversorgung in Städten zu wechseln. Die Primärenergieeinsparung von Kohle und Erdgas zur Reduzierung der gasförmigen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus zentralen Kraftwerken ist ein primäres Ziel zur Einsparung des Energieträgereinsatzes zum Beispiel in Energieregionen.<sup>579</sup> Die Vergleichsergebnisse dieser Studie zur dezentralen Energieversorgung in Städten<sup>580</sup> beziehen sich insbesondere auf die dezentrale Strombereitstellung zur Versorgung von Wohn- und Gewerbegebieten. Die Studie zeigt im direkten Vergleich, dass die städtische Versorgungsstrategie mit Photovoltaikanlagen und solarthermischen Anlagen, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit einem Nahwärmenetz sowie Blockheizkraftwerke (BHKW) in hoch verdichteten Siedlungsgebieten mit dezentralen Wärmepumpenanlagen eine deutliche Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bewirken kann. Dezentrale kommunale Blockheizkraftwerke speisen Strom- und Wärme in Strom- und Nahwärmenetz ein, mit dem Vorteil der Flexibilität in der Wahl des Energieträgers.

Für den europäischen Energieversorgungssektor prognostiziert die VDE-Studie<sup>581</sup> bis zum Jahr 2020, dass die dezentrale Wärmeversorgung einen Anteil am Gesamtwärmebedarf von bis zu 22% in Deutschland erreichen kann, wenn Kraft-Wärme-

---

<sup>578</sup>Umweltbundesamt (UBA) Hrsg.: Energieziel 2050: 100 % Strom aus regenerativen Quellen, Vorabdruck für die Bundespressekonferenz am 7. Juli 2010, Autorenbeiträge: Klaus, Thomas; Vollmar, Carla; Werner, Kathrin; Lehmann, Harry; Müschen, Klaus., Auftragnehmer des Forschungsprojektes "Modellierung einer 100-Prozent regenerativen Stromerzeugung in 2050", FKZ 363 01 277, Juli 2010.

<sup>579</sup>Verein Deutscher Energieversorger (VDE): Studie über die dezentrale Energieversorgung 2020, Juli/August 2007, vorgestellt der Öffentlichkeit durch den Vorsitzenden der ETG im VDE und Mitglied im VDE-Präsidium Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröppel und durch Dipl.-Ing. Martin Pokojski von Vattenfall Europe Berlin, VDE-Dialog Nr.4, ISSN 1618-422X.

<sup>580</sup>Ebd.: Dezentrale Energieversorgung 2020, Referenzjahr 2007.

<sup>581</sup>Vgl.: VDE Studie: Dezentrale Energieversorgung 2020, Zusammenfassung in VDE Dialog, Juli/August 2007, S. 10-11; in VDE Dialog, Juli / August 2007, Informationen im Internet URL <http://www.vde.com/reports>.

Kopplungsanlagen eingesetzt werden. Die elektronische Steuerung durch Microgrids<sup>582</sup> führt zu einer Zusammenschaltung, Steuerung und Bündelung von selbständigen dezentralen Einheiten und zur Bildung von virtuellen Kraftwerken. Das Steuerungsinstrument Microgrids ist ein in sich geschlossenes Energieversorgungssystem zur optimalen Nutzung der dezentral erzeugten Energie. Im Fall einer Betriebsstörung im Übertragungs- oder Verteilungsnetz greift die GRID-Steuerung auf die dezentralen Erzeugungseinheiten zu und garantiert eine optimale lokale Energieversorgung. Diese zukunftsweisende Versorgungsstrategie erfordert ein internetgestütztes Echtzeit-Energiemanagement zur Effizienzsteigerung für die angeschlossenen Versorgungseinheiten mit unterschiedlichen Energieträgern.

Die Kurzanalyse der TU München und der Deutschen Energieagentur<sup>583</sup> stellt eine Analyse zur Kraftwerksplanung von modernen Kraftwerken<sup>584</sup> in Deutschland vor. Der Kraftwerksbestand nutzt insbesondere fossile Energieträger wie Steinkohle, Braunkohle, Kombi-Gas und Erdgas zum Betrieb von Gasturbinenkraftwerken. Die Verträge über die Laufzeiten von älteren Kraftwerksanlagen sind überwiegend auf 50 Jahre festgelegt.<sup>585</sup> Die Studie zeigt, dass auch bei wechselnder Stromnachfrage bis zum Jahr 2020 weiterhin hocheffiziente Kraftwerksanlagen mit fossilen Energieträgern zur Energiebereitstellung benötigt werden. Die Entwicklung der Nettoengpassleistung<sup>586</sup> bestehender konventioneller Kraftwerke wird sich demnach bis zum Jahr 2030 drastisch auswirken.

Die Deutsche Energieagentur stellt die Ergebnisse der Expertenbefragung zum Kraftwärme-Kopplungsausbau (KWK) im Rahmen der Energiemarktentwicklung vor. Insbesondere die Rahmenbedingungen zur Gewährleistung einer sicheren, nachhaltigen und risikoarmen Energieversorgung legen die Lastverlagerungen in Schwachlastzeiten durch KWK-Anlagen fest.<sup>587</sup> Der Stromanteil an der Bruttostromerzeugung in Deutschland für das

---

<sup>582</sup>Energy Systems Siemens: Definition Microgrids sind in sich geschlossene regionale Energiesysteme, in die sowohl dezentrale Energieerzeuger als auch Verbraucher und wahlweise Speicher eingebunden sind. Informationen im Internet URL <http://www.energy.siemens.com/hq/de/energy-themen/smart-grid/intelligent-power-technologies>. (2015).

<sup>583</sup>Deutsche Energie-Agentur (dena): Kurzanalyse der Kraftwerksplanung in Deutschland bis 2020 (Aktualisierung), Annahmen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen, Februar 2010, Berlin.

<sup>584</sup>Ebd.: Kraftwerksbestand in Deutschland: gesicherte Leistung unterschiedlicher Kraftwerksarten. TU München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2008.

<sup>585</sup>Ebd.: Annahmen zu Laufzeiten fossil befeuerter Kraftwerke, Februar 2010, Berlin, Folie 9.

<sup>586</sup>Ebd.: Entwicklung der Nettoengpassleistung bestehender konventioneller Kraftwerke von 2005 bis 2030 für Heizöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle, Kernenergie, Vortrag Folie 11.

<sup>587</sup>Ebd.: Annahmen zu der Entwicklung der KWK in Deutschland bis 2030 in Leistung, Volllaststunden und Stromerzeugung von 2005 bis 2030, Folie 17.

Jahr 2030<sup>588</sup> aus regenerativen Energien durch Geothermie und Biomasse wird im Gegensatz zum Jahr 2005 unterschiedlich prognostiziert.<sup>589</sup>

Die Datenerhebung des Statistischen Bundesamtes von Städten und Gemeinden in Deutschland zeigt, dass sich 90 von 11.993 Städten und Gemeinden von der Versorgungsabhängigkeit des kommunalen Energieversorgers abgewandt und die Gesamtenergieversorgung für das Versorgungsgebiet in eigener Verantwortung übernommen haben.<sup>590</sup> Weitere Auswirkungen der autarken Energieversorgung zeigen sich im Zuwachs der regionalen Wertschöpfung mit der Zunahme von Arbeitsplätzen und des Anstiegs der Gewerbesteuereinnahmen.<sup>591</sup>

Praktizierte Strategieansätze für die nachhaltige Energieversorgung von Regionen sind die Effizienzstrategie, Konsistenzstrategie und die Suffizienzstrategie. Die Effizienzstrategie ermöglicht mit geringem Energieeinsatz, Endenergie bereitzustellen. Die Konsistenzstrategie garantiert mit der notwendigen Energiesicherheit ressourcenschonenden und naturverträglichen Wohlstand unter Berücksichtigung umweltverträglicher Energieträger und Energierohstoffe, die Umwelt- und Ökosysteme entlasten. Die Suffizienzstrategie erfordert, den absoluten Energieverbrauch und Produkte sowie Dienstleistungen auf ein verantwortbares Maß zu reduzieren. Der Energieverbrauch ist nachhaltig zu steuern, so dass innerhalb einer Generation und insbesondere generationsübergreifend Ressourcen geschont werden. Für die Umsetzung dieses Strategieansatzes sind Bewusstseins- und Verhaltensänderungen in der Gesellschaft erforderlich.<sup>592</sup>

Die Studie „Renewables 2011“ der Deutschen Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit bestätigt, dass eine Unterstützung der Energieversorgung an der kommunalen Energieversorgung nur mit regenerativen Energien realisierbar ist. Der statistische Datenvergleich des globalen Anteils von regenerativen Energien zeigt, dass ein Zuwachs und

---

<sup>588</sup>Ebd.: Stromerzeugung aus Regenerativen Energien in Deutschland bis 2030 in TWh/a von 2005 bis 2030, Folie 15.

<sup>589</sup>Vgl.: Deutsche Energie-Agentur (dena): Kurzanalyse der Kraftwerksplanung in Deutschland bis 2020. Vortrag: Effizienz entscheidet, Eingangsdaten Untersuchung: Zwei Szenarien für die Entwicklung der Stromnachfrage; Entwicklung der bestehenden fossilen und nuklearen Stromerzeugungskapazität; Ausbau regenerativer Energien gemäß BMU-Leitszenarion 2009; Berücksichtigung aktueller Investitionen in fossilen Kraftwerken, Februar 2010, Folie 3, Berlin.

<sup>590</sup>Statistisches Bundesamt (Hrsg.): DESTATIS: Statistisches Jahrbuch 2011, Nr. 2 Bevölkerung, Nr. 2.6 Gemeinden und Bevölkerung am 31.12.2009 nach Gemeindegrößenklassen und Ländern, Wiesbaden, 2011, S.40.

<sup>591</sup>Vgl.: Agentur für Regenerative Energien: Energieversorgung in Deutschland unter Informationen im Internet URL <http://www.unendlich-viel-energie.de> (2010), [www.kommunal-erneuerbar.de](http://www.kommunal-erneuerbar.de) (2010) Regenerative Energien Potenzialatlas 2020.

<sup>592</sup>Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien (Hrsg.): Kompass für die Entwicklung nachhaltiger 100%-Erneuerbare-Energie-Regionen, Kassel, 2010.

eine stetige Entwicklung von regenerativen Energien am gesamten Endenergieverbrauch weltweit zu verzeichnen ist.<sup>593</sup> Der Anteil an regenerativen Energien ist demnach weltweit jährlich um 8,9%<sup>594</sup> angestiegen.

Die Arbeitsgemeinschaft regenerativer Energien (AGEE-Stat) analysiert jährlich den Energiemarkt in Deutschland und schließt daraus, dass die regenerativen Energien für die städtische Energieversorgung sich insbesondere aus Biomasse, biogenem Anteil des Abfalls und der Solar- und Geothermie zusammensetzen.<sup>595</sup>

Das Bundesumweltministerium in Deutschland veröffentlicht jährlich statistische Daten zum Stand des Ausbaus von regenerativen Energien. Demnach konnte ein Gesamtanteil von 20,1% bereits im Jahr 2011 mit regenerativen Energien erreicht werden. Die Wärmeversorgung wird mit der Unterstützung von regenerativen Energien zu 10,4% bereitgestellt und trägt zu einem Gesamtanteil von 12,2% am gesamten Endenergieverbrauch von Strom und Wärme in Deutschland bei.<sup>596</sup>

Die Studie des Fachausschusses des Forschungsverbunds Regenerative Energien "Nachhaltiges Energiesystem 2050" untersucht den Endenergieverbrauch der privaten Haushalte zur Bereitstellung von Raumwärme in Deutschland. Die Bewertungsgrundlage zur Prognose des Endenergieverbrauchs bezieht sich auf Grundlage von beheizbaren Wohnflächen in Gebäuden. Ein Anstieg der beheizbaren Wohnflächen von 3,2 Mrd. m<sup>2</sup> bis 3,5 Mrd. m<sup>2</sup> wird bis zum Jahr 2050 prognostiziert. Bei einer durchschnittlichen Effizienzerhöhung von 80% der Heizungsanlagentechnik für Gebäude würde demnach der spezifische Nutzenergiebedarf für die Raumwärmebereitstellung auf 464TWh/a ansteigen und der flächenbezogene Jahresheizwärmebedarf für alle bestehenden Wohngebäude im Durchschnitt 144kWh/m<sup>2</sup>a betragen.<sup>597</sup> Im Gegensatz dazu erreicht die Förderung des Passivhausstandards für den Gebäudebestand<sup>598</sup> einen jährlichen Jahresheizwärmebedarf von 15 kWh/m<sup>2</sup>a oder weniger und könnte bis zum Jahr 2050 eine Reduzierung des Wärme-

---

<sup>593</sup>Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) Hrsg.: Renewables 2011, Global Status Report, REN 21 – Renewable Energy Policy Network for the 21 century, Paris, 2011.

<sup>594</sup>Ebd.: S. 76 (Tabelle R7) 2011.

<sup>595</sup>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Regenerative Energien 2010: Daten des BMU zur Entwicklung der Regenerativen Energien in Deutschland im Jahr 2010 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Regenerative Energien-Statistik (AGEE-Stat), 14.März 2011, Daten aus dem Anhang S.19 – 24.

<sup>596</sup>BMU - KI III 1: Struktur der Stromerzeugung aus regenerativen Energie in Deutschland im Jahr 2011, Arbeitsgruppe Regenerative Energien-Statistik (AGEE-Stat), Februar 2012.

<sup>597</sup>Vgl.: Forschungsverbund Regenerative Energien: Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% Regenerativen Energien, Fraunhofer IBP, Juni 2050, S. 29.

<sup>598</sup>a.a.O.: S. 29 ff.

energieverbrauchs erzielen. Zur Unterstützung dieses Ziels ist ein jährlicher Anstieg der kommunalen Sanierungsrate im Gebäudebestand jedoch bis zu 3,3% durch Fördermaßnahmen zu gewährleisten.

Statistische Modellrechnungen zur Entwicklung regenerativer Energien in Regionen und Kommunen bilanzieren, dass für das Jahr 2020 ein Rückgang des jährlichen Jahresheizwärmebedarfs im Wohngebäudebestand von circa 100 kWh/m<sup>2</sup>a auf 30 kWh/m<sup>2</sup>a erwartet wird. Der Nutzenergiebedarf zur Bereitstellung von Raumwärme für Wohngebäude im Bestand würde sich demnach im Jahr 2050 auf 93,1TWh/a reduzieren und einen jährlichen Jahresheizwärmebedarf von circa 26,4 kWh/m<sup>2</sup>a in Gebäuden erreichen.<sup>599</sup>

## **8.2. Nachhaltige Energieversorgung und Energiemarktwirtschaft**

Im Interesse einer zukunftsfähigen, nachhaltigen Energieversorgung, angesichts der nur begrenzten Verfügbarkeit fossiler Energieressourcen sowie aus Gründen des Umwelt- und Klimaschutzes hat sich die Bundesrepublik Deutschland zum Ziel gesetzt, den Anteil regenerativer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahr 2020 auf 14% zu erhöhen. Der Import fossiler Energieträger wie Mineralöl, Erdgas und Kohle führt zu einem jährlich steigenden Energiemarktzuwachs in Deutschland wie auch in den Exportländern, die Erdgas und Erdöl zur Verfügung stellen. Einflüsse durch Versorgungsengpässe und Lieferausfälle der Exportländer, natürliche und weltpolitische Ursachen, Konflikte und Preisrisiko beeinflussen die Versorgungssicherheit. Der Rückgang der Nachfrage an fossilen Energieträgern durch Substitutionsstrategien hat langfristigen Einfluss auf die Senkung der Weltenergiepreise und induziert eine mögliche Steigerung des Bruttoinlandsproduktes in Deutschland. Die sich abzeichnenden Verknappungstendenzen der Reserven von Rohöl und Erdgas spiegeln sich auch in den statistischen Reichweiten der Reserven wider. Bei einem gegenwärtigen Verbrauch hat Erdöl eine Reichweite von 62 Jahren, wenn Schweröle, Ölsande und Ölschiefer einbezogen werden. Erdgas dagegen wird bei gleichbleibendem Verbrauch noch circa 64 Jahre und Kohle noch etwa 200 Jahre zur Verfügung stehen.<sup>600</sup>

Der durchschnittliche Energiepreis für Heizöl EL in Deutschland ist aufgrund von globalen politischen wie auch wirtschaftlichen Krisen erheblichen jährlichen Schwankungen

---

<sup>599</sup> a.a.O.: S. 34.

<sup>600</sup> Bundesumweltministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Erneuerbare Energien – Innovation für die Zukunft, Berlin, 2004, S. 6ff.

unterworfen, die deutliche Preissteigerungen<sup>601</sup> für die Endenergieverbraucher verursachen. Politische Strömungen wie zum Beispiel die Weltwirtschaftskrise erzeugen einen Rückgang der Energienachfrage und somit einen Rückgang des Rohöl-Einfuhrpreisindex. In den Jahren 2010 bis 2014 beispielsweise ist in den USA die Schieferölfördertechnologie erfolgreich weiterentwickelt worden und führte dazu, dass der Öl-Boom in den USA zu einer Sättigung des US-Ölmarktes tendierte. Unterstützt von Naturkatastrophen, wie zum Beispiel flächengroße Waldbränden in Kanada, Erdbeben, Überflutungen etc., reagiert der Weltölmarkt völlig unerwartet und wurde mit starken Produktionsausfällen in mehreren Ölexportländern konfrontiert. Weitere wirtschaftliche Maßnahmen wie die Beschränkung der Rohölfördermenge auf 32,5 bis 33 Millionen Barrel erwirken die Festlegung von weltweiten Förderquoten. Die OPEC stellt im Jahresbericht 2015<sup>602</sup> die Unterstützung der regenerativen Energien und Energieeffizienz langfristig in Aussicht.

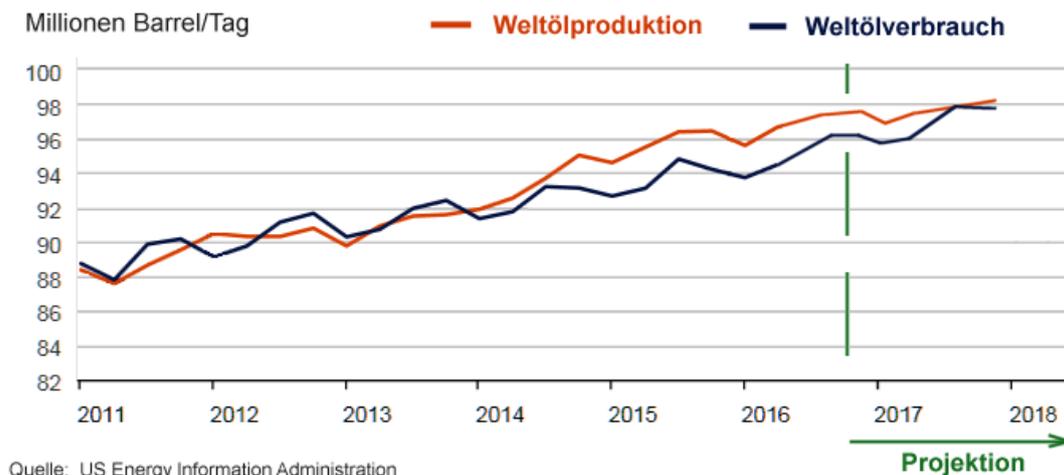


Abbildung 68: Weltölproduktion und Weltölverbrauch

In der Abbildung 68 ist anhand des Verlaufs der Weltölproduktion erkennbar, dass der weltweite Energieträgerbedarf von Rohöl stetig ansteigt.<sup>603</sup> Der Preis des Rohöls setzt sich von der Entwicklung der Preisindizes für Erdgas und Steinkohle stark ab. Die Steuer- und Abgabenbelastung für Erdgas zum Beispiel für Haushalte beeinflusst den Energie-

<sup>601</sup>Vgl.: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Zahlen und Fakten, Energiedaten, Stand 7.09.2010.

<sup>602</sup>OPEC (Hrsg.): Annual Report 2015, Organization of the Petroleum Exporting Countries, Public Relations and Information Department, Vienna, 2016.

<sup>603</sup>Vgl.: Entwicklung der Erdölpreise. Information im Internet unter URL <http://www.tecson.de/historische-oelpreise.html> (2016).

preis.<sup>604</sup> Der Energiepreis für Erdgas bildet sich aus 70% Import-, Transport-, Produktions- und Verteilungsdienstleistung sowie aus der Erdgassteuer (9%), Mehrwertsteuer (16%) und der Konzessionsabgabe von 2%.

Das Deutsche Wirtschaftsinstitut<sup>605</sup> prognostiziert, dass ein flächendeckender Ausbau mit regenerativen Energien zu einer langfristigen Erhöhung der Endenergiepreise auf der Grundlage der fossilen Energieträger beitragen wird. Da das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2004)<sup>606</sup> an der Markteinführung regenerativer Energien beteiligt ist, besteht ebenso ein Einfluss auf den Energiepreis fossiler Energieträger. Trotz der Erfolge bei der Energieeinsparung sind die flächenspezifischen Heizenergiekosten der Haushalte angestiegen. Dies ist insbesondere auf einen gestiegenen Heizölpreis zurückzuführen. Sollten die Energiepreise - wie in den meisten Energieszenarien angenommen - weiter steigen, können zusätzliche Energieeinsparungen helfen, die Energiekosten der Haushalte stabil zu halten.<sup>607</sup>

Der Betrieb von Heizungsanlagen mit fossilem Energieträgereinsatz verursacht hohe Betriebs- und Investitionskosten für den Anlagenbetreiber, die auf den Endenergieabnehmer umgelegt werden, denn der Preisanstieg wird von dem Wohnungsvermieter an den Mieter weitergegeben. Die jährliche Energiepreiserhöhung bietet für die Kommunen eine genügende Argumentationsgrundlage für die Planung mit regenerativen Energien zur Substitution von fossilen Energieträgern zur Bereitstellung von Warmwasser, Raumwärme und Klimakälte.

### **Strategie durch Förderprogramme**

Förderprogramme der Europäischen Union unterstützen das Wirtschaftswachstum, den Beschäftigungsmarkt und gleichzeitig globale Maßnahmen des Klimaschutzes. Die Verpflichtung zur Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen ist, insbesondere an die Förderung regenerativer Energien und an eine Reduzierung des Verbrauchs an fossilen Energie-

---

<sup>604</sup>Vgl.: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Steuer- und Abgabenbelastung für Haushalte für Erdgas, Stand 8.01.2010; Informationen im Internet URL <http://www.bdew.de> (2011).

<sup>605</sup>Kemfert, Claudia: Neue Kohlekraftwerke wären ein riesiges Problem, Wochenbericht des DWI Berlin, Nr. 23, 2010, S. 10.

<sup>606</sup>Bundesministerium für Umwelt (BMU): Mindestvergütungssätze nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 21. Juli 2004, Z III 1, Stand Juli 2004, S.1-17.

<sup>607</sup>Deutsches Wirtschaftsinstitut (Hrsg.): Wärmemonitor Deutschland 2013 in DWI Wochenbericht Nr.41, 2014, S.1027.

trägern gekoppelt. Das Förderprogramm „Intelligente Energie-Europa“ (IEE)<sup>608</sup> zum Beispiel ist ein nichttechnologisches Förderprogramm, das einen nachhaltigen Energieträgereinsatz in Städten und Gemeinden vor dem Hintergrund der Ressourcenverfügbarkeit unterstützt.

Der Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), der Europäische Sozialfonds (ESF) und der Kohäsionsfonds (KF) sind regionale Strukturprogramme, die Finanzierungsinstrumente für die technische Unterstützung gewährleisten, den Zugang von Klein- und Mittelbetrieben zu Mikrofinanzierungen verbessern und die nachhaltige Stadtentwicklung - auch mit regenerativer Energie - langfristig unterstützen.

Auf der nationalen Staatenebene fördern staatliche Einrichtungen wie das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) in Deutschland Maßnahmen zur Nutzung regenerativer Energien im Rahmen des Marktanreizprogramms des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit nach den Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung regenerativer Energien im Wärmemarkt. Im Interesse dieser Zielsetzungen von regionalen Förderprogrammen werden die Förderbedingungen, technischen Anforderungen und Umweltstandards der Richtlinien sowie die Marktentwicklung der regenerativen Technologien kontinuierlich überprüft und die Richtlinien zur Nutzung bei Bedarf angepasst.<sup>609</sup>

Mit der Ausweitung der europäischen und nationalen Förderung kommunaler Nahwärmenetze und folglich der verstärkten Integration von regenerativen Energiesystemen in der kommunalen Energieversorgung ist gleichzeitig der verstärkte Ausbau von Nahwärmenetzen, Hausübergabestationen und großvolumigen Warmwasserwärmespeichern angestiegen.<sup>610</sup> Die Nahwärmenetzplanung in städtischen Versorgungsgebieten zur Reduzierung der Wärmeverluste passt sich an die städtischen Gegebenheiten wie Straßenführung, Gebäudeanordnung, Wärmeabnehmer etc. an und berücksichtigt kurze Rohrleitungswege und geringe Leitungsdurchmesser. Die Wahl der Netzstruktur<sup>611</sup>, Trassenlänge und Verlegungssysteme beeinflusst die Höhe der Investitionskosten und schließlich den Eigenan-

---

<sup>608</sup>Vgl.: Presseartikel IP/09/513 - Kommission stellt 15 Mio. € zur Förderung von Investitionen für nachhaltige Energie bereit. Information im Internet unter URL <http://www.europa.eu/rapid/pressReleasesAction.de> 2009, Brüssel.

<sup>609</sup>Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA): Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung regenerativer Energien im Wärmemarkt vom 11. März 2011.

<sup>610</sup>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt, 2015.

<sup>611</sup>a.a.O.: Nahwärme-Netzstruktur: Ringnetz, Maschennetz, Strahlennetz, Haus – zu – Haus –Trassenführung, Keller zu Keller Verbindungen, S. 94.

teil an der beantragten staatlichen Förderung. Die standortbedingten Kosten für die Leitungsverlegung des Nahwärmenetzsystems sind von einer Vielzahl von Faktoren<sup>612</sup> abhängig, die auch die Investitionskosten beeinflussen.

Der regionale Beschäftigungsmarkt ist durch den Ausbau regenerativer Energien in Deutschland seit 2004 gestiegen.<sup>613</sup> Die Studie des Bundesumweltministeriums stellt dar, dass die Beschäftigungsdynamik insbesondere auf das Erneuerbare-Energien-Gesetz zurückzuführen ist.<sup>614</sup> Der Beschäftigungsanstieg ist Ursache eines zunehmenden wettbewerbsorientierten Marktumfeldes, der aufgrund des Beschlusses der Energiewende und Beteiligung internationaler Akteure initiiert wurde. Ein Beschäftigungszuwachs<sup>615</sup> konnte durch Marktstudien zum Beschäftigtenmarkt seitdem in den Branchen<sup>616</sup> Windenergie, Biomasse und Solarenergie festgestellt werden. Für den Arbeitsmarkt im regionalen Produktionsgewerbe von regenerativen Energieanlagen sind weitere Beschäftigungspotenziale erzeugt worden. Insbesondere die Beschäftigungsstruktur zur Anlagenherstellung der Windkraft und Solarenergie sowie die Sicherstellung von Betriebs- und Wartungsleistungen erhöht langfristig die Bruttobeschäftigung in Deutschland. Die Energiewende mit regenerativen Energien erfordert eine Finanzierung gerade in Zeiten der Finanzmarktinstabilität. Mit dem Ausbau der regenerativen Energien rücken Erweiterung, Ausbau und Optimierung der Energieversorgungsnetze in das Zentrum der politischen Entscheidungen, die Einfluss auf Regionen und Städte haben. Studien zur Bereitstellung von Investitionen durch PROGNOSE<sup>617</sup> zeigen, dass zum Jahr 2030 eine starke finanzielle Förderung des Energiemarktes mit regenerativen Energien erforderlich ist. Daher sind Untersuchungen zur Kosten- und Nutzenanalyse für den Ausbau von regenerativen Energien im

---

<sup>612</sup>a.a.O.: S. 95, Abbildung 4-5 (Spanne der Verlegekosten in Abhängigkeit der Verrohrung und Verlegeart).

<sup>613</sup>Umweltbundesamt (UBA) Hrsg.: Forschungsvorhaben der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung – GWS Osnabrück- unter Mitarbeit der Institute: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung –DIW Berlin-, Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt –DLR, Stuttgart, Prognos AG Berlin, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg –ZSW Stuttgart-, Untersuchungen zu den Arbeitsplatzwirkungen der Regenerativen Energien, UBA-FB 0001574/2008.

<sup>614</sup>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Umwelt, Heft 5, Mai 2012, Autor: Referat KI III,1, Allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten Regenerativen Energien, Titel Fachartikel: Jobmotor Regenerative, S. 7-8, 2012.

<sup>615</sup>Ebd.: S.7 (Aktuelle Arbeitsplatzzahlen).

<sup>616</sup>Ebd.: Beschäftigung durch den Ausbau Regenerativer Energien – Heute und Morgen: Beschäftigung in den Branchen Windenergie, Biomasse, Solarenergie, Wasserkraft und Geothermie (2011). Schätzungen des Bundesumweltministeriums von 2004 bis 2011, Abbildung S. 7.

<sup>617</sup>Vgl. Prognos (2010): Investitionen durch den Ausbau regenerativer Energien in Deutschland. Prognos (2011) - Konsequenzen eines Ausstiegs aus der Kernenergie bis 2022.

Strom- und Wärmebereich für eine langfristige Wirkungsbetrachtung unter Berücksichtigung der zukünftigen wirtschaftlichen Effekte unabdingbar.

### 8.3. Bevölkerungsentwicklung in Städten und Endenergiebedarf

Die zunehmende Weltbevölkerung, die fortschreitende Industrialisierung der Schwellen- und Entwicklungsländer und die hochtechnisierte Lebensweise der Industrienationen sind verantwortlich für einen steigenden Bedarf an weltweiten Energiemengen. Innerhalb von 45 Jahren ist eine Verdreifachung des Energieverbrauchs von 4 Milliarden Tonnen Öleinheiten auf mehr als 11 Milliarden Tonnen Öleinheiten zu verzeichnen.

**Entwicklung der Weltbevölkerung von 1950 mit Projektion bis 2050**

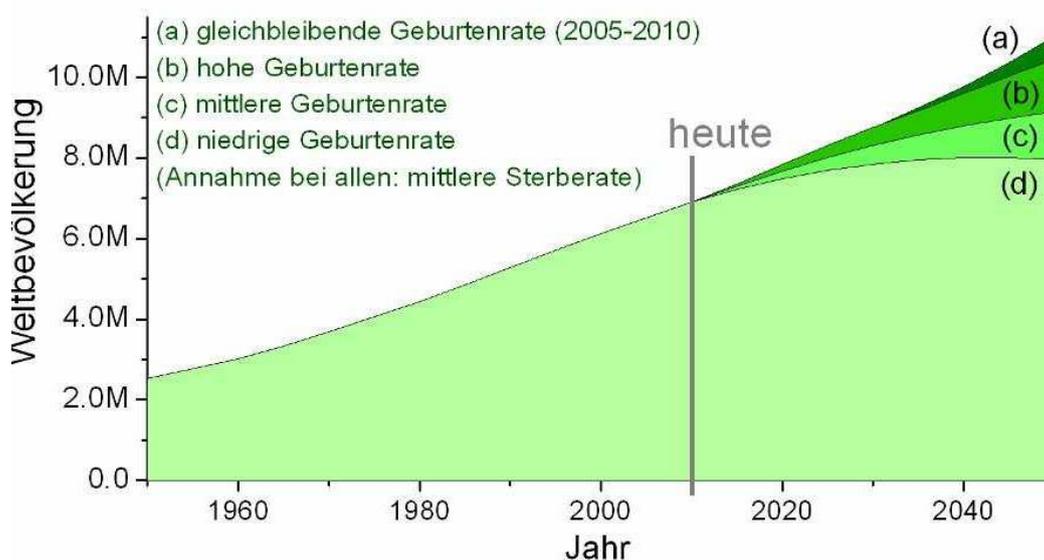


Abbildung 69: Entwicklung der Weltbevölkerung von 1960 bis 2050

Die Abbildung 69 stellt die Entwicklung der Erdbevölkerung<sup>618</sup> mit einem Zuwachs von circa 80 Millionen Menschen bis zum Jahr 2050 bei gleichbleibender Geburtenrate dar. Moderate Hochrechnungen prognostizieren einen Anstieg der Weltbevölkerung auf neun Milliarden Menschen.<sup>619</sup>

Die zu erwartende Tendenz der demographischen Bevölkerungsentwicklung in Deutschland ist für den Endenergieverbrauch von erheblicher Bedeutung. Die Bevölkerungszahl ist seit 2005 aufgrund sinkender Geburtenraten rückläufig. Die Anzahl der Haushalte ist

<sup>618</sup>Vgl.: Globaler Energieverbrauch und Auswirkungen, Information im Internet URL <http://www.regenerative-zukunft.de/aktuellelage> (2012).

<sup>619</sup>Quelle: Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects, 2008.

infolge des Trends zu kleineren Haushalten deutlich stärker gestiegen. Die beheizbare Wohnfläche der Haushalte in Deutschland wird auf circa 40,1 Mio.m<sup>2</sup> geschätzt und hat in 25 Jahren um etwa 5 Mio.m<sup>2</sup> bzw. 15% zugenommen. Höhere Bevölkerungs- und Haushaltszahlen schlagen sich unmittelbar im Endenergieverbrauch nieder. Die seit 1990 veränderten demografischen Rahmenbedingungen bewirkten einen um 2% höheren Endenergieverbrauch. Die Entwicklung des Gesamtenergieverbrauchs ist ebenso abhängig von der Dynamik des sektoralen und gesamtwirtschaftlichen Wachstums wie auch von der Kopplungsstrategie zwischen Strom- und Wärmeerzeugung. Die Auswirkungen des soziodemographischen Wandels auf die Ressourcenschonung und den Klimaschutz sind vor dem Hintergrund der kommunalen Bevölkerungsentwicklung durch Institute und das statistische Bundesamt untersucht worden. Der für Deutschland prognostizierte Bevölkerungsrückgang um circa 9% in dem Zeitraum von 2005 bis 2050, nach statistischer Datengrundlage des Statistischen Bundesamtes, bewirkt einen Rückgang des Gesamtenergiebedarfs und der Schadstoffbelastung aus Heizungsanlagen.<sup>620</sup>

Die Analyseergebnisse von Untersuchungen des Umweltbundesamtes zur demographischen Situation in Regionen und Städten in Deutschland geben Aufschluss über einen möglichen Rückbau von Wohnungen in Städten durch die Zunahme von leerstehenden Wohnungen in der Zukunft. Dieser erwartete Rückbau ist vor allem unter dem Gesichtspunkt der Energie- und Ressourceneffizienz zu betrachten und kann ebenfalls die Netzinfrastrukturen der städtischen Energieversorgung verändern. Leerstände von Wohnungen in Schrumpfungsgebieten haben beträchtliche Auswirkungen auf die Erhöhung des Heizwärmeverbrauchs von Mehrfamilienhäusern. Theoretische Modellrechnungen haben ergeben, dass bei ungünstiger Verteilung der noch genutzten Wohnungen in einem Geschosswohnungsbau der jährliche Heizwärmebedarf je m<sup>2</sup> genutzter Wohnfläche um 31% höher ist als bei einer Vollnutzung eines Wohngebäudes.<sup>621</sup>

Zum Beispiel wird für das Bundesland Sachsen mit einem hohen Anteil an Fernwärmeversorgung aufgrund des Rückgangs der Stadtbevölkerung und des dadurch erwarteten Wohnungsleerstandes ein um 4% erhöhter Heizwärmeverbrauch prognostiziert.<sup>622</sup>

---

<sup>620</sup>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Energie in Deutschland: Trends und Hintergründe zur Energieversorgung, Aktualisierte Ausgabe, S. 13, August 2010.

<sup>621</sup>Umweltbundesamt (Hrsg.): Soziodemographischer Wandel in Städten und Regionen – Entwicklungsstrategien aus Umweltsicht, Texte 18/07, Forschungsbericht 20516100, Prof. Dr. Müller, S. 67 – 71, 2007.

<sup>622</sup>Deilmann, Gruhler, Böhm (Hrsg.): Modellbundesland Sachsen, 2005, S.78ff.

Siedlungen mit niedriger Siedlungsdichte bedürfen längere Fernwärmenetzlängen als mehrgeschossige Zeilen- und Blockbauweisen mit hoher Siedlungsdichte.<sup>623</sup> Das Verhältnis zwischen Leitungslänge, Wärmeabnahme, Wirkungsgrad der Heizung, Zahl der Endnutzer und der durchschnittlichen Wohnflächennutzung ist maßgebend für eine effiziente Fernwärmeversorgung. Als Richtwerte gelten für Wohngebiete eine Geschossflächenzahl von größer als 1,0 sowie eine Netzlänge von 0,5 bis 1,0m je angeschlossener Wohnungseinheit. Der Rückgang des Wärmebedarfs ist kleinräumig unterschiedlich und tendenziell in den Randbereichen einer Stadt am stärksten. Die Infrastruktur der Fernwärmeversorgung kann somit nur eingeschränkt an den Bedarfsrückgang angepasst werden. Es ist damit zu rechnen, dass in Städten mit sinkender Bevölkerungszahl in Zukunft weite Bereiche nicht mehr mit Fernwärme versorgt werden können.<sup>624</sup> Eine Umstellung der Wärmeversorgung auf andere Energieträger ist daher energiepolitisch ungünstig, da die Effizienzvorteile der Kraft-Wärme-Kopplung nicht mehr genutzt werden können.

Die Studie des Umweltbundesamtes stellt dar, dass der Einsatz regenerativer Energien zur Heizwärmeversorgung entweder über kleine Anlagenleistungen zur Beheizung von Gebäuden oder aber über dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Nah- und Fernwärmenetzen und Kraftwerken erfolgen sollte.<sup>625</sup> Bei Fernwärmenetzen besteht keine Anschlusspflicht über die Haushalte, sodass Nahwärmenetze in Städten mit sinkender Bevölkerungszahl nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können.

Die Prognose zur Änderung der Versorgungssituation zum Beispiel in der Stadt Chemnitz zeigt, dass eine Umstellung der Fernwärmeversorgung auf fossile Energieträger als energiepolitisch ungünstig beurteilt wird, da die Effizienzvorteile der Kraft-Wärme-Kopplung nicht mehr genutzt werden können.<sup>626</sup>

## **8.4. Umweltschutz und Energieversorgung**

Der Anlagenstandort und der Betrieb von Anlagen zur Energieerzeugung werden im Genehmigungsverfahren nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und den dazugehörigen Verordnungen geprüft und genehmigt. Die Genehmigungsvoraussetzungen

---

<sup>623</sup>Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung (Hrsg.): Kriterien zur Bestimmung angemessener Dichten in Wohnquartieren schrumpfender Städte aus Sicht der städtischen Infrastruktur: Christiane Westphal, Dissertation, ISBN 978-3-933053-34-3, Dresden, 2008, Information aus dem Internet URL <http://www.ioer.de>.

<sup>624</sup>Umweltbundesamt (Hrsg.): Soziodemographischer Wandel in Städten und Regionen – Entwicklungsstrategien aus Umweltsicht, Texte 18/07, Forschungsbericht 20516 100, Prof. Dr. Müller, S. 70, 2007.

<sup>625</sup>Ebd.: S. 70 ff.

<sup>626</sup>Vgl.: Marschke (2006).

nach dem BImSchG werden im Genehmigungsverfahren nach den Emissionsanforderungen der Technischen Anleitung (TA Luft)<sup>627</sup> geprüft. Diese Verwaltungsvorschrift berücksichtigt Anlagen, die seit dem 01.10.2002 eine Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb nach §§6 und 16 BImSchG (Stand 2002) erhalten haben. Anlagen, die vor dem Jahr 2002 oder vor dem Erlass des BImSchG (1974) genehmigt worden sind, unterliegen der Anzeigepflicht nach § 67 (2) BImSchG. Das Emissionsverhalten der Anlagen ist an den Stand der Technik zum Schutz der Umwelt anzupassen.

Der Abstand von Energieerzeugungsanlagen zur Nachbarbebauung erfolgt nach dem Abstandserlass<sup>628</sup> aus Nordrhein-Westfalen und gibt Richtwerte für den Abstand des Anlagenstandortes zu schutzbedürftigen Flächen, Gebäuden und städtischen Quartieren vor. Anlagen zur Erzeugung von Strom- und Wärmeenergie sind dem Anlagenkatalog der 4. BImSchV zugeordnet und unterliegen den immissionsschutzrechtlichen Anforderungen nach dem BImSchG.

Bei raumbedeutsamen Planungen<sup>629</sup> sind die für eine bestimmte Nutzung vorgesehen Flächen einander so zuzuordnen, dass schädliche Umwelteinwirkungen für Wohngebiete und schutzbedürftige Gebiete so weit wie möglich vermieden werden. Die Errichtung und der Betrieb von fossilen und solaren Kraftwerken, Biomasse- und Windkraftanlagen werden nach den Vorgaben des Abstandserlasses geprüft und Schutzabstände zum Beispiel zu Wohngebieten von mindestens 300m festgelegt. Energieerzeugungsanlagen zum Beispiel zentrale Kraft- und Heizkraftwerke mit einer Leistungskapazität von bis zu 50MW sind mit einem Abstand von bis zu 1500m nach Anlagenleistung zur Wohnbebauung zu errichten. Nutzflächen des städtischen Umlandes wie stillgelegte Industriebrachen, Abbauflächen für Steinbrüche und Braunkohlebergbau<sup>630</sup>, Industrieflächen für Stahlwerke, Brachflächen und landwirtschaftliche Nutzflächen sind insbesondere im Außenbereich von Städten in Regionen festgelegt und stellen Flächen zur Errichtung von großflächigen regenerativen Anlagen wie Solarkraftwerke, Windkraftanlagen zur Verfügung.

---

<sup>627</sup>Vgl.: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 24.07.2002 (TA Luft).

<sup>628</sup>Vgl.: Abstandserlass NRW: Abstände zwischen Industrie- bzw. Gewerbegebieten und Wohngebieten im Rahmen der Bauleitplanung und sonstige für den Immissionsschutz bedeutsame Abstände (Abstandserlass), RdErl. d. Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz - V-3 - 8804.25.1 v. 6.6.2007.

<sup>629</sup>Vgl.: §50 BImSchG; Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge – Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) vom 15.03.1974 zul. geä. am 27.06.2012.

<sup>630</sup>Vgl.: Lausitzer- und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH-Flächen für Solarstromkraftwerke -, Broschüre, Stand 2007.

Die Festlegung von Emissionsgrenzwerten nach der Technischen Anleitung Luft stellt hohe Anforderungen an die Technologie von Abgasreinigungsanlagen. Die Reinigung von Abgasströmen aus Energieerzeugungsanlagen mit hoher Leistungskapazität ist ein wesentliches Argument für die Sicherstellung der zentralen Energieversorgung und versteht sich als Konkurrenz zu den dezentralen Energieversorgungsanlagen mit geringeren Feuerungswärmeleistungen. Im Anhang der 1. BImSchV werden Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme und erhitztem Abgas durch den Einsatz von Brennstoffen nach der Feuerungswärmeleistung eingestuft. Die Festlegung der Emissionen aus Gebäudeheizungsanlagen wird durch Grenzwerte der 1. BImSchV für staub- und gasförmige Emissionen sichergestellt.<sup>631</sup>

Zentrale Großanlagen zur Wärmeerzeugung emittieren ganzjährig leistungsabhängige Abluftvolumenströme, die erhebliche Emissionsfrachten wie Schwefeldioxyde, Stickoxide, Staub und Kohlendioxyde mitführen. Die Kraftwerksstandortauswahl in den Regionen, Außenbereichen und dem städtischen Umland von Städten erfolgt nach infrastrukturellen, wirtschaftlichen und leistungsbezogenen Parametern. Die Überwachung der städtischen Umweltbelastungen erfolgt über das Überwachungsmessnetz (LÜN)<sup>632</sup>, das über den Tag gemittelte Messwerte über die Immissionsbelastungen an den Stadtstandorten aufzeichnet. Die Betreiber von emittierenden zentralen Energieerzeugungsanlagen und Heizkraftwerken sind nach dem BImSchG verpflichtet, das Emissionsverhalten während des Anlagenbetriebes zu dokumentieren. Die Leistungsauslegung von Energieerzeugungsanlagen bezieht sich auf den Strom- und Heizwärmenutzenergiebedarf in Regionen und Städten zur Versorgung von Gebäuden, Haushalten, Transport, Gewerbe und Industrie.

Die Europäische Kommission hat zur Umsetzung der Richtlinie 2001/42/EG des Europäischen Parlamentes Empfehlungen für die Prüfung von Umweltauswirkungen im Rahmen des Bauplanungsrechts gegeben.<sup>633</sup> In § 2 Abs. 4 BauGB sind die Belange des Umweltschutzes aufgrund von § 1 Abs. 6 Nr. 7 und § 1a BauGB festgelegt. Der direkte Zusammenhang zwischen Umweltschutz und Bauleitplanung ist durch das Instrument der Umweltprüfung durch Umweltverträglichkeitsprüfungen gegeben wie zum Beispiel für

---

<sup>631</sup>Vgl.: 1. BImSchV – Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1.BImSchV), 26.01.2010.

<sup>632</sup>Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: Lufthygienische Überwachung Niedersachsen (LÜN). Information im Internet URL <http://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/luft/LUEN> (2016).

<sup>633</sup>Vgl.: Richtlinie 2001/42/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 27.06.2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme. Information im Internet URL <http://www.eu-lex.europa.eu/LexUriServ> (2016).

Wärmeleistung von mindestens 300MW.<sup>634</sup> Anlagen der Energiewirtschaft nach Artikel 4 Abs. 2 der Richtlinie 85/337/EWG sind einer Einzelfallprüfung zu unterziehen, wenn unmittelbare und mittelbare Auswirkungen für die Umwelt zu erwarten sind.<sup>635</sup>

Der Umweltbericht ist Bestandteil der Begründung im Bebauungsplanverfahren und im Erläuterungsbericht zum Flächennutzungsplan. Die Umweltprüfung zum Flächennutzungsplan ist für die Kommunen ein hilfreiches Lenkungsinstrument für eine umweltgerechte Steuerung der städtebaulichen Entwicklung. Die zu prüfenden Umweltbelange sind gemäß §§ 1 Abs. 6 Nr. 7 und 1a BauGB zusammengefasst. Das Ergebnis ist in der Abwägung von öffentlichen Belangen einzubeziehen. Weitere Planungsabsichten zur Untersuchung von Planungsalternativen oder die Untersuchung von nicht durchgeführten Planungen sind im Rahmen der Umweltprüfung zu bewerten.<sup>636</sup> Der Umweltbericht soll unter anderem die voraussichtlichen erheblichen Umwelteinwirkungen, einschließlich der Auswirkungen auf Aspekte der Bevölkerung, Luft, klimatische Faktoren, biologische Vielfalt, Fauna, Flora, etc. und deren Wechselwirkungen beschreiben. Der Umweltbericht<sup>637</sup> eignet sich zur detaillierten Aufnahme von standortbezogenen geologischen, hydrogeologischen, meteorologischen und demographischen Daten.

Eine Umweltprüfung ermittelt die voraussichtlichen erheblichen Umweltauswirkungen in einem Bauleitplanungsprozess, die in einem Umweltbericht zusammengefasst und bewertet werden.<sup>638</sup> Gegenstand des Umweltberichtes ist die Darstellung von erheblichen Umweltauswirkungen sowie Alternativen zu den geplanten Vorhaben im Bebauungsplanverfahren. Insbesondere in Sanierungsgebieten mit einer Sanierungssatzung richtet sich die Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem Bauleitplanungsrecht. Die Vorgaben des § 1

---

<sup>634</sup>Vgl.: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Novellierung des Baugesetzbuches, Umweltbericht und Umweltverträglichkeitsprüfung für Städtebauprojekte, Bericht der unabhängigen Expertenkommission, Berlin, 2002, siehe auch Richtlinie 85/337/EWG, Anhang II, Oktober 2009.

<sup>635</sup>Vgl.: RL 85/337/EWG über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten vom 27.06.1985. Anlagen der Industrie zur Erzeugung von Strom, Dampf und Warmwasser und zum Transport von Gas, Dampf und Warmwasser, Anlagen zur Speicherung von Erdgas und von CO<sub>2</sub> - Strömen in geologischen Stätten, Grundwasserentnahme- und künstliche Grundwasserauffüllungssysteme.

<sup>636</sup>Deutsches Institut für Urbanistik (Difu): Planspiel zur Städtebaurechtsnovelle 2016/2017, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Auftrag.) vom 31.01.2017.

<sup>637</sup>Vgl.: Stadt Gießen: Umweltbericht, Vorhabenbezogener Bebauungsplan Nr.KL 09/05 „Wald-weide“, Planstand 14.8.2007 (Beschreibung des Vorhabens mit Angaben über Standort, Art und Umfang sowie Bedarf an Grund und Boden, Beschreibung der Umwelt am Standort).

<sup>638</sup>Architekten- und Stadtplanerkammer Hessen (Hrsg.): Die Umweltprüfung und der Umweltbericht in der Bauleitplanung nach dem BauGB 2004 und dem UVPG 2005, Erläuterungen und Hinweise für Planungsträger und Planer zum Verfahrensablauf, den dabei erforderlichen Leistungen und deren Vergütung, AKH informiert Nr.22, Januar 2006.

Abs. 5 Satz 2 BauGB sollen dazu beitragen, dass eine menschenwürdige Umwelt zu sichern und die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sind, auch in Verantwortung für den allgemeinen Klimaschutz. Direkte Bewertungsmaßstäbe werden durch das UVPG oder die Plan-UP-Richtlinie nicht vorgegeben. Es gelten zunächst die im BauGB formulierten planerischen Grundsätze hinsichtlich des Umwelt- und Naturschutzes. Darüber hinaus sind die im Rahmen der Fachgesetze auf Bundes- und Landesebene vorgegebenen Grundsätze und Ziele Basis der Bewertung durch landesrechtliche Regelungen z. B. im Bereich des Naturschutz-, Wasser-, Forst-, Raumordnungs- und Abfallrechtes.<sup>639</sup>

Durch das Europarechtsanpassungsgesetz Bau-EAG ist die strategische Umweltprüfung Bestandteil der Bauleitplanung. Die Richtlinie 2001/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Juni 2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme - Plan-UVP-Richtlinie - ist mit der Novellierung des Baugesetzbuches zum 20.07.2004 durch das Europarechtsanpassungsgesetz Bau-EAG Bau in deutsches Recht umgesetzt worden. Die Beschränkung auf zusätzliche oder andere erhebliche Umweltauswirkungen in zeitlich nachfolgenden Bebauungsplanverfahren erfolgt nach der Absichtsregelung gemäß § 2 Abs. 4 Satz 5 BauGB. Die Regelung gibt den Kommunen für das Bauleitverfahren Möglichkeiten zur Verfahrensvereinfachung und -beschleunigung.

Solarkollektoren sind vergleichsweise einfache technische Einrichtungen. Die kritischen Komponenten der Solarkollektoren sind zur besseren Strahlungsausnutzung Oberflächenbeschichtungen, die vom Schwermetall Chrom (sog. Schwarzchrombeschichtung) bis zu Titan-Nitrid-Oxid Beschichtungen reichen. Diese Beschichtungen weisen eine schadstoffarme Produktion auf, besitzen bessere Absorptionseigenschaften als galvanische Beschichtungen und benötigen durch Plasmabeschichtung nur 10% des direkten Energieaufwandes früherer Beschichtungsverfahren.<sup>640</sup>

Die Nutzung erneuerbarer und regenerativer Energien ist mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden als Energieversorgungssysteme mit fossilen Energieträgern. Entscheidend für eine Gesamtbewertung von regenerativen Energien ist jedoch, wie diese Technologien heute und zukünftig im Vergleich zu den Konkurrenztechnologien zu bewerten

---

<sup>639</sup>Ebd. S. 25 (Arbeitshilfe A-Bewertungsmaßstäbe)

<sup>640</sup>Vgl.: Swissolar – Netzwerk für Wärme und Strom: Merkblatt „Umweltbilanz der Solarenergie“ von Gabor Doka, Doka Ökobilanzen, Zürich, Juli 2000.

und inwieweit die Umweltauswirkungen kausal auf die Eigenschaften der regenerativen und erneuerbaren Energiesysteme zurückzuführen sind.

Aus den Übersichts-Ökobilanzen folgt, dass für alle Energieketten mit regenerativen Energien der Einsatz erschöpflicher Energieressourcen und die Emissionen klimaschädlicher Gase im Vergleich zu fossilen Energieträgern äußerst niedrig sind. Die wärmeerzeugenden Systeme liegen zum Beispiel mit dem Energieträger Stroh unter der Umweltbelastung des Referenzmix. Dabei emittieren strohbeheizte Heizwerke mehr gas- und staubförmige Substanzen wie Chlor- und Schwefel, NO<sub>x</sub>, Staub etc. als Heizkraftwerke die mit Waldholz befeuert werden. Insbesondere bei Biomasseanlagen ist nicht nur die Bestimmung der Umweltwirkungen pro Kilowattstunde Endenergieträger relevant, sondern auch die mit einer Energieeinheit Biomasse erzielbaren Umweltentlastungen. Die Reduktionswirkung am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird in den verschiedenen Einsatzbereichen sichtbar. Insbesondere KWK-Systeme und Biomasse-Mitverbrennungsanlagen leisten einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz.<sup>641</sup>

Aufgrund der hohen Betriebseffizienz von erdgasbetriebenen Heizungsanlagen ist auch der Einsatz in der Wärmeversorgung klimapolitisch vertretbar. Ein ökologisch optimierter Ausbau von regenerativen Energien im Kontext eines Energiemix in Regionen und Städten unterstützt den Schutz der Umwelt. Der Vergleich der Reduktionswirkung am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den verschiedenen Einsatzbereichen zeigt, dass insbesondere KWK-Systeme und Biomasse-Verbrennung einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die zunehmende Durchdringung des Strom- und Wärmesektors mit regenerativen Energien, die steigende Effizienz des Kraftwerksparks und die abnehmende Kohlenstoffintensität des Strom- und Wärmesektors auf der einen Seite und eine zunehmend aufwändige Rohölgewinnung und -weiterverarbeitung andererseits werden jedoch dazu führen, dass diese Unterschiede in der Klimareduktionswirkung mit fortschreitender Zeit geringer werden.

Die emittierten Luftschadstofflasten aus Industrie, Gewerbe, Kleinf Feuerungsanlagen, Verkehr, Landwirtschaft, Nutztierhaltung und sonstigen Quellen werden täglich über stationäre Messstationen (LÜN) registriert und in städtischen Emissionskatastern eingepflegt. Die Betreiber der genehmigungsbedürftigen Anlagen sind gemäß der 4. BImSchV

---

<sup>641</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Kurzfassung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit FKZ 901 41 803, Stuttgart-Heidelberg-Wuppertal, 02.2004, S.12-16.

verpflichtet, den zuständigen Behörden aktuelle Emissionsdaten für den jeweiligen Erklärungszeitraum im Rahmen der Emissionserklärung mitzuteilen. Heizungsbedingte Emissionen im städtischen Raum werden nach der 1.BImSchV für kleine und mittlere Feuerungsanlagen und den Quellenaustrittshöhen beurteilt.<sup>642</sup> Vor der Errichtung von stark emittierenden Anlagen ist großräumig zu prüfen, wie hoch die Emissionsfracht und Emissionswirkung für die Stadtluft ist. Die zentrale Energieerzeugung mit fossilen Energieträgern hat Auswirkungen auf die Qualität der regionalen und städtischen Umwelt und belastet die Atmosphäre mit Luftschadstoffen.

## **8.5. Versorgungsstruktur der kommunalen Energieversorgung**

### **8.5.1. Energiekonzerne und Stadtwerke**

Die im Jahr 1998 eingeleitete Liberalisierung und Regulierung des europäischen Strom- und Gasmarktes durch die Europäische Union wirkt sich auf die Energieversorgungsunternehmen (EVU) und Stadtwerke in Deutschland durch einen intensiven Veränderungsprozess aus. Die Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes im Jahr 2005 in Verbindung mit zahlreichen neuen Rechtsverordnungen hat eine erhebliche Dynamik für die nationale Energiewirtschaft bewirkt.<sup>643</sup> Der Energieversorgungsmarkt für Strom und Wärme wird seitdem in Deutschland durch vier Energiekonzerne gelenkt. Diese zentrale Energieversorgungsstruktur in Regionen und Städten bewirkt, dass Stadtwerke in die städtische Energieversorgung investieren müssen. Anforderungen im Bereich der Strom- und Gasverteilung, Anstieg des Kostendrucks durch die Netzentgeltprüfungen und Anreizregulierung durch die gesellschaftsrechtliche Entflechtung führen daher zur Gründung von Netzbetriebsgesellschaften<sup>644</sup>.

Städte und Energieversorger schließen Konzessionsverträge zur Sicherstellung der Energieversorgung für das Versorgungsgebiet ab. Weitere Verträge und Vereinbarungen<sup>645</sup> zwischen dem Träger des Versorgungsgebietes, der Stadtverwaltung, den Eigenbetrieben der Kommune und den Stadtwerken sichern die Energieversorgung für die Endenergie-

---

<sup>642</sup>Vgl.: 1.BImSchV zur Durchführung des BImSchG vom 14.03. 1997. Information im Internet URL <http://www.schornsteinfeger-plueghan.de/pdf/1bimschv.pdf> (2016).

<sup>643</sup>Vgl.: Kooperationen als strategisches Handlungsfeld der Stadtwerke: Fachbeitrag von Dr.-Ing. Norbert Ohlms, Vizepräsident des Verbandes kommunaler Unternehmen e.V., Fachzeitschrift Umwelt 11/2008, S. 573.

<sup>644</sup>Ebd.: S.575 (Vorteile von Kooperationen).

<sup>645</sup>Vgl.: Grundsätze über die Regelung der Verwaltungsbeziehungen zwischen der Stadt Metzingen und den Stadtwerken Metzingen; Anschluss- und Versorgungspflicht im Konzessionsvertrag, Stadt Metzingen, 2009.

verbraucher. Die Stadtwerke werden aufgrund der Verpflichtung zur Versorgung angehalten, die Führung der Versorgungsleitungen und des Versorgungsnetzes nach den anerkannten Regeln der Technik und der Wirtschaftlichkeit zu planen, auszuführen und in einem betriebsfähigen und betriebssicheren Zustand zu halten. Der Vorhabenträger verpflichtet sich, die EVU im Rahmen der Bauleitplanung zur Sicherstellung der Versorgung mit Strom und anderen Energieträgern zu beteiligen.

Die Trennung von Netz- und Energievertrieb ist seit dem 13. Juli 2005 durch das neue Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)<sup>646</sup> erfolgt. Die Anschluss- und Versorgungspflicht ist aufgeteilt in eine Anschlusspflicht des Netzbetreibers und in eine Versorgungspflicht des Grundversorgers. Diese Neuregelung des EnWG führt zu Rechtsverordnungen wie die „Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Grundversorgung von Haushaltskunden und die Ersatzversorgung mit Elektrizität aus dem Niederspannungsnetz“<sup>647</sup> und die „Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Grundversorgung von Haushaltskunden und die Ersatzversorgung mit Gas aus dem Niederdrucknetz“<sup>648</sup>. Das Energiewirtschaftsgesetz (EWG) schließt unter §1 Abs.1 die sichere und effiziente leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit erneuerbaren Energien ein.

Die Stadtwerke sind strukturelle wie auch betriebliche Veränderungen ausgesetzt aufgrund der Liberalisierung der Energiemärkte und Anpassung des Europäischen Rechts für die Energieversorgung. Diese grundlegende Neuordnung der europäischen Gesetzgebung hat zu umfangreichen Auswirkungen für die Stadtwerke in den Mitgliedstaaten Europas geführt, die einem zunehmenden Wettbewerb ausgeliefert sind und zu einer Energiedienstleistungswirtschaft gedrängt werden. Umwelt- und energiepolitische Beschlüsse der nationalen Regierungen geben politische Vorgaben für eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland für Regionen und Städte. Lokale EVU sind aufgefordert, diese Ziele aktiv zu unterstützen.

Die aktuelle Energiewende in Deutschland fordert indirekt die Umsetzung in eine dezentrale Energieversorgung mit Anlagen der „Kraft-Wärme-Kopplung“ in Verbindung mit

---

<sup>646</sup>Vgl.: Energiewirtschaftsgesetz (Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung) vom 07.07.2005 (BGBl. I S. 1970, ber. S. 3621)

<sup>647</sup>Vgl.: Stromgrundversorgungsverordnung (StromGVV).

<sup>648</sup>Vgl.: Gasgrundversorgungsverordnung (GasGVV).

regenerativen Energien. Die Erhöhung des Anteils an regenerativen Energien für den Stromversorgungsbereich in Deutschland wird somit erwartet.<sup>649</sup>

Die Regelungen der Energiepolitik führen zu aussichtsreichen Geschäftsfeldern und Dienstleistungsbereichen wie Energieanlagen-Contracting, nachhaltige städtische Energieversorgungsmodelle mit angepassten Netzstrukturen und Energieberatungsleistungen insbesondere für die städtischen Akteure und EVU.

Die in diesem Kontext integrierten nationalen Umwelt- und Klimaschutzprogramme verstärken die Umsetzung in die dezentrale Energiediskussion und haben Einfluss auf die Minimierung der Gesamtkohlendioxidemissionen und auf den Emissionshandel. Lokale Klimaakteure nutzen die Stadtwerke als Partner zur Umsetzung von Maßnahmen und Bauvorhaben für den Klimaschutz und Umweltschutz. Die Mitglieder der Arbeitsgemeinschaft für sparsame Energie- und Wasserverwendung (ASEW) im Verband kommunaler Versorgungsunternehmen setzen sich ein für den Ausbau der regenerativen Energien und für eine Optimierung der Energieeffizienz für Energieerzeugungsanlagen.

### **8.5.2. Energieversorgungsunternehmen und städtische Leitbildprozesse**

Regionale und städtische Energieversorger werden in die Entwicklung von städtischen Leitbilddiskussionen und in der Stadtentwicklung als Träger öffentlicher Belange eingebunden. Das für das Versorgungsgebiet zuständige Energieversorgungsunternehmen ist im Rahmen des Versorgungsauftrages zur Strom- und Energielieferung für die Endenergieverbraucher verpflichtet. Diese Versorgungsverpflichtung bietet im Rahmen einer nachhaltigen umweltfreundlichen Stadtplanung mit innovativen Versorgungskonzepten Chancen für eine enge Partnerschaft zwischen den kommunalen Akteuren und den Stadtwerken. Die frühzeitige und aktive Beteiligung des lokalen Energieversorgers im städtischen Leitbildprozess führt dazu, dass lokale Energieversorger sich als kooperative Partner im Stadtplanungsprozess sehen.<sup>650</sup> Innovative städtische Planungsprozesse fordern hochwertige technische Infrastrukturleistungen für die Kommune, um Anlagen- und Netzstrukturen für eine umweltfreundliche Versorgung des Versorgungsgebietes anbieten zu können. Die energetische Stadterneuerung fördert die strategische Ausrichtung und Koordinierung von Maßnahmen der Energieeinsparung, der Effizienzsteigerung und des

---

<sup>649</sup>Damm, Winfried: Energiedienstleistungen - das Nonplusultra für Stadtwerke, Vorsitzender des Leitausschusses der Arbeitsgemeinschaft für sparsame Energie- und Wasserverwendung-, Fachzeitschrift Umwelt 11/2008, S. 577.

<sup>650</sup>Vgl.: Beitrag in der Fachzeitschrift Umwelt: Stadtwerke als Partner für den Klimaschutz - Chancen und Aufgaben der Stadtwerke, Fachzeitschrift Umwelt Nr. 566, 11/2008, S.566 ff.

Einsatzes erneuerbarer Energien. Akteure und Systemzusammenhänge werden auf den städtischen Ebenen Gebäude, Quartier und Gesamtstadt als interdisziplinäre Aufgabe eingebunden. Als Rahmen einer energetisch optimierten Stadtentwicklung gelten die Zielstellungen des integrierten Klima- und Energieprogrammes (IKEP) und das Energiekonzept der Bundesregierung bis zum Jahr 2020 und die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 50% zu reduzieren. Den Kern der detaillierten energetischen Zielstellungen bilden energetische Leitbilder und die Erstellung von Fachkonzepten. Die Zusammenfassung der einzelnen Fachkonzepte und die Prüfung der energetischen Plausibilität im INSEK sowie das Verbinden der avisierten Maßnahmen und Einzelkonzepte führen in einen Ziel- und Maßnahmenplan.<sup>651</sup>

Das Planungserfordernis für die Aufstellung von Bauleitplänen wie Flächennutzungs- und Bebauungspläne erfordert eine Beteiligung der EVU.<sup>652</sup> Lokale Stadtwerke sind wichtige regionale Akteure und Partner für die Energiestrukturplanung in den Regionen und Kommunen. Internetgestützte Abfragen der Kommunen zeigen, dass eine aktive Beteiligung der Stadtwerke an der Planung und Umsetzung von städtischen Leitbildprozessen, Umweltschutz- und Klimaschutzvorhaben nur in geringen Fällen bisher stattgefunden hat. Aus diesem Grund ist langfristig eine Reform der Gemeindeordnungen für die Länder erforderlich, damit die Sicherung der wirtschaftlichen, umwelt- und energiepolitischen Entwicklungsmöglichkeiten für Städte und Kommunen weiterhin gefördert wird.

Die Bewertung städtebaulicher Aspekte im Rahmen von Energieleitbildern zur Nutzung städtischer Freiflächen für die erneuerbare Energieerzeugung zeigt, dass Geothermie, Biomasse, Erdwärme, Wasserkraft und Windenergie als ungünstig für das Stadtbild und für die gesamte Gestaltung des urbanen Raumes eingestuft werden. Dagegen sind Photovoltaik, Solarthermie, Umgebungswärmenutzung, Erdwärmesonden, Geothermie, Abwasserwärmennutzung als umweltfreundlich, regelbar und flächeneffizient für die Nutzung städtischer Flächen eingestuft.<sup>653</sup> Leitbilder für energieeffiziente Stadtquartiere zeichnen sich aus durch eine flächendeckende energetische Sanierung der Gebäudesubstanz, Einbindung von regenerativen Energiesystemen, Dezentralisierung der Wärmeversorgung mit

---

<sup>651</sup>Vgl.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BBSR): Handlungsleitfaden zur Energetischen Stadterneuerung - Energie für Deutschland, BMVBS Berlin (Hrsg.), Bonn, Juni 2011.

<sup>652</sup>Vgl.: Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen: Begründung zur Aufstellung des Flächennutzungsplans, Information aus dem Internet URL <http://www.bauleitplan.bremen.de> (2012).

<sup>653</sup>Vgl.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BBSR): Handlungsleitfaden zur Energetischen Stadterneuerung - Energie für Deutschland, BMVBS Berlin (Hrsg.), Bonn, Juni 2011, S. 103 (Abb.34).

Nahwärme, bauliche Nachverdichtung und Ausbau einer zentralen Wärmeversorgung mit Kraft-Wärme-Kopplung.<sup>654</sup>

### 8.5.3. Konzessionsverträge

Die Konzessionsabgabe<sup>655</sup>, die die Energieversorger an die zu versorgende Kommune entrichten müssen, berechnet sich nach der Inanspruchnahme von Wegenutzungsrechten, der Bevölkerungszahl, dem Energiebedarf und der abgenommenen Leistung an Strom und anderer Energie.<sup>656</sup> Städte und Gemeinden verfügen mit dem Instrument der Konzessionsabgabe eine vertraglich vereinbarte, für den Kommunalhaushalt bedeutende finanzielle Einnahme. Rechtliche Grundlage des Wegenutzungsrechts in der Strom- und Gasversorgung ist §46 EnWG. Das Gesetz unterscheidet zwischen dem einfachen Wegenutzungsvertrag und dem qualifizierten Wegenutzungsvertrag, der auch als „Konzessionsvertrag“ bezeichnet wird. Öffentliche Verkehrswege sind Flächen (Straßen), die für den Gemeindegebrauch der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden. Nach § 46 Abs.1 EnWG besteht für die Gemeinden ein Kontrahierungszwang zum Abschluss von einfachen Wegenutzungsverträgen. Den Vertragsabschluss verweigern kann die Gemeinde nur, solange das Energieversorgungsunternehmen die Zahlung des Höchstsatzes der Konzessionsabgabe verweigert bzw. keine Einigung über die Höhe der Konzessionsabgabe erfolgt ist. Einigen sich die Vertragsparteien vorzeitig auf eine Verlängerung des Vertrages, muss die Gemeinde dies bekannt geben und anderen Interessenten Gelegenheit geben, sich ebenfalls um den Konzessionsvertrag zu bewerben. Der alte Konzessionsvertrag ist zu beenden und der neue Vertrag kann frühestens drei Monate nach Bekanntgabe geschlossen werden.

Da die finanzielle Abgabe an die Gemeinde auch nach dem Energieverbrauch berechnet wird, bietet ein Bevölkerungszuwachs mit gleichzeitiger Erhöhung des Energieverbrauchs langfristige Vorteile für die Kommune. Die Konzessionsabgabeverordnung legt die Zulässigkeit und Bemessung der Zahlung von Konzessionsabgaben der Energieversorgungsunternehmen im Sinne des §3 Nr. 18 des Energiewirtschaftsgesetzes an Gemeinden und Landkreise fest. Die Konzessionsabgaben sind Entgelte für die Einräumung des Rechts zur Benutzung öffentlicher Verkehrswege für die Verlegung und den Betrieb von

---

<sup>654</sup>Ebd.: S. 105-107.

<sup>655</sup>Vgl.: Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): DESTATIS: Energie auf einen Blick, 2009, S. 26 – 27.

<sup>656</sup>Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) Hrsg.: Leitfaden Konzessionsverträge und Konzessionsabgaben in der Strom- und Gasversorgung, Berlin, 9.11.2010.

Leitungen, die der unmittelbaren Versorgung von Letztverbrauchern im Gemeindegebiet mit Strom und Gas dienen.<sup>657</sup> Die Höchstbeträge der Energiekosten in Gemeinden richten sich gemeindegrößenklassenabhängig nach § 2 Abs. 2 Nr. 2a KAV<sup>658</sup>. Bei Strom, der nicht als Schwachlaststrom geliefert wird, gelten die gemeindegrößenklassenabhängigen Höchstsätze nach § 2 Abs. 2 Nr. 1b KAV. Für die Größenklassenbemessung ist die jeweils aktuelle Einwohnerzahl während der Vertragslaufzeit zu Grunde zu legen. In §48 Abs. 3 EnWG ist das Wegerecht vorrangig für die vertraglich vereinbarte Konzessionsabgabe. Ausnahmen von der Grundversorgungspflicht sind in §37 EWG gegeben, wenn zur Deckung des Eigenbedarfs eine Anlage zur Erzeugung betrieben wird. Es besteht kein Anspruch auf Grundversorgung zum Preis nach §36 Abs.1 Satz 1 EWG.

Bei der Thematik der Konzessionsabgabe wird immer mehr offensichtlich, dass die derzeitige Fassung der KAV nicht dem EnWG 2017 entspricht. Eine erneute Prüfung der Verordnung und entsprechende Novellierung des Gesetzes ist langfristig erforderlich.

Die logische Schlussfolgerung aufgrund der geschlossenen Dienstleistungsverträge zwischen Energieversorgern, Stadtwerken und Kommunalverwaltungen ist, dass die Kopplung der Konzessionsabgaben an den Energieverbrauch den Durchbruch für die regenerativen Energien für kommunale und städtische Versorgungsgebiete erschwert. Im Fall der Integration und Nutzung von regenerativen Energien und Wärmespeichernetzen sollte eine Entkopplung vom Endenergiebedarf bewirkt werden, damit die Kommune für das Energiesparen und die effiziente Erzeugung und Bereitstellung von Energie belohnt wird.

#### **8.5.4. Dezentrale städtische Energieversorgungsstrategie**

Der Ausbau der regenerativen Energien wird derzeit von zwei bedeutenden Strategiesätzen bestimmt. Die Befürworter einer dezentralen Energieversorgung fordern Energieerzeugungsanlagen<sup>659</sup> in der unmittelbaren Nähe des Endverbrauchers, da die Wärme auf kurzen Transportwegen mit wenigen Netzverlusten dem Endverbraucher bereitgestellt werden kann. Die Befürworter einer zentralen Energieversorgung begründen die Wahl der Anlagenstandorte für Wärmekraftwerke nur dort, wo die Infrastruktur und die wirtschaftlich besten Bedingungen vorzufinden sind.

---

<sup>657</sup>Vgl.: Konzessionsabgabenverordnung (KAV): Verordnung über Konzessionsabgaben für Strom und Gas vom 9.01.1992.

<sup>658</sup>Vgl.: §1 Abs.1 und 2 KAV.

<sup>659</sup>Vgl.: Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Mehr Energie einsparen in Europa durch Kraft-Wärme-Kopplung, Brüssel, 13.11.2008.

Eine Untersuchung über die Anteile der Kraft-Wärme-Kopplung am Endenergieverbrauch in den Mitgliedstaaten Europas<sup>660</sup> zeigt, dass im Jahr 2006 ein Anteil von 13,1%<sup>661</sup> am Endenergieverbrauch der EU durch eine Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erreicht worden ist. Mitgliedstaaten wie Finnland und Dänemark haben einen Anteil am Endenergieverbrauch mit der KWK-Wärmeerzeugung von über 40% erzielt.

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit von regenerativen Energiesystemen nicht nur über die direkten Wärmeerzeugungskosten erfolgen darf, sondern auch unter Berücksichtigung der vermiedenen Netzkosten einer dezentralen Versorgung.<sup>662</sup> Die Nutzung regenerativer Energiesysteme führt nach übereinstimmender Auffassung zu einer Reduzierung der energiebedingten Schadstoffemissionen im erheblichen Maße. In den Berichten der Mitgliedstaaten wird aber auf einige grundsätzliche Schwierigkeiten zur Entwicklung des KWK-Sektors hingewiesen.<sup>663</sup> Die KWK erfordert einen angemessenen ortsnahen Nutzwärmebedarf, hohe Investitionen und hohe Fixkosten mit geringer Rentabilität und langer Amortisationsdauer. Weiterhin wirkt sich die rückläufige Wärmenachfrage im Gebäudesektor auf die Nutzung der KWK im Fernwärmebereich aus. Daraus ergeben sich weitere Hemmnisse, die sich auf ungewisse langfristige Aussichten auf die staatliche Unterstützung zur Förderung sowie auf die Möglichkeit eines Netzanschlusses zu einem akzeptablen Preis für die Anpassung des Netzes an KWK-Strom beziehen.

Die Kraft-Wärme-Kopplung ist eine äußerst effiziente Energietechnologie. Da sich diese Anlagen in relativer Nähe zum Endverbraucher befinden sollten, sind die Energieübertragungs- und Verteilungsverluste relativ gering. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung können Energieträger zum Einsatz kommen wie Kohle, Erd- oder Biogas. Die Kraft-Wärme-Kopplung ist eine energiesparende Technologie, die nach dem heutigen Stand etwa 2% zur Realisierung der Zielvorgabe von jährlich 20% Primärenergieeinsparungen bis 2020 in Europa beiträgt.

---

<sup>660</sup>Vgl.: Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt, auch KWK - Richtlinie genannt, S.1-11, Brüssel, 13.11.2008.

<sup>661</sup>Ebd.: S.3 (unter Ausschluss des Energieverbrauchs des Verkehrssektors).

<sup>662</sup>Krägenow, Timm (Eurosolar): Fachartikel zu „Branche streitet um Solarenergie“, Financial Times Deutschland, 24.Mai 2007 geändert 8.01.2008.

<sup>663</sup>Vgl.: Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt, auch KWK - Richtlinie genannt, S.7, Brüssel, 13.11.2008.

In diesem Zusammenhang ist auf die Energiedienstleistungsrichtlinie, Gebäuderichtlinie, Leitlinie der Gemeinschaft für staatliche Umweltschutzbeihilfen und die vorgeschlagene Richtlinie über regenerative Energie zur Wärme- und Kälteerzeugung aus regenerativen Energiequellen hinzuweisen. In der zuletzt genannten Richtlinie sind Zielvorgaben für die bis 2020 zu erreichenden Energieanteile aus regenerativen Energiequellen für die Wärme- und Kälteerzeugung festgelegt. Die Kraft-Wärme-Kopplung aus regenerativen Energiequellen ist in den Strategien der Mitgliedstaaten zur Verwirklichung dieser Ziele einbezogen.<sup>664</sup>

Die dezentrale Stromerzeugung im Versorgungsbereich von Wohngebäuden trägt zur Förderung der Energieeffizienz bei.<sup>665</sup> Die als stromerzeugend genannten Anlagen, wie interne und externe Verbrennungsmotoren mit Dampfexpansion und Brennstoffzellen, arbeiten nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung und können auch gleichzeitig die Heizfunktion sowie die Warmwasserbereitstellung übernehmen. Die Anlagen erreichen eine höhere Energieausnutzung als bei der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. Der Stirlingmotor zählt zum Beispiel zu den Kleinst-BHKW und erzeugt in einem Leistungsbereich bis zu 6kW 144kWh Wärme und mit einem Generator in einem Leistungsbereich von 500W innerhalb von 24 Stunden 12kWh Strom.<sup>666</sup>

Die nachstehende Abbildung 70 zeigt die Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffen für die Kraft-Wärme-Kopplung. Die solare Energiegewinnung von Strom und Wärme ist in das leitungsgebundene KWK-Netz mit Nahwärmeversorgung einzuspeisen.

---

<sup>664</sup>Vgl.: Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt, auch KWK - Richtlinie genannt, S.6, Brüssel, 13.11.2008.

<sup>665</sup>Vgl.: Wilmsmann, Martin: Simulation von stromerzeugenden Heizungen im haushaltlichen Bereich - Wärmebedarf; EON Ruhrgas AG, Vortrag auf der ASUE - Fachtagung, Leipzig, 7. September 2006.

<sup>666</sup>Vgl.: Waas: Kleinst-Blockheizkraftwerk mit Stirlingmotor; Wärme und Strom erzeugen mit dem Einfach Stirlingmotor, Arbeitskreis Stirlingmotor München, Fachhochschule München, FB Maschinenbau.

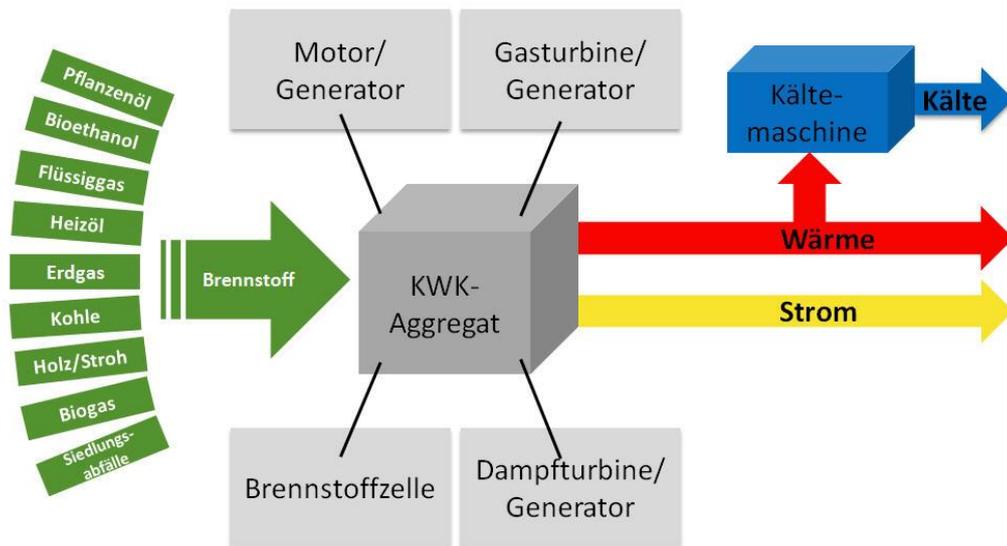


Abbildung 70: Dezentrale Wärmeversorgung mit KWK-Anlagen

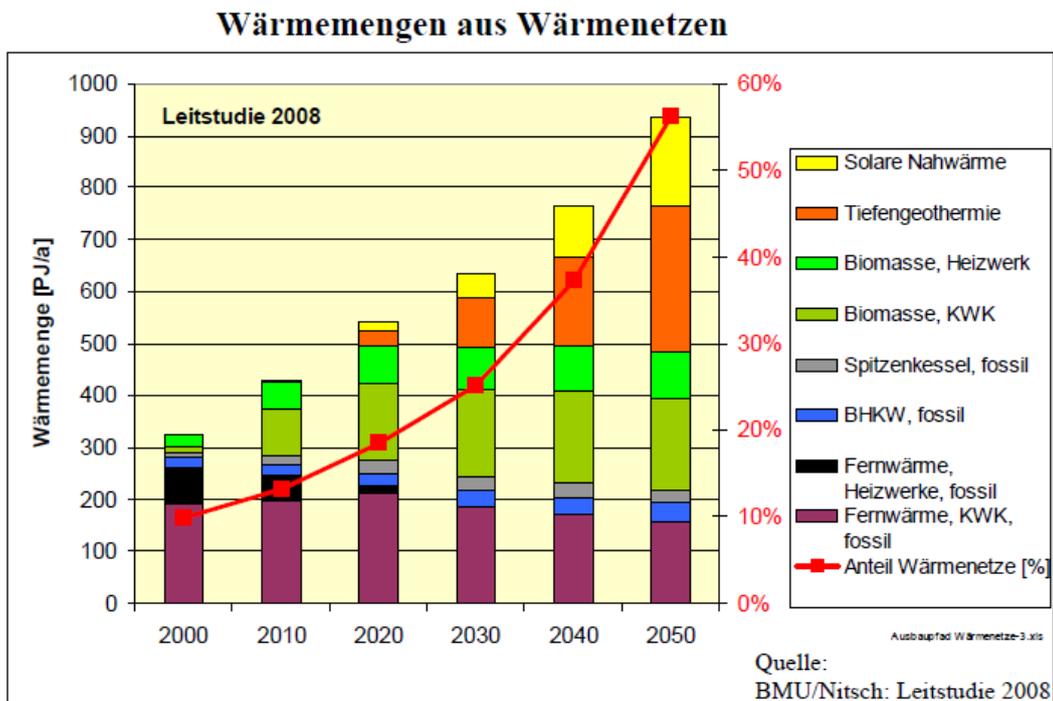


Abbildung 71: Wärmemengen aus Wärmenetzen – BMU Leitstudie 2008

Die BMU/Nitsch Leitstudie 2008 zur Erzeugung von Wärmemengen über solare und fossile Energiesysteme zeigt, dass der Anteil der Nahwärmenetze bis 2050 ansteigen wird unter Zuwachs der Einspeisung von solarer Nahwärme, Tiefengeothermie und Biomasse. Dezentrale Inselversorgungssysteme für städtische Quartiere sind strategisch zu planen, sodass am Versorgungsstandort der ganzjährige Bedarf an Raumwärme und Brauchwasser mit Unterstützung regenerativer Energien bereitgestellt wird und Lastspitzen von

Umwelteinflüssen unabhängige Heizungssysteme übernommen werden.<sup>667</sup> Dazu sind auf Lastfallsituationen ausgerichtete verbrauchsnahe Wärmespeichersysteme erforderlich, die die tägliche Spitzenlast über die gespeicherte Energie auffangen.

Der Einsatz von Otto-, Stirling- und Freikolben-Dampfmaschinen zur dezentralen Versorgung trägt zu einer effizienteren Nutzung von Erd-, Flüssig- und Biogas bei.<sup>668</sup>

Flüssiggas wird mehr und mehr als effizienter Brennstoff für eine umweltfreundliche Energieversorgung und zur dezentralen Versorgung von Wohn- und Sondergebieten eingesetzt. Die dezentrale Versorgung erfolgt über ein leitungsgebundenes Versorgungsnetz, das von einem außerhalb des Versorgungsgebietes zentral gelegenen unterirdischen Lagertank mit einem Fassungsvermögen von 100.000 Litern Flüssiggas bereitgestellt wird. Infolge der großvolumigen Lagerung von Flüssiggas ist eine hohe Brandlast und Explosionsgefahr für das Gemeindegebiet zukünftig gegeben.<sup>669</sup>

### **8.5.5. Leitungsgebundene Wärmeversorgung**

Die Literaturrecherche über die Situation von Fernwärme- und Nahwärmenetzen in deutschen und europäischen Städten zeigt deutlich, dass zur Sicherstellung der ganzjährigen Strom- und Wärmeversorgung leistungsstarke zentral gelegene Heiz- und Heizkraftwerke eingesetzt werden. Die Sicherstellung einer ganzjährigen Versorgung mit Warmwasser und Raumwärme ist nach Meinung der Energieexperten auch über dezentrale Wärmespeichersysteme erreichbar, wenn die saisonalen Potenziale zusammengeführt, gespeichert und für die winterlichen Heizperioden wirtschaftlich vorgehalten werden. Städtische Ballungsräume mit einem hohen Wärmeenergieverbrauch bieten sehr gute Chancen für ausgedehnte Fern- und Nahwärmesysteme. Die hohe Versorgungsdichte der Endenergieverbraucher bietet eine besonders vielversprechende Perspektive der Rentabilität und Realisierbarkeit von KWK-Projekten. Städtische Flächen wie Baulücken, brachliegende Flächen, unbebaute Freiflächen, die in rechtskräftigen Bebauungsplänen festgelegt sind, eignen sich für Anlagen der dezentralen Wärme- und Stromspeicherung in oberirdischer oder unterirdischer Bauweise. Die Eignung dieser städtischen Flächen ist im Rahmen der Stadterneuerung nachzuweisen.

---

<sup>667</sup>Vgl.: Kubessa, Michael: Dezentrale Energieversorgung; Fachvortrag ASUE - Fachtagung; EON Ruhrgas AG; Folie 19, Leipzig, 2006.

<sup>668</sup>Vgl.: Schulte, F.-J.: Praxiserfahrungen mit dem Lion-Powerblock; OTAG Strom mit Wärme, Olsberg; Fachvortrag ASUE - Fachtagung; EON Ruhrgas AG; Leipzig, 2006.

<sup>669</sup>Vgl.: Textbeitrag über Siedlung wird mit Flüssiggas versorgt, Luftkurort Heimbach. Information im Internet unter URL [http://www.bonner-bauen.de/hausbau-ratgeber/\(23.04.2012\)](http://www.bonner-bauen.de/hausbau-ratgeber/(23.04.2012)).

Statistische Datenanalysen der Europäischen Union geben darüber Aufschluss, dass der Anteil der Kraftwärmekopplung am Endenergieverbrauch in den Europäischen Mitgliedstaaten bereits im Jahr 2006 circa 13,1% erreicht hat. Die Europäischen Mitgliedstaaten Dänemark und Finnland sind führend mit mehr als 40 % KWK-Marktdurchdringung.<sup>670</sup>

In städtischen Kerngebieten mit hoher Gebäudedichte versorgt ein Nahwärmenetz ganzjährig.

Das Fraunhofer Institut hat in seinem Leitfaden „Nahwärme A24“ die Biomasse-Nahwärmenetze nach Art, Leistung, Brennstoffe, Verbraucherstruktur und Anlagenkosten verglichen. Fragen wie: ««Zitat: Welche Rolle kann die solare Nah- und Fernwärmenetzstruktur unter Berücksichtigung von saisonalen Wärmespeichern übernehmen? Können Wärmespeicher in das Nahwärmenetz integriert werden?»» sind in Projekten untersucht worden.<sup>671</sup> Die Planung eines städtischen Nahwärmenetzes bedarf daher einer über einen überschaubaren Zeitraum angepassten Energiebedarfsanalyse und- prognose, damit eine leistungsoptimierte Anlagen- und Netzauslegung erfolgen kann. Die Prüfung von Energieeinsparmaßnahmen von Gebäuden ist zu gewährleisten, damit Bedarfsreduktionen frühzeitig in die energetische Konzeptfindung integriert werden können. Für die Projektierung einer Nahwärmeversorgung ist die Jahresdauerlinie<sup>672</sup> zu verwenden. Der Raumwärme- und Warmwasserbedarf ist nach DIN 4701<sup>673</sup> und DIN 4708<sup>674</sup> zu berechnen.

Die Untersuchungsergebnisse von städtischen Projekten für Warmwasserspeichersysteme bestätigen einen Deckungsgrad des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs in Stadtquartieren von mehr als 50% mit einer saisonalen solaren Wärmespeicherung mit entsprechend großvolumigen Wärmespeichern. Energetisch optimierte Wohngebäude, die einen deutlich geringeren Jahresheizwärmebedarf von 35KWh/m<sup>2</sup>a vorweisen, erzielen eine vollständige Deckung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs mit Unterstützung von Wärmespeichern und großvolumigen Warmwasserspeichern von 10 bis 30 m<sup>3</sup>. Die Bereitstellung und Versorgung mit großvolumigen Warmwasserspeichersystemen am Ver-

---

<sup>670</sup>Vgl.: Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Mehr Energie einsparen in Europa durch Kraft-Wärme-Kopplung, Brüssel, 13.11.2008, KOM (2008) 771 endgültig.

<sup>671</sup>Fraunhofer Umsicht (Hrsg.): Leitfaden Nahwärme, A24, Anhang.

<sup>672</sup>a.a.O., S.5 (Wärmebedarf).

<sup>673</sup>Vgl.: DIN 4701 - vereinfachte Heizlastberechnung.

<sup>674</sup>Vgl.: DIN 4708 - Warmwasserbedarf für Wohngebäude.

sorgungsstandort für den energetisch unsanierten Gebäude- und Wohnungsbau ist aus wirtschaftlichen und bautechnischen Gründen nicht wirtschaftlich.<sup>675</sup>

Mit dem Ausbau der Fern- und Nahwärmeversorgung und dem damit verbundenen Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland sind wirtschaftlich zu erschließende Energieeinsparpotenziale verbunden.<sup>676</sup> Der Versorgungsvertrag nach AVBFernwärmeV<sup>677</sup> zur Abnahme von Dampf, Kondensat oder Heizwasser als Wärmeträger zwischen dem Fernwärmeversorger und den Endenergieabnehmern ist die rechtliche Grundlage.

Je nachdem, welche Rolle den unterschiedlichen Systemen in einem zukünftigen Energiemix zukommt, der Ausbau von Fernwärmenetzen kann ein Vorteil oder ein Hemmnis für die dezentrale städtische Wärmeversorgung sein, abhängig von der Größe des Versorgungsgebietes und Auslegung des Nahwärmenetzes. Die Europäische Kommission folgert aus den Ergebnissen der Untersuchung, dass gemeinsame Anforderungen für den Wärmenetzzugang zur Erhöhung der Anschlussdichte in Städten Bedingung sind. Eine geringe Anschlussdichte und ein bevölkerungsschwaches Versorgungsgebiet begrenzen das Entwicklungspotenzial der KWK -Technologien.

Die Prognose, dass bis zum Jahr 2030 etwa 80% der europäischen Bürger in städtischen Gebieten leben und arbeiten werden, stärkt den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung. Die Integration der KWK-Technologie in den städtischen Wärmeversorgungsprozess führt nachweislich zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, des Einsatzes von Ressourcen und zur Verringerung von Wärmenetzverlusten.<sup>678</sup> Wärmeversorgungsnetze versorgen Stadtgebiete, Agglomerationen und Siedlungsgebiete mit hoher Wohndichte sowie Sondergebiete mit öffentlicher und privater Nutzung. Die Untersuchung von Regionen und Städten mit Wärmenetzen<sup>679</sup> zeigt, dass ein Anschlussgrad von Wohngebieten und Wohnsiedlungen an Fern- und Nahwärmenetzen in Deutschland mit 12% bereits gegeben ist.

Mit der Schaffung eines geeigneten Rechtsrahmens in Deutschland, zum Beispiel der KWK-Richtlinie, wird dem Aufbau von städtischen Nahwärmenetzen Rechnung getragen. Aufgrund der strategischen Veränderung der Versorgung durch städtische Heiz-

---

<sup>675</sup>Vgl.: Boese & Diefenbach (2000).

<sup>676</sup>Vgl.: Schulz et al. (1994).

<sup>677</sup>Vgl.: AVBFernwärmeV (Verordnung über allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme) auf Grund des § 27 des Gesetzes zur Regelung des Rechts der Allgemeinen Geschäftsbedingungen vom 9. Dezember 1976 (BGBl. I S. 3317), §§ 2-4 AVBFernwärmeV.

<sup>678</sup>Vgl.: Kommission der Europäischen Gemeinschaft KOM (2008) 771. Energiesparen in Europa mit KWK-Anlagen.

<sup>679</sup>Vgl.: Rapp und Müller (1998).

kraftwerke mit effizienter Technologie, verändert sich die Versorgungsstruktur der regionalen Fernwärmeerzeugung ebenfalls maßgeblich.

Städtische Oberzentren weisen höhere Fernwärmeanschlussanteile auf als Mittelzentren. Die Untersuchung der städtischen Fernwärmeversorgung der Stadt Flensburg<sup>680</sup> zeigt, dass ein Anschlussgrad von 80% erzielt werden kann. Dagegen ist der Anschlussgrad in der Stadt Mannheim nur mit 50% gegeben. Weitere empirische Untersuchungen in Städten der europäischen Mitgliedstaaten von 1987 bis 1999 beweisen, dass der Gebäudeanschlussgrad an städtische Nah- und Fernwärmenetze weniger als 50% beträgt. Das Land Dänemark nimmt eine Spitzenposition in der Fern- und Nahwärmeversorgung ein, da fast eine landesweite Nahwärmeversorgung und Niedrigtemperaturwärmeversorgung umgesetzt worden ist.<sup>681</sup> Fernwärmenetze sind wirtschaftlicher, wenn der Primärenergiefaktor zertifiziert wird und die Kraft-Wärme-Kopplung die Anteile an der städtischen Wärmeversorgung erhöht. Die Zertifizierung ist ein Ergebnis der Novellierung der Energieeinsparverordnung und setzt nicht nur den Wärmeverlusten von Gebäuden enge Grenzen, sondern bewertet auch die Energieverluste in der Heizungs- und Anlagentechnik. Die als Nebenprodukt der Stromerzeugung bereitgestellte Wärme wird aus Heizkraftwerken angekoppelt.

## **8.6. Sektorenkopplung und Einspeisung von Energie**

Durch eine konsequente Fortführung einer kombinierten Netzverbundstrategie und Sektorenkopplung sind Solarenergie, Biomasse und Geothermie in Regionen und Städte unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit, Energieeinsparung und Klimaschutz weiter zu erschließen und zusammenzuführen. Die Einspeisung von Wärme und Niedrigtemperaturwärme durch regenerative Energien eröffnet für die städtische Wärmeversorgung zukünftig weitere Potenziale.

Die Wärme- und Stromerzeugung durch Biogas und Biomethan in landwirtschaftlichen Betrieben im Stadtumland stellt eine weitere Netzunterstützung für die städtische Nahwärmeversorgung dar. Die direkte Einspeisung von Biomethan in das städtische Gasnetz trägt zu einer Reduzierung von Erdgas und führt gleichzeitig zu einer Reduzierung von Methanemissionen. Die regionale Landwirtschaft zur Produktion von nachwachsenden

---

<sup>680</sup>Vgl.: Gruber et al. (1990), ZFK (1999).

<sup>681</sup>Vgl.: Krawinkel (1987), Daenag (1998), Dehli (1999).

Rohstoffen stellt das größte Potenzial für die Biogaserzeugung in Deutschland zur Verfügung.

Die Deutsche Energieagentur DENA veröffentlicht in einer Vergleichsstudie der Entwicklungs- und Schwellenländer das Biogaspotenzial über die industrielle Landwirtschaft in Südbrasilien und erschließt Strategien für die standortbezogene Strom- und Wärmeversorgung.<sup>682</sup> Die Studie ist im Rahmen des Projektes der Internationalen Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums durchgeführt worden.<sup>683</sup> Die Biomassepotenzialerhebung richtete sich auf landwirtschaftliche Betriebsgrößen mit einer Anbaufläche von mehr als 3ha bis 2.500ha. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass eine Produktion von circa 111Mio. m<sup>3</sup> Biogas beziehungsweise 77 Mio. m<sup>3</sup> Biomethan pro Jahr gegeben ist. Die Biogaseinspeisung ersetzt in der betrachteten Region circa 10% des regionalen Erdgasverbrauchs. Die Potenzialdefinition für das theoretische Biomassepotenzial entspricht dem jährlichen Biomassezuwachs, der durch die Umsetzung der Sonneneinstrahlung im Prozess der Photosynthese erwartet wird. Dagegen ist die theoretisch verfügbare Biomasse von den Parametern wie Erntetechnologien, Anbaustrategie, Erreichbarkeit und Transportfähigkeit abhängig.

Aktuelle Schätzungen über das jährlich zur Verfügung stehende NAWARO-Potenzial in Deutschland<sup>684</sup> prognostizieren einen Biogaspotenzialzuwachs von 90Mrd. kWh. Die Analyse und Bewertung der Nutzung von Biomasse durch das Wuppertal Institut zeigt, dass bis zum Jahr 2030 signifikant hohe Biomassepotenziale für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen. Diese Annahme stützt sich auf die Steigerung des Anbaupotenzials von Energiepflanzen von 1,6Mio. ha auf 2,6Mio. ha bis zum Jahr 2030.<sup>685</sup> Der realistische Ausbaupfad für Biogaseinspeisung wird mit einer Biogaserzeugung von rund 10Mrd. m<sup>3</sup> (10 Mrd.kWh/a) angegeben.<sup>686</sup> Die Vergärung von feuchter Biomasse (Fermentation) und

---

<sup>682</sup>Vgl.: DENA: Studie der Deutschen Energieagentur über die Potenzialanalyse für Biogas aus der Schweinemast im Bundesstaat Rio Grande do Sul (RGdS); Zeitschrift Umwelt, Heft 6, Juni 2010; S. 350-351; <http://www.dena.de> (2010).

<sup>683</sup>Vgl.: BMU: Projekt der Internationalen Klimaschutzinitiative und Förderung von Projekten zur Anpassung an den Klimawandel, REDD+ und zur Unterstützung klimafreundlichen Wirtschaftens in Entwicklungs- und Schwellenländern (2010); Zeitschrift Umwelt, Heft 6, Juni 2010; S. 350-351; <http://www.dena.de> (2010).

<sup>684</sup>Vgl.: Definition NAWARO: Potenzial von nachwachsenden Rohstoffen.

<sup>685</sup>Vgl.: Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse; Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW, Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen (Wuppertal Institut), Endbericht, Januar 2006.

<sup>686</sup>Vgl.: DENA: Biogaspotenzial in Deutschland, <http://www.biogaspartner.de> (Oktober 2010).

die Erzeugung von Biogas durch Gülle ist bereits Stand der Technik.<sup>687</sup> Eine wesentliche Bedingung zur Einspeisung von Biogas in das städtische Erdgasnetz ist die Aufbereitung zu Erdgasqualität. Die Einspeisung in Erdgasnetze ist nur möglich, wenn die Anforderungen des Regelwerks zur Qualitätssicherung der Erdgasbeschaffenheit erfüllt sind. Der Rohstoffbedarf pro Tag zur Biogasproduktion richtet sich nach der Leistungskapazität der Biogasanlagen. NAWARO-Anlagen produzieren mit 7,1 t/d Rohmasse (56m<sup>3</sup>/h Biogas), bei 36 t/d Rohmasse (280m<sup>3</sup>/h Biogas) und bei 71 t/d Rohmasse (560m<sup>3</sup>/h Biogas). Die Erzeugungsleistung von Biogas in Gülleanlagen bezieht sich auf 31,5 t/d Gülle mit 58m<sup>3</sup>/h Biogas, 158 t/d Gülle mit 290m<sup>3</sup>/h Biogas und 315 t/d Gülle mit 580m<sup>3</sup>/h Biogas.<sup>688</sup> Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen in Regionen und im städtischen Umland wird durch die Entfernung des Biogastransportes<sup>689</sup> von weniger als 15-20 km zum Endverbraucher berechnet. Die Biogasproduktion von 500m<sup>3</sup>/h benötigt eine notwendige landwirtschaftliche Anbaufläche von über 500ha.

#### *Wärmenetze zur Aufnahme der industriellen Abwärme*

Die Untersuchung von städtischen Wärmeversorgungsmodellen zur Nutzung von industrieller Abwärme zur Wärmeversorgung von Wohngebieten ist durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMBF) im Jahr 1979 erstmalig durchgeführt worden.<sup>690</sup> Industrielle Abwärme ist in einem Netzverbundsystem ohne Unterstützung von Wärmepumpen verwendet und als Produktionswärme in das Fern- und Nahwärmenetz eingespeist worden. Als Planungsrichtwert ist in der Fachliteratur eine wirtschaftliche Auslegung der städtischen Nahwärmeversorgung mit einem Radius von 5km ohne Übergabestationen vorgegeben. Die Nahwärmenetze sind als Wärmetransportsystem im geschlossenen Kreislauf zu betreiben. Die Wärmeabnahme aus dem Fern- und Nahwärmenetz erfolgt mit einer hausinternen Wärmeübergabestation. Konzepte zur Bereitstellung

---

<sup>687</sup>Vgl.: Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse; Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW, Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen (Wuppertal Institut), Endbericht, Januar 2006, S. 62.

<sup>688</sup>a.a.O.: S.21 (Leistungsgrößen der Biogasproduktion für Anlagen von 50m<sup>3</sup>/h, 250m<sup>3</sup>/h und 500m<sup>3</sup>/h)

<sup>689</sup>a.a.O.: S.50, Die Randbedingungen und Einflussfaktoren einer Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz sind gemeinsam mit der Gaswirtschaft erarbeitet worden und werden in Band 4 des Endberichts vom GWI Essen detailliert erläutert.

<sup>690</sup>Vgl.: BMFT: Untersuchung eines Modells der Wärmeversorgung aus Abwärme, Forschungsbericht T 79-118, Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co. Planungs KG, München, Dezember 1979.

von industrieller Wärme zeigen eine hohe jährliche Primärenergieeinsparung für Industriebetriebe und eine Reduzierung der städtischen CO<sub>2</sub>-Emissionen.<sup>691</sup>

### *Kommunale Abwasserversorgungsnetze*

Das städtische solare Wärmepotenzial ist durch die Nutzung von Niedrigtemperaturwärme aus städtischen Abwasserversorgungssystemen zu ergänzen. Die betrieblichen Einsatzgrenzen aus häuslichem Abwasser zur Wärmebereitstellung sind im Forschungsbericht des BMFT erstmalig im Jahr 1985 untersucht worden.<sup>692</sup> Die Auswertung von Abwassertemperaturmessungen in Trennsystemen zeigt, dass ungereinigte Abwässer in städtischen Kanalsystemen ein größeres Wärmepotenzial aufweisen als gereinigte Abwässer nach der biologischen Klärung in Kläranlagen. Auswertungen von Messdatenreihen städtischer Abwassertemperaturwerte im Kläranlagenzulauf zeigen, dass die Abwassertemperaturwerte durchschnittlich zwischen 8°C und 25°C betragen. Der Jahresganglinienverlauf der Abwassertemperaturwerte im Kläranlagenzulauf bei mittleren Abwasserströmen zeigt eine deutliche Temperaturdifferenz. Die Studie weist nach, dass eine bis 30%ige Bereitstellung des Brauchwasserpotenzials aus dem städtischen Abwassernetz für die standortnahe Gebäudeversorgung in städtischen Quartieren gegeben ist. Die wissenschaftliche Fachliteratur stellt unterschiedliche Wärmeentzugsleistungswerte von Abwasserströmen aus häuslichen Abwässern städtischer Abwassertrennsystemen zur Verfügung. Der tageszeitabhängige Abwasservolumenstrom ist maßgeblich für die Berechnung der Wärmeentzugsleistung des Abwassers. Die gesamte Wärmeleistung wird über die tägliche mittlere einwohnerspezifische Abwassermenge nach dem DWA-Regelwerk M 114 berechnet.<sup>693</sup> Das durchschnittliche Schmutzwasseraufkommen in Städten und Gemeinden wird als Tagesmittel in Bezug zum Abwasserkanaleinzugsgebiet wie folgt berechnet<sup>694</sup>:

$$(52) \quad Q_{s,d} = 170 \cdot * \cdot [1 + 1/2 \log(E/1000)]$$

---

<sup>691</sup>Bundesministerium für Umwelt (BMU): BMU Fachzeitschrift Umwelt, Band 5 Referat ZGII Industrieunternehmen Otto Fuchs KG, Meinerzhagen: Abwärmenutzung aus Rauchgas von Industrieöfen; Energieeffizientes Vorhaben in der metallverarbeitenden Industrie, 2010.

<sup>692</sup>Vgl.: BMFT: Einsatzgrenzen bei der Nutzung der Wärme aus kommunalem Abwasser mittels Wärmepumpen, Dreschmann, Pöppinghaus, Forschungsinstitut für Wassertechnologie der RWTH Aachen, Aachen, 1985, S.28 ff.

<sup>693</sup>Vgl.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.): DWA-Regelwerk: Merkblatt DWA-M114. Energie aus Abwasser, Wärme und Lageenergie, Hennef, Juni 2009.

<sup>694</sup>Vgl.: Baudirektion Kanton Zürich: Beurteilung der Fremdwasser-Verhältnisse, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2004.

$$(53) \quad Q_{s, \min} = 1/4 + \log(E/1000)$$

Das Wärmestrompotenzial des städtischen Abwassers ist nach dem Berechnungsansatz:

$$(54) \quad Q = v \cdot \rho_w \cdot V \cdot c_w \cdot \Delta\theta \quad [kW]$$

Das Institut für Siedlungswasserbau der Universität für Bodenkultur in Wien untersuchte das Aufkommen häuslicher Abwässer auf Abwassertemperaturschwankungen, tägliche Abwassermengen und Abwasserzusammensetzung einer mittelgroßen Stadt mit 85.000E.<sup>695</sup>

Die Temperaturwertmessungen<sup>696</sup> aus Feldversuchen in Abwasserkanalnetzen zeigen, dass in Trennsystemen Durchschnittstemperaturwerte<sup>697</sup> im Jahresmittel von 10°C bis 20°C vorgehalten werden. Langzeitemperaturmessungen beweisen, dass die Temperaturdifferenzwerte von Abwasserströmen in bebauten Wohngebieten aufgrund der Abwasserkanalnetzlänge und des Einflusses von Umgebungstemperaturen kontinuierlich abnehmen und den Abwassertemperaturwert von 10°C unterschreiten.

Die technische Auslegung von Abwasserwärmetauschern wird durch Hersteller<sup>698</sup> mit einer maximalen Wärmeleistung von 4,25kW/m<sub>Leitungslänge</sub> bei einer Wärmeleitfähigkeit von 1,580W/m K angegeben. Die Abwasserkanalnetze in Gemeinden mit einer Siedlungsgröße von weniger als 5.000 Einwohnern werden für einen täglichen häuslichen Schmutzwasseranfall von 150 l/E/Tag geplant. Diese Kennzahl führt zu einer Überschätzung der täglichen Schmutzwasserstrommenge und ist für die städtische Wärmeversorgung in Feldversuchen standortnah nachzuweisen.<sup>699</sup>

Das Modellprojekt der Stadt Bremerhaven zeigt, dass bei einer Kanalnetzlänge von 140m eine maximale Wärmeleistung von 230kW/a theoretisch dem Abwasserstrom entzogen werden kann und für 300 Wohneinheiten bereitgestellt wird. Die Fachliteratur empfiehlt für die Planung von Abwasserkanalnetzen zur Wärmeentnahme einen Abwasserkanalquerschnitt des Abwassertrennsystems von DN >600 und eine mittlere tägliche Abwas-

<sup>695</sup>Vgl.: Universität der Bodenkultur Wien: Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz, Tabelle 11-1: Häusliches Schmutzwasser (ATV, 1994), Tabelle 11-1: Tagesganglinie des Trockenwetterabflusses einer Stadt mit 85.000 Einwohnern inkl. Industrie (ATV, 1994), Nr. 811.103, Haberl, S. 139.

<sup>696</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Balke, K.-D., Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen, S. 7, Februar 1981, S. 55 Abb.40 Jahresgang von Abwassertemperaturen nach MAN (ganzjährige mittlere Abwassertemperaturen der Städte Düsseldorf 22,1° C, Bad Harzburg 17,2° C, Fürth 12,5° C).

<sup>697</sup>Ebd.: S. 141 (Abschnitt 11.3.1 Allgemeine Merkmale).

<sup>698</sup>Bea GmbH und prosys GmbH: Studie zur Untersuchung des Abwasserwärmepotenzials in Bremerhaven, S. 18.

<sup>699</sup>Vgl.: Bemessung von Kläranlagen im ländlichen Raum: Fachartikel, Information aus dem Internet URL <http://sbr.gmxhome.de> (Januar 2009), Nr. 6.1.

sertemperatur von 8°C. Die Wärme aus Abwasser ist geeignet zur Bereitstellung des Gebäudeheizwärmebedarfs mit Niedrigtemperaturwärme und geringen Vorlauftemperaturwerten. Betriebsparameter wie eine ausreichende Abwassermenge im Trennsystem des städtischen Abwassersystems, ein ganzjähriger Abwasserstrom und ein Versorgungsnetz von 100m zwischen den zu versorgenden Wohngebäuden und dem Schmutzwassertrennsystem sind erforderlich.<sup>700</sup>

### *Geothermie*

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung (TAB) beim Bundestag stellt die Ergebnisse der Untersuchung dar und folgert, dass ein jährliches technisches Angebotspotenzial von 312TWh pro Jahr in Deutschland für die geothermische Stromerzeugung zur Verfügung steht. Im Jahr 2016 sind 18 Geothermieanlagen mit 7,3MW elektrischer und 188MW thermischer Leistung registriert worden. Die Steigerung des Wärmepotenzials der Geothermie ist von 1,5TWh im Jahr 2000 auf 5,6TWh im Jahr 2010 statistisch erfasst worden.<sup>701</sup>

Der weitere Ausbau der Geothermie ist abhängig von dem Stand der Technik, der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit. Die notwendigen Explorationsmaßnahmen, Erdbohrungen und ökologische Hemmnisse schränken den Ausbau von Geothermie ein. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen ergibt sich ein erschließbares technisch-ökologisches Potenzial bis zum 2050 von circa 50TWh pro Jahr bei einer installierten Netto-Leistung von 6,4GWel. Die Geothermie stellt nach Wind und Sonne das größte Ausbaupotenzial, um die Energieversorgung bis 2050 zu 100% aus regenerativen Energien decken zu können. Die Speicherung des erzeugten Wärmepotenzials aus der tiefen Geothermie ist in Modellanlagen umgesetzt worden und in Nahwärmenetze unter Hinzunahme der Kraft-Wärme-Kopplung in das Versorgungssystem eingespeist worden. Die Mindestanschlussdichte und Mindestwärmeabnahme sind wesentliche Indikatoren für einen effizienten Nahwärmenetzbetrieb mit Geothermie und KWK-Wärme. Versorgungsgebiete mit einer hohen Wohndichte und einer hohen Bedarfswärmedichte sind geeignet, städtische Nahwärmeinseln für eine effiziente kommunale Energieversorgung bereitzustellen.

---

<sup>700</sup>Bea GmbH und Prosys GmbH (Hrsg.): Potenzialstudie zur Abwasserwärmenutzung in Bremerhaven, Bremer Energie-Konsens, Januar 2004, S. 12.

<sup>701</sup>Umweltbundesamt: Wie viel Potenzial steckt in der Geothermie? Information im Internet URL <http://www.umweltbundesamt.de/> (Stand 2016).

Zur Unterstützung der saisonalen Lastabdeckung von städtischen Quartieren und Siedlungen sind „kalte Nahwärmenetze“ geeignet. Die Wärmestromdichte der geothermischen Wärme wird in der Fachliteratur im Mittel mit  $70\text{W}/\text{m}^2$  angegeben. Das Wärmepotenzial einer geothermischen Lagerstätte wird nicht nur durch die Bodentemperaturwerte bestimmt, sondern auch durch die Wärmekapazität der anstehenden Bodenschichten zum Beispiel Naturgestein  $700$  bis  $1200\text{J}/(\text{K kg})$ . Der Wärmetransport in den Bodenschichten ist abhängig von dem geothermischen Gradient und wird mit  $30^\circ\text{C}/\text{km}$  angegeben. In Abhängigkeit der mittleren Bodenoberflächentemperaturwerte von  $7$  bis  $11^\circ\text{C}$  im Jahresmittel sind in  $2.000\text{m}$  Bodentiefe Temperaturwerte von  $70^\circ\text{C}$  und in  $5.000\text{m}$  Bodentiefe Temperaturwerte von  $160^\circ\text{C}$  festgestellt worden. Städtebauliche Planungsinstrumente wie das Wärme-Contracting-Modell unterstützen den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb von geothermischen Anlagen. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz fördert die Optimierung der Kraftwärmekopplung in Verbindung mit der Geothermie, damit Anreize geschaffen werden, Wärmelasten in bestehende Fern- und Nahwärmenetze einzuspeisen.

#### *Solare Erwärmung von städtischen Luftmassen und Wärmerückgewinnung*

In hoch verdichteten urbanen Gebieten werden atmosphärische Luftmassen des städtischen Raumes durch die solare Einstrahlung tagsüber erwärmt und während der Tageszeit in Luftmassen gespeichert. Die Außenluft wird über Fensterbrüstungen zur Wärmerückgewinnung angesaugt und Luftwärmetauschern (Enthalpie-Tauscher) zugeführt, die die Wärme in Raumwärme umwandeln. Ein effizienter Anlagenbetrieb des Wärmetauschers ist bis zu einem atmosphärischen Lufttemperaturwert von circa  $-5^\circ\text{C}$  gewährleistet. Die mittleren täglichen Außentemperaturwerte in den Wintermonaten dürfen den Temperaturwert von  $-15^\circ\text{C}$  während der Heizperiode nicht überschreiten.<sup>702</sup> Im Fall der Bereitstellung von Klimakälte zur Raumklimatisierung ist der atmosphärische Temperaturwert von  $+35^\circ\text{C}$  maßgebend.<sup>703</sup>

Luftbetriebene Wärmepumpenanlagen erzeugen Vorlauftemperaturen von  $55$  bis  $65^\circ\text{C}$  bei atmosphärischen Lufttemperaturen von  $-16$  bis  $-20^\circ\text{C}$  und sind nur mit einem geeigneten Kältemittel und leistungsstarken Scroll-Kompressoren in Verbindung mit einer Einspritzkühlung und Doppeldruckausgleich zu betreiben. Nach dem Prinzip des umgekehrten

---

<sup>702</sup>Vgl.: Fachzeitschrift Klima vor Ort: Bauen-Sanieren-Energiesparen im Ostalbkreis, Fachartikel: Voll unter Dampf, Fachtext: Lüftungskonzepte werden bei der Fenstersanierung häufig stiefmütterlich behandelt, Mai 2012, S. 22-23.

<sup>703</sup>Vgl.: Domotec GmbH: Wärmepumpensysteme von Domotec: Grundlagen für die Auslegung von Wärmepumpen und Wärmeentzugsleistung. Information im Internet URL <http://www.domotec.de>. (05.2008).

Kältemittelkreislaufs arbeiten Split -Klimageräte zur Klimatisierung und zur Erzeugung von Raumwärme im Kühlbetrieb als Kältemaschine und im Heizbetrieb als Luft-Luftwärmepumpe. Schallleistungspegel von luftbetriebenen Wärmepumpen von 50dB(A) erfordern einen Mindestabstand zwischen dem Aufstellungsort der Wärmepumpe und der Grundstücksgrenze zu Nachbargebäuden von mindestens 4m.

Gebäudeaußenflächen, insbesondere Fensterflächen, Geschossdecken, Fassaden und Dachflächen, reflektieren die solare Strahlung als Transmissionswärme an die Umgebungsluft ab. Die Auswertung von Modellvorhaben zeigt, dass die Transmissionswärmepotenziale von Gebäuden und Flächen in Klimaregionen stark voneinander abweichen.

Als Ursache ist die Differenz zwischen den Heizgradtagen und den Heiztagen Ergebnis der wissenschaftlichen Untersuchung. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz zeigt für die Berechnung des Wärmestroms, dass mit zunehmendem Anstieg der Außentemperatur die Intensität der Wärmereflexion in Abhängigkeit des Fassadenbaustoffes, Emissionsgrades und Bauteilkörpers zunimmt.<sup>704</sup>

Feldversuche von städtischen Modellvorhaben zeigen, dass Baumaterialoberflächen über den Reflexions- und Absorptionsgrad die solare Strahlungsaufnahme beeinflussen und das nutzbare Wärmepotenzial verändern. Die bautechnische Feldforschung beweist, dass die Speicherung der auftreffenden solaren Strahlung und die Nutzung der Transmissionswärmeverluste durch den technischen Bauteilabsorber, der die Wärmeströme aus der Umgebungsluft über die Gebäudeaußenflächen absorbiert, als nutzbares Wärmepotenzial zwischenspeichert werden kann. Zur täglichen Wärmespeicherung eignen sich Bauteilabsorber aus Stahlbeton als konstruktives Bauelement. Stahlbeton besitzt eine hohe Wärmespeicherkapazität von 2.400kJ/m<sup>3</sup>K und ist für einen monovalenten Wärmepumpenanlagenbetrieb einsetzbar. Die Aufbereitung des Wärmepotenzials aus städtischen atmosphärischen Luftmassen für die Gebäudeversorgung wird in Forschungsvorhaben untersucht.<sup>705</sup>

---

<sup>704</sup>Vgl.: Stefan-Boltzmann-Gesetz: Berechnung des Wärmestroms und die Strahlungsleistung für einen Körper mit der Stefan-Boltzmann-Konstante.

<sup>705</sup>Vgl.: Emissionsgrad zum Beispiel von Sand mit 0,76 bei einer Temperatur von 20° C, dagegen von Wasser mit 0,965 bei einer Temperatur von 10 bis 50° C. Der Reflexionsgrad für feuchten Sand wird mit 20-30 % und für trockenen Sand mit 45 % angegeben.

### *Thermische solare Brauchwasseranlagen*

Solarthermische Anlagen mit Flach- oder Röhrenkollektoren erzeugen Warmwasser, das für den Raumwärme- und Warmwasserbedarf für Siedlungen, städtische Quartiere und Einzelgebäude bereitgestellt wird. Die Auslegung und Leistungsberechnung der Anlagen erfolgt nach den Vorgaben der DIN 4701-Teil 10. Der solare Energieertrag von thermischen Solaranlagen mit Flachkollektoren, die nach Süden geneigt sind, beträgt nach solarem Strahlungsangebot an Standorten in Klimaregionen zwischen 160 und 400W/m<sup>2</sup>a.<sup>706</sup> In Deutschland stehen Jahresmittelwerte der Globalstrahlung von maximal 1.000kWh/m<sup>2</sup> und in den südlich gelegenen Mitgliedstaaten Europas bis zu 1.800kWh/m<sup>2</sup> zur Verfügung.

Der Vergleich von Leistungsberechnungen solarthermischer Anlagen zeigt, dass eine 1 bis 2m<sup>2</sup> nach Süden ausgerichtete Kollektorfläche zur saisonalen Bereitstellung von Brauchwasserwärme für einen Zweipersonenhaushalt gegeben ist. Für die ganzjährige Bereitstellung des Warmwasserbedarfs für Wohngebäude mit einer Brauchwassertemperatur von 60°C sind circa 1,9 kWh/Tag/Person (700-1000kWh/Person/a) Nutzenergiebedarf in Form von Erdgas oder Heizöl erforderlich. Ein Vergleich von thermischen Anlagen zeigt, dass hohe Wirkungsgrade von bis zu 80 % je nach Klimaregion in Deutschland erzielt werden können, wenn der Wärmedurchgangskoeffizient 3,5W/m<sup>2</sup>K erreicht und die Flächenneigung 45° beträgt.<sup>707</sup> Das solarthermische Wärmepotenzial ist nutzbar für die Gebäudeversorgung in Verbindung mit Heizungsanlagen und Kombisystemen sowie einem Kurzzeit- oder Langzeitwärmespeicher. Im Jahresmittel ist am Standort 115 bis 400W/m<sup>2</sup>a Wärme nutzbar, um einen täglichen Warmwasserbedarf von 1,9 kWh/Tag/Person (700 kWh/Person/a) bereitzustellen.

## **8.7. Städtische Wärmespeicheranlagenetze**

Die Auswertung von städtischen Wärmeversorgungsprojekten mit regenerativen Energien zeigt, dass großvolumige Wärmespeicheranlagenetze erforderlich sind, um am Versorgungsstandort die dezentrale solare Wärmeversorgung für städtische Quartiere zu unterstützen. Großvolumige unterirdische Warmwasserspeichersysteme in städtischen Quartie-

---

<sup>706</sup>Vgl.: Auslegung von Solaranlagen; Information im Internet URL <http://www.impulsprogramm.de> (2011).

<sup>707</sup>Vgl.: Auslegung von Solaranlagen; Information aus dem Internet URL <http://www.impulsprogramm.de> (2011).

ren sind bereits Stand der Technik.<sup>708</sup> Die Bereitstellung von Niedrigtemperaturwärme aus solarer Strahlung über städtische Flächen für die städtische Wärmeversorgung bedingt eine Energieversorgungsstruktur mit städtischen dezentralen Wärmespeicheranlagenetzen.

Die technologische Weiterentwicklung von Langzeitwärmespeichern ist zum heutigen Stand 2017 ausgerichtet auf die ganzjährige Speicherung von Geothermiewärme und der Zuführung aus dem Ertrag solarer thermischen Anlagen. Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Entwicklung effizienter Wärmespeichermaterialien wie Phasenwechsel- und Absorptionsmaterialien mit einer hohen Materialdichte zeigen, dass Langzeitwärmespeichersysteme den effizienten Betrieb mit einer Reduzierung von Wärmeverlusten erreichen.

Das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart untersucht im Rahmen des Forschungsprojektes Solarthermie 2000+ den Bau von solargestützten Nahwärmesystemen mit dezentralen Kurzzeit- und Langzeit-Wärmespeichern. Die Untersuchungen des Forschungsprojektes fokussieren sich auf die solargestützte Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärmespeichern mit dem Ziel, einen solaren Deckungsgrad von bis zu 50% am Gesamtheizwärmebedarf von Gebäuden zu erzielen und ausreichend Brauchwasserwärme für die standortnahe Versorgung von Gebäuden im Bestand bereitzustellen.<sup>709</sup>

Weitere Untersuchungsergebnisse von Kurzzeit- und Langzeitwärmespeichersystemen (Kieselsteine als Wärmespeichermaterial) in Verbindung mit der städtischen Nahwärmeversorgung und Erdwärme in Städten Ravensburg, Hamburg, Friedrichshafen und Neckarsulm zeigen, dass mit dieser Versorgungsvariante eine effiziente ganzjährige Wärmebereitstellung für städtische Versorgungsgebiete gegeben ist. Das städtische Modellvorhaben „50 Solarsiedlungen in Nordrhein-Westfalen“ des ITW Stuttgart beweist, dass dezentrale Wärmespeicheranlagensysteme für eine sichere effiziente ganzjährige solare Wärmeversorgung unerlässlich sind.<sup>710</sup>

---

<sup>708</sup>Mangold, Dirk: Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher in Deutschland, ITW Universität Stuttgart, S. 1-7, Tabelle 1, 1998-1999

<sup>709</sup>Vgl.: ITW Stuttgart: Analyse des Betriebes von Pilotanlagen zur Speicherung von Warmwasser; Solarthermie 2000+, Stuttgart, 2000.

<sup>710</sup>Vgl.: Mangold, Dirk: Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher in Deutschland, ITW Universität Stuttgart, S. 1-7, Tabelle 1, 1998-1999.

Die Auswertung von Langzeituntersuchungen an Grundwasserwärmespeichern in Regionen und Städten zeigt, dass die Speicheranlagenleistung von standortbezogenen Einflussgrößen und Leistungskennzahlen abhängig ist. Die meteorologischen, geologischen und hydrogeologischen Einflüsse sind für den Betrieb und für die technische Auslegung zu berücksichtigen. Der Anlagenvergleich zeigt, dass natürliche Wärmespeicheranlagen mit konstanten Temperaturwerten über eine stabile Wärmeentzugsleistung während der Heizperiode verfügen.<sup>711</sup>

Aktuelle Forschungsvorhaben untersuchen die Steigerung der Energiedichte von Wärmespeicheranlagen mit der Entwicklung von Materialien und Komponenten auf der Basis von Sorptionsprozessen. Für die städtische Gebäudeversorgung realisierte Sorptionsspeicheranlagen erzielten eine Dichte von 130kWh/m<sup>3</sup>. Das Projekt MAKSORE untersucht die Steigerung einer effektiven volumetrischen Energiedichte von mindestens 180kWh/m<sup>3</sup>.<sup>712</sup>

#### *Langzeitwärmespeichersysteme*

Das Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Forschung und Technologie in Deutschland<sup>713</sup> untersuchte von 1970 bis 1980 Technologien zur Wärmespeicherung von solarer Wärme in dezentralen Warmwasser-Großspeichern unter Berücksichtigung der meteorologischen regionalen Standortverhältnisse. Die Forschungsergebnisse der Modellversuche zeigen, dass eine ganzjährige autarke Heizung- und Warmwasserversorgung von städtischen Quartieren mit solarer Wärme und dezentraler Wärmespeicherung nicht gewährleistet werden kann. Untersuchungsergebnisse von Wohnprojekten zeigen, dass kleinvolumige Wärmespeicheranlagen zur Sicherstellung der Heizwärme und des Warmwasserbedarfs in Etagenwohnungen weiterhin zur Unterstützung der solaren Wärme erforderlich sind. Die technologische Weiterentwicklung von zentralen Großwärmespeicheranlagen für Gebäude und Siedlungen bezieht sich auf ein Wärmespeichervolumen von 5 bis 10m<sup>3</sup> zur ganzjährigen Wärmeversorgung.<sup>714</sup> Die

---

<sup>711</sup>Vgl.: Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607L: Solare Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, wissenschaftlich-technische Programmbegleitung für Solarthermie 2000 Plus, Solites Stuttgart, 2005 bis 2007.

<sup>712</sup>Vgl.: Forschungsinitiative der Bundesregierung: Energiespeicher. Information im Internet URL <http://www.forschung-energiespeicher.info/waerme-speichern/projektliste> (2017).

<sup>713</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie: BMFT-FB-T 80-173, Langzeitspeicher für Wohngebäude und Solararchitektur, Bonn, 1980.

<sup>714</sup>Ebd.: S.7 (Warmwasserspeicher).

technische Entwicklung von Langzeitspeicheranlagen wird mit Forschungs- und Entwicklungsprojekten unterstützt.

### *Erdwärmespeicher*

Erdwärmespeicher sind natürliche Speichersysteme und werden als Wärmeausgleichs Speicher, die die Überschusswärme aufnehmen und abgeben, zur Unterstützung der Versorgungssicherheit des kommunalen Versorgungssystems eingesetzt. Eine effiziente Nutzung von saisonalen Wärmespeichern ist gegeben, wenn das Erzeuger- und Verbraucherlastmanagement ausgeglichen und dem Abnahmedefizit eine adäquate, zeitlich verschobene Wärmezunahme gegenübersteht. Ganzjährig in Betrieb befindliche Langzeiterdwärmespeicher sind mit einer großvolumigen Speicherkapazität ausgestattet um die tägliche Wärmeabgabe vorzuhalten.

Die Betriebsweise von Erdwärmespeichersystemen ist durch das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung seit 1981 erforscht worden.<sup>715</sup> Im Fokus der Langzeituntersuchungen ist die Speicherleistungsfähigkeit von kugelförmigen Erdspeichern zu anderen geometrischen Behälterformen analysiert worden. Der effiziente Langzeitbetrieb mit einem Wärmelastmanagement zur Bereitstellung von ganzjähriger Raumwärme für Gebäude ist durch Simulationen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie nachgewiesen.<sup>716</sup>

### *Aquiferspeichersysteme*

Die geologischen Verhältnisse am Standort bestimmen die Nutzung von Aquiferspeicheranlagen als thermische unterirdische Wärmespeicher. Geologische Untersuchungen der Bodenschichten belegen, dass in Deutschland bis zu 70% der Bodenschichtverhältnisse für den Betrieb von Aquiferspeicheranlagen geeignet sind und eine Wärmeenergiebereitstellung von bis zu 10GMh vorgehalten werden kann.<sup>717</sup>

Betriebliche Untersuchungen über die Wärmespeicherkapazität von Aquiferspeicheranlagen zeigen, dass 2.000 Speicheranlagen eine Warmwasserspeicherkapazität von über 10

---

<sup>715</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie: Forschungsbericht BMFT-FB-T 81-200: Untersuchung des Betriebes eines Erdwärmespeichers, 11/ 1981.

<sup>716</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie: Forschungsbericht BMFT-FB-T 81-200: Untersuchung des Betriebes eines Erdwärmespeichers. Speicherperiode mit konventionellen Speichersystemen von Warmwasser für den Zeitraum von einigen Tagen bis maximal zu zwei Monaten, 11/2008, S.8.

<sup>717</sup>Vgl.: Energieversorgung der Stadt Berlin: Energiekonzept des Gebäudes des Deutschen Bundestages, Berlin.

TWh in Deutschland bereitstellen können.<sup>718</sup> Das technische Prinzip von Aquiferspeichersystemen<sup>719</sup> ist die Speicherung von solarer Strahlungsenergie erwärmtes Wasser, das in den Grundwasserleiter injiziert wird. Da die Warmwasserentnahme während der Heizperiode eine Reduzierung der Grundwassertemperaturwerte erzeugt, wird im Aquiferspeicherbehälter das gespeicherte Wasser kontinuierlich mit Hilfe von Zusatzbeheizungen erwärmt, damit ganzjährig die Wärmebereitstellung für Gebäude gesichert werden kann. Die thermische Beeinflussung oder Vereisung der angrenzenden Bodenschichten ist zu unterbinden mit einem Mindestabstand von 50m zwischen den Bohrsonden. Die betriebliche Planung von Aquiferspeicheranlagen bedarf einer geologischen und hydrogeologischen Voruntersuchung am Speicherstandort. Die Aquiferkältespeicheranlagen sind für die Klimatisierung von Gebäuden geeignet und der Strombedarf für die Klimakältebereitstellung wird in den Sommermonaten reduziert.

#### *Adsorptive Wärmespeichersysteme*

Das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB in Stuttgart erforscht die Entwicklung von Adsorptionswärmespeicheranlagen. Das Speicheranlagensystem ist mit Zeolith-Kügelchen als Speichermaterial gefüllt, da das Speichermaterial eine poröse Materialzusammensetzung aufweist und die Kugeloberflächenstruktur zur effektiven Aufnahme von Wärme geeignet ist. Das Speichermaterial wird vor dem Befüllen mit Wasserdampf benetzt, sodass in den Materialporen des Zeolith Wärme vorgehalten wird. Im Fall der Wärmeaufnahme wird das in den Poren des Speichermaterials befindliche Wasser entfernt und unter Wärmezufuhr getrocknet. Die im Speichermaterial aufgenommene Wärme wird über einen langen Zeitraum gespeichert bis zu einer Speichertemperatur von über 100°C.

Die chemische und sorptive Wärmespeicherung dagegen ist ein interdisziplinäres Forschungsfeld und umfasst die Materialentwicklung zur Herstellung und Optimierung von Speichermaterialien sowie die thermische und chemische Verfahrenstechnik zur Verfahrens- und Komponentenentwicklung. Das Ziel ist die Erhöhung der thermischen Speicherdichte von Speichermaterialien und gleichzeitig die Verbesserung des Wärme- und

---

<sup>718</sup>Vgl.: Fachausschuss Nachhaltiges Energiesystem 2050 (FVEE): Energiekonzept 2050; Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % Regenerativen Energien, Juni 2010, S. 57.

<sup>719</sup>Vgl.: WIRO Wohnungsgesellschaft mbH: Projekt Helios: Betrieb eines Aquifer-Wärmespeichers in Rostock. Fachbericht aus dem Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e.V., Nr.38/39, 10. Jahrgang/Heft 5/6, 11/12 2002, S.8.

Stofftransports bei der thermischen Speicherbe- und -entladung. Eine hohe Speicherdichte und eine verlustfreie Wärmespeicherung sind insbesondere für Langzeitwärmespeicheranlagen entscheidende Kriterien, um ein geringes Speichervolumen mit einer hohen Effizienz der Wärmespeicherung zu erzielen. Ein weiterer Einsatzbereich des chemisch-sorptiven Wärmespeichers sind saisonale Wärmespeicheranlagen für solarthermische Anlagen, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) und geothermische Anlagen.<sup>720</sup>

#### *Natürliche Wärmespeicher als Oberflächengewässer und Grundwasservorkommen*

Oberflächengewässer, Flüsse, Kanalstrecken und Küstengewässer speichern die tägliche solare Strahlung und sind daher geeignet, ein ganzjähriges Wärmepotenzial als Niedrigtemperaturwärme bereitzustellen. Das Wasser in Oberflächengewässern besitzt einen geringen Reflexionsgrad von 0,1, aber einen Gesamtemissionsgrad von 0,965. Nicht fließende Oberflächengewässer sind demnach als effiziente Wärmespeicher in Tiefen mit stationären ganzjährigen Temperaturwerten nutzbar. Durchgeführte Feldversuche bestätigen, dass in Gewässertiefen von 10m eine konstante Wassertemperatur von circa 10-12° C vorgehalten wird. An kalten Wintertagen während der Heizperiode beträgt zum Beispiel der mittlere Temperaturwert von Grundwasserleitern in den wasserführenden Schichten 7°C bis 12°C. Grundwasserwärmepumpen werden nach dem Entnahme- und Sickerbrunnenprinzip bei einer konstanten mittleren Quelltemperatur von 8 bis 12° C eingesetzt. Die Mindestentfernung zwischen Entnahme- und Sickerbrunnenanlage muss zwischen 10 m und 15m betragen und der Grundwasserspiegel darf nicht tiefer als 15m unter der Erdoberfläche liegen, da ein effizienter Betrieb der Förderpumpe sonst nicht zu erwarten ist. Die Fachliteratur für Grundwasserwärmepumpen empfiehlt für die Auslegung von Wasserwärmepumpenanlagen, dass für eine Gebäudeheizwärmeleistung von 10kW ein Grundwasserstrom von 1.500 bis 2.000 l/h vorhanden ist.

#### *Hydrothermalwasserspeicher*

Thermalwasservorkommen sind im Hydrothermalatlas für die Regionen der norddeutschen Tiefebene, des süddeutschen Molassebeckens zwischen Donau und den Alpen, der Schwäbischen Alp und Bayern, im Oberrheintal sowie im Aachener Raum kartographiert.

---

<sup>720</sup>Vgl.: Fraunhofer Gesellschaft–Achema 2012, Wärme speichern – kompakt und flexibel, aus Forschung Kompakt / 01.06.2012. Technologiebeschreibung unter [https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/pressemedien/2012/pdf/fk06\\_2012\\_JUNI.pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/pressemedien/2012/pdf/fk06_2012_JUNI.pdf). Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Information im Internet unter URL [https://www.fraunhofer.de/de/presse/presse\\_informationen/2012/juni/waerme-speichern-kompakt-und-flexibel.html](https://www.fraunhofer.de/de/presse/presse_informationen/2012/juni/waerme-speichern-kompakt-und-flexibel.html). (2016).

Die Kartierung stuft die förderfähigen Erdwärmequelltemperaturwerte nach Wassertemperaturstufen ( $>40^{\circ}\text{C}$ ) ein. Das Hydrothermalwasser wird über eine Tiefenbohrung an die Oberfläche gefördert, abgekühlt und über eine zweite Bohrstelle in die Bodenschichten, aus die das Wasser entnommen worden ist, zurückgeleitet.<sup>721</sup>

Die Fachliteratur zeigt Projektbeispiele, die im städtischen Umland die Förderung von Hydrothermalwasser mit einer Wassertemperatur von unter  $100^{\circ}\text{C}$  für eine betriebswirtschaftliche Gebäudeversorgung gewährleisten. Die gleichzeitige Erzeugung von Strom ist mit der Technologie der ORC Turbine<sup>722</sup> mit Umwandlung des Thermalwassers ab einer Thermalwassertemperatur von mehr als  $106^{\circ}\text{C}$  gegeben.

Betriebsergebnisse aus Projektbeispielen zur Förderung des Thermalvorkommens mit Tiefenbohrungen zeigen, dass ein mittlerer Durchschnittstemperaturwert des Bodens während der Heizperiode zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $+10^{\circ}\text{C}$  sowie eine Auslegungstemperatur der Wärmequelle von mindestens  $5^{\circ}\text{C}$  bestehen muss. Der direkte Wärmeentzug aus den tiefen Erdschichten wird über Solewasserleitungen gewährleistet. Der Vergleich standortbezogener Auslegungsparameter führt zu einer mittleren ganzjährigen Wärmeentzugsleistung aus tiefen Erdschichten von circa  $50\text{ W/m}_{\text{Bohrtiefe}}$  bei einer Erdwärmebohrung ab einer Mindestdiefe von 5m. Der Abstand zu den Nachbargrundstücken muss mindestens 5m betragen. Zur Erzielung einer Heizwärmeleistung von 10kW ist eine Erdwärmesonden - tiefe von 70 bis 130m erforderlich.<sup>723</sup>

### *Tiefenerdwärmespeicher*

Die Recherche der Fachliteratur über die Planung und den Anlagenbetrieb bereits in Betrieb befindlicher Anlagen für Erdsonden und Tiefenerdwärmespeicheranlagen zeigt, dass die Tiefenerdwärme unabhängig von der Tages - und Nachtzeit, den Jahreszeiten und den klimatischen Bedingungen für die Gebäudeversorgung zur Verfügung steht. Erdwärmesonden sind in Bodentiefen von 100m bis zu 150m effektiv mit einer Mindestsondenlänge von 40m unter Berücksichtigung des standortbezogenen geologischen Profils. Die richtige Bemessung der Erdwärmesondenlänge ist nach hydrologischen und geologischen Bedin-

---

<sup>721</sup>Vgl.: Landesinitiative Zukunftsenergien NRW: Geothermie - Erdwärme für Nordrhein-Westfalen. Zukunftsenergien. Unterstützt von Land und Wirtschaft. Hrsg: Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen, S.5 ff. <http://www.energieland.nrw.de>.

<sup>722</sup>Ebd.: S. 7 (Strom aus Geothermie mit dem ORC –Organic Ranking Cycle-, Projekt: Marktgemeinde Altheim in Oberösterreich.

<sup>723</sup>Vgl.: VDI Richtlinie 4640 Blatt 2: Auslegungsparameter für EWS Anlagen < 30kW.

gungen eine wesentliche Voraussetzung für einen effizienten technischen und wirtschaftlichen Anlagenbetrieb. Die überschüssige Wärme wird in zentralen überirdischen Speichersystemen oder in Erdbohrpfählen am Versorgungsstandort direkt gespeichert.<sup>724</sup>

Einen Spezialfall der Erdwärmesonden stellen Energiepfähle dar, die beim Bau von Gebäudebauwerken in den Bohrpfahlgründungen integriert werden. Ergebnisse über den ganzjährigen Betrieb von Erdwärmesondenfeldern an den Versorgungsstandorten der Schweiz zeigen, dass zwischen den Sonden die Erdschichttemperaturwerte im Wärmeentzugszeitraum abnehmen. Das Bundesamt für Energiewirtschaft der Schweiz hat mit wissenschaftlichen Instituten für die Planung von Erdwärmesondenfeldern Berechnungsmodelle entwickelt, die nachweisen, dass ein Abstand zwischen den Sonden von mehr als 5m eingehalten werden muss, da sonst eine Vereisung der Bodenschichten zu erwarten ist.<sup>725</sup>

Die Bohrung von Erdwärmesonden in Deutschland bedarf der behördlichen Erlaubnis oder Bewilligung nach § 3 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG). Eine Betriebs- und Bohrerlaubnis ist nach § 8 Bundesberggesetz für Anlagen mit größerer Heizwärmeleistung als 30kW mit einer Bohrtiefe von mehr als 100m erforderlich. Tiefenbohrungen sind über das Lagerstättengesetz bei den Landesämtern für Umwelt und Geologie anzuzeigen.

Das zur Verfügung stehende geothermische Potenzial ist in den städtischen Quartieren und im städtischen Umland über die dezentrale Nahwärmeversorgung nutzbar. Der Langzeitbetrieb von Erdwärmesonden mit Wärmespeicherung ist in Pilotvorhaben durch das Technische Institut der Universität Stuttgart auf die Veränderung der Wassertemperaturwerte im Erdwärmesondenspeicher untersucht worden. Die statistische Auswertung der Temperaturmessdaten zeigt, dass in einer Bodentiefe von größer als 32m ein konstanter Speichertemperaturwert von bis zu 30°C ganzjährig vorgehalten wird und saisonale Schwankungen durch meteorologische Einflüsse nicht nachweisbar sind.<sup>726</sup> Die Kartierungskarte von einem geothermischen Vorkommen im städtischen Umfeld von Krefeld für die Versorgung von städtischen Quartieren ist durch rot markierte Felder nachstehend

---

<sup>724</sup>Vgl.: Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e.V.: Nr. 38/39, 10. Jahrgang/Heft 5/6, 11/12. 2002, S.17 - Erdwärmeversorgung Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr. F. Rummel-, S. 20 - Bad Urach mit HDR-Stromerzeugung-, S. 22 - Bad Blumau in Österreich (Thermalwasserbohrung zur Versorgung der Anlage mit Wärmeenergie und für Badezwecke Thermalwassernutzung), 2002, S. 24.

<sup>725</sup>Vgl.: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Erdwärmennutzung in Hessen, Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2005, S. 9 –Nachweis von EUGSTER et al. 1992.

<sup>726</sup>Vgl.: ITW Universität Stuttgart: Graphische Darstellung der Messergebnisse über die Speichertemperaturen in Bodenschichten nach langjährigen Messdaten über einen Zeitraum von drei Jahren zur saisonalen Speicherung von Sonnenwärme.

dargestellt. Die geothermische Ergiebigkeit für 2.400 Betriebsstunden pro Jahr beträgt größer als 150 kWh/m a (roter Flächenbereich) bei einer Erdsondentiefe von 80m. Die Abnahme der geothermischen Ergiebigkeit zeigt sich in den gelben Feldern mit 90 bis 99 KWh/m a.

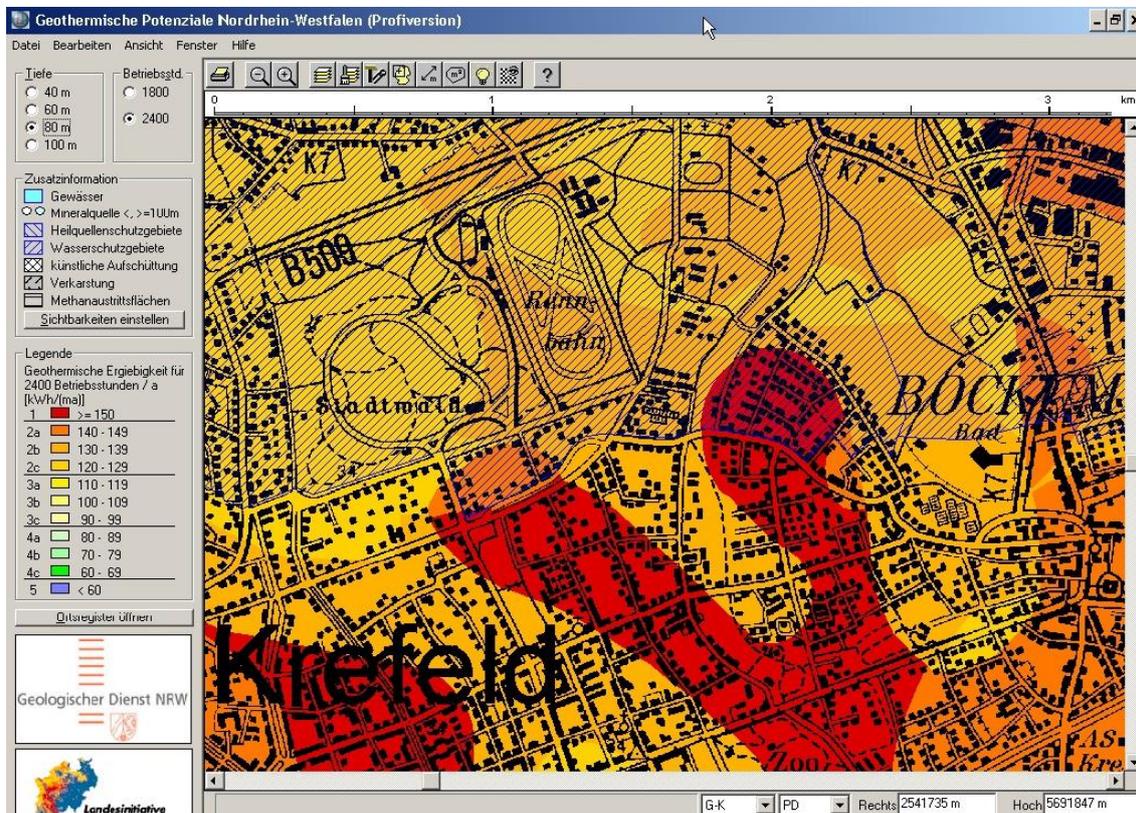


Abbildung 72: Kartierung geothermischer Potenziale in Nordrhein-Westfalen

## 8.8. Energieversorgungsrecht

Die Sicherstellung der regionalen und städtischen Energieversorgung in den europäischen Mitgliedstaaten wird überwiegend durch Sekundärenergie unter Nutzung von fossilen Energieträgern wie Erdgas, Heizöl, Kohle und durch Strom gewährleistet. Städtische Versorgungsgebiete sind durch den ganzjährigen Anlagenbetrieb mit fossilen Kraftwerken für die Strom- und Wärmeversorgung abgesichert. Die Gestaltung der Liefer- und Vertragsverhältnisse zwischen den Energieversorgern und den Kommunen unterliegt dem Energieversorgungsrecht. Die Bereitstellung von Erdgas, Flüssiggas, Heizöl, Holz und Kohle wird über Energiestofflieferanten entweder leitungsgebunden oder logistisch auf der Schiene oder Straße direkt zum Versorgungsstandort geliefert. Leitungsgebundene Energien wie Strom, Erdgas, Fern- und Nahwärme sind im öffentlichen Straßenraum der Kommunen verlegt. Den Endverbrauchern wird Wärme und Strom als Nutzenergie ganz-

jährig bereitgestellt. Kommunen gewähren den Energieversorgungsunternehmen (EVU) die Netzdurchleitung und das Nutzungsrecht für die leitungsgebundene Energieversorgung mit Konzessionsverträgen. Die den Endenergieverbrauchern bereitgestellte Wärme oder Strom wird durch Stromtarif- und Netzendgeldtarifverträge zwischen dem Energieversorger und dem Endverbraucher rechtlich abgesichert.

Die Verpflichtung zur generellen Energieabnahme ist den Gebäude- und Grundstückseigentümern nach aktueller Rechtslagefreigestellt.<sup>727</sup>

### **8.8.1. Energieversorgung und kommunale Selbstverwaltung**

Die Kommune ist eine Gebietskörperschaft und juristische Person des öffentlichen Rechts<sup>728</sup> mit eigener Verfassung, eigenem kommunalen Haushalt und der Zuständigkeit für die Fach- und Dienstaufsicht. Landkreise, Städte und Gemeinden bilden die räumliche und rechtliche Struktur in Deutschland, die in der Kommunalverfassung und in den Gemeindeordnungen der Länder geregelt ist.<sup>729</sup> Das Recht der Städte und Gemeinden auf die Bereitstellung der Energieversorgung für das städtische Versorgungsgebiet gehört zu den örtlichen Angelegenheiten und bedarf der eigenverantwortlichen Umsetzung.<sup>730</sup> Das kommunale Selbstverwaltungsrecht zur örtlichen Energieversorgung wird durch das Energieversorgungsrecht<sup>731</sup> eingeschränkt. Die eigene Verantwortung zur Sicherstellung der kommunalen Energieversorgung kann anderen Energieversorgungsunternehmen übertragen werden. Die Auswertung der Gemeindestatistik von 2009<sup>732</sup> zu der Gemeindeentwicklung und Einwohnerzahl zeigt, dass in 2.115 Gemeinden 500 bis 999, 2.080 Gemeinden 1.000 bis 1.999 und 1.836 Gemeinden 200 bis 499 Einwohner gemeldet sind. In

---

<sup>727</sup>Vgl.: §§ 5a, 6a, 7a des KWK-Gesetzes zum Neu- und Ausbau von Wärmenetzen und dem Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) mit Änderungen vom 04. August 2011 durch das „Gesetz zur Neuregelung energiewirtschaftlicher Vorschriften“, 2002.

<sup>728</sup>Vgl.: Definition von Kommunen und Gemeinden, Information aus dem Internet URL [http://www. Wirtschaftslexikon.gabler.de/](http://www.Wirtschaftslexikon.gabler.de/) (2012).

<sup>729</sup>Vgl.: §12 der Deutschen Reichsverordnung vom 30. Januar 1935-RGBl. 1, S. 49 und §1 der Grundbuchverordnung vom 8. August 1935, RMBl., S. 637.

<sup>730</sup>Vgl.: Kommunale Einwirkung auf gemischt wirtschaftliche Energieversorgungsunternehmen in Fachzeitschrift Kommunalpolitik und Energiewirtschaft, S. 39-40, Textstelle Evers: Das Recht der Energieversorgung, 2. Aufl., 1983, S.88 ff.

<sup>731</sup>Vgl.: Kommunale Einwirkung auf gemischt wirtschaftliche Energieversorgungsunternehmen in Fachzeitschrift Kommunalpolitik und Energiewirtschaft, S. 39-40. Textstelle Stern: Kommunalwirtschaft und Verfassungsrecht - die verfassungsrechtliche Position, Bonner Kommentar zu Artikel 28, Randnummer 120, 1970.

<sup>732</sup>Vgl.: Definition des Begriffs Kommune und Gemeinde: Information aus dem Internet URL [http:// wirtschaftslexikon.gabler.de/](http://wirtschaftslexikon.gabler.de/) (2012) und empirische Untersuchung über die Anzahl der Gemeinden in Deutschland, Stand 2009, Statistisches Bundesamt.

1.000 bis 1.300 Gemeinden sind 2.000 und 10.000 und in 1.400 Gemeinden 10.000 bis 99.999 Einwohner gemeldet. 80 Städte mit 100.000 bis über 500.000 Einwohnern bilden die Mittel- und Oberzentren in den Regionen Deutschlands.

Die Literaturrecherche zu den energiepolitischen Inhalten der Landesverfassungen in Deutschland zeigt, dass nach Artikel 28 Grundgesetz den Gemeinden das Recht zusteht, alle Angelegenheiten der örtlichen Gemeinschaft im Rahmen der Gesetze in eigener Verantwortung zu regeln. Den Gemeinden wird nach Art. 28 Abs. 2 des Grundgesetzes die Wahlmöglichkeit eingeräumt, die Eigen- oder Fremdenergieversorgung in eigener Entscheidungskompetenz zu regeln und dem Energieversorger die Wegerechte für das Versorgungsnetz notwendigerweise zuzusprechen. Die Gemeindeverbände haben im Rahmen ihres gesetzlichen Aufgabenbereiches nach Maßgabe der Gesetze das Recht zur Selbstverwaltung. Zum Beispiel werden in der Landesverfassung Nordrhein-Westfalens keine Einschränkungen zu energiepolitischen Initiativen, Grundbedürfnisse für Bürger für lebensnotwendige Leistungen und zur Sicherstellung der Daseinsvorsorge festgelegt, sodass daraus abgeleitet werden kann, dass die Sicherstellung der Versorgungspflicht mit Energie in Konkurrenz zum Energiewirtschafts- und Gemeinderecht steht.<sup>733</sup>

### **8.8.2. Anschluss- und Benutzungszwang für die Wärmeversorgung**

Bundes- und landesrechtliche Festlegungen geben Gemeinden und Gemeindeverbänden, die zu einem Anschluss- und Benutzungszwang an ein Netz der öffentlichen Nah- oder Fernwärmeversorgung ermächtigt worden sind, Planungshilfen für den Klima- und Ressourcenschutz. Nach §16 EEWärmeG<sup>734</sup> ist der Anschluss- und Benutzungszwang für Nah- und Fernwärmenetze vorgegeben. Gemeinden haben ihre öffentlichen Verkehrswege für die Verlegung und den Betrieb von Leitungen einschließlich Fernleitungen zur Netzsteuerung und Zubehör zur unmittelbaren Versorgung von Endenergieverbrauchern im Gemeindegebiet diskriminierungsfrei durch den Konzessionsvertrag zur Verfügung zu stellen. Die vertragliche Bindung darf höchstens für eine Vertragslaufzeit von 20 Jahren abgeschlossen werden. Nach aktueller Rechtsauffassung verstößt der Anschluss- und Benutzerzwang nicht gegen Artikel 28 Abs. 2 Grundgesetz, wenn in der Gemeindeordnung ein Anschluss- und Benutzungszwang für die öffentlichen Einrichtungen in der Gemeinde

---

<sup>733</sup>Vgl.: Verfassung des Landes Nordrheinwestfalen, Information im Internet URL <http://lexsoft.de>.

<sup>734</sup>Vgl.: §16 EEWärmeG (Anschluss- und Benutzungszwang).

festgelegt worden ist. Landes- und kommunalbaurechtliche Festsetzungen über die Festlegung des Anschluss- und Benutzungszwangs zur Förderung des Anschlusses an die Fern- und Nahwärmeversorgung sind aus Gründen des Klimaschutzes nicht rechtswidrig.<sup>735</sup>

Der Anschluss an das Fernwärmenetz ist rechtlich zulässig und von der Kommune durchsetzbar, wenn die Anforderungen aus dem § 7 Nr.3 EEWärmeG erfüllt werden und dadurch die Notwendigkeit aus besonderen städtebaulichen Gründen und zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen gegeben ist. Urteile der Landesverwaltungsgerichte<sup>736</sup> über die Zulässigkeit von regenerativen Energien für denkmalgeschützte Gebäude unterstützen nachhaltig den Schutz der Umwelt und des Klimas in Regionen und Kommunen.

In diesem Rechtskontext ist auf das Rechtsgutachten des „Börsen“- und „Wahlstedt-Urteils“<sup>737</sup> zur Regelung der kommunalen Fernwärmeversorgung in Städten für das Land Schleswig-Holstein zu verweisen. Das Urteil des Oberlandesgerichtes Kiel hat entschieden, dass ein Anschluss- und Benutzungszwang keine besonderen örtlichen Belastungen der städtischen Luftmassen voraussetzt, sondern aus Vorsorgegründen zum Schutz des Klimas bereits gerechtfertigt wird. Die verwaltungsgerichtliche Entscheidung bezieht sich auf das staatliche Schutzziel im Grundgesetz, dass Städte und Kommunen zum Schutz der Bevölkerung und folglich auch zum Klimaschutz verpflichtet sind. Das Urteil stützt sich insbesondere auf die Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die städtische Wärmeversorgung mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gegeben ist als mit fossil betriebenen Heizkraftwerken.

Die Gemeinden sind angehalten zu bestätigen, dass das örtliche Energieversorgungsunternehmen tatsächlich der Gemeinde zur Energieversorgung des Gemeindegebietes zur Verfügung steht und den öffentlichen Zweck erfüllt. Die Gemeinde kann den Grund der

---

<sup>735</sup>Vgl.: Urteil des BVerwG vom 06.04.2005, 8 CN 1.03 zu Artikel 28 Abs. 2 GG i. V. zu §§ 2, 10, 14 Abs. 1 der Gemeindeordnung Sachsen; Information im Internet URL <http://dejure.org/dienste/lex/GG/28/1.html> (6.04.2005).

<sup>736</sup>Vgl.: Gerichtsurteile der Landesverwaltungsgerichte: Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg: Denkmalschutz kontra Klimaschutz-Photovoltaikanlage auf denkmalgeschützter Pfarscheuer. Beschluss 1-S 1070/11, 01.09.2011. Verwaltungsgericht Berlin: Errichtung einer Solaranlage auf denkmalgeschütztem Haus. Beschluss VG 16K 26.10, 09.09.2010. Bayerischer Verwaltungsgerichtshof: Photovoltaikanlage auf denkmalgeschützter Kirche unzulässig. Beschluss 14 ZB 09.1289, 12.10.2010 aus Kostenlose Urteile, Information aus dem Internet URL <http://www.kostenlose-urteile.de> (August 2012).

<sup>737</sup>Vgl.: Koch, Hans-Joachim: Kommunale Gestaltungsmöglichkeiten zur Förderung der KWK-Nutzungs-Überlegungen de lege lata und lege ferenda. Rechtsgutachten im Auftrag des schleswig-holsteinischen Ministeriums für Finanzen und Energie, Universität Hamburg, Hamburg, 2001.

öffentlichen Zwecksetzung<sup>738</sup> zur Forderung des Anschluss- und Benutzungszwangs gegen Endenergieverbraucher rechtlich durchsetzen.

### **8.8.3. Energieversorgung und Kraftwärmekopplung**

Das Energiewirtschaftsgesetz aus dem Jahr 2005 legt für Betreiber von leitungsgebundenen Versorgungsnetzen für Stromenergie und Erdgas Rechte und Pflichten für den Betrieb von Energieversorgungsnetzen fest. Der Netzbetreiber ist verpflichtet, sicher und zuverlässig das leistungsfähige Energieversorgungsnetz<sup>739</sup> diskriminierungsfrei zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht zu optimieren, zu verstärken und auszubauen. Der Grundversorger ist nach § 36 Abs. 2 Ziffer 4 Satz 1 des Gesetzes über den Beschluss der Bundesnetzagentur vom 20.08.2007 verpflichtet, die Geschäftsbilanzen offen zu legen und das Konzessionsgebiet für die Energieversorgung anzugeben. Als Grundversorger wird das EVU anerkannt, das die zahlenmäßig meisten Haushaltskunden in einem Netzgebiet vertraglich versorgt. Das Strom- und Erdgasnetz ist einem regionalen oder städtischen Marktgebiet zugeordnet.

Der Ausbau von kleinteiligen städtischen Nahwärmeversorgungsnetzen erzeugt Impulse für einen Paradigmenwechsel zum bestehenden städtischen Wärmeversorgungssystem. Die intelligente Einbindung von Energieeffizienzstrategien und Nachfragesteuerungskonzepten führt langfristig zu einer Reduzierung des städtischen Energieversorgungsnetzausbaus. Diese Strukturänderung bedarf einer Verordnungsermächtigung nach §14 Abs.2 des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) zur Einbindung einer dezentralen Energieversorgung nach dem Grundgesetz.

Gleichzeitig kann das Regenerative Energien-Ausbaubeschleunigungsgesetz<sup>740</sup> den Abbau von Hemmnissen in den Fachgesetzen fördern.<sup>741</sup> Die Fachliteratur zum BauGB zeigt Lösungsmöglichkeiten für eine Umstrukturierung der städtischen Energieversorgung auf, die sich ausschließlich auf den Versorgungsort bezieht. Die gesetzliche Novellierung des Baugesetzbuches (BauGB) und der Baunutzungsverordnung (BauNVO) ist erforderlich. Der Bundesverband Regenerative Energien begründet den Strukturausbau von regenerati-

---

<sup>738</sup>Ebd.: Begründung zum Rechtsgutachten der Universität Hamburg, Hamburg, 2001.

<sup>739</sup>Vgl.: § 46 (1) EWG (Wegenutzungsverträge).

<sup>740</sup>Deutscher Verband Regenerative Energie e.V. (BEE): vgl. Aktionsprogramm Regenerative Energien zum Ausbau Regenerativen Energien, 21.03.2011, S.1-8.

<sup>741</sup>Ebd.: S. 1-8 (Ansätze zur Änderung des Regenerativen Energiegesetzes, Regenerative-Energien-Wärmegesetzes, Energiewirtschaftsgesetzes, Raumordnungsgesetzes, Baugesetzbuches, Denkmalschutzgesetzes, Naturschutzgesetzes und Wasserhaushaltsgesetzes).

ven Energien und die Nutzung von Wärmeerzeugungsanlagen mit Effizienztechnologien damit, dass mit der Einführung einer Regenerativen-Energien-Wärmeprämie die Förderung des Umstiegs auf kohlenstoffarme Energieträger zukünftig erleichtert wird.<sup>742</sup>

Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)<sup>743</sup> aus dem Jahr 2002 unterstützt die Bundesregierung im Interesse des Klima- und Umweltschutzes, um den Ausbau von städtischen Wärmeversorgungsnetzen zu fördern. Der verstärkte Ausbau von städtischen Wärmeversorgungsnetzen<sup>744</sup> ist effektiv gegeben, wenn an das leitungsgebundene Wärmeversorgungsnetz mindestens ein Endenergieverbraucher angeschlossen ist, der nicht gleichzeitig Eigentümer oder Betreiber von einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage ist.<sup>745</sup> Das KWKG-Gesetz unterstützt die Errichtung und den Betrieb von Mini-KWK-Anlagen im Leistungsbereich bis 50kW und fördert gleichzeitig die Brennstoffzellentechnologie. Der zusammenhängende Versorgungsbetrieb von Energieanlagen an einem Versorgungsstandort wird nach der Anlagengesamtleistung finanziell durch die Bundesregierung gefördert und trägt zu einer standortgebundenen Inselversorgung mit Wärmeversorgungsinseln und kleinteiligen Wärmeversorgungsnetzen<sup>746</sup> in Städten bei. Mit den Gesetzen EEWärmeG und KWKG wird zielgerichtet die städtische Quartiersversorgung mit dezentralen Versorgungsstrukturen<sup>747</sup> zur Erzeugung von Wärme- und Klimakälteenergie für den Gebäudebestand gefördert.

#### **8.8.4. Stadtquartiere und Gebäudebestand**

Mit dem Gesetzesentwurf zur Stärkung der klimagerechten Entwicklung nach dem Koalitionsvertrag der Bundesregierung soll der Klimaschutz in Gemeinden unter Berücksichtigung der städtebaulichen Innenentwicklung im Bauplanungsrecht gestärkt und die In-

---

<sup>742</sup>Vgl.: Bundesverband Regenerative Energie: Bereits 2007 sind mehrere wissenschaftliche Institute in einer Bewertung unterschiedlicher Fördermodelle für den Wärmesektor zu dem Schluss gekommen, dass ein solches haushaltsunabhängiges Modell das effektivste Instrument ist, um die Energiewende im Gebäudebereich zu schaffen. Information aus dem Internet URL <http://www.energie-experten.org> (2011).

<sup>743</sup>Vgl.: Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG 2002) - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - vom 19.März 2002.

<sup>744</sup>Vgl.: Begründung zu den Änderungen des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes. Information aus dem Internet URL <http://www.kwkg-novelle.de> (2011).

<sup>745</sup>Vgl.: Begründung zum Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz. Information aus dem Internet URL <http://www.kwkg-novelle.de> (2011).

<sup>746</sup>Vgl.: Darlegung der Zulassungsvoraussetzungen nach § 6a Abs.1 Nr.3 i.V.m. § 5a Abs.1 Nr. 1 und 2, § 7a Abs.1 Satz 1 und 2 sowie § 7a Abs. 3 KMKG, entnommen aus dem Merkblatt Wärmenetze. Information aus dem Internet URL <http://www.kwkg-novelle.de> (2011).

<sup>747</sup>Vgl.: BHKW-Infozentrum Rastatt: Stellungnahme zur Novelle des KWKG-Gesetzes, Rastatt, S. 1-5, 2008. Information aus dem Internet URL <http://www.kwkg-novelle.de> (2011).

tegration von regenerativen Energien insbesondere von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen für die Erzeugung von Strom- und Wärmeenergie erweitert werden.<sup>748</sup>

Die Stärkung einer klimagerechten Stadtentwicklung erfordert rechtliche Anpassungen an das Stadtplanungsrecht, damit eine Umstrukturierung von einem zentralen Versorgungsnetz zu einem dezentralen Versorgungsnetz für die Erzeugung, Verteilung, Nutzung und Speicherung von Strom- und Wärmeenergie gewährleistet werden kann. Zur Förderung einer sparsamen und effizienten Nutzung von Wärme im Rahmen von energetischen Baumaßnahmen für den Gebäudebestand ist § 248 BauGB als Sonderregelung auf der Grundlage der Energieeinsparverordnung und des Regenerativen-Energien-Wärmegesetzes aufgenommen worden.

Die Richtlinie der Europäischen Gemeinschaft über die gesetzliche Regelung von Energieprofilen von Gebäuden bezieht sich auf Artikel 175 der Europäischen Gemeinschaft mit der Zielvorgabe, die Begrenzung der Kohlendioxidemissionen durch eine effiziente Energieversorgung im Wohn- und Dienstleistungssektor zu unterstützen. Die Mindestanforderungen an Energieprofile des Gebäudebestandes beziehen sich in erster Linie auf den Einfluss der örtlichen klimatischen Verhältnisse sowie im Rahmen der Gebäudeneubauplanung auf die systematische Prüfung von Energieversorgungsanlagen.<sup>749</sup>

Mit der Energieeinsparverordnung von 2009 wird die Umsetzung für Bestandsgebäude und Neubauten mit einem energiesparenden Wärmedämmschutz und einer effizienten Heizanlagentechnik gefördert. Die Verordnung regelt die Wärmeschutzanforderungen für Dienstleistungs- und Wohngebäude, die mit Raumwärme, Warmwasser und Klimakühlbedarf über Energieerzeugungsanlagen versorgt werden. Der Jahresprimärenergiebedarf für bestehende Wohngebäude wird nach der Energieeinsparverordnung, bezogen auf DIN Normen EN 832: 2003-06, V 4108-6:2003-06 und V 4701-10: 2003-08 im Monatsbilanzverfahren nach DIN EN 832:2003-06 berechnet.<sup>750</sup>

Die klimagerechte Entwicklung wird durch das Regenerative-Energien-Wärmegesetz von 2008 gefördert und regelt für Gebäudeeigentümer den Mindestanteil an regenerativen

---

<sup>748</sup>Vgl.: Deutscher Bundestag - Änderung des Baugesetzbuches vom 23.09.2004 (BGBl. I S. 2414): Entwurf eines Gesetzes zur Stärkung der klimagerechten Entwicklung in den Städten und Gemeinden, Drucksache 17/6076, 17. Wahlperiode, 06.06.2011.

<sup>749</sup>Vgl.: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Energieprofile von Gebäuden, 2001 (0098 (COD)).

<sup>750</sup>Vgl.: Energieeinsparverordnung (EnEV 2009): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, 24.07.2007. Umsetzung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 über die Wirkungsgrade von mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen beschickten neuen Warmwasserkesseln.

Energien für die Energieversorgung und den Wärmeenergiebedarf. Insbesondere ist das Gesetz im Interesse des Klimaschutzes zur Schonung fossiler Ressourcen und die Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten für eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung erlassen worden. Nach der konkurrierenden Gesetzgebung des Bundes besteht für die Länder und Kommunen die Option, den Anteil an regenerativen Energien der Energieversorgung nach eigenem Ermessen festzulegen. Der Katalog im Anhang des Gesetzes legt für die Verwendung von regenerativen Energien Leistungsanforderungen und technische Anlagenleistungen für die Nutzung fest. Für die Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden in städtischen Quartieren, die in einem räumlichen Zusammenhang stehen, ist der Wärmeenergiebedarf nach § 5 EEWärmeG anteilig bereitzustellen. Das Gesetz berücksichtigt die Wärmeversorgung von kommunalen Gebietskörperschaften mit Nah- und Fernwärmeversorgung und sichert die rechtliche Grundlage zur Planung von städtischen Wärmeversorgungsnetzen mit einem Anteil an regenerativen Energien.<sup>751</sup>

#### **8.8.5. Stromerzeugung und Energiemix**

Die Grundlage zur Integration regenerativer Energiesysteme stellt das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) dar.<sup>752</sup> Das Gesetz regelt vorrangig die Einspeisevergütung für Strom von regenerativen Energien in das Stromleitungsnetz im Interesse des Klima- und Umweltschutzes. Die Bundesregierung fördert durch das EEG den Anteil an regenerativen Energien für die städtische Stromversorgung und die schrittweise Anhebung von 35% auf 80% von 2020 bis zum Jahr 2050. Der Gesamtanteil an regenerativen Energien am gesamten Bruttoendenergieverbrauch soll bis zum Jahr 2020 auf mindestens 18% erhöht werden. Die Regelung der Stromeinspeisung ist für die Wasserkraft, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Geothermie, Energie aus Biomasse sowie für den biologisch abbaubaren Anteil von Abfällen aus Haushalten und Industrie festgelegt. Die Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist nach § 3 Absatz 4 des KWKG und die Abnahmeverpflichtung von KWK-Anlagen nach § 4 Abs. 1 und 4 des KWKG gewährleistet. Das EEG unterstützt die Integration von regenerativen Energiesystemen und trägt dazu bei, den Umstieg von der zentralen auf die dezentrale städtische Energieversorgung insbesondere für die Stromenergie vorzubereiten. Die Umsetzung des Gesetzes unterstützt die

---

<sup>751</sup>Vgl.: Gesetz zur Förderung Regenerativer Energien im Wärmebereich: Regenerative-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) vom 7. August 2008, zuletzt geändert durch Art. 9 G v. 20.10.2015 I 1722.

<sup>752</sup>Vgl.: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energie-Gesetz – EEG 2017) vom 21.07.2014, zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 22.12.2016 I 3106.

städtische Energieversorgung mit regenerativen Energien und fördert die Integration von Wärmespeichern in bebauten Gebieten im Interesse des Klima- und Umweltschutzes.<sup>753</sup>

---

<sup>753</sup>Vgl.: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Regenerativen Energien im Strombereich und zur Änderung der damit zusammenhängenden Vorschriften - Gesetz für den Vorrang Regenerativer Energien - Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) - vom 25. Oktober 2008.

## 9. Regionen und regenerative Energien

Die Bundesländer stellen Landesenergieprogramme<sup>754</sup> auf, in denen Ziele über die energiepolitische Schwerpunktsetzung festgelegt und Handlungserfordernisse abgeleitet und verankert sind. Die Umwelt- und Energiepolitik der Länder fokussiert sich bei der Umsetzung von Klimaschutzzielen auf eine nachhaltige effiziente Energieerzeugung. Die Beteiligung von Umweltschutz- und Wirtschaftsverbänden und Bürgern bewirkt, dass Impulse für die Gestaltung von Landesenergieprogrammen auf dem Energieversorgungssektor gegeben werden.<sup>755</sup> Für die städtische Wärmeversorgung von Gebäuden mit Raumwärme und Warmwasser von privaten Haushalten und öffentlichen Verwaltungen ist durch Festsetzungen per Erlass des Berliner Senats für eine branchenbezogene Energieeinspargesetzgebung<sup>756</sup> für das Stadtgebiet Berlin eine 30%ige CO<sub>2</sub>-Emissionsreduzierung erzielt worden. Die Mitgliedsstaaten sind gehalten, einen nationalen Aktionsplan, auch für den Wärme- und Klimakältesektor, zu verabschieden, um den Bedarf an Energie aus regenerativen Quellen abzuschätzen.

Da das zur Verfügung stehende Potenzial an regenerativen Energien in den Mitgliedstaaten noch nicht flächendeckend erfasst ist, wird die Entwicklung eines globalen und europaweiten Solar- und -Windatlanten empfohlen. Die Rahmenbedingungen für eine standortbezogene Planung regenerativer Energien in Regionen sind durch diese Planungshilfe bis 2020 vorgegeben. Das im Jahr 2011 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) enthält Marktanreizprogramme und fördert den Anteil an regenerativen Energien für die Wärmeversorgung in Städten.

Der Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS) gibt in Kooperation mit Wissenschaft, Politik und Wirtschaft wertvolle Impulse, wie der Wärmeversorgung mit regenerativen Energien in Deutschland zum Durchbruch verholfen werden kann.<sup>757</sup> Das politische Ziel der nationalen Aktionspläne zum Schutz der Umwelt und des Klimas in Regionen und Städten wird mit einer Reduzierung der Gesamtemissionen<sup>758</sup> nach Ausbaupfad begrün-

---

<sup>754</sup>Senatsverwaltung Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz (Hrsg.): Landesenergieprogramm Berlin von 2006-2010, Berlin spart Energie und schützt das Klima, 2010.

<sup>755</sup>Senatsverwaltung Berlin: Landesenergieprogramm zur Minimierung der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen von bis zu 14 % im Zeitraum von 1990 bis 2002. Information aus dem Internet URL <http://www.senatsverwaltung-berlin.de/Energieeinspargesetz> (2009).

<sup>756</sup>Ebd.: § 15 Abs. 2 Berliner Energieeinspargesetz.

<sup>757</sup>Szczepanski, Petra: Der Anteil regenerativer Energien an der Wärmeerzeugung muss gesteigert werden, Öffentlichkeitsarbeit des Forschungsverbundes Sonnenenergie, 2005.

<sup>758</sup>Definition aus der Fachliteratur: Als Gesamtemissionen der Sektoren: Verkehr, Wohnen, Energieerzeugung.

det.<sup>759</sup> Die Solarstromenergieerzeugung in Deutschland ist nach der politischen Zielvorgabe auf eine installierte Gesamtleistung von 7.919 MW zu heben. Die thermische Wärmeerzeugung durch solarthermische Anlagen erreicht demnach 4,1 bis 5,3Mrd.kWh Wärmeertrag. Die Biomasseanlagen tragen zu einem Anstieg der erzeugten Wärmemenge von bis zu 101,9Mrd. kWh bei.<sup>760</sup> Dagegen ist die Nutzung des Erdwärmepotenzials mit einem Wärmeenergieanteil am Gesamtwärmeverbrauch zu steigern.

Die Internetrecherche zur Stadtentwicklung von nachhaltigen Stadtversorgungskonzepten zeigt, dass Modellvorhaben wie die Null-Emissions-Stadt, Solarstadt, autarke Stadt, intelligente Stadt etc. im Rahmen der Stadtentwicklung von Kommunen umgesetzt werden. Aus diesem Grund ist die Zentralitäts- und Dezentralitätsdebatte ein wesentlicher Bestandteil der Stadtentwicklung und Infrastrukturplanung zur Versorgung von Städten mit Energie geworden. In diesem Kontext ist zu untersuchen, ob eine städtische Inselversorgung mit Heizkraftwerken und Nahwärmenetzen für städtische Quartiere die optimale Lösung ist. Die städtische Gebäudeversorgung mit Zentralheizungsanlagen zur Bereitstellung von Wärme erschwert die Integration von regenerativen Energien, da die EVU selbstverständlich Energie bereitstellen. Ebenso ist in der Erforschung von Stadtentwicklungskonzepten erforderlich, ob großflächige zentrale Versorgungslösungen im Außenbereich der Städte mit Solarkraftwerken, geothermischen Kraftwerken, Biogasanlagen, Biomasseheizkraftwerken etc. effektiver sind als eine zentrale Lösung mit herkömmlichen Kraftwerken und regenerativen Energien. Weiterhin ist im Rahmen von Energieversorgungsstrategien zu untersuchen, ob eine autarke Energieversorgung einer Region oder Stadt ohne fossile Energieträger möglich ist. Der Forschungsbedarf zu der Problemlage ist zu intensivieren, damit Vor- und Nachteile von regionalen und städtischen Energiekonzepten sowie Versorgungsstrategien für die kommunale Energieversorgung beurteilt werden können. Für die energetische Stadtentwicklung sind Planungsansätze und eine gute Datenlage wie Indikatoren für den Energieverbrauch, Verbraucherverhalten, Arbeits- und Lebensumfeldfaktoren unter Berücksichtigung der Bevölkerungszunahme und Demographie einer Region oder Stadt zu entwickeln. Die Infrastrukturplanung für die Wärmeversorgung erfordert einen städtischen Wärmetlas, Konzepte der Nahwärmeversorgung

---

<sup>759</sup>Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009: Förderung der Nutzung von Energie aus regenerativen Quellen, 5.06.2009; Allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten der Regenerativen Energien: Auswertung der Nationalen Aktionspläne für Regenerative Energie der EU-Mitgliedstaaten, Referat KI III 1, Fachzeitschrift Umwelt, Heft 2, Jahrgang 2011, S.21.

<sup>760</sup>Agentur für Regenerative Energien: Energieversorgung in Deutschland, Regenerative Energien Potenzialatlas 2020, S.54.

unter Berücksichtigung der regenerativen Energien und Abstimmungskonzepte mit dem Energie-Mix. Eine integrierte Regional- und Stadtentwicklung unter Einbeziehung der Standortdaten aus der gesellschaftspolitischen, marktwirtschaftlichen, sozialen, klimatologischen und energietechnologischen Analyse von Regionen und Städten ist Grundvoraussetzung für die nachhaltige Energieversorgungsplanung für Wärme und Strom.

Die aufeinander abgestimmte Vorhabenplanung und frühzeitige Beteiligung der Akteure in der energetischen Stadtplanung ist ein wesentlicher Bestandteil. Die Fachdisziplinen Regionaldatenanalyse, Energieversorgungsplanung, Versorgungstechnik, Architektur und Stadtentwicklung sind in den Planungsprozess regenerative Energien einzubinden. Kommunale Stadtentwicklungsvorhaben wie Stadtumbau, Stadtteilkonzepte, Stadtentwicklung, städtebauliche Wettbewerbe und Sanierungskonzepte sind grundlegend mit der Entwicklung und Planung von Energieversorgungskonzepten systematisch zu vernetzen, damit eine Gesamtstrategie für die Regionen und Kommunen vorgelegt werden kann. Die energetische Stadtentwicklung ist insbesondere auf den Gebäudebestand innerhalb eines städtischen Quartiers zu beziehen. Ein übergeordnetes kommunales Schutzziel ist die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Verbrauchs und der Klimaschutz in Regionen, Städten und Stadtteilen.

Energetische Stadtentwicklungsmodelle sind über stadtteilübergreifende „Energieleitpläne“ zu planen, verknüpft mit Empfehlungen aus der nachhaltigen Stadtentwicklung.<sup>761</sup> Nur durch ein konsequentes Monitoring des Stadtentwicklungsprozesses mit energetischen Maßnahmen ist sichergestellt, welche Versorgungskonzepte sich in der Praxis bewähren und wie sich die Akzeptanz der Bürger zur Energieversorgung in den Quartieren entwickelt. Die Vernetzung von Stadtentwicklungs- und Energieplanungskonzepten ist auf der Planungsebene urbane Stadt über das städtische Quartier bis zum einzelnen Gebäudevorhaben konsequent weiter zu führen.

## **9.1. Regionalentwicklung und Energieversorgung**

Die Ziele der Raumordnung sind Grundlage für die energetische Strategieplanung, nachhaltige Entwicklung von Regionen mit regenerativen Energien und Entwicklung von gesamtstädtischen Energieversorgungskonzepten. Die raumplanerischen Festlegungen und

---

<sup>761</sup>Landeshauptstadt München (Hrsg.): Energiegerechte Stadtentwicklung in München, Chancen für den Bestand durch energetisch innovative Neubaugebiete in Freiham und Neuaußing, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Januar 2013.

regionalen Schutzziele für natürliche Ressourcen und Böden sind für eine nachhaltige Energieversorgung von Regionen und Städten in den Regionalplänen festzulegen. Die Wahl des Energieträgers und die Effizienzsteigerung von Anlagen der Energieversorgung mit schadstoffmindernden Technologien können mit Kennzahlen und Indikatoren in der Regionalplanung vorgegeben werden. Ein anzuvisierendes Planungsziel ist, dass die effiziente dezentrale Energieerzeugung mit allen zur Verfügung stehenden regionalen und lokalen solaren Wärmepotenzialen vorrangig als raumstrukturelles Entwicklungsziel vor die regionale zentrale Energieversorgungsstrategie mit fossilen Energieträgern gestellt wird. Planungsziele der Regionalplanung wie die Ausschöpfung der Potenziale zur Verringerung des Energieverbrauchs und die Nutzung regionaler und lokaler regenerativer Energien zur Förderung und zum Schutz der nachhaltigen Nutzung der Lebensräume und natürlichen Lebensgrundlagen erfordern langfristige Umsetzungen. Eine umsetzungsstarke regionale Versorgungsplanung sollte sich daher an die regionale Raumstruktur und an die regionalen und kommunalen Energieleitpläne anpassen, die eine grundlegende Planungsstrategie für eine regionale Energieträger-Mix-Versorgungsstrategie festgelegt haben. Mit einem wachsenden Anteil der regenerativen Energien ist die Optimierung des Gesamtenergieversorgungssystems in Regionen gegeben.

Der globale Klimawandel erfordert gezielte Strategieansätze für eine regionale Klimaschutzpolitik. Einer Erhöhung der durchschnittlichen atmosphärischen Lufttemperaturwerte der erdnahen Atmosphäre um mehr als 2°C und einem Anstieg der Meere ist global entgegenzuwirken. Die Analyse von extremen Wetterereignissen durch Wettermessstationen erfordert eine Entwicklung von Anpassungsstrategien und Vorsorgemaßnahmen für die Regional- und Stadtentwicklung. Die Abstimmung von Umweltbelangen zur Festlegung von Klimaschutz- und Umweltschutzziele in der regionalen Strategieplanung von Energieversorgungskonzepten müssen mit der Raumordnungsplanung vereinbar sein. Direkte positive Wirkungen, die durch eine konsequente Luftreinhaltepolitik und Reduzierung von Luftverunreinigungen zur Klimastabilisierung gegeben sind, verändern die regionale Energieversorgung- und Mobilitäts politik. Der Handlungsansatz der Regionalplanung zur Verwirklichung der genannten Optimierungspfade ist jedoch begrenzt und kann indirekt über eine raumstrukturelle Gestaltung und begleitend mit Umsetzungsstrategien den Rahmen für weitere Projektrealisierungen und Ansätze bieten.

Regionale energetische Entwicklungskonzepte steuern indirekt die Energieversorgungsplanung in den Kommunen. Potenzialstudien in Regionen, die einen hohen Primärenergieverbrauch durch Ressourcen fossiler Energieträger für die regionale Energieerzeugung

feststellen, geben die Grundlage für geeignete Steuerungs- und Planungsinstrumente. Die Integration von regenerativen Energien in Regionen bietet erhebliche Einsparpotenziale für eine nachhaltige regionale Energieversorgung, insbesondere zur Steuerung der Primärenergiebilanz und Minimierung der Abhängigkeit zu Energieimporten.

Energiepolitische Grundsätze einer räumlichen Energieversorgungsplanung zur Koordination der kommunalen Wärmeversorgung mit regenerativen Energien werden zum Beispiel in der Schweiz mit dem Planungsinstrument der „strukturellen Gemeindeentwicklung“ umgesetzt. Das Energieversorgungsunternehmen „EnergieSchweiz“ führt mit einem festgelegten Absenkungspfad das Energiesparen für eine 2.000-Watt-Gesellschaft ein, indem der Versorgungsanteil durch regenerative Energien für Raumwärme und Warmwasser auf 40% bis zum Jahr 2020 erhöht werden kann. Die strategische Umsetzung in Regionen erfolgt durch regionale Energiekonzepte mit einem räumlichen Energieplan nach Vorgabe der schweizerischen Vereinigung für Raumplanung.<sup>762</sup>

Regionale Energie- und Umweltkonzepte sind als gemeinsame Planungsinstrumente für Regionen geeignet, um Energieeinsparung, rationelle Energienutzung und Förderung von regenerativen Energien in Kommunen oder ländlichen Gebieten langfristig festzulegen. Regionale Klimaschutzagenturen unterstützen den Beratungsprozess und die Netzwerkbildung für Energieversorgungsunternehmen.

Die Strategie zur Speicherung von Strom- und Wärmeenergie in Regionen und Kommunen ist für die Entwicklung eines Lastmanagementsystems unbedingt in Regionalplänen festzulegen. Thermische Kraftwerke liefern konstante Strom- und Wärmemengen für die Grundlastversorgung der Regionen und Städte. Die Erzeugung von Strom und Wärme durch regenerative Energien unterliegt Schwankungen und erfordert daher geeignete Energiespeicheranlagen wie zum Beispiel Pumpspeicherwasserkraftwerke, Druckluftspeicher, Gasturbinen-Kraftwerke und den Einsatz mobiler Fernwärme mit Wärmespeicheranlagen.

Die Festsetzung der Kraftwärmekopplung in Regionalplänen und Leitbildern von Regionen und Kommunen, die großflächige Industrie- und Gewerbegebiete mit energieintensiven Betrieben vorweisen, ist geeignet für die Maximierung von Wärmeeinspeisungspotenziale in Regionen und angrenzenden städtischen Versorgungsgebieten mit Fern- und Nahwärmenetz. Zielvereinbarungen der Landesregierungen unterstützen durch die Regio-

---

<sup>762</sup>Vgl.: Schweizerische Vereinigung für Raumplanung (VLP-ASPAN): Räumliche Energieplanung, aus Raum & Umwelt, Mai Nr. 3/11, S. 9 Abb. 3 Räumliche Energieplanung, Informationen aus dem Internet URL <http://www.planar.ch> (2012).

nalpolitik die Steigerung der Energieproduktivität und Energieersparnis. Der für Regionen wichtige Primärenergieverbrauch zur Erzeugung von Wärme und Strom kann somit durch eine prozentuale Reduzierung in der Regionalplanung vorgegeben werden.

Der regionale Flächennutzungsplan gemäß §9 Abs. 6 ROG hat ebenfalls eine Steuerungsfunktion zur Reduzierung des Flächenverbrauchs in Kommunen. Eine flächensparende Flächenausweisung von Siedlungs- und Gewerbegebieten sowie Standorten für großflächigen Einzelhandel und Freizeit ist effektiv zu gestalten. Voraussetzungen sind präzise, klare und eindeutige Ziele der Raumordnung in Landes- und regionalen Raumordnungsplänen unter Anwendung der Bodenschutzklausel nach §1a BauGB. Der kommunale Flächenzuwachs ist aus diesem Grund durch Orientierungswerte, Richtwerte und mit dem Gebot der Eigenentwicklung zu steuern.<sup>763</sup> Regionalpläne enthalten bereits Steuerungselemente, die in der Fachliteratur als planerisch wirksame Instrumente zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme gelten wie zum Beispiel Orientierungswerte für Einwohner/Hektar. Die Ausweitung einer Raumbesichtigung zur Erhebung von aktuellen städtischen Flächendaten und die Festlegung von Kennziffern zur Entwicklung der Flächennutzung, der Siedlungsdichten und der Siedlungsstrukturen in den Regionen und Gemeinden verstärken die gezielte Flächenausweisung von versiegelten und unversiegelten Flächen.

## **9.2. Energieregionen und regionale Energiekonzepte**

Die Regionalpläne sind zukunftsweisende Planungsinstrumente, die auf der Grundlage der Landesplangesetzgebung für einen Zeithorizont von bis zu 20 Jahren entwickelt werden. Diese Plangrundlage dient den öffentlichen Planungsträgern zur Steuerung der kommunalen Bauleitplanung sowie der Planung von raumbedeutsamen Vorhaben, zum Beispiel der Windenergie oder der Biomasse und der Steuerung von Investitionen im Rahmen des Raumordnungsverfahrens. Die Beteiligung der Öffentlichkeit eröffnet Anregungen und Bedenken für oder gegen das Vorhaben. Nachhaltig wirksame Regionalpläne geben Umsetzungsstrategien mit Handlungsempfehlungen für die regionalen und lokalen Akteure sowie für die Beteiligten im Planungsprozess vor. Ein wesentlicher Bestandteil der Regionalnetzwerkentwicklung ist die Förderung von Kooperations- und Aktionsfeldern zur Sicherstellung vielfältiger Synergieeffekte für die beteiligten Akteure.

---

<sup>763</sup>Projektgruppe Flächenverbrauch (Hrsg.): Flächenverbrauch und Bodenbewusstsein – Nationale Strategie und lokale Umsetzung. Eine Veranstaltung der Projektgruppe „Flächenverbrauch“ des Instituts für Stadt- und Regionalplanung in Zusammenarbeit mit der Kooperationsstelle Wissenschaft/Arbeitswelt, Haus des Deutschen Städtetages, Berlin, 2005.

Die Regionen in Deutschland sind aufgefordert, mit einer umweltfreundlichen Strategieentwicklung die Energieversorgung unter Festlegung von Nachhaltigkeitskriterien auf regenerative Energien umzustellen, damit die Energieversorgung mit fossilen Kraft- und Heizkraftwerken mittel- bis langfristig zurückgebaut werden kann. Insbesondere beim nachhaltigen Ausbau der Stromerzeugung mit Windkraftanlagen haben die Regionen Fortschritte erzielt. Die Bilanzierungsansätze zum globalen Primärenergiebedarf mit 100% regenerativen Energien zeigt der Bericht des Forschungsverbundes Regenerativer Energien.<sup>764</sup> Das 2°C-Ziel zur Dekarbonisierung von fossilen Energieträgern mit einer unterirdischen Speicherung nach dem Prinzip der Carbon Dioxide Capture<sup>765</sup> and Storage (CCS)<sup>766</sup> in Regionen ist als Ziel umsetzbar. «Vollzitat: Diese verbindlichen nationalen Gesamtziele müssen mit dem Ziel in Einklang stehen, bis 2020 mindestens 20% des Bruttoendenergieverbrauchs der Gemeinschaft durch Energie aus regenerativen Quellen zu decken. Die Mitgliedstaaten treffen Maßnahmen, um effektiv zu gewährleisten, dass ihr Anteil von Energie aus regenerativen Quellen den indikativen Zielpfad erreicht oder übersteigt.» (Amtsblatt der Europäischen Union L140/28).

Die Strategieentwicklung zur Änderung der Energieversorgung mit regenerativen Energien in Regionen und Kommunen erfordert eine detaillierte Bestandsaufnahme der örtlichen Versorgungssituation und die Analyse des Nutz- und Endenergiebedarfs. Das Planungsinstrument der Potenzialanalyse ist zur Erstellung von Energiekonzepten unabdingbar und erfasst die lokalen Gegebenheiten für die Energieversorgung mit regenerativen Energien und zeigt den Ist-Zustand der fossilen Energieträger, die zur Versorgung einer Region oder Kommune eingesetzt werden. Ergebnisse von Potenzialstudien stellen den Zusammenhang zwischen dem Substitutionsanteil fossiler Energieträger und dem Anteil von regenerativen Energien dar.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBs) und das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) steuern die regenerative Energieanlagenstrategie mit planerischen Vorgaben für regionale Energieversorgungskonzepte,

---

<sup>764</sup>Forschungsverbund Regenerativer Energien: Primärenergetische Bilanzierung von Elektrizität aus regenerativen Energiequellen nach der Wirkungsgradmethode und der Substitutionsmethode. Für fossile Energieträger dient als Umrechnungsfaktor der Heizwert. Bei einem Kohlekraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 40 % wäre 1 kWh elektrische Energie primärenergetisch mit 2,5 kWh zu bewerten; Energiekonzept 2050, Juni 2010, S.16.

<sup>765</sup>Radgen, P., Cremer, C., Gerling, P., May, F., Knopf, S.: Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und-Speicherung, Forschungsbericht UBA-FB 000938, Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz>.

<sup>766</sup>Richtlinie 2009/31/EG: Europäisches Parlament und des Rates vom 23.4.2009, Geologische Speicherung von Kohlendioxid, Abl., EU, 5.09.2009, Nr. L 140, S.114-135; vgl. a.a.O.: CCS-Richtlinie.

die im Planungsprozess regionale Entscheidungsträger und Akteure bereit stehen. Die konzeptionellen Vorgaben für die Umsetzung regionale Energiekonzepte sind aus den Ergebnissen der Grundsatzstudie des Forschungsprogramms „Modellvorhaben der Raumordnung (MORO)“ entwickelt worden. Weitere Untersuchungsergebnisse aus thematischen Forschungsfeldern wie „Strategische Einbindung regenerativer Energien in regionale Energiekonzepte – Folgen und Handlungsempfehlungen aus Sicht der Raumordnung und Wertschöpfung auf regionaler Ebene“ sind für die Planung von regionalen Energieversorgungskonzepten anzuwenden.<sup>767</sup>

Die Studie stellt erstmals konkrete Kennzahlen für die Energieregionen vor, die den regionalökonomischen Beitrag durch regenerative Energiesysteme modellhaft für eine Region abschätzen. Weitere Untersuchungen zum Raumordnungsgesetz zeigen, dass es für die Aufstellung von regionalen Energiekonzepten nach der gesetzlich vorgegeben Raumordnung keine einheitliche Vorgehensweise gibt, da die strukturellen, räumlichen Strukturen und ökonomischen Rahmenbedingungen in den Regionen zu unterschiedlich sind.<sup>768</sup>

Die Steuerung der Projektierung von regenerativen Energien in Energieregionen unter Anwendung der Planungsinstrumente der Regionalplanung ist nur für Vorhaben zulässig, die raumbedeutsam sind. Der in §2 Abs. 2 Nr. 6 ROG formulierte Grundsatz sieht deshalb vor, dass Planungsvoraussetzungen für den Ausbau der regenerativen Energien zur Verfügung gestellt werden. In der Fachliteratur ist die Beurteilung der Raumbedeutsamkeit für regenerative Energien in Energieregionen nicht einheitlich begründet. Anlagen der Solarenergie, Geothermie und Wasserkraft sind weniger raumbedeutsam in Regionen aufgrund des Flächenbedarfs nach dem Raumordnungsgesetz.<sup>769</sup>

Regenerative Energien bedürfen regionale Energiekonzepte, die langfristig zu regionalen Entwicklungskonzepten führen müssen. Regionale Entwicklungskonzepte haben weiterhin das Ziel, basierend auf freiwilliger Selbstbindung der beteiligten Akteure, einen regionalen Konsens über die anzustrebende Entwicklung einer Region zu erstellen. Unterstützend zur Vorbereitung oder Verwirklichung von Raumordnungsplänen oder raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen ist §13 Abs. 1 S. 1 ROG anzuwenden. Regionale Ver-

---

<sup>767</sup>Vgl.: MORO: Modellvorhaben der Raumordnung, Forschungsprogramm des BMVBS, BBSR und BBR. Regenerative Energien: Zukunftsaufgabe der Regionalplanung, ISBN 978-3-87994-781-2, Mai 2011.

<sup>768</sup>Ebd.: Regenerative Energien: Zukunftsaufgabe der Regionalplanung. Studien aus den Modellregionen Nord-schwarzwald, Trier und Hannover sowie aus dem Landkreis Friesland, 2011.

<sup>769</sup>Vgl.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Übersicht von der Beurteilung der Raumbedeutsamkeit von regenerativen Energieanlagen.

sorgungsstrategien nutzen insbesondere regionale Potenzialstudien, die von einem „Masterplan Energie“ begleitet werden. Dieser zukunftsorientierte Planungsansatz erfordert eine strukturelle Konzeption der regionalen Energieversorgung und integrierte Handlungskonzepte durch die zuständigen Kommunen. Energieleit- oder Klimaleitbilder sind durch einen strategischen Fahrplan mit Planungskennzahlen planbar, der mit den regionalen und kommunalen Akteuren bis zur Umsetzungsreife abgestimmt wird. Dieser Entwicklungsprozess, der zu einer Bildung einer zukünftigen Energieregion führt, wird aus den Ergebnissen der Potenzialanalysen generiert und durch kommunale Energiekonzepte umgesetzt. Daraus entwickeln sich lokale Energieprojekte mit regenerativen Energien in Städten und Gemeinden. Zur Festsetzung von regionalen Zielen und Leitbildern, mit dem Ziel der Reduzierung des Energieverbrauchs sowie Ausschöpfung von Energieeinsparpotenzialen in Regionen, sind überregionale Energiekonzepte erforderlich, die über den Bezugsraum „Region oder Stadt“ hinausgehen. Aus der Sicht der Raumordnung ist eine Region eindeutig definiert über regionale Raumordnungspläne als abgegrenzter Bezugsraum.<sup>770</sup>

Regionale Qualifikations-Workshops und Weiterbildungsangebote unterstützen begleitend die Kompetenzstärkung und den Wissenstransfer der beteiligten Akteure für die Projektplanung regenerativer Energien. Die Evaluation ausgewählter Fallstudien von Energiekonzepten in Regionen zeigt, dass ein „Best Practice-Standardmodell“ für regionale Energiekonzepte nicht gegeben ist.

Regionen erfordern differenzierte Versorgungsvarianten, die von regionalen Leitbildern gesteuert werden, sodass eine regionale Abgrenzung zu den Infrastrukturversorgungsnetzen der Energiewirtschaft durch naturräumliche, nutzungsstrukturelle oder geographische Aspekte stärker zu berücksichtigen ist. Eine Region, die als „Energieregion“ geplant ist, stellt einen nicht realen Raum dar. Eine administrative raum- bzw. regionalplanerische Abgrenzung zu angrenzenden Regionen ist für die Projektierung von regenerativen Energien daher anzustreben. Regionen und Planungsverbände geben mit der Entwicklung von regionalen Energiekonzepten einen entscheidenden Schritt in Richtung eines strategischen Energieportfolios und -managements vor. Die Aufstellung von wissenschaftlich fundierten Potenzialstudien zur Wärme und Strombereitstellung ist für Regionen im Planungsstadium Grundlage, um den Gesamtenergiebedarf abschätzen zu können.

---

<sup>770</sup>Vgl.: TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH: Regionale Energiekonzepte, dargestellt am Beispiel der Region Mersch-Ettelbrück-Diekirch, Vortrag anlässlich der Terratec von Schwenke / Wiesner, 1994.

Die Vergleichsstudie des TÜV Rheinland<sup>771</sup> zur Untersuchung von Energieregionen kommt zum Ergebnis, dass die regionale Planungsebene keine fundierten Versorgungsstrategien für die regionale Verankerung von regenerativen Energien zur Umsetzung energiepolitischer Ziele einsetzt. Regionale Energiekonzepte sind zweckmäßig, wenn die administrative Umsetzung durch Kommunen und Gemeinden in einer Region aussagekräftig und vollständig nachgewiesen ist. Ein Prioritätenmanagement zur Konzeptionierung von Energieregionen ist grundlegend zu etablieren.<sup>772</sup>

Die Entwicklung einer nachhaltigen Energieregion ist auf die Vermittlung zwischen Landesplanung und Regionalentwicklung in der betroffenen Region angewiesen. Die aktive Beteiligung und Mitwirkung von Kommunen und Gemeinden, Mitgliedern der Regionalversammlung, Fachbehörden und Institutionen ist erforderlich, damit der integrative nachhaltige Entwicklungsprozess für einen zukunftsorientierten Regionalplan mit regenerativen Energien entwickelt werden kann.

Das Institut für Wirtschaft und Verkehr stellt institutionelle Lösungsansätze vor, die Zweckverbände in Agglomerationsräumen zur Konzeptentwicklung und zur Bewältigung regionaler Aufgaben für die Energieversorgung und Flächennutzung nutzen. Zur Lösung spezifischer regionaler oder kommunaler Planungssituationen ist die Beteiligung von Stadt-Umland-Verbänden zu fördern, damit Entscheidungen zur Koordinierung der städtischen Flächenplanung und folglich Lösungen für die Energieversorgung in Regionen und Städten entwickelt werden können.<sup>773</sup>

Nach § 4 Abs. 1 Nachbarschaftsgesetz (NVerbG) haben Verbände unter Beachtung der Ziele der Raumordnung und Landesplanung die geordnete Entwicklung der Nachbarregionen zu fördern und somit einen Ausgleich der Interessen der Verbandsmitglieder zu erwirken. Der Umlandverband übernimmt Planungsaufgaben der Gemeinden und wird Träger für die vorbereitende Bauleitplanung.

Die Gründung eines Planungsverbandes nach §205 BauGB ist in den Möglichkeiten hinsichtlich der aktiven Flächen- und Maßnahmenbevorratung eingeschränkt und eignet sich zum Beispiel für Kompensationskonzepte zwischen benachbarten Kommunen und sonstigen öffentlichen Trägern. Zweckverbände von Gemeinden und Gemeindeverbänden un-

---

<sup>771</sup>a.a.O.: S.12ff.

<sup>772</sup>a.a.O.: S.25 (Schlussbetrachtung).

<sup>773</sup>Röhl, Klaus-Heiner: Gewerbeflächenmanagement in Agglomerationsräumen –Institutionelle Lösungsansätze und die Einflussmöglichkeiten der Regionalplanung, Nr. 1/98 Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Hrsg.: Die Professoren für Wirtschaft und Verkehr, Dresden, Januar 1998, S.6.

terstützen zum Beispiel die Planung von Fern- und Nahwärmeversorgungsnetzen mit Heizwerken zur Sicherstellung einer kommunalen Nahwärmeversorgung. Körperschaften des öffentlichen Rechts und Private können Mitglieder von Zweckverbänden werden.<sup>774</sup> Der Zusammenschluss als "Planungszweckverband" nach §205 Abs. 6 BauGB stellt eine Option zur unterstützenden Planung und Strategieentwicklung für eine kommunale Energieversorgung mit regenerativen Energien dar. Der Zweckverband besitzt zwar keine Entscheidungskompetenz in der Aufstellung von Bebauungsplänen, jedoch können Schwerpunkte für die Flächennutzungsplanung zur Integration unterschiedlicher kommunaler Entwicklungsvorstellungen getroffen werden und weit über die Kompetenzen der gesetzlichen Regionalplanung hinaus reichen.<sup>775</sup>

### 9.3. Regionale Netzwerke

Das Klimabündnis regionaler Netzwerke<sup>776</sup> fördert den Erfahrungsaustausch zwischen den benachbarten Regionen zur Entwicklung von nachhaltigen Energieversorgungsstrategien. Das Bundeswirtschaftsministerium unterstützt innovative Bioenergie-Konzepte zur Entwicklung eines Versorgungsnetzwerkes mit Bioenergie-Regionen durch regionale Förderprogramme, die mit wissenschaftlicher Unterstützung die Projektdurchführung begleiten. Kleine regionale Versorgungsnetze im ländlichen Raum sind geeignet, „Bioenergiedörfer“ mit einer autarken Nahwärmeversorgung und mit Wärmeinseln zu vernetzen.

Das Kompetenznetzwerk „Dezentrale Energietechnologien“ unterstützt mit dem Projekt „Entwicklungsperspektiven für eine nachhaltige 100 %-regenerative-Energie-Region (EE)“ in Deutschland Regionen und Kommunen. Netzwerkveranstaltungen begleiten die Projekte nach einem Masterplan Energie und führen die regionalen und kommunalen Akteure zu einem gemeinsamen Dialog zusammen.<sup>777</sup>

---

<sup>774</sup>Ebd.: S.7; Beispiele Verband Region Stuttgart, Umlandverband Frankfurt, Planungsverband äußerer Wirtschaftsraum München.

<sup>775</sup>Vgl.: Müller (1994), S.134.

<sup>776</sup>Vgl.: Netzwerke und Bündnisse: Klima-Bündnis, der internationale Rat für kommunale Umweltinitiativen (ICLEI), Energie Cités.

<sup>777</sup>Kompetenznetzwerk dezentrale Energietechnologien e.V.: Potenzialstudie ZuBRA und interkommunale Zusammenarbeit, Information im Internet URL <http://www.deenet.org/projekte/potenzialstudie-zubra-masterplan-energie/> (2016).

Regionale Netzwerktreffen mit den beteiligten Regionen und landkreisweite Vernetzungstreffen zwischen den Akteuren sind unterstützend für die Entwicklung von Energieregionen.

Die Auswertung der Energieregionen zeigt, dass Regionalverbände, Landkreise und Kommunen die Energieversorgungstrategie in einer EE-Region unterschiedlich durchführen. Dabei wird das Ziel „100 % erneuerbar“ vor allem als bilanziertes Ziel für ländliche Regionen verstanden. Der interkommunale Zusammenschluss von Regionen mit einem vorhandenen Energieleitbild setzt sich insbesondere zum Ziel, den Energiebedarf zur Bereitstellung von Strom und Wärme innerhalb von 20 Jahren aus 100% regenerativen Energien zur Verfügung zu stellen. Weitere Ziele des regionalen Netzwerkes stehen für die Erhaltung der Wertschöpfung in den Regionen, Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz, Ausbau der Energieeinspar- und Effizienzpotenziale für regenerative Energien. Die Projekte beziehen insbesondere die Öffentlichkeit, Bürger und interessierte Gruppen wie Architekten, Stadtplaner und Energiefachplaner ein.<sup>778</sup>

Das Projekt „100 % Regenerative Energie Regionen (100ee-Regionen)“ identifiziert und vernetzt Regionen und Kommunen, die ihre regionale Energieversorgung zukünftig auf regenerative Energiesysteme umstellen.<sup>779</sup> Erfahrungsaustausch, Wissenstransfer und die Erfahrungen für eine Vernetzung der Regionen sind vor der Entwicklung eines Energieleitbildes einzubinden, damit Ergebnisse aus den Modellregionen übertragen und in digitale Modellkarten von Regionen<sup>780</sup> dargestellt werden können. Die Unterstützung für den Wissenstransfer zur Entwicklung von Energieleitbildern und Energieregionen wird durch das bundesweite Netzwerk<sup>781</sup> vorgegeben, das einen gezielten Erfahrungsaustausch zwischen den Regionen und Energieregionen ermöglicht. Das 100ee-Netzwerk ist für die Kommunen und Regionen eine Plattform, um die dezentrale Energiewende aktiv zu unterstützen. Derzeit sind 146 Landkreise, Gemeinden und Regionalverbände in Deutschland, die sich das 100ee-Ziel gesetzt haben eingebunden. Die beteiligten Regionen umfassen 25 Millionen Einwohner und eine Gesamtfläche von 127.000km<sup>2</sup>.

---

<sup>778</sup>Vgl.: Agentur für erneuerbare Energien: Kongress „100%-Erneuerbare-Energien-Regionen“. Netzwerk und Austauschkonzepte. Information im Internet URL <https://www.unendlich-viel-energie.de/die-agentur> (2017).

<sup>779</sup>Vgl.: Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien (deENet): Förderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und fachliche Beratung durch das Umweltbundesamt (UBA), Kassel; <http://www.100-ee.de> (2017).

<sup>780</sup>a.a.O.: Information im Internet unter URL <http://www.100-ee.de/> (2017).

<sup>781</sup>Vgl.: Information im Internet URL <http://www.100-ee.de/news/bundesweites-Netzwerk> (2017).

Regionale Plattformen für den Wissenstransfer wie RegioSolar e.V. ist eine internetgestützte Vernetzung der Regionen zur Förderung einer nachhaltigen Energieversorgung mit regenerativen Energien. Die Projektdatenbank von RegioSolar e.V. führt lokale und regionale Initiativen für die Projektierung von solaren Vorhaben, auch zum Abgleich bereits durchgeführter Projekte, zusammen.<sup>782</sup>

Für den regionalen Raum in Europa stellt die Studie von ENERMED<sup>783</sup> den Stand der regenerativen Energien zum Beispiel in den Regionen des nördlichen Mittelmeerraumes dar. Das regionale Pilotprojekt, das in der Region Franche-Comté<sup>784</sup> durch ADEME<sup>785</sup> durchgeführt wird, unterstützt die Koordination in der Region zur Umsetzung des Energiesparens in Gebäuden und die Integration regenerativer Energien und den Wissenstransfer für die regionalen und örtlichen Entscheidungsträger.

Die Regionalverbände steuern und fördern die Planung der regenerativen Energien in Regionen. Die organisatorische Struktur und der Aufbau von Regionalverbänden sind geeignet, auf regionale Energieversorgungsstrategien nach dem Regionalplan und auf die städtische Energieversorgung des Versorgungskonzeptes direkt oder indirekt Einfluss zu nehmen.<sup>786</sup> Die Beispiele aus der Arbeitsgemeinschaft Regionalverbände zeigen, dass eine strukturierte Ansiedlung von regenerativen Energien nach Vorgabe von regionalen Energiekonzepten unter Mitwirkung der Regionalverbände zielgerecht gesteuert werden kann.<sup>787</sup>

#### **9.4. Regionale und kommunale Energieleitbilder**

Regionale und kommunale Energieleitbilder sind Grundlagen für eine nachhaltige Energieversorgungsplanung hinsichtlich eines verantwortungsvollen und effizienten Umgangs mit Nutzenergie. Energieleitbilder, mit der Festsetzung von Vorranggebieten für die Fern-

---

<sup>782</sup>Vgl.: RegioSolar e.V. Information im Internet unter URL <http://www.regiosolar.de/initiativen>.

<sup>783</sup>Wallaert, Vincent: Projekt ENERMED, Les régions méditerranéennes et le développement des énergies renouvelables mit Unterstützung von ERDF im MED Programm, 2010.

<sup>784</sup>Vgl.: Pôle-énergie Franche comté: <http://www.pole-energie-franche-comte.fr>.

<sup>785</sup> ADEME - Agence de l'environnement et de la maîtrise d'énergie, Frankreich. Information im Internet unter URL <http://www.ademe.fr/> (2016).

<sup>786</sup>Vgl.: Regierungspräsidium Gießen, Staatsanzeiger 25: Regionalplan Mittelhessen 2001, Geschäftsstelle der Regionalversammlung Mittelhessen, 18. Juni 2001.

<sup>787</sup>Vgl.: Arbeitsgemeinschaft der Regionalverbände in Ballungsräumen und dem Regionalverband Ruhr: Regionalverbände - Starke Partner für die Zukunftsgestaltung in den Ballungsräumen, S. 12, Essen, August 2006.

und Nahwärmeversorgung<sup>788</sup>, bieten Chancen, Ansätze für Potenzialanalysen zur Wärmespeicherung und die Förderung einer standortbezogenen Wärmepotenzialspeicherung am Versorgungsstandort zu formulieren.

Regionale Energieleitbilder für die fossile Energieversorgung beziehen sich insbesondere auf den Ausbau einer leitungsgebundenen Versorgung mit Fern- und Nahwärmenetzen, Erweiterung von Erdgasleitungsnetzen und auf den generellen Ausbau von regenerativen Energiesystemen. Das Energiesparen und die Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Leitbildern erfordern effizientere Maßnahmenkonzepte, die eine bedeutende Akzeptanzwirkung in der Öffentlichkeit erzielen. Der Start-up Prozess einer kommunalen Energieversorgungsplanung stützt sich auf Ideen und Maßnahmen, die einer Vision oder eines Leitbildes für die zukünftige Energieversorgungsstrategie bedarf.

Die Internetrecherche zum Thema „Energieleitbilder“<sup>789</sup> und Befragungen von Energieplanern zeigt unterschiedliche Planungsansätze zur Entwicklung von kommunalen Energieleitbildern. Kommunale Energieleitbilder beziehen sich aufgrund der Recherche primär auf den Ausbau bestehender Versorgungsnetzstrukturen mit dem Ziel, eine leitungsgebundene städtische Erdgasnetzverdichtung zu fördern und wirken sich positiv auf die Identität und Attraktivität von städtischen Quartieren in Städten aus.<sup>790</sup> Insbesondere sind der Umwelt- und Klimaschutz, Energieeinsparimpulse zum Strom- oder Wärmeverbrauch<sup>791</sup>, Heizanlagensteuerung in Gebäuden, bauliche und anlagentechnische Gebäudesanierungskonzepte sowie Nutzungsänderungen von Bestandsgebäuden Ansätze zu Aufstellung von Energieleitbildern.

Der Klimaschutz ist einer der größten Herausforderungen für die globale Gesellschaft. Um die globale Erderwärmung auf maximal 2°C zu begrenzen, sind die energiebedingten Kohlendioxidemissionen in Europa um mindestens 80-95% bis zum Jahr 2050 zu reduzieren. Mit dem europäischen Handlungskonzept für die Mitgliedstaaten zeigt das „Erste Energiepaket des Ausschusses der Regionen“ Maßnahmen auf zur Begrenzung des Kli-

---

<sup>788</sup>Vgl.: Energieleitbild der Stadt St. Pölten; <http://www.st-poelten.gv.at> (2011).

<sup>789</sup>Vgl.: Leitbilder und Potenziale eines solaren Städtebaus. Der Energy Report: 100% Renewable Energy 2050; Informationen im Internet unter URL <http://www.ecofys.nl>.

<sup>790</sup>Landeshauptstadt München (Hrsg.): Energiegerechte Stadtentwicklung in München Chancen für den Bestand durch energetisch innovative Neubaugebiete in Freiam und Neuaubing, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Januar 2013, S.69ff.

<sup>791</sup>Vgl.: Energiebericht der Gemeinde Wiernsheim, 03.09.2010; Informationen im Internet unter URL <http://www.wiernsheim.de>, 2011.

mawandels. Aus den Energieszenarien ist abzuleiten, dass der Ausbau der regenerativen Energien zur Umsetzungsförderung von Klimaschutzziele gefordert wird.<sup>792</sup>

Der „Global Status Report Regenerative Energien“ stellt den Stand der weltweiten Energieversorgung mit regenerativen Energien in Regionen dar und analysiert den Installationsgrad der weltweit installierten solarthermischen Anlagenleistung.<sup>793</sup>

Die Energieerzeugung in den Ländern verursacht weltweit circa 45% der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und produziert jährlich circa 10,5Gt CO<sub>2</sub>-Emissionen (Stand 2008).<sup>794</sup>

Die Europäische Union setzt politische Ausbauziele seit dem Jahr 2000 dahingehend fest, dass jeder Mitgliedstaat selbständig dafür sorgen muss, den Anteil an regenerativen Energien am Bruttoenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 nach dem nationalen Gesamtziel zu gewährleisten. Langfristige städtebauliche Entwicklungsmaßnahmen fördern die Vorbildfunktion für kommunale Entscheidungsträger und Nachbargemeinden, indem energetische Sanierungsvorhaben umgesetzt werden. Energieleitbilder integrieren strukturelevante Themenbereiche in das regionale oder städtische Leitbild, sodass Umwelt- und Klimaschutzziele als gleichwertige Ziele eingebunden werden. Der Fokus wird in der Energieleitbildentwicklung immer mehr auf die Stadtentwicklungsstruktur und auf das in der Stadt zur Verfügung stehende Potenzial von lokalen regenerativen Energiesystemen unter Berücksichtigung des Substitutionsanspruchs fossiler Energieträger gelegt. Die Städtebauförderung setzt insbesondere Klimaschutzanforderungen als Querschnittsaufgabe in den städtebaulichen Programmen fest. Städtebaulich sind die energetischen Sanierungsziele in Sanierungssatzungen zu implementieren. Dieser planungsrechtliche Ansatz ist Voraussetzung, um Bestandsgebäude in benachteiligten städtischen Quartieren mit finanziellen Mitteln der Städtebauförderung energetisch zu sanieren. Die Planung von Sanierungsgebieten nach §136 ff. BauGB zur Förderung von städtischen Quartierskonzepten mit regenerativen Energien erfordert daher detaillierte Untersuchungen des Gebäudeenergiebedarfs und der städtischen Infrastruktur. Darauf aufbauend wird der städtische Sanierungsrahmenplan erstellt.

---

<sup>792</sup>Vgl.: Europäische Kommission: Erstes Energiepaket, Ausschuss der Regionen „Begrenzung des globalen Klimawandels auf 2° C, Der Weg in die Zukunft bis 2020 und darüber hinaus, BR-Drucksache, Nr.6/07, 2007.

<sup>793</sup>Vgl.:REN21.2008 Report, Renewables 2007 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat and Washington, DC: Worldwatch Institute), Copyright Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH und zusammengestellt von Eric Martinot, 2008, Tabelle R5, S.42; [http://www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wiprojekt/RE2007\\_Global\\_Status\\_Report.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/RE2007_Global_Status_Report.pdf).

<sup>794</sup>Ausfelder, F.;Bazzanella,A.: Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>. Diskussionspapier DECHEMA e.V., Frankfurt/M.,2008.

## 10. Stadtentwicklung und regenerative Energien

### 10.1. Nachhaltige Energieversorgungsstrategien

Die Konferenz des Bundesumweltministeriums und des Verbandes der kommunalen Unternehmen "Vision 2050 - Perspektiven für Stadtwerke im Energiemarkt" entwickeln Leitlinien für städtische Versorgungsstrategien mit „Regenerativen Energien“.<sup>795</sup> Die zukünftige kommunale Energieversorgung erfordert von den Energieversorgern (EVU) und den Stadtwerken neue städtische Versorgungskonzepte zur Umstellung von einer zentralen zu einer dezentralen Energieversorgung. Dieser Umstrukturierungsprozess erfordert die Identifizierung neuer Geschäftsfelder für Stadtwerke.

Die energetische Stadterneuerung umfasst die strategische Ausrichtung und Koordinierung von Maßnahmen der Energieeinsparung, der Effizienzsteigerung und des Einsatzes erneuerbarer Energien. Dieser Strategieansatz ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die Akteure und Systemzusammenhänge auf den Ebenen urbane Stadt, städtisches Quartier und Bebauung einbindet. Der Steuerkreis der energetischen Stadterneuerung erfordert die Datenanalyse nach Status Quo mit der Formulierung energiepolitischer Zielstellungen auf kommunaler Ebene. Die fachübergreifende Bewertung mit allen Stadtentwicklungsbereichen führt zu der Auswahl von urbanen energetischen Modellvorhaben.<sup>796</sup>

Stadtentwicklungskonzepte, die städtische Energieversorgungsnetze mit regenerativen Energien planen, erfordern eine detaillierte Bestandsaufnahme<sup>797</sup> des energetischen Gebäudebestandes, des Jahresheizwärmebedarfs und des Versorgungsstandortes unter Berücksichtigung der kommunalen Energieversorgungsstruktur.<sup>798</sup>

Die Analyse von kommunalen Energieprojekten zur Wärmewende in Deutschland zeigt, dass städtische Versorgungsgebiete mit mehr als 50.000 Einwohnern mit einer hohen Bebauungs- und Wärmebedarfsdichte durch eine Fern- und Nahwärmeversorgung versorgt

---

<sup>795</sup>Vgl. Perspektiven für Stadtwerke im Energiemarkt; Verband kommunaler Unternehmen e.V., Konferenz am 6. Juli 2010; <http://www.vku.de> (2010).

<sup>796</sup>Bundesinstitut für Bau-,Stadt-und Raumforschung (Hrsg.): Energetische Stadterneuerung-Zukunftsaufgabe der Stadtplanung - Modellvorhaben in Städten der Bundesländer Brandenburg und Sachsen-Anhalt, Modellvorhaben zur energetischen Stadterneuerung, Werkstatt: Praxisheft 78, Berlin, 2012.

<sup>797</sup>Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern: Aufbruch Bayern-Bayerisches Energiekonzept; Energetische Fragen im Städtebau von Löhlein, Johanna; Würzburg, 2011, S.27-29.

<sup>798</sup>Vgl.: Landeshauptstadt Sankt Pölten; Kommunales Energieversorgungskonzept, Bericht vom 16.09.2009; <http://www.st-poelten.gv.at/Content.Node/presse/Energieversorgungskonzept.pdf>.

werden.<sup>799</sup> Der fossile Energieträger Heizöl dominiert in den ländlichen Gemeinden mit weniger als 7.500 Einwohnern, dagegen übernimmt die leitungsgebundene Erdgasversorgung in den bevölkerungsstarken Kommunen mit mehr als 10.000 Einwohnern flächendeckend die Wärmeversorgung des Stadtgebietes.<sup>800</sup>

In Forschungsprojekten des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau zur Stadtentwicklungsplanung sind die Wechselbeziehungen zwischen Siedlungsstrukturplanung und Energieversorgungsstruktur untersucht worden. Die Auswertung der Forschungsprojekte zeigt, dass insbesondere die Konkurrenzsituation zwischen den regionalen Energieversorgungsunternehmen, Stadtwerken und Kommunen die Entwicklung von innovativen städtischen Energieversorgungskonzepten mit regenerativen Energien grundsätzlich erschwert. Die Kommunen verfolgen zum einen das Ziel einer nachhaltigen Stadtentwicklungspolitik zum Klimaschutz mit regenerativen Energien und planen zum anderen den Ausbau der kommunalen Energieversorgung mit einer leitungsgebundenen Erdgasversorgung unter Berücksichtigung der Siedlungsstruktur.<sup>801</sup>

Eine autarke kommunale Energieversorgung ist von einem ambitionierten Versorgungskonzept abhängig und erfordert von den Kommunen, dass ein Konzessionsvertrag abgelehnt wird, um die Selbstversorgung mit Energie selbständig zu verwalten. Modellvorhaben in den Kommunen wie die Null-Energiestadt zeigen, dass die regenerativen Energien einen Hauptbestandteil der Wärmelastverteilung übernehmen können, jedoch Unterstützung durch die Kraft-Wärme-Kopplung zur Sicherstellung der Versorgung mit Wärme und Strom benötigen. Nahwärmenetze mit dezentralen Heizkraftwerken, die mit Biomasse oder Biogas betrieben werden, unterstützen gleichzeitig die Versorgung von städtischen Quartieren.<sup>802</sup>

Die Analyse von städtischen Wärmeversorgungskonzepten in Kommunen zeigt, dass die Erhaltung und Modernisierung von Wärmeversorgungsnetzen als Entwicklungsmotor der Stadtentwicklung wirkt. Die Ausweisung von städtischen Sanierungsgebieten eröffnet gleichzeitig die Möglichkeit für eine energetische und technologische Anpassung an neue Energieversorgungssysteme und zum Wärmenetzausbau. Sanierungsvorhaben in städti-

---

<sup>799</sup>Heinrich Böll Stiftung (Hrsg.): Wärmewende in Kommunen – Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der Wärmeversorgung. Band 41. Schriften zur Ökologie, Berlin. S. 107, Abb.29.

<sup>800</sup>Vgl.: Gemeinde Wiernsheim, Bevölkerungszahl 6443 im Jahr 2007; <http://www.wiernsheim.de> (2011).

<sup>801</sup>Vgl.: BWS Bau, Köln, 1981.

<sup>802</sup>Bernd Demuth, Stefan Heiland, Norbert Wiersbinski, und Claudia Hildebrandt (Hrsg.): Energielandschaften – Kulturlandschaften der Zukunft? Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skripten 364, 2014.

schen Kerngebieten begründen die Modernisierung des Gebäudebestandes und fördern die Erhaltung der denkmalgeschützten Gebäudesubstanz. Die Planung von kommunalen Versorgungskonzepten in städtischen Sanierungsgebieten erfordert eine hohe Strom-, Wärmebedarfs- und Anschlussdichte.

Die dezentrale Struktur der kommunalen Energieversorgung mit regenerativen Energien eröffnet den Endenergieverbrauchern die aktive Beteiligung an Gemeinschaftsprojekten der Energieversorgung und an der Partizipation von Energiegenossenschaften. Im städtischen Kontext sind Energieerzeugungsflächen in Städten wie Gebäudeflächen, Straßenflächen, Industriegrundstücke, Brachflächen etc. für die solare Energieversorgung zu verifizieren, damit die Gründung von Energiegenossenschaften wirtschaftlich ist. Die Untersuchung von Modellvorhaben in „Energiewäldern“<sup>803</sup> zeigt, dass überwiegend Anlagen zur Erzeugung von Solarstrom durch Energiegenossenschaften betrieben werden, da die Errichtung der Anlagen von Bund und Ländern gefördert und eine Einspeisevergütung von Solarstrom nach dem regenerativen Energiegesetz geleistet wird. Aufgaben, Verantwortlichkeit und rechtliche Vertragsbeziehungen zwischen den eingetragenen Mitgliedern und der Energiegenossenschaft sind in Satzungen festgelegt.<sup>804</sup>

Ein Beispiel für die Neustrukturierung der kommunalen Energieversorgung zum Gebäudebestand zeigt die Stadt Berlin, die mit der Gründung von Energiesparpartnerschaften regenerative Anlagensysteme zur Versorgung von Gebäuden fördert. Die Aufgabe der Energiepartnerschaften ist, dass das Energieeinsparpotenzial verbindlich für Gebäudeeigentümer vorgegeben wird. Die Investitionen, die für die energetische Modernisierung von Gebäuden und technischen Heizungsanlagen erforderlich sind, übernimmt der private Energiedienstleister als „Energie-Contractor“. Die Refinanzierung der durchgeführten Investitionen und Anlagenkosten erfolgt über die eingesparten monatlichen Energiekosten. Mit dem Instrument des Contractings bzw. Energie-Contractings lassen sich Energieeinsparpotenziale im Gebäudebestand und für den Neubau von Gebäuden sowie für Liegenschaften erschließen, ohne dass der Eigentümer die notwendige Investition tätigen

---

<sup>803</sup>Vgl.: DGRV Genossenschaften: Energiegenossenschaften: Bürger, Kommunen und lokale Wirtschaft in guter Gesellschaft von Regenerative Energien Projekte in Kommunen und Agentur für Regenerative Energien, Regenerative Großstadt, S.30-37, Information aus dem Internet URL <http://www.unendlich-viel-energie.de/> (2015).

<sup>804</sup>Vgl.: Gründung einer Energiegenossenschaft: Ein gemeinschaftlicher Geschäftsbetrieb für die Energiewende vor Ort, Agentur für Regenerative Energien e.V., Informationen im Internet URL <http://www.kommunal-erneuerbar.de> (2015).

muss. Der Eigentümer der Liegenschaft wird sowohl von den erforderlichen Investitionen als auch von der organisatorischen Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahmen entlastet. Das Finanzierungsinstrument als Beteiligungsgemeinschaft<sup>805</sup> wird bereits für die Errichtung und den Betrieb von Bürgersolaranlagen eingesetzt. Die Gebäudedachflächen der Bürgersolaranlagen sind Eigentum der Gebietskörperschaften oder privaten Industrieunternehmen. Mehr als fünfhundert Liegenschaften des Landes Berlin sind den Energieeinsparpartnerschaften vertraglich beigetreten.<sup>806</sup>

Die steigende Zahl der Haushalte und der damit verbundene Bevölkerungsanstieg in Städten haben Auswirkungen auf die Zunahme des Energieverbrauchs und Luftschadstofffrachten. Zur Umsetzung der nationalen Klimaschutzziele sind die Kommunen unverzichtbare Partner, denn in Städten, Gemeinden und Landkreisen bestehen erhebliche Klimaschutz- und Energieeffizienzpotenziale. Die nachhaltige klimafreundliche Stadtentwicklung rückt daher bei allen Planungsvorhaben immer mehr in den Vordergrund und der Ausbau der regenerativen Energien wird unterstützt. Städtebauliche Verträge und Vereinbarungen mit Energieversorgern und Endverbrauchern erzielen langfristig die Umsetzung von Maßnahmen aus regionalen und städtischen Klimaschutz- und Energiekonzepten, die das interdisziplinäre Handeln mit den Entscheidungsträgern und Akteuren erweitern.<sup>807</sup> Die Anforderungen von regionalen Klimaschutzinitiativen motivieren Kommunen, indem der Gesamtenergieverbrauch analysiert und innovative Modellprojekte nach dem Leitbild der CO<sub>2</sub>-Neutralität<sup>808</sup> für den Klimaschutz geplant werden.

Der Vergleich von städtischen Klimaschutzkonzepten des Deutschen Instituts für Urbanistik zeigt, dass insbesondere städtische Energieversorgungsmodelle, Gebäudeversorgungsmodelle, Beleuchtungs- und Energieeinsparkonzepte<sup>809</sup> und Energieeffizienzmodelle etc. im Fokus des kommunalen Klimaschutzes stehen. Orientierungshilfen und Leit-

---

<sup>805</sup>Vgl.: Wikipedia: Bürgersolaranlage oder Bürgerkraftwerk. Information im Internet URL <http://de.wikipedia.org/> (24.04.2012).

<sup>806</sup>Vgl.: Berliner Energieagentur: Leitfaden Energiespar-Contracting in öffentlichen Liegenschaften - Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Information im Internet URL <http://www.berliner-e-agentur.de/sites/default/files/uploads/pressematerial/contracting-leitfaden>. (2015)

<sup>807</sup>Vgl.: Hansestadt Hamburg: Klimaschutzkonzept für Hamburg, Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft, Projektnummer: Klimaschutzförderprogramm „Regenerative Wärme“ 2011/025, Energetische Sanierung von Nichtwohngebäuden 2010/031, S.9 – 15.

<sup>808</sup>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Schwerpunktthema "Kommunaler Klimaschutz", Heft 11, Jahrgang 2010, S.608-661.

<sup>809</sup>Vgl.: Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen (Kommunalrichtlinie); Informationen im Internet URL <http://www.bmu-klimaschutzinitiative.de> (12.2010).

fäden zur Planung von kommunalen Klimaschutzkonzepten stellt das Deutsche Institut für Urbanistik zur Verfügung.<sup>810</sup>

Der DOBRIS-Lagebericht der EUA stellt ein Monitoringkonzept für die Bewertung der städtischen Umweltqualität in Europa für städtische Ökosysteme zur Verfügung, da Methoden der Datenerfassung zur städtischen Umweltqualität unzureichende Ergebnisse bereithalten.<sup>811</sup> Die zu untersuchenden Wechselbeziehungen zwischen dem Umweltzustand, Stadtentwicklung, Wachstum der Bevölkerung und Energieverbrauch sind im Rahmen der Monitoringkonzepte in Beziehung gesetzt. Die Verbrennung von fossilen Energieträgern verursacht eine Emissionsfracht an Kohlendioxid-, Staub-, Stickoxid- und Schwefeldioxid. Die Kampagne vom Internationalen Council for Environmental of Initiatives „Städte für den Klimaschutz“<sup>812</sup> stützt sich auf das Ziel zur Entwicklung von Aktionsplänen mit der Reduzierung von Kohlendioxid-Emissionen.

Die Industriestädte in Mittel- und Westeuropa erzeugen über stationäre Verbrennungsanlagen die höchste PM-10 Belastung (Staub)<sup>813</sup> und verursachen erhebliche Auswirkungen für die menschliche Gesundheit in Regionen und Städten. Kraftwerke, Industrieanlagen und Produktionsstätten erzeugen einen hohen Anteil an Luftschadstoffen<sup>814</sup> durch Verbrennung fossiler Energieträger.<sup>815</sup> Durch eine intensive Emissionsbegrenzung der stationären Emissionsquellen ist bereits ein Rückgang an Schwebstaubkonzentrationen in den europäischen Städten erzielt worden. Die Emissions- und Immissionsgrenzwerte für den Betrieb von genehmigungsbedürftigen Anlagen zur Energieerzeugung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz reduzieren die Luftbelastung in Regionen und Städten.<sup>816</sup>

---

<sup>810</sup>Deutsches Institut für Urbanistik (difu): Beispiele für Klimaschutzkonzepte vom Deutschen Institut für Urbanistik gGmbH 2008-2012; <http://www.kommunaler-klimaschutz.de>; <http://www.leitfaden.kommunaler-klimaschutz.de>.

<sup>811</sup>Vgl.: European Environment Agency: Die Umwelt in Europa: Der zweite Lagebericht, Städtische Umwelt (Kapitel 12.1), 1997.

<sup>812</sup>Vgl.: International Council for Environmental Initiatives (ICLEI); Cities and regions explore smart energy grids and smart solutions; Informationen im Internet URL <http://www.iclei-europe.org> (2011).

<sup>813</sup>Vgl.: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 30. Juli 2002 (Anhang besondere Regelungen für Anlagen Nr.5.4 ff.) – PM-10 (Korngrößenklasse mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10µm) veröffentlicht im Gemeinsamen Ministerialblatt, Oktober 2002.

<sup>814</sup>Ebd.: Kapitel 12.3.1 Energie.

<sup>815</sup>Ebd.: Kapitel 12.3.2 (sonstige Schadstoffe).

<sup>816</sup>Vgl.: §§ 48a, 49 BImSchG vom 26.09.2002 geä. durch Artikel 8 vom 8.11.2011 (BGBl. S. 3830).

## 10.2. Nachhaltige Stadtentwicklung und Energiebedarf

Der Bericht „Zukunftsfähige Städte in Europa“ stellt die Bedeutung von Rahmenbedingungen und Grundsätze für eine nachhaltige Stadtentwicklung in den Kommunen Europas in den Vordergrund.<sup>817</sup> Das Grünbuch der Europäischen Kommission empfiehlt zum Schutz des städtischen Klimas Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung.<sup>818</sup> Strukturfondsverordnungen für Regionen und Städte bilden den Rahmen für die Umsetzung von Energieprogrammen als Langzeitstrategie für die integrierte städtische Entwicklung in Europa.<sup>819</sup>

Das ExWoSt-Forschungsfeld urbaner Strukturen untersucht aus der Sicht des CO<sub>2</sub>-Verbrauchs energetische Modellvorhaben für Städte zum Klimawandel. Dieser Planungsansatz stellt aus der Sicht der Stadtentwicklung zum Klima- und Umweltschutz eine einseitige Strategie dar und wird in diesem Kontext nicht weiter betrachtet.<sup>820</sup>

Der Brundtlandbericht stützt sich auf den Grundsatz der dauerhaften Entwicklung, Verbesserung der Lebensqualität und Schutz der Umwelt innerhalb der Tragfähigkeitsgrenzen der Ökosysteme.<sup>821</sup> Der Ökosystemansatz ist ein komplexes Strategiesystem für den städtischen Versorgungskreislauf zur Steuerung von Stoffströmen der Energieerzeugung, Ressourcenverwendung und Abfallentsorgung in dem System Stadt. Ein Strategieziel zur Einhaltung der Ökosystembilanz ist, die Entkopplung des Energiebedarfs zum Wirtschaftswachstum in Regionen und Städten zu erreichen. Als Ursachen für die fortschreitende Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch sind der technologische Fortschritt, die sparsame und rationelle Energienutzung und die Veränderung der Wirtschaftsstrukturen verantwortlich. Die Ergebnisse der Langzeitstatistik zur städtischen

---

<sup>817</sup>Europäische Kommission (Hrsg.): Schwerpunktzusammensetzung des Berichts „Zukunftsfähige Städte in Europa“ für Kommunalverwaltungen, Sachverständigengruppe für die städtische Umwelt, Information aus dem Internet URL <http://ec.europa.eu/environment/urban/locsm-de.htm> (21.07.2006).

<sup>818</sup>Europäische Kommission: Grünbuch 2006, Eine europäische Strategie für nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Energie, SEK 2006, 317. 8.3.2006, Brüssel.

<sup>819</sup>Europäische Kommission: Verordnung (EG) Nr. 663/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juli 2009 über ein Programm zur Konjunkturbelebung durch eine finanzielle Unterstützung der Gemeinschaft zugunsten von Vorhaben im Energiebereich, Informationen im Internet URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/> (13.7.2009).

<sup>820</sup>Vgl.: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumentwicklung: ExWoSt-Forschungsfeld; Urbane Strategien zum Klimawandel, Modellvorhaben und Pilotprojekte, 2010.

<sup>821</sup>Vgl.: Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, 1987, UN-Entwicklungsprogramm und Weltnaturfonds, 1991, Internationaler Rat für kommunale Umweltinitiativen (ICLEI, 1994).

Energieversorgung bestätigen, dass der Trend in Deutschland zur Entkopplung seit Beginn der 90er Jahre während des wirtschaftlichen Wachstums nicht erreicht worden ist.<sup>822</sup> Städte sind keine geschlossenen, sondern hochgradig abhängige offene Systeme, da sie von den angrenzenden Regionen und dem städtischen Umland mit Ressourcen und Energie versorgt werden. Aus diesem Grund ist ein integriertes Energieversorgungskonzept auf der Basis der Ökosystembilanz für Städte anzustreben, da die Ressourcen- und Energiekreisläufe zusammengeführt und die Integration regenerativer Energiesysteme somit gefördert wird. Dieser strategische Ansatz ist für die dezentrale Energieversorgung von Städten und für kleinräumige Siedlungsgebiete im Rahmen der Stadtentwicklung und Energieversorgungsinfrastruktur aufzunehmen.

In den Europäischen Mitgliedstaaten verbrauchen insbesondere die Metropolen den größten Anteil am Gesamtenergie- und Primärenergiebedarf.<sup>823</sup> Der Wohngebäudesektor in Städten und Metropolen trägt wesentlich dazu bei. Die Statistik zum Endenergieverbrauch von Haushalten zeigt, dass die überwiegende Zahl der Haushalte durchschnittlich bei einer Haushaltsgröße von weniger als drei Personen liegt und der tägliche Energieverbrauch ansteigt.<sup>824</sup>

Statistische Untersuchungen in Deutschland bestätigen einen 2%igen höheren Energieverbrauch pro Jahr aufgrund der Zunahme der Bevölkerungs- und Haushaltszahlen.<sup>825</sup>

Die Einflüsse des soziodemographischen Wandels stellen städtebauliche Leitbilder und Strategien für eine ressourcenschonende und energiegerechte Entwicklung von Städten und Regionen grundlegend in Frage. Städtische Leitbilder wie die perforierte Stadt oder Netzstadt sind im Rahmen des demographischen Wandels entwickelt worden. Die Auswirkungen des demographischen Wandels in den Kommunen sind durch Demographieberichte der Bertelsmann Stiftung untersucht worden und stellen statistische Datenprognosen für Kommunen in Deutschland bis zum Jahr 2025 zur Verfügung. Die Untersuchung bezieht sich auf 2.959 Kommunen und 432 Landkreise und zeigt, dass die demo-

---

<sup>822</sup>Vgl.: Informationen aus dem Internet URL <http://www.bmwi.de/BMWi/> (2012).

<sup>823</sup>European Environment Agency: Die Umwelt in Europa: Der zweite Lagebericht, Städtische Umwelt (Kapitel 12.4.1), 1997.

<sup>824</sup>Vgl.: Wiener Stadtwerke (Hrsg.): Materialien der Wiener Stadtwerke zur nachhaltigen Entwicklung Nummer 6, Energieeffizienz von Städten: Szenarien für eine sichere und klimaverträgliche Energieversorgung von Großstädten, Wien, 2011.

<sup>825</sup>Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): DESTATIS: Energie auf einen Blick, 2009, S.21.

graphische Entwicklung und die steigende Anzahl der Haushalte den kommunalen Energieverbrauch zukünftig verändern werden.<sup>826</sup>

Insgesamt steigt der kommunale Anteil an Erdgasanschlüssen für Wohnungsneubauten an und versorgt rund 18,5 Mio. Wohnungen, die mit Erdgasetagenheizungen ausgestattet sind. Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs von Gebäuden wird geprägt durch energiesparende Maßnahmen im Gebäudesektor, wie durch Substitutionseffekte durch einen vermehrten Einsatz von Zusatzheizungen und regenerativen Energien.<sup>827</sup> Heizöl zur Versorgung von Wohngebäuden ist der häufigste Energieträger, gefolgt von Erdgas, Steinkohle, Kernenergie und Wasserkraft.<sup>828</sup>

Der Endenergieverbrauch für den Heizungs- und Warmwasserbedarf von Haushalten in Regionen wird aufgrund der meteorologischen Situationen täglich beeinflusst.<sup>829</sup>

### **10.3. Flächenmanagement und Energieverbrauch**

Die Studie des Rates für nachhaltige Entwicklung untersucht im Rahmen einer Strukturanalyse Projekte zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme in Kommunen. Die Forderung nach einem kommunalen Flächenmanagement ist eine Strategie für die städtische Planung, die für die Kommunen eine Daueraufgabe darstellt zur Festlegung und Bilanzierung des Versiegelungsgrades. Städtische Baulandkataster sind im BauGB nicht gesetzlich festgelegt und die Umsetzung für Kommunen daher nicht verpflichtend ableitbar. Demnach besteht die Möglichkeit für Kommunen, eine Selbstverpflichtung zu einem „aktiven“ kommunalen Flächenmanagement unter Beteiligung von Eigentümern und Investoren zu entwickeln. Das kommunale Brachflächenkataster unterstützt die Nachweisführung des kommunalen „freien Flächenpotenzials in Städten“ zum Beispiel zur Erweiterung von dezentralen Energiespeichernetzen und zur Etablierung von regenerativen Energien wie für großflächige solare Anlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme.<sup>830</sup>

Das Umweltbundesamt stellte eine Tendenzentwicklung zwischen der abnehmenden Bevölkerung und zum demographischen Wandel sowie zur städtischen Siedlungs- und Ver-

---

<sup>826</sup>Vgl.: Bertelsmann-Stiftung: Wegweiser Kommune, Daten und Prognosen: Demographie-Berichte der Kommunen; [www.wegweiser-kommune.de](http://www.wegweiser-kommune.de); (2010).

<sup>827</sup>Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): DESTATIS: Energie auf einen Blick, 2009, S. 8.

<sup>828</sup>Ebd.: S. 7 (Abbildung, Anteil der Energieträger am Primärenergieverbrauch, ARGE Energiebilanzen).

<sup>829</sup>Vgl.: DESTATIS: Energie auf einen Blick, Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Ausgabe 2009.

<sup>830</sup>Vgl.: Rat für nachhaltige Entwicklung: Studie im Auftrag des Rates für Nachhaltige Entwicklung: Erfolgsfaktoren zur Reduzierung des Flächenverbrauchs in Deutschland, Dialogik gGmbH, Stuttgart, S.27, 2007.

kehrfläche fest. Die Steigerung der städtischen Versiegelung ist unabhängig des demographischen Wandels um 3,8% (115 ha pro Tag) innerhalb von drei Jahren angestiegen.<sup>831</sup> Das Ergebnis der Studie des Sächsischen Staatsministeriums zur Untersuchung der Wirkungszusammenhänge zwischen Siedlungsentwicklung, städtischer Flächenentwicklung und Bevölkerungsentwicklung in verdichteten Gebieten des Bundeslandes Sachsen zeigt, dass trotz eines städtischen Bevölkerungsrückgangs der städtische Flächenverbrauch nicht zurückgebaut oder anderen Nutzungen zugeführt worden ist. Der anhaltende Trend zur Suburbanisierung entwickelt sich langfristig gegenläufig.<sup>832</sup> Der wachsende Bedarf an seniorengerechten Wohnformen und Siedlungsstrukturen in Städten steigt langfristig. Eine Abnahme oder Zunahme der Gesamtbevölkerung bewirkt nicht automatisch einen Rückgang oder Anwachsen der städtischen Siedlungsfläche.<sup>833</sup>

Die Untersuchung aufgrund von Shell-Szenarien stellt Ergebnisse über den Pro-Kopf-Energieverbrauch von mehr als 500 Städten mit über 750.000 Einwohnern und 21 Metropolen mit über 10 Millionen Einwohnern dar. Die Analyse der Ergebnisse generiert sechs städtische Grundtypen, die Aussagen zu der Entwicklung des Energieverbrauchs in Städten darstellen. Das Bevölkerungswachstum findet zunehmend in Städten statt und die Bevölkerung wächst mit dem Verbrauch von Energie, Ressourcen, Siedlungsfläche und Gebäudetypen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Anteil des weltweiten Energieverbrauchs in Städten von 2010 bis 2040 von 66% auf ca. 80% steigen wird. Der Gesamtenergiebedarf einer Stadt ist von Klima und geografischer Lage, Einwohnerzahl und Wirtschaftsaktivität sowie von der Stadtentwicklung abhängig. Ausgedehnte Metropolen mit drei bis fünf Millionen Einwohnern befinden sich in Industrieländern mit dichtbesiedelten Innenstädten und dünnbesiedelten Vororten. Der sehr hohe Energieverbrauch ist auf ein hohes Pro-Kopf-Einkommen, Gebäude und Wohnhäuser und von ausgedehnten Siedlungsflächen von Vororten zurückzuführen. Wohlhabende Gemeinden sind im Vergleich kleiner Versionen ausgedehnter Metropolen mit 750.000 bis drei Millionen Einwohnern. Der Pro-Kopf-Energieverbrauch dieser Städte ist aufgrund hoher Einkommen in Kombination mit ausgedehnten Stadtbezirken und Gebäuden vergleichsweise hoch. Aus den Untersuchungen sind sechs typische Entwicklungspfade für Städte entwickelt wor-

---

<sup>831</sup>Umweltbundesamt (Hrsg.): Soziodemographischer Wandel und Umwelt, April 2007, S. 77.

<sup>832</sup>Vgl.: Forschungsvorhaben des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft (Groß, Bergfeld, Helm 2001), aus soziodemographischem Wandel und Umwelt, S.32, April 2007.

<sup>833</sup>Umweltbundesamt (Hrsg.): Soziodemographischer Wandel und Umwelt, April 2007, S. 32.

den, die bedeutende Auswirkungen auf Energieverbrauch und- effizienz haben. Der globale Energieverbrauch ist demnach abhängig von einer kontrollierten Urbanisierung und wirtschaftlichen Entwicklung von Städten.<sup>834</sup>

Urbane und kompakte Siedlungsstrukturen bieten im Gegensatz zu suburbanisierten und zersiedelten Räumen günstige Bedingungen für die Energieeinsparung und den Einsatz erneuerbarer Energien. Die effiziente Nutzung der vorhandenen städtischen Infrastruktur stellt einen wesentlichen Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz. Städtische Strukturen und Lebensweisen sind in Bezug der Verfügbarkeit fossiler Energieträger und den damit verbundenen steigenden Energiekosten sowie den notwendigen Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel energieeffizient zu gestalten. Eine an der Flächenkreislaufwirtschaft orientierte flächeneffiziente Siedlungsentwicklung ist anzustreben.<sup>835</sup>

## **10.4. Städtische Wärmeversorgungsmodelle für den Gebäudebestand**

### **10.4.1. Wohndichtemodelle und Wärmebedarfsdichte**

In der Stadtentwicklung sind Wohndichte- und Wärmebedarfsdichtemodelle für die kommunale Wärmeversorgung abzuwägen, damit der räumliche und städtebauliche Zusammenhang in den städtischen Quartieren erhalten bleibt. Die Auswertung von urbanen Wohndichtemodellen<sup>836</sup> in Städten und Metropolen zeigt, dass die Wohndichte pro km<sup>2</sup> der städtischen Bevölkerung und der Gesamtwärmeenergiebedarf in Städten und städtischen Quartieren im Zusammenhang stehen.<sup>837</sup> Die Wohndichte hat Einfluss auf den städtischen Wärmebedarf und wird in Energiebedarfsatlanten und Wärmebedarfskarten<sup>838</sup> von Regionen und Gemeinden dokumentiert. Die Planung von Sanierungsvorhaben in städtischen Quartieren bedarf in der vorbereitenden Projektierungsphase der Festlegung von städtebaulichen Festsetzungen wie Grundflächenzahl (GRZ), Geschosshöhen und Ge-

---

<sup>834</sup>Shell Studie - New Lenses: Städte der Zukunft - Ergänzung zu den New Lenses Szenarien, Broschüre. Information im Internet URL <http://www.shell.de/szenarien> (2017).

<sup>835</sup>Vgl.: Ressourcenschonende Stadtentwicklung - Nachhaltige Siedlungsstrukturen durch Energiekonzepte, Klimaschutz und Flächeneffizienz, Fabian Dosch und Lars Porsche, Informationen zur Raumentwicklung, Heft 3/4.2009, S.255-279.

<sup>836</sup>Vgl.: Wurzbacher, Steffen: Zum Verhältnis zwischen urbaner Dichte und Energie, Dissertation, BU Wuppertal, Köln 2011.

<sup>837</sup>Vgl.: Statistik über die Wohndichte in deutschen Großstädten; <http://www.cireview.de/stadtfakten>; Die Stadt Herne hat 170.000 Einwohner mit 3.342 Einwohner/km<sup>2</sup>.

<sup>838</sup>Vgl.: Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern: Aufbruch Bayern - Bayerisches Energiekonzept; Energetische Fragen im Städtebau von Löhlein, Johanna; Würzburg, 2011, S.40.

schossflächenzahl (GFZ) in Bebauungsplänen. Im Bauleitplanungsprozess ist die Festlegung der Wohndichte mit der Siedlungstypologie und den Wohngebäudeklassen abzustimmen.<sup>839</sup>

Die Wärmebedarfsdichte eines städtischen Quartiers wird nach dem Wärmeenergiebedarf von Gebäudeklassen eines städtischen Quartiers in Abhängigkeit von der Siedlungstypologie, Gebäudeform und dem Wärmeenergiebedarf pro Einwohner (Energiekennzahl) für Heizung und Warmwasser festgelegt. Die detaillierte Erfassung, Analyse und Auswertung der täglichen Wärme- und Stromlasten und der damit verbundene jährliche und monatliche Energieverbrauch der Endenergieverbraucher ist die Grundlage für die kommunale Energiekonzeptentwicklung. Der Datenbestand der kommunalen EVU zum Wärme- und Stromverbrauch ist durch Befragung der Energieverbrauchsdaten beim Endenergieverbraucher zu erweitern und durch die GIS-Datenerfassung abzugleichen. Energieverbrauchswerte von Bestandsgebäuden in Bebauungsgebieten sind in kommunalen Wärmeatlanten digital erfasst und nach Versorgungsstandorten auswertbar. Bei städtischen Neubaugebieten sind die energetischen Verbrauchswerte der Gebäude durch Datenaufnahme in Energieausweisen nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) dokumentiert.

Die energetische Analyse von städtischen Quartieren zeigt, dass in der Praxis die Wärmebedarfsdichten bei Landgemeinden zwischen 250 und 400MWh/(ha a) und bei Städten mit größeren Fernwärmegebieten bei circa 900MWh/(ha a) liegen. Die Untersuchung von städtischen Wärmenetzen bezüglich der Siedlungsgebiete und der Wärmebedarfsdichte durch das Institut für Energie und Umwelt (IFEU) zeigt, dass bei verdichteten Siedlungsstrukturen mit einer GFZ über 0,9 ein Effizienzstandard bereits durch einen Passivhausbestand erzielt werden kann, der eine Wirtschaftlichkeit von städtischen Wärmenetzen erfüllt.<sup>840</sup>

Ohne Berücksichtigung der Transformation des Fernwärmesystems in Richtung Low-Ex-Systeme ergeben sich restriktive Bedingungen, wie zum Beispiel bei der Bewertung für städtische Wärmenetze, bei der selbst bei Verlegung eines Netzes für Nah- und Fernwär-

---

<sup>839</sup>Vgl. Gemeindeverwaltung Aubing: Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Dichtemodelle im Bereich Wohnen, Städtebaulicher Beschluss, 2005.

<sup>840</sup>IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Hrsg.): Die Nutzung von Energieströmen in kommunalen Strom-Wärme-Systemen zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Neutralität von Kommunen bis zum Jahr 2050. Wolff, Jagnow (2011), Oktober 2014, S.164 ff.

me bei mittlerer Wohndichte mit  $<0,5$  und einer Gebäudeenergiekennzahl von unter 120 kWh/(m<sup>2</sup> a) keine Nahwärmenetzversorgung mehr empfohlen wird.<sup>841</sup>

#### **10.4.2. Solare städtische Energieversorgungsplanung**

Die Internationale Energieagentur initiierte Solar-City Modellprojekte<sup>842</sup> zur Forschung und Marktentwicklung in Europa.<sup>843</sup> Schwerpunkte sind die Verwendung von Solarenergiesystemen, Reduzierung von Kohlendioxidemissionen und Entwicklung kommunaler Versorgungsstrategien sowie die Festlegung von energetischen Zielwerten nach Entwicklungsszenarien.

Das Projekt der 50 Solarsiedlungen untersucht städtebauliche Modellvorhaben nach dem strategischen Ziel der Energie- und Klimaschutzstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen. Die Auswertung der städtebaulichen Projekte zeigt, dass mit der solaren Energieversorgung städtebaulich angepasste Energieversorgungsstrategien für urbane Gebiete zu entwickeln sind.<sup>844</sup>

Das Forschungs- und Demonstrationsprogramm Solarthermie 2000 analysiert in diesem Zusammenhang die Wirtschaftlichkeit der Solarthermie unter Berücksichtigung der Senkung der solaren Nutzwärmekosten und der Steigerung des Systemnutzungsgrades von solaren Kollektorsystemen. Die Evaluierung der Betriebsergebnisse von Pilot- und Demonstrationsanlagen bestätigt, dass für großflächige solare Kollektoranlagen die spezifischen Investitionskosten um den Faktor 2 niedriger sind als bei kleinflächigen Kollektoranlagen. Die Erzeugung von solar unterstützter Niedrigtemperaturwärme ist mit großflächigen Kollektoranlagen als wirtschaftlich einzustufen.<sup>845</sup>

Die Reduzierung des Endenergieverbrauchs von Gebäuden und die unterstützende Lastabdeckung durch solare Wärme in Siedlungsgebieten mit geringer Wärmebedarfsdichte erschweren die wirtschaftliche Nutzung von Nahwärmenetzen. Siedlungsgebiete mit einer mittleren und hohen Wärmebedarfsdichte sind geeignet, die

---

<sup>841</sup>a.a.O.: Wolff, Jagnow (2011).

<sup>842</sup>Ecofys GmbH: „Solar City“ Task 30 der IEA: Dipl.-Ing. Frank Wouters, Solar City –Task 30 der IEA Internationalen Energie Agentur, FVS, Fachtext, Themen 2001, S.139-143.

<sup>843</sup>Vgl.: IEA, Solarcity (2002), Fisch (2002).

<sup>844</sup>Vgl.: Energie Agentur NRW (Hrsg.): 50 Solarsiedlungen in Nordrhein-Westfalen, Energie Region NRW, Dezember 2011.

<sup>845</sup>Schirmer, Ulrich: Solares Heizen mit Großanlagen – Chancen und Perspektiven, Technische Universität Chemnitz und Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ-Außenstelle Berlin), S. 1-23.

Wärmeversorgung über ein städtisches Nahwärmenetz zu gewährleisten.<sup>846</sup> Der Restwärmebedarf für die Gebäudeversorgung ist durch Biomasseanlagen oder Wärmepumpensysteme (Strom-Mix) bereitzustellen. Für die solare Stadtentwicklung sind folgende städtebauliche Anforderungen anzunehmen:

- Entwurf von regionalen solaren Energieversorgungskonzepten. Abstimmung von kommunalen Strom- und Wärmeversorgungssystemen in Regionen. Primärenergiereduzierende Wärmeerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zur Einbindung regenerativer Energien.
- Städtebauliche Lösungen für eine nachhaltige kommunale Energieversorgung mit regenerativen Energien, Wärmenetzplanung, energetische Bebauungsstruktur auf Quartiersebene.
- Ausbau der Fern- und Nahwärmenetze in Regionen und Städte. Planung und Erweiterung von Niedertemperaturnetzen (LowEx-Netze).
- Dezentrale Wärmespeichernetze in städtischen Quartieren durch effiziente Speichertechnik für Niedrigtemperaturwärme.
- Die Einbeziehung der kommunalen Entscheidungsträger wie auch der Energieverbraucher für ein solares Wärmeversorgungskonzept für städtische Quartiere.
- Regelung des Nutzenergiebedarfs für Gebäude unter Berücksichtigung der solaren Strahlung nach meteorologischen Bedingungen in den Sommer- und Wintermonaten.
- Sanierung von Bestandsgebäuden als Nullenergie-, Niedrigenergie und Passivhausstandard zur Reduzierung der Wärmebedarfsdichte.
- Sicherstellung der Wärmeversorgung von Gebäuden mit einem unterschiedlichen Temperaturniveau für die Warmwasserbereitung von 45° bis 65° C und für die Raumheizung 35°C bis 55°C.
- Die Niedrigtemperaturwärme ist durch regenerative Energien wie Solar- und Geothermie wie auch mit industrieller Abwärme, Abwasserwärme und Kraft-Wärme-Kopplung zu verbinden.

Die Optimierung der Wärmeenergieversorgung von Städten in Bezug zum Wärmeenergieverbrauch von Gebäuden zeigt, dass eine Ausschöpfung aller baulichen und technischen Energiesparmaßnahmen von Gebäuden notwendig ist, um die Integration energieeff-

---

<sup>846</sup>Szablinsky, Dariusz: Energetische Optimierung von solarunterstützten Nahwärmesystemen, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft10, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2004.

fizienter bzw. solarer Versorgungssysteme in urbanen Gebieten zu fördern.<sup>847</sup> Da bauliche Maßnahmen und Heizanlagensysteme zu einer Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfs beitragen, ist die passive Wärmebereitstellung bereits Stand der Technik im Passivhausbau. Wohngebiete mit Passivhausstandard und einem Jahresheizwärmebedarf von weniger als 35 kWh/m<sup>2</sup>a sind geeignet, die solare Niedrigtemperaturwärme für die Gesamtwärmeversorgung mit Wand- und Bodenheizsystemen bereitzustellen. Die Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfs von Wohngebieten auf dem Niveau des Passivhausstandards ist eine Grundvoraussetzung zur Integration von solaren Energiesystemen und Systemen der Niedrigtemperaturwärme in urbanen Gebieten. Im Gegensatz zu Gebäuden in Wohngebieten verbrauchen kommunale und private Liegenschaften wie Verwaltungsgebäude, Schulen, Krankenhäuser, Pflegeheime etc. einen hohen saisonalen, branchenbedingten Raumwärme- und Warmwasserbedarf, der nur mit solarer Niedrigtemperaturwärme unterstützt werden kann.

Die Umsetzung der solaren städtischen Energieversorgung erfordert eine hohe Flexibilität in der Stadtentwicklung und im Stadtumbau.

## **10.5. Bauleitplanungsrecht und Landesbaurecht**

### **10.5.1. Regenerative Energien und Raumordnung**

Der Grundsatzkatalog der Raumordnung gemäß §2 ROG erlaubt eine raumplanerische Auseinandersetzung in den Raumordnungsplänen nach dem Grundsatz gemäß §2 Abs. 2 Nr. 10 ROG. Die Landes- und Regionalplanung bezieht sich auf diesen Regelungsinhalt der Raumordnung zur Potenzialnutzung regenerativer Energien für die regionale Energieversorgung. Die Ausweisung in Regionalplänen unterstützt die energiepolitische Zielstellung von Ländern zur Umsetzung eines regionalen Klimaschutzprogramms und fördert langfristig die Erhöhung des Anteils regenerativer Energien am Primär- und Endenergieverbrauch. Die Aufstellung und Änderung<sup>848</sup> von Raumordnungsplänen bedingt einer Prüfung der voraussichtlichen erheblichen Umweltauswirkungen, die in einer Region zu erwarten sind. Wegen der elementaren Bedeutung des Klimaschutzes für Gesellschaft, Ökonomie und Umwelt kann Klimaschutz demnach als Teilziel des regionalen Leitbildes

---

<sup>847</sup>Vgl.: Boese & Diefenbach (2000).

<sup>848</sup>Vgl.: §16 (1) Gesetz zur Anpassung des Baugesetzbuches an EU-Richtlinien (Europarechtsanpassungsgesetz - Bau-EAG Bau-).

für eine nachhaltige Raumentwicklung festgelegt werden. In der Planungspraxis sind jedoch Konflikte zwischen dem Raumplanungsrecht und des Klimaschutzes verifiziert worden. Das Verhältnis des Bauleitplanungsrechts zum Klimaschutz ist somit ein Verhältnis des Anlagenplanungsrechts zur Standortgenehmigung der Anlagen zur Energieversorgung. Das Regional- und Umwelt-Monitoring in der Regionalplanung stellt Basisinformationen zu regionalen Leitbildern und der Gestaltung von Kulturlandschaften wie zum Beispiel für nachwachsende Rohstoffe und für die energetische Biomassenutzung sicher.

In Regionen sind Biogasanlagen dort planungsrechtlich geeignet, wenn in der Land- und Forstwirtschaft die vorhandenen Potenziale für die Energiegewinnung aus Biomasse und Biogas vorhanden sind und gestärkt werden. Die Biogaserzeugung und -nutzung stellt einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Versorgung mit regenerativen Energien dar und fördert die Wertschöpfung im ländlichen Raum. Die naturschutz- und raumverträgliche Nutzung ist zu gewährleisten, da Auswirkungen auf die Umweltgüter und Wechselwirkungen mit anderen Raumnutzungen durch die Biomasseproduktion verbunden sind. Dazu sind die Auswahl der Energiepflanzenarten und die Anbaumethode unter naturschutz- und raumverträglichen Gesichtspunkten mit den Entscheidungsträgern abzustimmen. Das Bauleitplanungsrecht regelt im Wesentlichen die Standortfrage der Anlagen zur Energieerzeugung und die Planung der Leitungstrassen für die regionale Energieversorgung. Vorranggebiete und Vorbehaltsgebiete für die Nutzung von Anlagen zur Verwertung von Biomasse werden in den Raumordnungsplänen ausgewiesen. Bei den Biogasanlagen handelt es sich seit dem EAG Bau bauplanungsrechtlich gemäß §35 Abs. 1 Nr. 6 BauGB um privilegierte Vorhaben, die im Außenbereich mit einer unteren Leistungsgrenze von 0,5MW für eine Hofstelle errichtet werden können.

Die Errichtung und der Betrieb von Photovoltaikanlagen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (2014) ist auf Freiflächen in Regionen und Städten wie auch auf Gebäudeflächen planungsrechtlich zugelassen und stellen gleichzeitig einen anspruchsvollen Raumanspruch in den Regionen dar. Das Regionalmonitoring stellt ein wesentliches Planungsinstrument dar zur Feststellung der Standorteignung in den Regionen und ist geeignet, regionale meteorologische Standortdaten wie die mittleren Jahressummen der Globalstrahlung für die solare Anlagenplanung, Flächennutzungsbilanzen, Bodenverhältnisse etc. zu erfassen. Grundsätzlich bieten planungsrechtlich festgelegte Flächen in Regionen, die vorzugsweise mit Südausrichtung (mit Einschränkungen aber auch von Ost- bis Westrichtung) ein solares Anlagenpotenzial aufweisen, hohe Ertragschancen. Ein Sonderfall ist

die Installation aufgeständerter Solarmodule auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in der regionalen Planung. Großflächige solare Photovoltaik- oder thermische Freiflächenanlagen sind bevorzugt auf Flächen mit technischer Vorbelastung (Windkraftparks) in Regionen aus ökologischer Sicht zu errichten. Aus wirtschaftlicher Sicht sind Industrie- und Gewerbegebiete, die im räumlichen Zusammenhang zum städtischen Umland oder Außenbereich stehen sowie brachliegende ehemals baulich genutzte Flächen und Konversionsflächen vorteilhaft. Regionen sichern mit Vorranggebieten und Vorbehaltsgebieten die „regionale Solarenergieversorgung“ mit Solaranlagen systemen. Im Außenbereich zählen solare Anlagen nicht zu den privilegierten Vorhaben im Sinne des §35 Abs.1 BauGB. Für Anlagen zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlung ist eine Vergütungsverpflichtung des Netzbetreibers für Strom nur gegeben, wenn die Anlage vor dem 01.01.2015 entweder im Geltungsbereich eines Bebauungsplans oder auf einer planfestgestellten Fläche nach §38 Satz 1 BauGB für Anlagen nach §11 Abs. 3 EEG (2014) errichtet worden ist. Der grundsätzliche Vorrang geeigneter städtischer Gebäudeflächen gegenüber der solaren Freiflächennutzung zu nutzen, besteht aus Gründen des Umweltschutzes und der Flächeninanspruchnahme weiterhin. Die Errichtung von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie darf nicht ausschließlicher Zweck für die Aufstellung oder Änderung des Bebauungsplans und der Flächennutzung sein. Gemäß §2 Abs. 2 Nr. 1 b und c des Bundesbodenschutzgesetzes sind Bodenfunktionen Bestandteil des Naturhaushalts und dürfen dauerhaft nicht beeinträchtigt werden.

Die Förderung von geothermischen Anlagen stützt sich in der Regel auf den Grundsatz von regionalen Planungsansätzen, die in einer Region einen ausgewogenen Energiemix und den Klimaschutz unter Erhöhung des Anteils regenerativer Energien anstreben. Die Geothermie unterscheidet zwischen geothermischen Anlagen, die oberflächennah zu Heizzwecken zum Einsatz kommen, und Anlagen, die in größeren Tiefen über 100m dem Heizen bzw. der Stromerzeugung durch hydrogeothermische, hydrothermale und petrophysikalische Systeme dienen.

### **10.5.2. Regenerative Energien und Städtebaurecht**

Die Bauleitpläne sind den Zielen der Raumordnung anzupassen und fördern eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung. Das Baugesetzbuch regelt für die bauliche und sonstige Nutzung von Grundstücken, dass die Belange des Umweltschutzes, einschließlich des Naturschutzes und der Landschaftspflege, die Nutzung regenerativer Energien, sowie die sparsame und effiziente Nutzung von Energie bei der Aufstellung von Bauleitplänen Berücksichtigung finden. §9 Abs. 1 Nr. 23 BauGB regelt speziell den städtebaulichen Im-

missionsschutz auf örtlicher Ebene und somit indirekt die Planung von regenerativen Energien für städtische Quartiere und Gebäude. Die Anforderungen an die leitungsgebundene Energieversorgung (Strom, Wärme, KWK) und die damit verbundenen Versorgungsstandorte in den Städten sind nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) vorgegeben. Klimaschutzkonzepte verdeutlichen die Situation der lokalen Energieversorgungsstrukturen mit dem Ziel der Bewertung des zukünftigen Potenzials regenerativer Energien und Reduzierung von Kohlendioxidemissionen in den Sektoren Verkehr, Haushalte und Industrie des städtischen Versorgungsgebietes. Nach §1 Abs. 6 Nr. 11 BauGB ist festgelegt, dass die „«beschlossene sonstige städtebauliche Planung»“ (Vollzitat: aus dem BauGB) regenerative Energiesysteme zum Schutz der Umwelt und zum Schutz des Klimas in der städtebaulichen Entwicklung berücksichtigen soll. Das Erfordernis zur Entwicklung von regionalen und städtischen Klimaschutzkonzepten ermöglicht das Baugesetzbuch gemäß §1 Abs.5 BauGB. Die Aufstellung von Energiekonzepten für das städtische Versorgungsgebiet ist somit durch das Baugesetzbuch legitimiert. Die Umsetzung von Stadtumbau- und Sanierungskonzepten aufgrund von Klimaschutzkonzepten erfordert angepasste Modelle mit Energieversorgungssystemlösungen unter Berücksichtigung der bestehenden Versorgungsnetzstrukturen, des Gebäudebestandes und des Gebäudeenergiebedarfs.

Das BauGB ist gesetzliche Grundlage für die städtische Bauleitplanung. Kommunalverwaltungen und öffentlichen Trägern stehen Planungsgrundlagen für die städtische Bauleitplanung zur Verfügung.<sup>849</sup> Die Aufnahme des Klimaschutzes in die Novelle des Baugesetzbuches eröffnet den Kommunen die Möglichkeit, für den Klimaschutz und für die Klimaanpassung die Städtebauförderung in der Stadtentwicklung in Anspruch zu nehmen. Die Handlungsfelder der Stadtplanung und der Stadtentwicklung zur umweltfreundlichen Energieversorgung und zum Klimaschutz liegen vorrangig in einem energiegeforderten Städtebau und in der Entwicklung von ressourcenschonenden Raum- und Siedlungsstrukturen. Dazu ist insbesondere die Umsetzung von technischen und städtebaulichen Maßnahmen für einen effizienten Versorgungsnetzbetrieb sowie für Infrastrukturlösungen zur Minimierung des Jahresheizwärme, Warmwasser- und Strombedarfs zu zählen.<sup>850</sup> Flä-

---

<sup>849</sup>Vgl.: BauGB: §§ 5 Abs. 2b und 9 BauGB vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), Teilflächennutzungsplan und Bebauungsplan.

<sup>850</sup>Vgl.: Entwurf eines Gesetzes zur Stärkung der klimagerechten Entwicklung in den Städten und Gemeinden: Änderung des BauGB vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 12. April 2011 (BGBl. I S.619) geändert worden ist, Drucksache 17/6076, Stand 06.06.2011, S. 3-13.

chennutzungspläne in Städten zur Planung einer umweltfreundlichen Energieversorgung regeln insbesondere die CO<sub>2</sub>-Reduzierung, Standorte hinsichtlich des anlagentechnischen Klimaschutzes sowie die Energieeffizienz von Gebäuden. Nach §1 Abs. 5 Satz 2 BauGB wird der Klimaschutz für die städtische Planung in Bauleitplänen festgelegt und bezieht sich nicht nur auf einzelne städtische Quartiere, sondern unter der Berücksichtigung des Gleichbehandlungsgebots auf die Gesamtstadt oder Gemeinde. Das Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung von Städten und Gemeinden wirkt sich auf das Bauplanungsrecht nach §1a Abs. 5 BauGB auf. Klimaschutz unterliegt den Abwägungsbelangen und folgt dem §2 Nr.6 Satz 7 ROG. Verbindliche Maßnahmen aus Energieversorgungskonzepten sind in Flächennutzungsplänen zur Entwicklung von Bebauungsplänen für regenerative Energien und für den Klimaschutz gegeben.<sup>851</sup> Die Festsetzung von Versorgungsflächen nach §9 Abs. 1 Nr. 12 BauGB ist klimaschutzorientiert und präzisiert Flächen für Anlagen und Einrichtungen zur dezentralen und zentralen Erzeugung, Verteilung, Nutzung und Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung. Aus den Änderungen des BauGB folgen klimaschutzorientierte Erweiterungen für Planzeichen nach der PlanzV.

Das städtebauliche Planungsrecht zur Umsetzung von gesetzlichen Klimaschutzregelungen benötigt weitere gesetzliche Regelungen mit Vorbildcharakter zur Harmonisierung. Die Anforderungen an Bauleitplänen, den Klimaschutz im BauGB weiter für die Umsetzung zu präzisieren, ist mit der Einführung einer Klimaschutzklausel nach §1a BauGB mit Ergänzung des §1 Abs. 6 Nr. 7 BauGB gegeben. Das Instrument der Klimaschutzklausel nach BauGB nimmt die Städte und Gemeinden in die Pflicht, sich intensiv mit Klimaschutzmaßnahmen zu befassen. Daraus folgt, dass die Prüfung der rechtlichen, finanziellen und sonstigen tatsächlichen Möglichkeiten unter Berücksichtigung eines städtebaulichen Gesamtkonzepts und eines Abgleichs mit sonstigen Umweltbelangen erforderlich ist.<sup>852</sup> Die Aufnahme des globalen Klimaschutzes als strategisches Planungsziel in der Bauleitplanung nach dem Baugesetzbuch (§1 Abs. 5 Satz 2 BauGB) ist somit gegeben.

---

<sup>851</sup>Vgl.: BVerwG, U.v. 17.12.2002, NVwZ 2003, 733 sowie U. v. 21.10. 2004, ZfBR 2005, 195.

<sup>852</sup>Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltschutz im Planungsrecht - Die Verankerung des Klimaschutzes und des Schutzes der biologischen Vielfalt im raumbezogenen Planungsrecht – Texte 10/08, Forschungsbericht 363 01 176, UBA-FB 001123 vom Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, März 2008, S.55 ff.

Die Beurteilung von allgemeinen Auswirkungen in Bauleitplänen ist somit Bestandteil des allgemeinen Umwelt- und Naturschutzes. In den §§2 und 2a des BauGB wird die Aufstellung eines Umweltberichts für ein städtebauliches Vorhaben verbindlich von den Kommunalverwaltungen gefordert. Die durch das Vorhaben hervorgerufenen Umweltauswirkungen werden in einem Umweltbericht bewertet und Maßnahmen zur Reduzierung, Verhinderung und Verringerung festgeschrieben. Bei der Aufstellung von Bauleitplänen sind insbesondere die in §1 Abs.6 Nr. 1 - 11 BauGB angegebenen Anforderungen zu berücksichtigen. Die Belange des Umweltschutzes sind in §1 Abs.6 Nr. 7 des Gesetzes<sup>853</sup> zur Vermeidung von Emissionen durch eine sparsame und effiziente Nutzung von Wärmeenergie festgelegt.

Klimaschutzkonzepte finden verstärkt Berücksichtigung in der Flächennutzungsplanung, wenn die Kommune oder das Gemeindegebiet Anlagen, Einrichtungen und sonstigen Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, fördern. Mit der Präzisierung im Gesetz unter §9 (1) Nr. 12 BauGB<sup>854</sup> wird dem Flächennutzungsplan eine hohe Bedeutung beigemessen, da Versorgungsflächen, einschließlich Flächen für Anlagen und Einrichtungen zur dezentralen und zentralen Erzeugung, Energieverteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus regenerativen Energien oder aus der Kraft-Wärme-Kopplung aus städtebaulichen Gründen festgesetzt werden können. Der Bebauungsplan setzt die Art und das Maß der Bodennutzung fest und trifft Regelungen zu den Verkehrsflächen, Bebauungsformen und Gemeindebedarfsflächen. Der Bebauungsplan ist Grundlage zur Erteilung von Baugenehmigungen für Anlagen und Gebäude im Baugenehmigungsverfahren. Die Träger öffentlicher Belange, dazu gehören die regionalen und kommunalen Energieversorgungsunternehmen, werden im Genehmigungsverfahren zur Aufstellung der Bauleitpläne im städtischen Planungsprozess beteiligt. Die städtische Infrastrukturplanung und die eigenverantwortliche Beteiligung an der Gesamtenergieversorgung des städtischen Versorgungsgebietes sind in der Verantwortung der Kommune. Bei der Aufstellung von Bauleitplänen sind die öffentlichen und privaten Interessen gegeneinander abzuwägen.

Die Städtebauförderung ist der wichtigste Impulsgeber für die Umsetzung von energetischen Stadtentwicklungsprozessen und unterstützt das integrierte Handeln unter Berück-

---

<sup>853</sup>Gesetz zur Anpassung des Baugesetzbuches an EU-Richtlinien (Europarechtsanpassungsgesetz Bau -EAG Bau), §1 (6) Nr.7 ff.

<sup>854</sup>Vgl.: §9 (1) Nr. 12 Bau GB.

sichtigung von mehrdimensionalen Effekten nach §148 Abs. 2 BauGB.<sup>855</sup> Die Städtebaufördermittel gemäß §164a BauGB fördern Baumaßnahmen nach §148 Abs. 2 BauGB. Stadtumbaumaßnahmen<sup>856</sup> sind im Baugesetzbuch zum Wohl der Allgemeinheit vorgesehen und sollen insbesondere dazu beitragen, dass die Siedlungsstruktur den Erfordernissen der Entwicklung von Bevölkerung und Wirtschaft sowie den allgemeinen Anforderungen an den Klimaschutz und die Klimaanpassung angepasst wird. Die städtebauliche Ordnung wird durch bauleitplanerische und bauordnungsrechtliche Festsetzungen vorgegeben und bestimmt das Maß und die Art der baulichen Nutzung, Bauweise, Gebäudeausrichtung, Beschattung und Einflüsse auf die aktive und passive Sonnenenergienutzung. Indirekt ist eine Beeinflussung des Gebäudeenergiebedarfs durch den Festsetzungskatalog gegeben.

Klimaschutz und Innenentwicklung von Städten werden durch das BauGB gefördert und erreichen dadurch städtische Quartiere und Ortskerne.<sup>857</sup> Die Darstellung zentraler Versorgungsbereiche im Flächennutzungsplan und die Neuregelung des Erschließungsvertrages sind für die regenerative Energieversorgung wesentliche gesetzliche Regelungen. Gesetzliche Regelungen in §136 BauGB ergänzen die Klimaschutznovelle dadurch, dass eine Beurteilung des Standortes, ob in einem Gebiet städtebauliche Missstände der Bebauung vorliegen, gefordert werden kann. Städtebauliche Missstände im Kontext der städtischen Versorgung zielen auf die energetische Beschaffenheit, Gesamtenergieeffizienz der vorhandenen Bebauung und den Versorgungseinrichtungen des Gebiets unter Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen an den Klimaschutz und an die Klimaanpassung. Es werden dadurch zusätzliche Kriterien für die bauliche Sanierungsbedürftigkeit eines städtischen Quartiers nach sozialen, hygienischen, wirtschaftlichen und kulturellen Erfordernissen geschaffen. Die Umsetzung der Richtlinie 2014/52/EU<sup>858</sup> im Städtebaurecht fördert die nachhaltige Entwicklung gemäß der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Ressourcenschonung, erneuerbare Energien, Luftqualität aufgrund der Umsetzung der

---

<sup>855</sup>Vgl.: Förderprogramm für „Aktive Stadt- und Ortsteilzentren“ zur Entwicklung von Stadtentwicklungskonzepten (INSEK<sup>e</sup>) im ExWoSt-Forschungsfeld „Energetische Stadterneuerung“ unter dem Gesichtspunkt der CO<sub>2</sub>-Bilanz des Quartiers.

<sup>856</sup>Vgl.: BauGB 3. Teil, Neugefasst durch Bek. v. 23.9.2004 I 2414; zuletzt geändert durch Art. 1 G v 22.7.2011 I 1509, §171 a – d ff.

<sup>857</sup>Vgl.: BauGB – Novelle: Änderungen durch die RL 2014/52/EU vom 04.05.2017 (BGBl. I S. 1057), in Kraft getreten am 13.05.2017.

<sup>858</sup>Vgl.: Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 2014/52/EU im Städtebaurecht und zur Stärkung des neuen Zusammenlebens in der Stadt vom 04.Mai 2017, in Kraft getreten am 13.Mai 2017.

geänderten UVP-Richtlinie in Bezug zur Umweltprüfung nach dem BauGB einbezogen.<sup>859</sup>

Im Rahmen der rechtswissenschaftlichen Überprüfung des Baugesetzbuches und der Baunutzungsverordnung durch die Bundesregierung<sup>860</sup> ist eine Anpassung und Weiterentwicklung der gesetzlichen Vorschriften für eine energieeffiziente Stadtentwicklung unverzichtbar. Kommunen tragen die Verantwortung für den „Klimaschutz“. Ergebnisse des Rechtsgutachtens<sup>861</sup> zu Rechtsfragen der ökologischen Stadterneuerung und zum Einfluss der Europäischen Union zeigen, dass im Rahmen der Überprüfung des §1 Abs.5 Satz 2 BauGB die Festschreibung des Klimaschutzes in der städtischen Bauleitplanung nicht eindeutig ist. Somit ist das Bauplanungsrecht auf die Unterstützung der Energiefachgesetze angewiesen. In der Klimaschutznovelle der Bundesregierung bezieht sich §1 Abs. 5 Satz 2 BauGB auf §2 Nr. 6 Satz 7 Raumordnungsgesetz (ROG).

Das Ergebnis der rechtlichen Prüfung des Gesetzes zeigt, dass Klimaschutz-Festsetzungen im Rahmen der Stadtentwicklung und des Stadtumbaus städtebaulich durch das BauGB begründet sind. Die rechtlichen Festsetzungen nach §9 Abs. 1 Nr. 12 BauGB bedürfen aufgrund des Festsetzungskataloges Präziserungsbedarf dahingehend, dass Energieversorgungsflächen in Städten auch für regenerative Energien und für die Kraft-Wärme-Kopplung bestimmt sind. Eine Änderung der Planzeichenverordnung<sup>862</sup> ist im Rahmen der Klimaschutznovelle für Flächen von Versorgungsanlagen mit regenerativen Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung in Bauleitplänen vorgesehen.<sup>863</sup>

Die Festsetzung von Baugebieten in Städten nach den §§2-14 BauNVO erklärt bestimmte Arten von Nutzungen als zulassen, nicht zulassen oder ausnahmsweise für zulässig, wenn besondere städtebauliche Gründe die Nutzung rechtfertigen. Die der Versorgung von Bebauungsgebieten mit Elektrizität, Gas, Wärme, Wasser und Abwasser dienenden Neben-

---

<sup>859</sup>Vgl.: Deutscher Bundestag: Drucksache 18/10942 zum Gesetzentwurf der BR – Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der RL 2014/52/EU im Städtebaurecht und zur Stärkung des neuen Zusammenlebens in der Stadt, 23.01.2017.

<sup>860</sup>Vgl.: Blechschmidt, Rolf: Stand der geplanten Novellierung BauGB und BauNVO - Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Stadtentwicklung, DIHK/IfS Städtebau und Immissionsschutz, Vortrag, S. 1-37, 08.09.2011.

<sup>861</sup>Ebd.: S.3, Rechtsfragen zur ökologischen Stadterneuerung. Rechtsgutachten von Battis, Mitschang, Kersten – Erfahrungsaustausch Europäisches Städtebaurecht-Städtebau unter EU-Einfluss. Umfrage unter Mitgliedstaaten und Fachkonferenz. Rechtsgutachten von Battis, Mitschang, Otto, DIHK/IfS Städtebau und Immissionsschutz, Vortrag, 08.09.2011.

<sup>862</sup>Vgl.: Verordnung über die Ausarbeitung der Bauleitpläne und die Darstellung des Planinhaltes (PlanZVO): V. v. 18.12.1990 BGBl. I 1991 S. 58; zuletzt geändert durch Artikel 2 G. v. 22.07.2011 BGBl. I S. 1509; Geltung ab 01.04.1991.

<sup>863</sup>Anmerkung zur PlanZVO: Festlegung von Energieerzeugungsflächen durch den Verfasser aufgrund der Auswertung von Standortdaten (Flächen) in Kommunen.

anlagen sind nach § 14 BauNVO in den städtischen Baugebieten als Ausnahme zugelassen, auch wenn keine besonderen Nutzflächen festgesetzt sind. Als Nebenanlagen gemäß BauNVO sind regenerative und erneuerbare Energien zu zählen. Wenn im Bebauungsplan nichts anderes festgesetzt ist, können auf den nicht überbaubaren Grundstücksflächen des urbanen Gebietes Nebenanlagen nach §14 BauNVO zugelassen werden.

Über die Erforderlichkeit der Novellierung der BauNVO hat das Deutsche Institut für Urbanistik eine Umfrage über die Regelungen zur Zulässigkeit von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien nach der Baunutzungsverordnung durchgeführt. Das Ergebnis der Befragung zeigt, dass die Mehrzahl der Städte der Auffassung ist, dass die Zulässigkeit von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien erleichtert wird und sich gesetzliche Änderungen auf den §14 BauNVO beziehen.<sup>864</sup>

Die städtebauliche Entwicklung von Neubaugebieten zur Integration erneuerbarer Energien ist nach §11 Abs.1 und 2 BauNVO vorteilhafter als für bestehende städtische Quartiere mit Bestandsgebäuden. Energieeffiziente Gebäude wie Passivhäuser mit energieeffizienten Heizungsanlagen sind als Klimaschutzunterstützende Maßnahmen einzustufen. Die Ausrichtung von Gebäudedach- und Fassadenflächen in Südrichtung ist für Neubaugebiete zur Etablierung einer solaren städtischen Energieversorgung bereits im Planungsstadium gegeben. Nach §14 Abs.1 Satz 1 BauNVO sind Solaranlagen, die zur Energieversorgung von Gebäuden dienlich sind und der Eigenart nicht der Funktion widersprechen, als „untergeordnete Nebenanlagen und Einrichtungen“ zulässig. Die klimaschutzrelevanten Maßnahmen im Rahmen der Bebauungsplanung sind Festsetzungsmöglichkeiten nach §9 Abs. 1 Nr. 1 bis 3 BauGB i.V. m. der BauNVO. Eine optimale, energiesparende solare Gebäudeversorgung durch Gebäudehöhenstaffelungen und Höhenbegrenzungen nach §9 Abs. 1 Nr. 1 i.V. m. §§16 und 18 BauNVO kann im Rahmen der städtischen Bauleitplanung festgelegt werden. Nach §9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB sind gesetzliche Festlegungen von Energiekennwert- und Emissionsobergrenzen sowie Gebäudebauteil-k-Werte vorgegeben, jedoch ist eine Forderung durch Kommunen zur Umsetzung gesetzlich nicht durchzusetzen. Die Nutzung erneuerbarer Energien zum Beispiel solarthermische Anlagen zur Wärmegewinnung in Städten ist über die vertragliche Verpflichtung im städtebaulichen Vertrag nach §11 Abs.1 Satz 2 Nr.4 BauGB gegeben.

---

<sup>864</sup>Vgl.: Bunzel, Arno: Novellierungsbedarf bei der Baunutzungsverordnung. Ergebnisse einer Umfrage des Deutschen Instituts für Urbanistik und des Deutschen Städtetages, April 2010, S. 19-20, Abbildung 7.

Die allgemeinen Grundsätze der städtischen Bauleitplanung im Rahmen von Stadtentwicklungskonzepten sind nach §1 Abs. 3 Satz 1 und Abs. 7 BauGB dahingehend zu überprüfen, ob bauliche oder technische Festsetzungen für die Anlageninstallation von Gebäuden in Betracht kommen. Die baulichen und technischen Maßnahmen beinhalten Dachneigungsgrade und baustatische Vorgaben für solartechnische Anlagen auf Dach- und Fassadenflächen und sind in Bebauungsplänen bei der Errichtung von Gebäuden für die Installation von Solaranlagen festzulegen. Die verbindliche Festlegung von technischen Vorgaben zur Errichtung von regenerativen und erneuerbaren Energien für Gebäude ist rechtlich nicht umsetzbar und wird von den kommunalen Fachbehörden als nicht realisierbar eingestuft. Städtebaurechtliche Regelungen erfordern das Vorliegen städtebaulicher Gründe, wobei auch der Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit und die Belange zur Nutzung von erneuerbaren Energien nach §1 Abs. 5 Satz 1, Abs. 6 Nr. 7f BauGB zu berücksichtigen sind.

Das Erneuerbare Energie Gesetz (EEG) unterscheidet integrierte Solaranlagen, die ausschließlich an oder auf einem Gebäude oder einer Lärmschutzwand angebracht und Anlagen, die gemäß §11 Abs. 2 Satz 1 EEG nicht auf einem Gebäudedach installiert werden können. Die planungsrechtliche Zulässigkeit richtet sich nach §35 Abs. 2 BauGB, wenn die Ausführung oder Nutzung öffentlicher Belange nicht beeinträchtigt und die Erschließung gesichert ist. Für Bebauungspläne hat der Gesetzgeber mit dem EAG Bau 2004 eine neue Regelung hinsichtlich der Festsetzungsmöglichkeiten für Solarenergieanlagen geschaffen. Gemäß §9 Abs. 1 Nr. 23b BauGB können im Bebauungsplan aus städtebaulichen Gründen bauliche Maßnahmen für Gebäude festgelegt werden, die den Einsatz erneuerbarer und regenerativer Energien ermöglichen. Es ist planungsrechtlich zu untersuchen, ob die Festlegung nach §9 BauGB den Gemeinden die Möglichkeit eröffnet, durch Bebauungsplan festzulegen, dass Gebäude innerhalb von Bebauungsgebieten mit Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien ausgestattet bzw. bestimmte Energieträger für bestimmte Zwecke verwendet oder nicht verwendet werden dürfen. Die rechtliche Prüfung zeigt, dass eine Festschreibung von Energieträgern und der daraus folgende Nutzungszwang in Bebauungsplänen nicht zulässig sind.<sup>865</sup> Für städtische Quartiere sind durch bauplanungsrechtliche Erhaltungssatzungen und örtliche Baugestaltungssatzungen Einschränkungen der baurechtlichen Zulässigkeit gegeben. Da die bauplanungsrechtliche

---

<sup>865</sup>Vgl.: Deutscher Bundestag – wissenschaftliche Dienste: Zulässigkeit von Bebauungsplänen in Bezug auf die Festschreibung und den Nutzungszwang bestimmter Heizenergiearten, Ausarbeitung WD 7-3000-130/09, 2009, Kapitel 6.

Zulässigkeit von großflächigen Solaranlagen im Außenbereich Konflikte mit Zielen des flächenbezogenen Umwelt-, Natur- und Landschaftsschutzes nach sich ziehen kann, ist der Ansatz des EEG zu begrüßen, die Vorhaben für regenerative Energien innerhalb von Bebauungsplänen oder durch Planfeststellungsbeschlüsse in städtischen Quartieren zu fördern.

Nach §9 Abs. 1 Nr. 12 BauGB sind städtische Versorgungsflächen einschließlich Flächen für Anlagen und Einrichtungen zur dezentralen und zentralen Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung vorzuhalten und nach §9 Abs. 1 Nr. 23 b geeignete Maßnahmen zur Umsetzung in Städten vorzunehmen. Das Herstellen des kommunalen Einvernehmens nach §36 Abs. 1 BauGB zur Genehmigung von KWK-Anlagen ist durch die zuständige Kommunalaufsicht zu gewährleisten. Die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung in Städten ist durch den Anschluss- und Benutzungszwang über inhaltliche Festsetzungen in den Bebauungsplänen und mit dem Planungsinstrument des städtebaulichen Vertrages festzulegen. Zur Planung von KWK-Anlagen in städtischen Quartieren ist die Aufnahme von verbindlichen Regelungen für KWK-Anlagen in der Baunutzungsverordnung von Bedeutung. Anlagen zur Nutzung von Solarenergie und Einspeisung von Strom und Wärme stehen in direkter Konkurrenz zu städtischen Nahwärmelösungen, da ein Anschluss- und Benutzungszwang für Neubau- und Sanierungsgebiete über kommunale Satzungen besteht. Das Energiefachrecht und die Bauleitplanung stehen den Öfteren in Konkurrenz zueinander. Regelmäßige gesetzliche Änderungen aufgrund von europarechtlichen Vorgaben wirken sich mittelbar auf die städtische Bebauungsplanung aus. Unter Beachtung der unterschiedlichen Zielrichtung ist eine gegenseitige Ergänzung anzustreben.

Die Stärkung der Innenentwicklung<sup>866</sup> zur Beschleunigung der Integration von regenerativen Energien in den Städten und Gemeinden erfordert konkrete gesetzliche Grundlagen, die durch die Beschleunigung der Energiewende und zur Unterstützung des Klimaschutzes erforderlich werden. Die Planungsvereinbarung<sup>867</sup> im Rahmen des städtebaulichen Vertrages nach §11 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 BauGB zwischen der Kommune und dem Vorha-

---

<sup>866</sup>Vgl.: Entwurf eines Gesetzes zur Stärkung der Innenentwicklung in den Städten und Gemeinden und weiteren Fortentwicklung des Städtebaurechts. Information im Internet URL <http://www.bmvbs.de/> (Umsetzung der Koalitionsvereinbarungen), 2012.

<sup>867</sup>Vgl.: Stadt Lübeck: Planungsvereinbarung durch Musterverträge und städtebaulicher Vertrag, Informationen im Internet URL <http://www.luebeckonline.com/mustervertraege/>.

beiträger fixiert die Bedingungen für die Entwicklung und Aufstellung von einfachen und qualifizierten Bebauungsplänen. Die Erschließung, Versorgung und sonstige Maßnahmen sind in einer Vereinbarung verbindlich festzulegen. Die Errichtung und Nutzung von Anlagen und Einrichtungen zur dezentralen und zentralen Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung, entsprechend den Zielen und Zwecken der städtebaulichen Planungen, sind in städtebaulichen Verträgen nach §11 Abs.1 Nr. 4 BauGB umsetzbar. Die Festsetzung der energetischen Bauqualität von Gebäuden ist nach §11 Abs. 1 Nr. 5 BauGB vorgegeben. Sondergebiete für Solarparks sind nach §11 Abs.2 Satz 2 der BauNVO für Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien städtebaulich festsetzbar.

Der §11 Abs.2 Satz 1 Nr. 4 und 5 BauGB ist durch die Änderung des Gesetzes zur Stärkung der klimagerechten Entwicklung in den Städten und Gemeinden in den Vordergrund gerückt worden. Der städtebauliche Vertrag eignet sich aufgrund der Gestaltungsmöglichkeiten in besonderer Weise für eine klimagerechte Stadtentwicklung, indem Energieversorgungsanlagen, Gebäudetypen und regenerative und erneuerbare Energiesysteme für eine dezentrale und zentrale Wärmeversorgung im Planungsstadium festgelegt werden können. Rechtswissenschaftliche Untersuchungen zum Baugesetzbuch zeigen, dass Präzisierungen im städtebaulichen Vertrag über die Nutzung und Zulässigkeit von regenerativen Energien und der Kraftwärmekopplung Planungssicherheit geben. Dazu zählen Vereinbarungen auch über die Festlegung der energetischen Qualität von Gebäuden.<sup>868</sup> Der Bezug zur Europäischen Gebäuderichtlinie<sup>869</sup> wird durch die Novellierung des Baugesetzbuches deutlich. Die Realisierung von Bauvorhaben gewinnt durch private Investoren auf der Grundlage von projektbezogenen städtebaulichen Verträgen zwischen Kommunen und Eigentümern an Bedeutung.<sup>870</sup> Bedeutende Bauvorhaben werden auf der Grundlage projektbezogener städtebaulicher Verträge durchgeführt und erfordern weniger Planungseinschränkungen durch rechtskräftige Bebauungspläne. Die Planbindung<sup>871</sup> verstößt in der Regel gegen das Städtebaurecht, da vertragliche Zusagen einer Gemeinde, einen Bebauungsplan für ein vom Investor gewünschtes Projekt aufzustellen, unwirksam sind. Die

---

<sup>868</sup>Vgl.: §11 Absatz 1 Nummer 4 und 5 BauGB-Städtebaulicher Vertrag.

<sup>869</sup>Vgl.: Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamteffizienz von Gebäuden, 2010.

<sup>870</sup>Schönefelder, Koske, Ziegler: Städtebauliche Verträge (I); Veröffentlichungen Eike Schönefelder in Immobilien Business Nr. 1/2000, S.36.

<sup>871</sup>Ebd.: S.37.

kommunale Bauleitplanung muss beim rechtsstaatlichen Handeln ein hohes Maß an Neutralität wahren. Das städtebauliche Instrument ist für die Aufnahme von Zielsetzungen für regenerative Energieanlagen im Rahmen des Grundstückserwerbs geeignet.<sup>872</sup> Die Wahl der Energieversorgung von gemeindeeigenen Baugrundstücken ist in Grundstückskaufverträgen unter Festsetzungen und Vereinbarungen zulässig, sodass zum Beispiel die Wärmeversorgung durch ein Nahwärmeversorgungsnetz sichergestellt werden kann und den Betrieb und die Errichtung von Inselversorgungsanlagen zum Beispiel durch Blockheizkraftwerke erlaubt.<sup>873</sup>

Konkrete Investitionsvorhaben, die langfristig planungsrechtlich vorbereitet werden, nutzen das städtebauliche Instrument des vorhabenbezogenen Bebauungsplans. Der Unterschied zum städtebaulichen Vertrag besteht darin, dass der Vorhabenträger auf der Grundlage eines von ihm vorgelegten Vorhaben- und Erschließungsplans in der Lage sein muss, die Erschließungsmaßnahmen für das Bauvorhaben fristgerecht durchzuführen. Die Verpflichtung zur Sicherstellung der Erschließung ist in einem Durchführungsvertrag festgelegt. Der Festlegungskatalog nach §9 BauGB und die Vorschriften aus der Baunutzungsverordnung sind für den vorhabenbezogenen Bebauungsplan nicht anzuwenden. Der Planungsspielraum für regenerative Energieanlagen wird mit städtebaulichen Verträgen für städtische Quartiere erweitert.

### **10.5.3. Stadtumbau und Sanierungsvorhaben**

Die quartiersbezogene energetische Gebäudesanierung im Bestand für die Umsetzung einer effizienten und nachhaltigen Energieversorgung mit regenerativen Energien ist nach den Vorschriften des Baugesetzbuches gegeben. Klimaschutz- und Energiekonzepte schließen die Bestandserhebung von sanierungsbedürftigen Stadtquartieren ein, auch wenn andere städtebauliche Defizite der Gesamtstadt betroffen sind. Der §9 Abs. 1 Nr. 23b BauGB bezieht sich auf den Neubau von Gebäuden, baulichen Anlagen und berücksichtigt nicht die Sanierung des Gebäudebestandes. Der Geltungsbereich<sup>874</sup> der Bremischen Landesbauordnung schließt Versorgungsleitungen, die der öffentlichen Versorgung

---

<sup>872</sup>Vgl.: Städtebaulicher Vertrag zum Bebauungsplan Nr. 98 b „Am obersten Heimbach“ Stadtteil Großenritte; Festlegung eines Trennsystems, Wärmepumpen, Solarthermische Anlagen, Energieträger wie Biomasse, Luftdichtheit Gebäude; Information im Internet URL [http://www.baunatal.de/6005/download/Staedtebaulicher\\_Vertrag.pdf](http://www.baunatal.de/6005/download/Staedtebaulicher_Vertrag.pdf).

<sup>873</sup>Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Hrsg.): Klimaschutz in Kommunen Praxisleitfaden, Berlin, 2011, S.51-60; S. 71-74; S.116-120; ISBN 978-3-88118-496-0.

<sup>874</sup>Ebd.: §1 (2) Nr.3 BremLBO.

dienen, aus. Die Planung von städtischen Sanierungs-, Stadtumbau- und Rückbaumaßnahmen erfordert ein integriertes Vorgehen unter Einbeziehung der Stadtentwicklungsziele, die Städte und Gemeinden festgelegt haben. Bei der Neuordnung der Entwicklung im Siedlungsbestand kommen insbesondere die Instrumente des besonderen Städtebaurechts wie die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen und Stadtumbaumaßnahmen zum Tragen. Auf dieser Grundlage sind Ziele des Stadtumbaus und der Stadterneuerung, unterstützt durch die einschlägigen Städtebauförderprogramme des Bundes und der Länder, umsetzbar. Rechtsförmliche Instrumente des Kommunalrechts wie der Erlass einer Anschluss- und Benutzungssatzung für Nah- und Fernwärmenetze sind für Ziele der Stadtentwicklung geeignet. Für die räumliche Entwicklung der Gemeinde ist die Liegenschaftspolitik der Städte und Gemeinden im Rahmen der Umsetzung verantwortlich.

Das Prinzip der Verhältnismäßigkeit und des Gleichheitsgrundsatzes<sup>875</sup> nach Art. 3 Abs.1 des Grundgesetzes ist bei der Festsetzung von Sanierungsvorhaben zu beachten. Rechtliche Einschränkungen durch Landesgesetze oder durch textliche Festsetzungen in Bebauungsplänen und kommunalen Satzungen sind anzuwenden, wenn eine unzumutbare Belastung für den Gebäudeeigentümer verhindert wird. Der Gesetzgeber hat im Baugesetzbuch und in den Landesbauordnungen Übergangsregelungen und Ausnahmeregelungen vorgesehen, die von den Kommunen zu berücksichtigen sind. Das Verwaltungsgericht Gießen entschied für die Bürgerinteressen, dass die Durchsetzung der kommunalen Solarsatzung<sup>876</sup> durch die Stadt Marburg ausgesetzt wird.<sup>877</sup>

Die Auswertung von Rechtsgutachten des Landesbaurechts zeigt, dass Eigentümer von Bestandsgebäuden nicht rechtlich verpflichtet werden können, energetische Sanierungsmaßnahmen vorzunehmen, da die energetischen Maßnahmen einen Eingriff in den Bestandsschutz der Gebäude darstellen. Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) berücksichtigt nicht den baugenehmigten Gebäudebestand vor 2009. Das Erfordernis von Wärmeschutzmaßnahmen und baulichen Änderungen an der Gebäudesubstanz von beheizten oder klimatisierten Räumen ist durch den §9 EnEV vorgegeben und ermöglicht die Festlegung von Grenzwerten für Wärmedurchgangskoeffizienten von Gebäudeaußenbauteilen.

---

<sup>875</sup>Vgl.: BVerfG, Beschl. v. 18.02.2009 – 1 BvR 3076/08 –, BVerf-GE 122, 374, 391 f.; Beschl. v. 27.02.2007 – 1 BvL 10/00 –, BVerfGE 117, 272, 294.

<sup>876</sup>Vgl.: Urteil des Verwaltungsgerichtes Gießen vom 25.5.2010 – 8 K 4071/08.GI, Entscheidung des Verwaltungsgerichtes Gießen zur Solarsatzung der Stadt Marburg. (2010).

<sup>877</sup>Vgl.: Urteil des Verwaltungsgericht Gießen vom 25.5.2010 – 8 K 4071/08.GI (2010).

Die nach dem Landesbaurecht rechtmäßig errichteten Gebäude genießen Bestandsschutz, sodass Eingriffe in den Gebäudebestand von den Kommunalverwaltungen gerechtfertigt sind. Der Bestandsschutz für Gebäude und für Grundstücke ist in Artikel 14 des Grundgesetzes sowie nach dem Prinzip des Vertrauensschutzes gemäß Artikel 20 Abs. 3 des Grundgesetzes als Rechtsstaatsprinzip verankert.<sup>878</sup>

Als Rechtsgrundlage für klimarelevante Festsetzungen in Bauleitplänen ist §9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB anzuwenden. Der Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes oder die Vermeidung oder Minderung von Emissionen von Heizungsanlagen wird hiermit berücksichtigt, da die Raumwärme- und Brauchwassererzeugung von Gebäuden CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht, die zu schädlichen Umweltauswirkungen führen können. Der Einbau einer nachträglichen Wärmedämmung in Geschossdecken nach §10 Abs. 3 und 4 EnEV wird durch die zuständige untere Bauaufsichtsbehörde der Städte und Gemeinden anlassbezogen gefordert. Die Nachrüstpflichten für Eigentümer von Bestandsgebäuden sind in §10 EnEV festgelegt. Eine gesetzliche Verankerung im Landesbaurecht ist nicht vorgesehen, da den Ländern für diesen Rechtsbereich keine Gesetzgebungskompetenz übertragen worden ist.

Die rechtliche Begründung durch die Fachgesetze beweist, dass die mit dem „Niedrighausenergiestandard“ verbundenen baulichen und technischen Vorkehrungen nach §9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB eine Reduzierung der Abgasemissionen von Heizungsanlagen erzielen. Die städtebauliche Planungspraxis rückt von dieser gesetzlichen Regelung ab. Die Kommunalverwaltungen nutzen Planungsinstrumente wie den städtebaulichen Vertrag oder Grundstückskaufverträge zur Umsetzung von energetischen Maßnahmen.

Die Landesbauordnungen zum Beispiel des Landes Bremen<sup>879</sup> regeln verbindlich, dass bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben und Gesundheit, nicht gefährdet werden. Gebäude sind gemäß ihrer Nutzung und den klimatischen Verhältnissen mit einem baulichen Wärmeschutz auszustatten, damit Feuerungsanlagen mit einem sparsamen und schadstoffarmen Energieeinsatz betrieben werden können. Die Landesbauord-

---

<sup>878</sup>Vgl.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *stadt: pilot spezial. Regenerative Energien, Energieeffizienz und Klimaschutz in der Stadt von morgen*. Oktober 2011, S. 20-22: Interview mit Prof. Dr. Monika Böhm, Staats- und Verwaltungsrecht an der Philipps-Universität Marburg, 2011.

<sup>879</sup>Vgl.: *Bremische Landesbauordnung (BremLBO) und Änderung des Bremischen Ingenieurgesetzes*: Senat für Bau, Umwelt und Verkehr, Entwurf 2009.

nungen setzen mit „Kann-Bestimmungen“ fest, dass der Betrieb von Feuerungsanlagen<sup>880</sup> zur Verteilung und Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser mit möglichst umweltschonenden Energieträgern erfolgt. Die bauliche Erweiterung von Bestandgebäuden im Sinne einer Heizungsanlagenmodernisierung unterliegt nicht dem Prinzip des Bestandschutzes von Gebäuden.<sup>881</sup> Die Kontrollverpflichtung zur Umsetzung von heizungstechnischen Maßnahmen an Bestandsgebäuden ist mit der Neufassung von §26 b EnEV (2009) festgelegt. Die zuständigen Bezirksschornsteinfegermeister erfüllen den nach Gesetz festgelegten Kontrollauftrag.

Die Landesbauordnungen erschweren die Errichtung und den Betrieb von regenerativen Energien für denkmalgeschützte Gebäude, da baurechtliche Festlegungen nach Denkmalschutzgesetz bauliche Veränderungen des Bestandsgebäudes nicht zulassen. Denkmalgeschützte Ensembles und historische Gebäudeobjekte mit einer schützenswerten Fassadengestaltung besitzen in städtischen Kerngebieten, historischen Stadtkernen und Stadtquartieren bauhistorischen Schutz zur Erhaltung des unverwechselbaren städtebaulichen Ausdrucks. Eine Befreiung ist gegeben, sofern Gründe des Denkmalschutzes oder der Baugestaltung vorliegen und der Antragsteller nachweist, dass die Wärmeversorgung des Gebäudes überwiegend auf Basis erneuerbarer Energieträger oder aus der Nutzung eigener Abwärme erfolgt oder der Jahres-Heizwärmebedarf weniger als 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) beträgt.<sup>882</sup> Private und öffentliche Sonderbauten im Bestand wie Hochhäuser, Gebäude mit Grundflächenausdehnung, Verkaufsstätten, Büro- und Verwaltungsgebäude, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen, Schulen und Hochschulen, Gewerbe- und Industriegebäude erfordern individuell angepasste energetische Maßnahmen und unterliegen Ausnahmeregelungen nach dem Baurecht. Die Nutzung der Solarenergie in kommunalen Liegenschaften beispielsweise zur Wassererwärmung in Schwimmbädern oder Sporthallen, zur Stromerzeugung in Schulen und Rathäusern oder zur Wärmeversorgung von Siedlungen über solar unterstützte Nahwärmesysteme erzielt eine große Wirkung in der Öffentlichkeit und verstärkt die Vorbildfunktion von Kommunen. Zur Förderung der Öffentlichkeitsarbeit stehen Planungsinstrumente wie Solarstadtpläne und Solardachkataster zur Verfügung.

---

<sup>880</sup>Ebd.: §41 (1) BremLBO.

<sup>881</sup>Vgl.: Hofmann: Repetitorium Hofmann: Baurecht Baden-Württemberg. Information im Internet URL <http://www.repetitorium-hofmann.de>, S.20, (Bestandsschutz), 2010.

<sup>882</sup>Deutsche Energie-Agentur (2010): Leitfaden „Energieeinsparung und Denkmalschutz“, Prüfung von Ausnahmen bei Förderung im KfW-Programm „Energieeffizient Sanieren“, Version 1.3, Stand Juli 2010. Information im Internet URL <http://www.zukunftshaus.info/de/projekte/niedrigenergiehaus-im-bestand>. (28.9.2010).

Die Umsetzung des §9 BauGB kann mit der Übernahme von Regelungen der örtlichen Bauvorschriften<sup>883</sup> erfolgen und als verbindliche Festsetzungen in Bebauungsplänen oder Satzungen übertragen werden.<sup>884</sup>

Die Länder sind aufgefordert, im Landesbaurecht entsprechende Ermächtigungen durch Rechtsverordnungen zu verankern, damit die Kommunen angemessene Satzungen für die energetische Gebäudesanierung erlassen können. Für die Umsetzung der energetischen Sanierungsverpflichtung nach §8 EnEG und nach §27 EnEV hat der Gesetzgeber bisher keine hinreichende Gesetzesgrundlage geschaffen.<sup>885</sup> Ostdeutsche Großstädte haben mit städtebaulichen Versorgungsstrukturmaßnahmen eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudebestand indirekt erzielt. Die Stadt Dresden konnte die Gesamtemissionen des Gebäudebestandes auf die Hälfte durch modernste Kraftwärmekopplungsanlagen und eine Wärmeenergiebereitstellung durch städtische Fern- und Nahwärmenetze reduzieren.<sup>886</sup>

Die für den Freistaat Bayern übertragene Ermächtigung zum Erlass der Zuständigkeits- und Durchführungsverordnung (ZVEnEV)<sup>887</sup> nach der Energieeinsparverordnung und zum Energieeinspargesetz (EnEG) regelt zwar die behördlichen Zuständigkeiten und baurechtlichen Verfahren, legt aber keine materiellen Anforderungen für die energetische Sanierung fest. Aus den genannten Gründen sind zur Initiierung von Pilotprojekten, Modellvorhaben und Sanierungsvorhaben der klimagerechten Stadtentwicklung rechtliche Instrumente von den Landesbaubehörden vorzugeben, damit eine zwingende Umsetzung über die in der Energieeinsparverordnung festgelegten energetischen Maßnahmen durch die Gebäudeeigentümer an bestehenden Gebäuden erfolgen kann.

---

<sup>883</sup>Vgl.: BremLBO, §51 Nr.10.

<sup>884</sup>Vgl.: §87 (3) BremLBO.

<sup>885</sup>Vgl.: Stellungnahme des Senators Umwelt, Bau und Stadtentwicklung der Freien Hansestadt Bremen zu der energetischen Gebäudesanierung. Information im Internet URL <http://www.enevonline.org/> (2012).

<sup>886</sup>Vgl.: Reduzierung von Schadstoffen in Städten am Beispiel der Stadt Dresden, Fachbericht des Deutschen Städtetages, Information im Internet URL <http://www.staedtetag.de> (2015).

<sup>887</sup>Vgl.: Stellungnahme des Freistaates Bayern zu der energetischen Gebäudesanierung. Information im Internet URL <http://www.enevonline.org/>.

# 11. Energetische Gebäudearchitektur

## 11.1. Gebäudebestand und Energieeffizienz

Datenerhebungen zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand sind durch das Bremer Energie Institut (BEI) und dem Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt (IWU) vorgenommen worden. Die Datenbasis der Untersuchung stellt eine Grundlage zur Analyse von Energieeinsparmaßnahmen, Wärmeschutz und städtischer Wärmeversorgung für den deutschen Wohngebäudebestand dar. Die Datengrundlage stützt sich auf eine repräsentative Befragung von Hauseigentümern und der Schornsteinfegerinnung in den Kehrbezirken von Kommunen. Die Ergebnisse aus 241 Stadt- und Landkreisen zeigen, dass die energetische Wohngebäudesanierung im Bestand von Baualtersklassen und Gebäudetypologien und der regionalen Architekturvielfalt abhängig ist.<sup>888</sup>

Die Festlegungen in der Wärmeschutzverordnung 1978 konnten einen energetischen Modernisierungsfortschritt von 25 bis 30% für Bestandsgebäude erzielen. Die Analyse der Energieeffizienz von Wohngebäuden im Bestand durch die Deutsche Energie-Agentur (DENA) zeigt, dass aufgrund der Umsetzung von Wärmeschutzverordnungen eine jährliche Modernisierungsrate von 1,1% in Deutschland erreicht worden ist. Die statistisch aufgenommene Gesamtwohnfläche in Deutschland nach Destatis 2010 beträgt circa 3,4 Mrd. m<sup>2</sup>. Der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden ist mit 63% für Ein- und Zweifamilienhäuser und mit 5% für Mehrfamilienhäuser, bezogen auf den Gesamtgebäudebestand, statistisch erfasst worden.<sup>889</sup> Die durchschnittliche Wohnfläche von Gebäuden beträgt für Einfamilienhäuser 140m<sup>2</sup> und für eine Wohnungseinheit in Mehrfamilienhäusern 66m<sup>2</sup> bezogen auf Wohneinheiten, Gebäudegrößen und Gebäudealter.<sup>890</sup>

Die Zahl der Wohneinheiten im Gebäudebestand (2014) beträgt circa 40,2Mio. Wohneinheiten. Davon befinden sich 53% der Wohnungen in Mehrfamilienhäusern mit mehr als drei Wohneinheiten. Die statistische Datenanalyse des Gesamtgebäudebestandes setzt

---

<sup>888</sup>Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand, Bremer Energie Institut (BEI) und IWU. Autoren: Dr. Nikolaus Diefenbach, Dr. Holger Cischinsky, Markus Rodenfels (IWU) und Dr. Klaus-Dieter Clausnitzer (BEI), Darmstadt, 09.12.2012.

<sup>889</sup>Deutsche Energie Agentur (dena) Hrsg.: Der dena-Gebäudereport 2011. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Wohngebäudebestand. Stand August 2011 (Leseprobe).

<sup>890</sup>Ebd.: S.7 Quellen: Hochrechnung auf Basis von (Destatis, 2008), (Destatis, 2010) und (dena, 2011).

sich aus 83% Ein- und Zweifamilienhäusern mit 1 bis 2 Wohneinheiten, aus 11% mit 3 bis 6 Wohneinheiten, aus 5% mit 7 bis 12 Wohneinheiten und aus 1% mit mehr als 12 Wohneinheiten zusammen. 71% des Gebäudebestandes ist vor dem Jahr 1979 errichtet worden und erfordert Maßnahmen zur baulichen und technischen Energieeinsparung. 29% der Wohngebäude, die von 1979 bis 2009 gebaut wurden, sind aufgrund der Wärmeschutzverordnung von 2001 mit Wärmedämmmaßnahmen und modernen effizienten Heizungsanlagen ausgestattet.<sup>891</sup>

Der Energieträgereinsatz für den Wohngebäudebestand zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung in Deutschland teilt sich auf in 44% Erdgas, 30% Heizöl, 8% Fernwärme, 5% Strom, 1% Wärmepumpenenergie, 2% Kohle und 10% regenerativer Energiesysteme. 40% der Wohnungen des städtischen Gebäudebestandes wird mit dem Energieträger Erdgas versorgt.<sup>892</sup> Die Untersuchung des Schornsteinfegerhandwerks zeigt, dass circa ein Drittel der Wohnraumheizungen in Deutschland mit Heizöl betrieben wird.<sup>893</sup>

Die Ergebnisse der Analyse des Gebäudebestandes und Gebäudesanierungsbedarfs zeigt die Studie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie 2014 zur Energieeffizienzstrategie. Das Strategiekonzept prognostiziert für den Gebäudebestand und für eine klimaneutrale Energieversorgung, dass bis 2050 die Zielvorgabe zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs<sup>894</sup> in Regionen und Städten bis zu 80% durch die Kombination von Energieeinsparung und dem Einsatz regenerativer Energien umgesetzt werden kann. Im Gebäudesektor wirkt sich dieser strategische Ansatz so aus, dass der durchschnittliche spezifische Endenergieverbrauch für Wärme, Heizung und Warmwasser für Haushalte von 177 (kWh/m<sup>2</sup>a) zukünftig auf 50% reduziert wird. Das Denkmalschutzrecht verhindert aus Gründen zur Erhaltung des historischen Kulturerbes, dass 15% der Bestandsgebäude nicht mit Wärmedämmmaßnahmen ausgestattet werden können.<sup>895</sup>

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung zur Erarbeitung einer Effizienzstrategie für Gebäude sind die Ergebnisse der 13. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung bis zum Jahr 2060 untersucht worden. Die Prognose zur Steigerung des Energieverbrauchs wird sich um 2,6% erhöhen unter Berücksichtigung der meteorologischen Mo-

---

<sup>891</sup>Ebd.: S.4 Datenquellen aus (Destatis, 2008), (Destatis, 2010), (Destatis, 2012).

<sup>892</sup>Ebd.: S.24 (Energieträger für den Gebäudebestand).

<sup>893</sup>Quelle: Schornsteinfegerhandwerk (2009); Bundesindustrieverband (2009).

<sup>894</sup>Vgl.: Primärenergiefaktoren gemäß DIN 18599.

<sup>895</sup>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Sanierungsbedarf im Gebäudebestand – Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie, Berlin, Dezember 2014, S.10ff.

dellrechnungen und einer linearen Erwärmung der Regionen durch den Klimawandel. Die daraus abzuleitende Reduzierung der Heizgradtage verringert den Raumwärmebedarf bis zu 13% gegenüber dem Klima-Referenzzeitraum von 1990 bis 2010. Der strategische Ansatz zur Dekarbonisierung, der Einsatz erneuerbarer Energien sowie die energetische Modernisierung der Gebäudehülle mit Heizungsanlagentechnik reduzieren den fossilen Primärenergiebedarf in Regionen und Städten.<sup>896</sup>

In Anlehnung an die Energieeinsparverordnung 2014 sind grundsätzliche Standards für Effizienzhäuser festgelegt.<sup>897</sup> Der Gesamtenergiebedarf wird auf die Gebäudenutzfläche gemäß der Energieeinsparverordnung<sup>898</sup> oder auf die beheizte Wohnfläche nach der Wohnflächenverordnung<sup>899</sup> bezogen.<sup>900</sup>

Im Auftrag der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ sind die langfristigen Einsparpotenziale des Gebäudebestandes untersucht worden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass 65% der Wohnfläche von Gebäuden in Deutschland vor dem Jahr 1989 errichtet worden sind. Die der Enquete-Kommission vorliegenden Gutachten prognostizieren, dass die Installation von Wärmedämmungen in Altbauten zur wärmetechnischen Verbesserung gleichzeitig mit einer „sehr umfangreichen, aus bautechnischen Gründen notwendigen Sanierungen des Gebäudes“ vorgenommen werden sollte.<sup>901</sup>

Langjährige Untersuchungen des Instituts für Wohnen und Umwelt Darmstadt über den Gebäudebestand in Deutschland belegen, dass insbesondere durch bauliche Wärmedämmmaßnahmen für Dächer, Außenfassaden, Bodenplatten und Kellerwänden hohe Energieeinsparpotenziale zu erwarten sind und der Wärmeverbrauch bis zu 90% gesenkt werden kann.

Das IWU entwickelte im Rahmen des Forschungsprojektes Passivhaus ein Projektierungspaket für den Architekten und Planer, das sich auf die Nettowohnfläche von Gebäu-

---

<sup>896</sup>IWU/ifeu/prognos: Bundesstelle für Energieeffizienz (Auftraggeber): Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude - erstellt im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Erarbeitung einer Energieeffizienzstrategie Gebäude, Studie, Berlin, Heidelberg, Darmstadt, 01.12.2015.

<sup>897</sup>Vgl.: Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW): Energiestandard für Gebäude – Information im Internet unter URL <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-KfW-Effizienzhaus/> (Stand 2016).

<sup>898</sup>Vgl.: Energieeinsparverordnung 2016: Information im Internet URL [http://www.enev-online.com/enev\\_praxis-hilfen](http://www.enev-online.com/enev_praxis-hilfen) (Stand 2016).

<sup>899</sup>Vgl.: Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche (Wohnflächenverordnung - WoFlV). Information im Internet URL <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/woflv/gesamt.pdf> (2016).

<sup>900</sup>Vgl.: Energiestandard Gebäude: Information im Internet URL <http://www.wikipedia.org/wiki/kfw-40> (2012).

<sup>901</sup>Deutscher Bundestag: Dritter Bericht der ENQUETE-KOMMISSION: Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre zum Thema Schutz der Erde gemäß Beschluss des Deutschen Bundestages vom 16.10. und vom 27.11. 1987, Drucksache 11/8030 vom 24.05.1990.

den bezieht und auf der Grundlage von SIA 380/1 und der europäischen Norm EN 832 mit dem Ziel, für energetische Gebäude Verbrauchskennzahlen zur Einhaltung des Primärenergieverbrauchs und des Nutzenergiebedarfs festzulegen.

Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU Darmstadt) untersuchte im Auftrag der Enquete-Kommission des Bundestages das Energieeinsparpotenzial für den deutschen Gebäudebestand. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass der Jahresheizwärmebedarf von Gebäuden nach Bauepoche und nach Wärmeschutzanforderungen langfristig reduziert worden ist. Der Erlass von Wärmeschutzverordnungen bewirkt, dass der Transmissionswärmeverlust der Umfassungsflächen reduziert und somit der Jahresheizwärmebedarf von Gebäuden langfristig verringert wird. Die Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2014 und das Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden regelt für Bestandsgebäude den baulichen Wärmeschutz und die Heizungsanlagentechnik für einen energieeinsparenden Heizungsbetrieb.<sup>902</sup>

Energieausweise für Gebäude dokumentieren den Gesamtenergiebedarf, Wärmeverbrauch und die Energieeffizienz der Heizanlagentechnik von Wohngebäuden und Gebäuden. Die Anforderungen nach der EnEV sind erfüllt, wenn Wohngebäude den Jahres-Primärenergiebedarf eines Referenzgebäudes nach §3 Abs.1 EnEV<sup>903</sup> und den Höchstwert des spezifischen, auf die übertragenen Umfassungsflächen bezogenen Transmissionswärmeverlusts nicht überschreiten. Für baulich geänderte Gebäude darf insgesamt der Jahres-Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes nach §4 Abs. 1 EnEV die Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche um nicht mehr als 40% überschreiten.<sup>904</sup>

Die Studie des Fraunhofer Instituts untersucht Technologien und Systeminnovationen zur Energieversorgung und Einsparung bei Baudenkmalen. Die nachstehende Tabelle zeigt die Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden vor und nach einer baulichen Gebäudesanierung mit der Veränderung des baulichen Veränderungspotenzials.

---

<sup>902</sup>Vgl.: Ebel et. al. 1990; Ebel et. al. 1995.

<sup>903</sup>Vgl.: §1 (1) Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014: Anwendungsbereich für Gebäude, soweit sie unter Einsatz von Energie beheizt oder gekühlt werden, und für Anlagen und Einrichtungen der Heizungs-, Kühl-, Raumluft- und Beleuchtungstechnik sowie der Warmwasserversorgung von Gebäuden, 24.07.2007 geä. durch Artikel 1 der VO vom 29.04.2009.

<sup>904</sup>a.a.O.: §9 (1) Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014, Abschnitt 3.

Gebäudetyp	Heizwärmebedarf (kWh/m <sup>2</sup> a)	Heizwärmebedarf nach der baulichen Sanierung (kWh/m <sup>2</sup> a)
Wohngebäude (EFH, RH)	210	25-30
Innerstädtische Gebäude (MFH, Blockbebauung)	125	50
Gebäudekomplexe (Blockbebauung)	100-200	50-75
Büro- und Verwaltungs- gebäude	80-225	25
Bildungsstätten (Schulen, Volkshochschulen, Uni- versitäten)	200-275	50-80

Tabelle 7: Heizwärmebedarf vor und nach einer Gebäudesanierung

Heizungssysteme in Gebäuden erzeugen Heizwärme und Warmwasser zur Deckung des jährlichen Energiebedarfs und dürfen nicht mehr Wärme erzeugen, als das Gebäude selbst verbraucht und für die bestimmungsgemäße Nutzung benötigt.<sup>905</sup> Gebäude aus der Gründerzeit, Fachwerkhäuser und denkmalgeschützte Stadtquartiere und Gebäudeensembles sind zu den genannten Gebäudetypologien zu zählen.<sup>906</sup>

Die Untersuchung zur Erschließung niedriginvestiver Energieeinsparpotenziale für drei Liegenschaften des Bundes zeigt, dass die bauliche Optimierung von Bestandsgebäuden und eine effiziente Heizungsanlagentechnik ein hohes Potenzial zur Energieeinsparung vorweist, da der tägliche Energiebedarf wie bei Wohngebäuden nicht eingefordert wird.<sup>907</sup>

## 11.2. Gebäudemodelle und Wärmeenergiebedarf

Die durch den Verfasser durchgeführten Untersuchungen über städtische Versorgungssysteme zeigen, dass eine detaillierte Datenerfassung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden zur Planung von Wärmeversorgungsstrategien in städtischen Quartieren erforderlich ist. Der in städtischen Kerngebieten vorhandene Gebäudebestand mit historischen Gebäuden, Bürogebäuden und Geschäftshäusern erfordert einen Jahresheizwärmebedarf,

<sup>905</sup>Vgl.: § 3 EnEG (Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden), 1976, neugefasst durch Bek. v. 1.9.2005 I 2684 geändert durch Art.1 G v. 28.3.2009 I 643.

<sup>906</sup>Vgl.: Fraunhofer Institut (IBP): Denkmal und Energie. Technologien und Systeminnovationen zur Energieversorgung und Einsparung bei Baudenkmalen. Technische Universität Dresden, Weller, Bernhard, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Dresden, 2008.

<sup>907</sup>Institut für Gebäude Energetik (IGE): Untersuchung zur Erschließung niedrigintensiver Energieeinsparpotenziale, Endbericht, AZ: 10.08.17.7-08.41, Universität Stuttgart, September 2009.

der ein Vielfaches des Wärmeenergiebedarfs von Neubaugebäuden darstellt. Die Energiepreispolitik und Anforderungen des Klimaschutzes haben dazu geführt, dass energiesparende Nullenergie- und Passivhäuser mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von  $15\text{kWh/m}^2\text{ a}$  entwickelt und konstruiert wurden. Der strategische Ansatz zur Energieeinsparung für den Gebäudebestand wird zu einer Schlüsselrolle im Rahmen der Umsetzung von regionalen und städtischen Klimaschutzziele.<sup>908</sup>

Unter Berücksichtigung der instabilen Abnahme des Jahresheizwärmebedarfs in städtischen Quartieren sind standortbezogene flexible Wärmeversorgungskonzepte erforderlich. Die Untersuchung von Referenzstädten durch das Projekt pluralistische Wärmeversorgung durch Pfaffenberger (2004) führt zur Entwicklung eines mathematischen Schätzverfahrens zur Bestimmung des jährlichen Wärmebedarfs von Wohngebäuden. Die gemittelten monatlichen Messdaten von Modellvorhaben geben eine statistische Übersicht zum Raumwärmebedarf von Gebäuden aufgrund der Gebäudetypologie, Gebäudeabmessungen und Baualtersklassen. Die Verbrauchskennzahlen beziehen sich auf die Gebäudestruktur, den Wohnflächenbedarf pro Einwohner, den Bedarf an Wärmeenergie und auf die Energieverbrauchsstruktur.<sup>909</sup> Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik begleitete die Studie der pluralistischen Wärmeversorgung und bewertete Baukonstruktionen, Bauteile und Baustoffe von Gebäuden sowie deren Anlagenkomponenten Heizung und Lüftung aufgrund der örtlichen Klima- und Nutzungsbedingungen.<sup>910</sup>

Die Aufnahme der Messdatenwerte von energetischen und raumklimatischen Verhältnissen in den Modellgebäuden ist durch die modulare Versuchseinrichtung VERU<sup>911</sup> erfolgt. Die Datenwerte der modular aufgebauten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS-Anlage) sowie die meteorologischen Standortdaten sind in der Gesamtbewertung betrachtet worden.

Strahlungs- und lichttechnische Messungen an Außenwandflächen im Gebäude und außerhalb des Gebäudes sind mit Hilfe des softwaregesteuerten Messsystems IMEDAS ausgewertet worden.<sup>912</sup>

---

<sup>908</sup>Warnecke, Günter: Meteorologie und Umwelt, Springer Verlag, 1991, S. 60.

<sup>909</sup>Pfaffenberger, W: Pluralistische Wärmeversorgung; Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien, Frankfurt, März 2004.

<sup>910</sup>Ebd.: Kapitel 1.1.1 Verbrauchskennzahlen und Fernwärmepotenziale im Wohnbereich (S. 33-34)

<sup>911</sup>Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IPB): Projekt "VERU" eine modulare Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen, Standorte Stuttgart und Holzkirchen.

<sup>912</sup>a.a.O.: S.7 (Messsystem IMEDAS).

Die Untersuchung von Energieverbrauchskennwerten für Nichtwohngebäude erfolgte durch die Gesellschaft für Energieplanung und Systemanalyse. Der Endbericht über die Verbrauchskennwerte 2005 stützt sich auf den Datenvergleich von 25.000 Gebäuden aus 45 Gebäudegruppen.<sup>913</sup>

Das FfE-Gebäudemodell für Wohngebäude ist durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. in München als Modellvorhaben für Energieverbrauchswerte entwickelt worden. Die integrale Zuordnung der hoch aufgelösten Modellierung stützt sich auf Klassifizierungskriterien wie Baualtersklassen, Siedlungs- und Gebäudetypologie, geographische Lage des Gebäudestandortes, Heizenergie- und Warmwasserverbrauchswerte und Gebäudekonstruktion. Aus den Modellprojekten sind Basisdaten zum mittleren Raumwärme- und Warmwasserbedarf generiert worden.<sup>914</sup>

Das FfE-Regionenmodell für Energiesysteme<sup>915</sup> zur Modellierung von regionalen und städtischen Energieversorgungssystemen stellt die räumliche Auflösung des Gebäudebestandes auf der Gemeindeebene zu Klassifizierungskriterien dar. Die Berechnung bezieht sich auf die städtische Nah- und Wärmeversorgung unter besonderer Berücksichtigung der Kraftwärmekopplung für städtische Versorgungsgebiete.<sup>916</sup> Der Modellansatz stützt sich auf neun Siedlungskategorien und der Gebäudestruktur von Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern einer Stadt oder Gemeinde (GE) mit einem Verteilungsschlüssel.<sup>917</sup> Die Zusammenführung des Gebäudebestandes wird nach der Lokalstatistik und nach Baualtersklassen mit der nachstehenden Berechnungsgleichung berechnet:

$$(55) \quad \text{Gebäude}(GT, BA; GE) = \text{Gebäude}(GT, GE) \frac{\text{Gebäude}(GE, BA)}{\text{Gebäude}}$$

Die Aufteilung der Gebäude in Baualtersklassen (BA) erfolgt unabhängig vom Gebäudetyp (GT). Die Berechnungsergebnisse des FfE-Regionenmodells sind im Vergleich zum IWU Gebäudetypologiekatalog als plausibel zu bewerten.<sup>918</sup>

---

<sup>913</sup>Vgl.: Gesellschaft für Energieplanung und Systemanalyse (ages-GmbH): Katalog zur Auswertung nach Gebäudegruppen von 1999 und 2005, <http://www.ages-gmbh.de> (2011).

<sup>914</sup>Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE): Energiemodell der Wohngebäude - Räumlich hoch aufgelöste Modellierung des Wohngebäudebestands in Deutschland, BWK Bd. 64 (2012), Nr.1/2 Seite 49 ff., Energieforum.

<sup>915</sup>Regionen-Modell: Beer, M. / Schmid, T.

<sup>916</sup>Pfaffenberger, W. et al. und auf Beer, M.; Schmid, T.

<sup>917</sup>Beer, M.; Schmid, T.: Das Regionenmodell - Neue Ansätze zur Modellierung von Energiesystemen. BWK 62 (2010), Nr.10, S. 47-50.

<sup>918</sup>Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE): Energiemodell der Wohngebäude - Räumlich hoch aufgelöste Modellierung des Wohngebäudebestands in Deutschland, BWK Bd. 64 (2012), Nr.1/2, Energieforum, S. 51ff.

Die nachstehende Tabelle 8 stellt den Zusammenhang zwischen dem Heizwärmebedarf und dem Energiestandard von Gebäuden dar. Die energetische Gebäudearchitektur entwickelte sich seit 2002 durch das KfW-Effizienzhaus im Rahmen der energetischen Stadtsanierung.<sup>919</sup>

Energiestandard Gebäude	Heizwärmebedarf $Q_h$
unsaniertes Wohnhaus, Baujahr 1960–1980	300 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
WSchVO 1977	≤ 250 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
WSchVO 1982	≤ 150 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
WSchVO 1995	≤ 100 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
Niedrigenergiehaus 2002	≤ 70 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-60-Haus (EnEV 2004)	≤ 60 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-40-Haus (EnEV 2004)	≤ 40 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-Effizienzhaus 70 (EnEV 2007)	≤ 70 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-Effizienzhaus 55 (EnEV 2007)	≤ 55 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-Effizienzhaus 85 (EnEV 2009)	≤ 85 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-Effizienzhaus 70 (EnEV 2009)	≤ 70 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-Effizienzhaus 55 (EnEV 2009)	≤ 55 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
KfW-Effizienzhaus 40 (EnEV 2009)	≤ 40 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
Passivhaus	≤ 15 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
Effizienzhaus Plus	≤ 0 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)

Tabelle 8: Entwicklung des Energiestandards von Gebäuden

Durch die Energieeinsparverordnungen von 1977 bis 2014 ist der Jahresheizwärmebedarf von Gebäuden in Städten deutlich gesunken.

Das zertifizierte Gebäudemodell nach „Minergie-Standard“ ist in der Schweiz im Rahmen des Forschungsprojektes Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpen nach der energetischen Betriebsweise und effizienten Endenergienutzung von Niedertemperatur-Heizungsanlagen untersucht worden. Der Minergie-Standard ist eine Qualitätsmarke für Gebäude, die den Jahresheizwärmebedarf von 45kWh/m<sup>2</sup>a für Neubauten und den Jahresheizwärmebedarf von 90kWh/m<sup>2</sup>a für Gebäude im Bestand (älter als 1990) langfristig unterschreitet. Die Gebäudedatenanalyse erfolgt über den Anlagenbetrieb und den Energiebedarf des Gebäudemodells in Anlehnung an die Gebäudeaußenhülle und Heizanlagentechnik. Der Minergie-Standard ist durch die Vorlage eines effizienten Lüftungskonzeptes nachzuweisen.<sup>920</sup>

<sup>919</sup>Vgl.: IKU-Energetische Stadtsanierung-Energieeffizient Bauen und Sanieren, Kreditanstalt für Wiederaufbau, Oktober 2015. Information im Internet URL [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/Arbeitshilfen-Präsentationen/Präsentationen/IKU-Energetische-Stadtsanierung-EES-\(219\).pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/Arbeitshilfen-Präsentationen/Präsentationen/IKU-Energetische-Stadtsanierung-EES-(219).pdf). (2017).

<sup>920</sup>Vgl.: Minergie-Standard: Der Minergie-Standard ist ein in der Schweiz zertifiziertes Gebäudemodell. Die Berechnungsgrundlagen beziehen sich auf die Energiebezugsfläche nach SIA 380/1 für die Heizungsanlage und Warmwasseraufbereitung.

Das erste Passivhaus ist im Jahr 1990 in Darmstadt Kranichstein mit einem funktionell energetisch definierten Gebäudeenergiekonzept errichtet worden.<sup>921</sup> Der Passivhaus-Standard reduziert den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes durch eine effektive Wärmedämmung, dichte Gebäudehülle, Nutzung von passiven Solargewinnen und Integration der kontrollierten Wohnraumlüftung. Der Jahres-Heizwärmebedarf wird nach dem LEG/PHI-Verfahren (PHPP) bezogen auf die tatsächlich beheizte Fläche (Energiebezugsfläche) berechnet und weist den Energiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Kühlung und Haushaltsstrom nach. Das Passivhaus unterschreitet einen zertifizierten Primärenergiebedarf von  $\leq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .<sup>922</sup>

Der Transmissionswärmeverluste und Wärmebrücken von energieoptimierten Gebäuden und Bauteilen sind mit Hilfe der Thermobildaufnahme nachweisbar. Die Auswertung der Thermobildaufnahme in Abbildung 73 eines Wohngebäudes in Passivhausbauweise zeigt, dass im Bereich der Fassaden- und Fensterflächen die Wärmeverluste der Gebäudeaußenflächen reduziert sind. Im Gegensatz zur benachbarten Gebäudekonstruktion sind Wärmeströme über Fassaden- und Fensteraußenflächen sowie Wärmebrücken erkennbar. Eine deutliche Temperaturabnahme von  $7\text{-}9^\circ\text{C}$  über die Gebäudehülle ist somit messtechnisch erfasst worden.

Die technische Unterstützung durch solarthermische Anlagen und PV-Anlagen trägt zu einer Verringerung des Gesamtenergiebedarfs bei. Die Berechnungsmethode über die inneren Wärmegewinne oder -verluste des Passivhaus-Standards stützt sich auf eine monatliche Bilanzierung der Wärme, die von den Gebäudebauteilen der Gebäudehülle aufgenommen oder abgegeben wird.<sup>923</sup>

Der standardisierte jährliche Wärmeverbrauch von Gebäuden in Passivhausweise ist eine wesentliche Planungs- und Bemessungsgrundlage für ein Niedrigtemperaturwärmeverorgungsnetz in städtischen Quartieren.

---

<sup>921</sup>Vgl.: Feist, 1995.

<sup>922</sup>Vgl.: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Die EnEV und das Niedrigenergiehaus, Autor Tobias Loga, IWU Darmstadt, Tagungsbeitrag für das Seminar „Die neue Energieeinsparverordnung in Beispielen – Seminar für kommunale MitarbeiterInnen“ des IKU, Wiesbaden am 18.4., 7.5. und 6.6.02 in Fulda bzw. Frankfurt/M.

<sup>923</sup>Fraunhofer (IBP): Planung-Tool für Passivhäuser – Monatsbilanzverfahren und hygrothermische Simulation, Sonderdruck aus wksb Heft 69, 58. Jahrgang 2013.

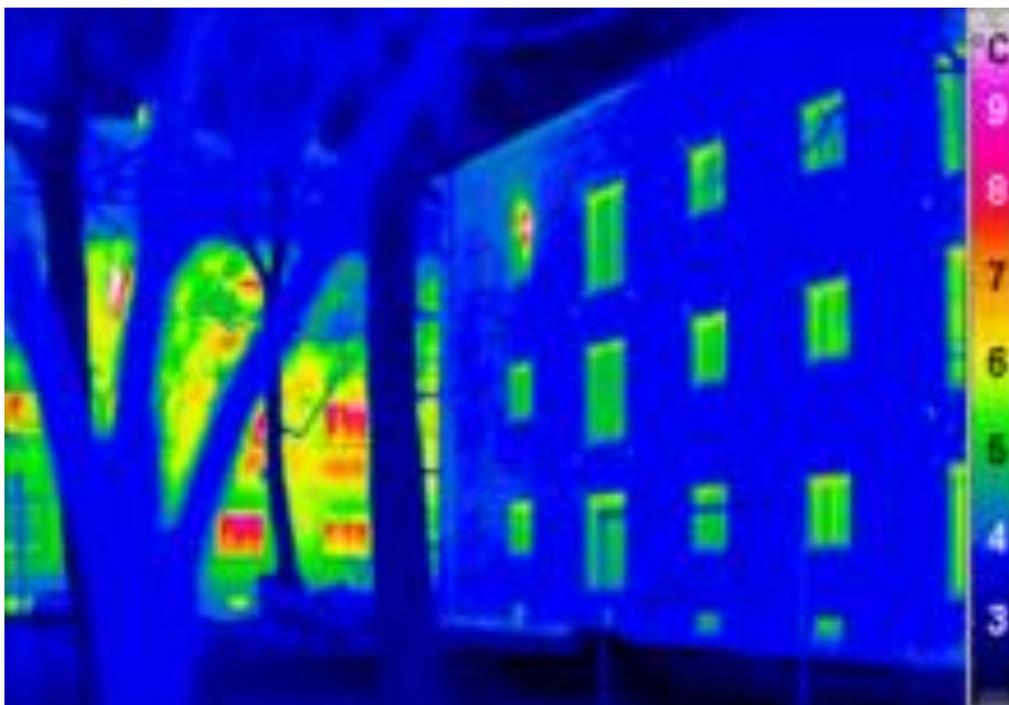


Abbildung 73: Thermografie von einer Fassade eines Passivhauses

Der Niedrigenergiehaus-Standard ist charakterisiert durch die Einhaltung des Jahresheizwärmebedarfs von  $<70\text{kWh/m}^2\text{a}$ . Der Schwerpunkt zur Reduzierung des Wärmebedarfs ist über hausinterne Warmwasserspeicher zur Unterstützung der Raum- und Warmwasserversorgung sowie über die Speicherung der solaren Wärme und passiven Solargewinnung gegeben. Die Niedrigtemperaturwärmeheizung in Fußböden und Wandflächen trägt zu einer effizienten Wärmeversorgung und zur Warmwasserbereitstellung bei. Die Qualitätsprüfung zur energetischen Optimierung der Gebäudekonstruktion und Gebäudeanlagentechnik garantiert den zertifizierten Jahresheizwärmebedarf eines Niedrigenergiehaus-Standards. Simulationsprogramme für die jahreszeitabhängige Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfs unterstützen die anlagentechnische Planung der Gebäudeversorgung mit Wärmepumpensystemen und integrierten Wärmespeichern. Die Festlegung eines Gebäudeenergiestandards garantiert langfristig Planungssicherheit für die dezentrale Wärmeversorgungsstrategie am Standort und zur Planung von Niedrigenergiewärme-konzepten in städtischen Quartieren.

Für Gebäude im Bestand ist die Niedrigenergiebauweise nur effizient, wenn Umbau, Sanierung oder Erweiterung der Gebäudesubstanz interne Niedrigtemperaturwärmesysteme über Bauteile einsetzen.<sup>924</sup>

---

<sup>924</sup>Bundesamt für Energie (Hrsg.): Kostengünstige Wärmeheizungsanlagen für Niedrigenergiehäuser, Simulationsprogramme TRNSYS, MATLAB/SIMULINK, Basel, Dezember 2000.

Die Gebäudekonstruktion eines Nullenergiehausstandards ist charakterisiert durch einen hohen zertifizierten Wärmeschutzstandard der Gebäudehülle. Zur Aufnahme und Demonstration der Energieeffizienz- und Energieeinsparpotenziale von Gebäuden im Nullenergiehausstandard sind in den Städten Hannover und Berlin die technischen und bautechnischen Parameter sowie der Gesamtenergieverbrauch an Modellvorhaben messtechnisch erfasst und analysiert worden.<sup>925</sup> Nach Voss (2000) und Fellbach (2002) sind die Messergebnisse über die Jahresenergiebilanz in Solarsiedlungen dokumentiert und analysiert worden. Die Datenauswertung von Energieverbrauchsmessungen über die Betriebsweise von technischen Anlagen und täglichen Transmissionswärmeverluste von Gebäudeflächen zeigt, dass eine ausgeglichene oder in einigen Fällen sogar eine positive Jahresenergiebilanz für den Endenergiebedarf festgestellt werden konnte. Der tägliche Heizwärme- und Warmwasserbedarf wird unterstützend durch solarthermische Wärme über Warmwasserspeicheranlagen (großvolumige Latentwärmespeicheranlagen) zur Verfügung gestellt.

Die Architektur von Gebäuden in Regionen und Städten ist an die regionale Bautradition angepasst und berücksichtigt die regionalen meteorologischen Verhältnisse.

### **11.3. Einflüsse auf den Primär- und Endenergiebedarf von Gebäuden**

Die Potenzialstudie im Auftrag des Bundes für Naturschutz in Bayern untersuchte die Anforderungen von Wärmedämmsystemen für Bestandsgebäude und prognostizierte Energieeinsparpotenziale und die damit verbundenen Investitionen nach Gebäudetypologien. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass für Gebäudetypologien in Regionen und Städten geeignete und optimale Maßnahmenpakete zur Wahl der Wärmeversorgungssysteme und des baulichen Wärmeschutzes bei der Gebäudeplanung untereinander verglichen werden. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.<sup>926</sup>

Das Institut für Wohnen und Umwelt Darmstadt (IWU) stellt in der Studie Gebäudetypologien aus dem Gebäudebestand im Bundesland Bayern die Ergebnisse der Potenzialstudie des Instituts für Energiewirtschaft der Technischen Universität München vor. Die meteorologischen Standortdaten sind Basisdaten und auf die durchschnittliche Gradtag-

---

<sup>925</sup>Vgl.: Hinz & Werner, 1994.

<sup>926</sup>Vgl.: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Gebäudetypologie in Bayern. Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns, Potenzialstudie im Auftrag des Bundes Naturschutz Bayern e.V., 2006.

zahl von 4022Kd des Freistaates Bayern bezogen. Die Berechnung des Gebäudeheizwärmebedarfs erfolgt nach dem Heizperiodenverfahren (DIN V 4108-6). Das IWU Darmstadt entwickelte aus den Ergebnissen praxisrelevante Maßnahmenpakete für Baualterklassen und Gebäudetypologien zur Wahl des baulichen Wärmeschutzes, Heizungsanlagen systemen und Solarenergieanlagen.<sup>927</sup>

Die Wärmebedarfsdichte von städtischen Quartieren ist in städtischen Wärmeatlanten zur Planung von Nahwärmenetzen dokumentiert. Berechnungsgrundlage ist die Wärmebedarfsermittlung von Wohngebäuden nach Gebäude- und Baualterklassen. Die Datenmengen sind in einem praxisbezogenen Gebäudekatalog zusammengefasst, der die Abschätzung des Energieeinsparpotenzials zulässt. Die Gebäudetypologien sind für die Bundesländer Schleswig-Holstein<sup>928</sup>, Bremen, Sachsen-Anhalt, den Freistaat Bayern und für die Städte Hamburg, Essen und Hannover erstellt worden. Die Beispiele der Städte Bremen und Bremerhaven<sup>929</sup> zeigen, dass dort eine jährliche Gesamtersparnis von circa 260 Mio. Liter Heizöl-Äquivalente durch gebäudetechnische Wärmedämmmaßnahmen erzielt werden konnte.

Die folgende Abbildung 74 zeigt die Wärmeverluste von Bauteilgruppen für Bestandsgebäude nach Gebäudetypologie und Baualtergruppen. Die Ergebnisse der Potenzialstudie zeigen, dass erhöhte Wärmeverluste über Bauteilwärmebrücken, Außenwände, Dachkonstruktionen sowie Fensterflächen von Gebäuden im Bestand nachgewiesen worden sind. Die Reduzierung der Bauteilwärmeverluste von Einfamilienhäusern des Baualters von 1949 bis 1970 konzentrierte sich insbesondere auf die Wärmedämmung von Dachkonstruktionen, Bodenplatten und Kellergeschossen. Die Wärmeverluste von Bauteilgruppen für Mehrfamilienhäusern und Reihenhäusern haben sich zwischen 1952 bis 1974 nicht wesentlich verändert. Infolge von Ölkrisen und dem Erlass von Energieeinsparverordnungen sind Anforderungen an den Gebäudedämmstandard festgesetzt worden, die dazu führten, dass nach 1974 der Heizwärmeverbrauch für alle Gebäudetypologien deutlich abgenommen hat.<sup>930</sup>

---

<sup>927</sup>Ebd.: S.1 ff.

<sup>928</sup>Vgl.: Energieagentur Schleswig-Holstein: Gebäudetypologie Stadt Essen, Freistaat Sachsen, Schleswig-Holstein etc. [www.ibsh.de](http://www.ibsh.de).

<sup>929</sup>Noack, C.C., von Ehrenstein, D., Franke, J. (Hrsg): Energie für die Zukunft. Das Beispiel Bremen. Der Abschlussbericht des Energiebeirats, SP-Verlag, 1989, S.53-86.

<sup>930</sup>Ebd.: S.16 (Abbildung 3.1, 2006)

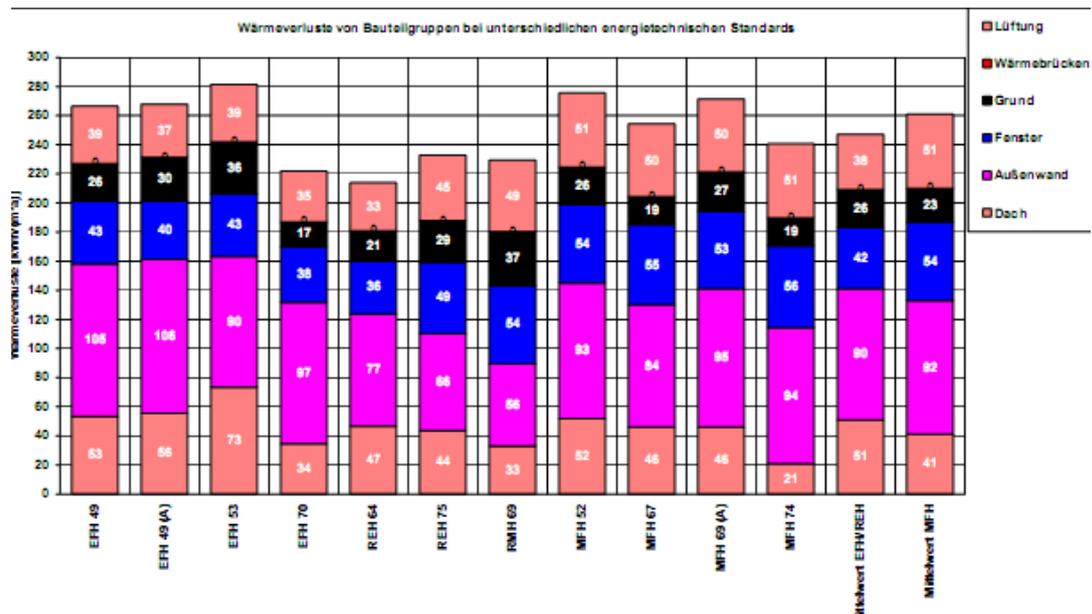


Abbildung 74: Wärmeverluste von Bauteilgruppen nach Gebäudetypologien

Das Kurzverfahren „Energieprofil“ ist ein vereinfachtes, statistisch abgesichertes Verfahren zur Erhebung von Gebäudedaten zur Erstellung des Energieprofils von Gebäuden auf der Grundlage der Klassifizierung von Gebäudebeständen.<sup>931</sup> Die Energiebilanz von Gebäuden wird nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 bis 12 berechnet.

Im Rahmen des Pilotprojektes nach den Projektvorgaben der EU-Richtlinie 2002/91/EG „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ ist eine Vereinfachung der Datenermittlung von Gebäudeaußenflächen, U-Werten und anlagentechnischen Parametern gegeben.

Das Modellprojekt der Gemeinde Ebenhausen untersucht den Tagesgang des Brauchwasserwärmebedarfs durch Endenergieverbraucher in der Gemeinde. Die täglich benötigte Wärmebedarfsmenge für den Betrieb der Raumheizung und Erzeugung des Warmwasserbedarfs von Wohngebäuden ist in der Heizungsperiode aufgezeichnet worden. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass in dem Tageszeitraum ab 8:00, 14:00 und 18:00 Uhr der maximale Wärmebedarf abgefordert wird. Die erfassten Tageswerte sind mit Hilfe der normierten Heizungsenergieverteilung auf die Stundenwerte verteilt worden.

Die Datenauswertung der Tagesverteilung für Wohngebäude in Abbildung 75 zeigt, dass eine Warmwasserspeicherung während den Nachtstunden erforderlich ist, um den täglich

<sup>931</sup>Vgl.: Institut Wohnen und Umwelt GmbH: Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden, Kurztitel: Kurzverfahren Energieprofil, Autoren: Tobias Lang, Jens Knissel, Nikolaus Diefenbach, Rolf Born, IWU Forschungseinrichtung des Landes Hessen und der Stadt Darmstadt, S.2, 2005.

chen Wärmebedarf zu den Spitzenzeiten von 07:00 bis 13:00Uhr und von 19:00 bis 22:00Uhr den Endverbrauchern zur Verfügung zu stellen.

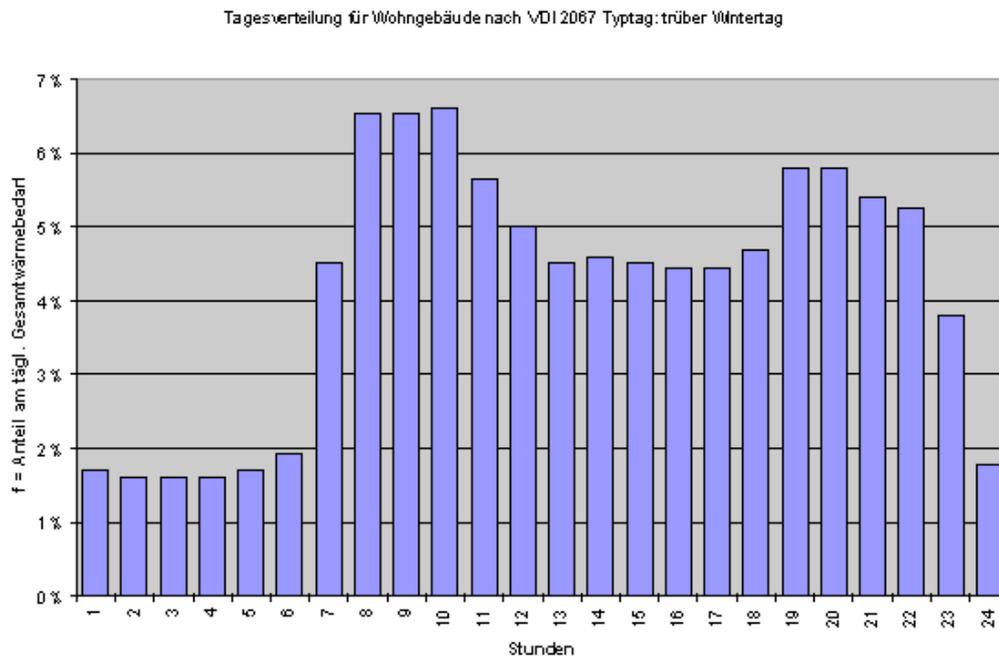


Abbildung 75: Tagesverteilung Wärme für Wohngebäude an einem trüber Wintertag

Mit Hilfe eines BHKW-Plans wird die Ganglinie des stündlichen Wärmebedarfs von einzelnen Gebäuden bis zu größeren Nahwärmenetzen berechnet. Um den Wärmelastgang eines Einzelgebäudes mit exakten dynamischen Modellen (z.B. DYNBIL, /Feist 1993/) im Detail nachzubilden, ist eine genaue Aufnahme der Gebäudedaten (Abmessungen, Orientierungen und bauphysikalische Kennwerte von Außen- und Innenbauteilen) notwendig. Der Einfluss durch die Endenergienutzer ist über Daten zum Nutzerverhalten (Raumtemperaturen, Nachtabsenkung, Anteil der beheizten Flächen, Warmwasserbedarf, etc.) aufzunehmen.

Die nachstehende Abbildung 76 über den stündlichen Wärmebedarf eines Gebäudes nach Jahresstunden zeigt eine deutliche Zunahme von 0 bis 3000 Jahresstunden und ab 6000 Jahresstunden. Das Intervall zwischen 3000 und 6000 Jahresstunden zeigt den reduzierten Wärmebedarf in den Sommermonaten. Die Abnahme von Wärme ist von dem Nutzerverhalten des Endverbrauchers abhängig und vom Tagesablauf.

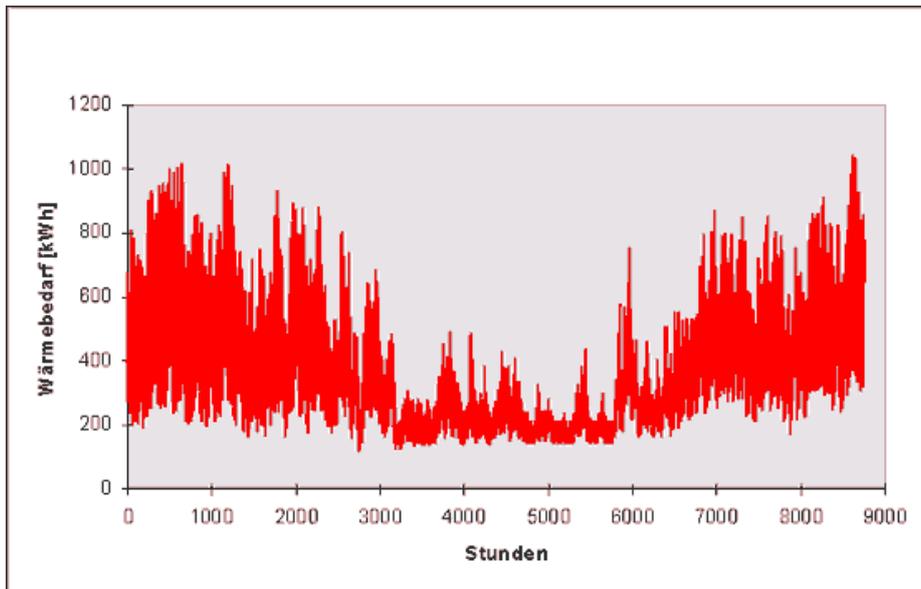


Abbildung 76: Stündlicher Wärmebedarf eines Gebäudes nach Jahresstunden

Die nachstehende Graphik zeigt den monatlichen Wärme- und Klimakältebedarf von Bestandsgebäuden innerhalb eines Kalenderjahres. Der Wärmebedarf wird in der Heizperiode über die städtische Quartiersversorgung und über ein Wärmepumpen-Anlagenetz gesichert. Die Bereitstellung der Klimakälte wird durch Umwandlung von Erdwärme in Klimakälte aus Warmwasserspeicheranlagen über das Kalenderjahr gewährleistet.<sup>932</sup>

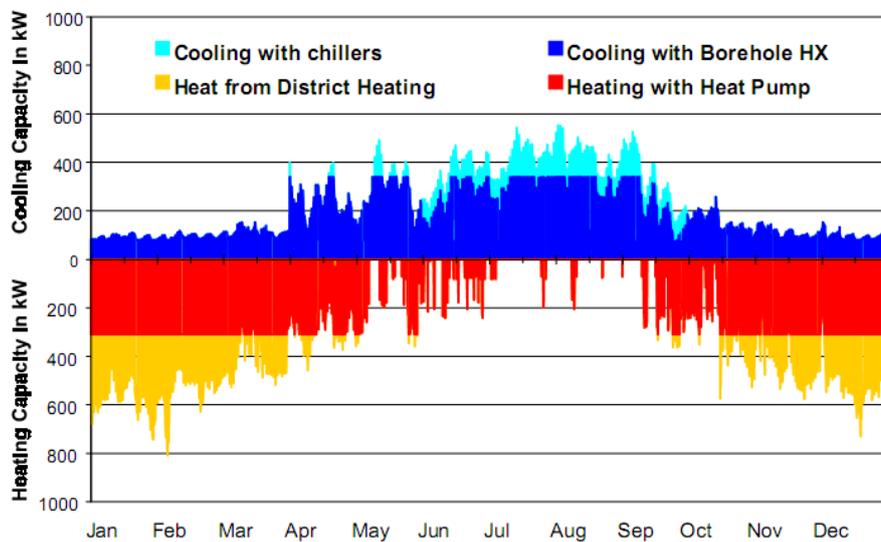


Abbildung 77: Monatliche Heizperiode und Klimakältebereitstellung

Der Tagesgang des Wärmebedarfs von öffentlichen Verbrauchern wie Schulen, kommunalen Dienstleistern, Behörden etc. ist unterschiedlich zu den privaten Wohngebäuden zu

<sup>932</sup>Bundesministerium für Forschung und Technologie (Hrsg.): Typische Tagesganglinien der stündlichen Wärmeerzeuger- und Verbraucherleistung; Speicherlade- und Entladezeiten; erforderlicher Inhalt eines Speichers zur Überbrückung der Revisionszeit, BMFT 79-118, S.61, 1979.

bewerten. Die Abbildung 78 zeigt die Tagesverläufe der Wärmelast für Wohngebäude nach saisonalen Jahreszeiten in der Winter- und Sommerperiode. Die Dauerlinien von Typ 1 bis Typ 4 nehmen einen identischen Kurvenverlauf nach dem Tageszeitverlauf und Abnahme der relativen Wärmelast ein.

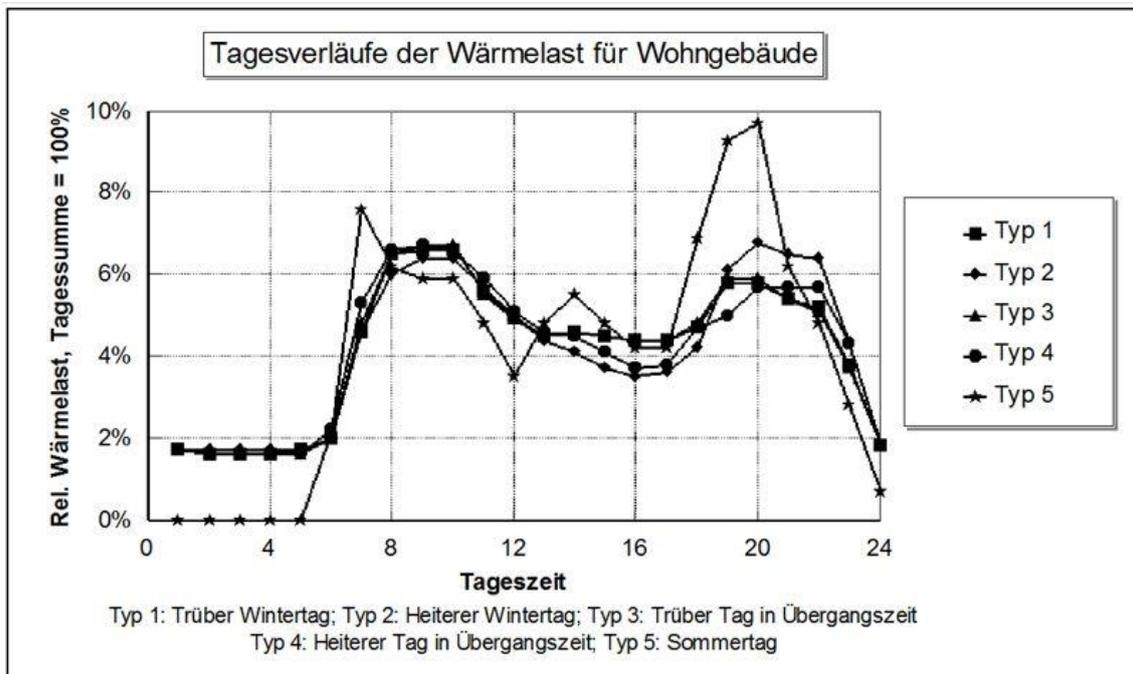


Abbildung 78: Tagesverläufe zur Bestimmung von Stundenwerten der Wärmelast

Die zur Berechnung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden erforderlichen Außentemperaturwerte sind dem TRY-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes entnommen worden. Die mittleren Außenlufttemperaturwerte wie die solaren Strahlungsdaten sind aus der Datenbank „DB-Klimagebiete“ für unterschiedliche Klimagebiete generiert.

Die Simulation der Gebäudeenergiebereitstellung für Wärme und Klimakälte mit solarer Strahlung und Unterstützung eines unterirdischen thermischen Energiespeichersystems ist in dem Modellvorhaben der Deutschen Solarforschungsgesellschaft (DSF)<sup>933</sup> evaluiert worden. Während der Heizperiode von September bis Mai werden der Heizenergiebedarf und die Spitzenwärmelast durch Wärmepumpensysteme unterstützt. Die ganzjährige Bereitstellung des Klimakältebedarfs, insbesondere für die Sommerperiode, wird aus dem Warmwasserspeicher durch Umwandlung bereitgestellt.

<sup>933</sup>Vgl.: Vortrag im Rahmen von ECES-IEA-: Modellvorhaben zur unterirdischen thermischen Energiespeicherung mit Erdwärmesonden, Geothermische Fachtagung Waren/Müritz, ZAE Bayern, Universität Gießen, Universität Stuttgart, 6-9.11.2002 –Gemeinsame Arbeit in Annex 12 des Implementing Agreement ECES der Internationalen Energieagentur.

Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) stellt Gebäudedaten über den maximalen Jahresheizwärmebedarf von Gebäudetypologien, die während der Bauzeit von 1918 bis 2002 errichtet worden sind, in einer internen IWU-Datenbank zur Verfügung. Die U-Werte von Gebäudebauteilen wie Dächer und Wände von Bestandsgebäuden sind nach Baualtersklassen und Gebäudetypologie für die bauphysikalische Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs katalogisiert worden.<sup>934</sup>

Die Gebäuderichtlinie der Europäischen Kommission beansprucht einen allgemeinen Rahmen für eine Methode zur Berechnung der integrierten Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudeteilen vorzugeben.<sup>935</sup>

Städtebauliche Einflüsse der Gebäudeausrichtung in Bebauungsgebieten oder städtischen Quartieren sind durch Windfelder und Windströmungsrichtungen zur Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs zu berücksichtigen. Der Endenergiebedarf richtet sich an die saisonalen meteorologischen Verhältnisse in den Regionen und an die Abnahmeleistung des täglichen Endenergiebedarfs zur Versorgung von Gebäuden mit Wärme und Strom.

Der Nutzenergiebedarf von Gebäuden und die zu erwartenden Primärenergieeinsparpotenziale werden insbesondere durch die energetische Qualität der thermischen Gebäudehülle, der Heizanlagentechnik und geometrischen Abmessungen des Gebäudes bestimmt.<sup>936</sup> Die Berechnung der Energiebilanz von Bestandsgebäuden ist nach DIN V 4108-6 und nach DIN V 4701-10 und -12 mit Hilfe von bauphysikalischen Berechnungsprogrammen gegeben.<sup>937</sup>

Versorgungsleitungsnetze stellen Strom, Fern- und Nahwärme den Haushalten auf der Basis von fossilen Primärenergieträgern wie Erdgas, Flüssiggas, Kohle, Holz und Heizöl ganzjährig zur Verfügung. Die Umwandlung von Nutzenergie in Endenergie erfolgt über Heizungs-, Klimaanlage und Warmwasserspeicheranlagen direkt am Versorgungsstandort in Gebäuden und durch regionale und städtische Heizkraftwerke und Kraftwerke.

---

<sup>934</sup>Vgl.: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Gebäudetypologie Deutschlands und in Bayern [IWU, 2003]. Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns, Potenzialstudie im Auftrag des Bund Naturschutz Bayern e.V., S.7, S.13 ff. 2006.

<sup>935</sup>Vgl.: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: Konsistenz und Aussagefähigkeit der Primärenergiefaktoren für Endenergieträger im Rahmen der EnEV, Diskussionspapier im Auftrag von Zukunft ERDGAS e.V., Berlin und Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) Bonn, Wuppertal 18.12.2015, S.16 ff.

<sup>936</sup>Pöschk, Jürgen (Hrsg.): Jahrbuch Energieeffizienz in Gebäuden 2011, Verlag und Medienservice, ISBN 978-3-936-06207-6, Berlin, 2011.

<sup>937</sup>Vgl.: Wärmeschutz im Hochbau: Energetische Bewertung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen, Datensätze Kurzprofil der Gebäude nach der Gebäudewohnstatistik Bayern (Ife), 2005.

Der Primärenergiefaktor (PEF) von Wärme und Strom sowie KWK-Anlagen ist definiert als Quantifizierung der vollständigen Bilanz von Energieverlusten und Energieaufwendungen (Brennstoffe oder Strom) bei der Förderung, Aufbereitung, Umwandlung, Transport und Verteilung eines Endenergieträgers im Sinne der Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Endenergieträgern unter Energieeffizienzgesichtspunkten.<sup>938</sup>

In der DIN V 18599 vom Mai 2013 wird auf das computergestützte Programm GEMIS10 zur Ermittlung von Primärenergiefaktoren verwiesen. Aus den Prozessketten werden in GEMIS kumulierte Energieaufwände (KEA) bzw. kumulierte Energieverbräuche (KEV) berechnet. Der KEV ist in der VDI 4600 als kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden definiert und umfasst alle gehandelten, primärenergetisch über Bereitstellungsnutzungsgrade bewerteten Endenergien (EE) für Wärme, Kraft, Licht und sonstige Nutzelektrizitätserzeugung.<sup>939</sup> Der Jahresheizwärmebedarf von Gebäuden ist abhängig von den mittleren monatlichen Außentemperatur- und Gebäuderaumtemperaturwerten sowie von der ortsgebundenen klimaabhängigen Heizgradzahl. Die Heizperiode<sup>940</sup> in Deutschland ist gesetzlich festgelegt vom 01. Oktober bis zum 30. April des Jahres. Die Anzahl der Heizgradtage<sup>941</sup> ist definiert als Differenz zwischen dem mittleren Außentemperaturwert und dem Raumtemperaturwert in Gebäuden. Die Gradtagzahl<sup>942</sup> ist als Differenz zwischen dem mittleren monatlichen Außentemperaturwert und dem festgelegten Heizgrenztemperaturwert<sup>943</sup> von 15°C für Deutschland festgelegt. Die Messung der mittleren atmosphärischen Tagestemperaturwerte in Regionen und Städten erfolgt über stationäre Messstationen, die in städtischen Gebieten vorzugsweise im nahen Bereich von Flughäfen und im Stadtumland verstetigt sind.

Die nachstehende Abbildung 79 zeigt eine tagesabhängige Darstellung der Messergebnisse von atmosphärischen Temperaturmesswerten in Bezug zum Bewölkungsgrad vom 17. Juli 2012 in der Taunusregion.

---

<sup>938</sup>Vgl.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2011, „Förderung, Aufbereitung, Umwandlung, Transport und Verteilung“ eines Endenergieträgers in seiner vorgelagerten Kette, S. 66.

<sup>939</sup>Vgl.: VDI 2012, S. 7.

<sup>940</sup>Definition der Heizperiode: Die Heizperiode ist die Zeitspanne vom ersten (1.10.) bis zum letzten Heiztag (30.04) in Deutschland. Für die Außentemperaturen werden die gemessenen Werte des Deutschen Wetterdienstes zugrunde gelegt. Vgl.: Informationen im Internet URL <http://wikipedia.de> (2016).

<sup>941</sup>Definition Heizgradtage: Die Gradtagzahl und Heizgradtage werden mit der Einheit Kd/a (Kelvin Tag / Jahr) angegeben, 2015, Vgl.: Informationen im Internet URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Gradtagzahl>.

<sup>942</sup>Vgl.: Definition Gradtagzahl: Informationen im Internet URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Gradtagzahl>, 2015.

<sup>943</sup>Vgl.: VDI-Richtlinie 2067/DIN 4108 T6.

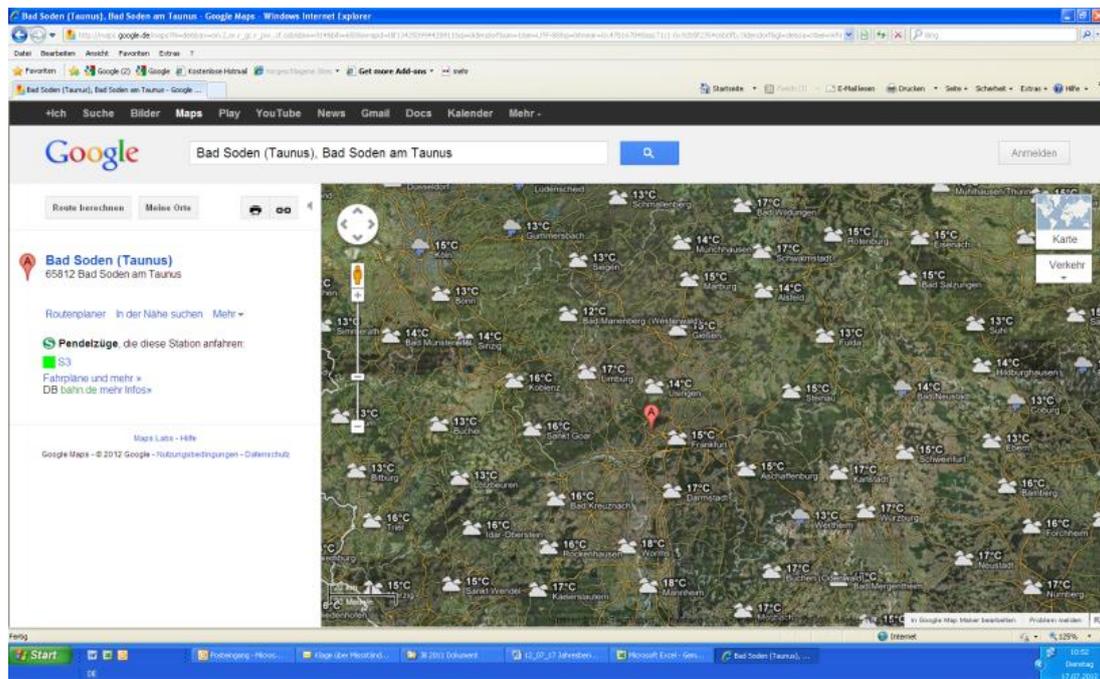


Abbildung 79: Atmosphärische Tagestemperaturen und Bewölkungsgrad

## 11.4. Solare Gebäudeplanung

Die Solararchitektur von Gebäuden stellt eine hohe Herausforderung im Rahmen der solaren Stadtplanung für Bebauungsgebiete dar. Planungsparameter zur Gebäudeplanung wie die Standortwahl, Firstrichtung, Dachflächenneigung, Gebäudeform, Straßeninfrastruktur, Bepflanzung und Fassadenausrichtung sind für die städtebauliche Quartiersplanung. Zur Nutzung der solaren Strahlung auf Gebäudeflächen sind die Architektur und die Gebäudeorientierung in Bezug zu den Jahreszeiten, Sonnenstand und der technischen Solaranwendung auszurichten. In der Winterperiode ist der Sonnenstand 15 bis 30° ausgerichtet und wandert von Südosten bis zum Südwesten. Die Verschattungsfreiheit des Gebäudes und die senkrechte Wirkung der Sonnenstrahlen auf Kollektorsystemen sind wesentliche Bedingungen der Solararchitektur. Die Südabweichung der Gebäudelängsseite (Traufseite) ist mit weniger als 30° auszurichten. Die Minimierung der wärmeübertragenden Gebäudehüllflächen durch einen kompakten Baukörper mit einem günstigen A/V-Verhältnis ist ein Grundprinzip des energiesparenden Bauens. Solare Gebäude generieren solare Wärme über südorientierte Fassaden- und Dachflächen mit technischen Solaranlagen.

Bei Einfamilienhäusern mit solaren Deckungsgraden zwischen 50 und 70% sind Warmwasserspeichervolumen zwischen 5 m<sup>3</sup> und 9 m<sup>3</sup> ausreichend. In Bestandsgebäuden ist die Einbringung eines Warmwasserspeichers bautechnisch ungeeignet, da der Speicherbehälter in Einzelteilen geliefert und vor Ort zusammengeschweißt werden muss. Die technischen Alternativen sind Mehrkammerspeichersysteme im Gebäude oder außerhalb des

Gebäudes. Transparente Bauteile von Gebäuden versorgen das Gebäudeinnere mit Licht und solarer Wärme und sind in den Wintermonaten Wärmeverlustquellen und relative Kaltflächen für das Gebäude ohne solare Strahlung. Gebäudefassaden mit Südfenster und Wärmeschutzglas weisen eine positive Jahresenergiebilanz auf. Fassadenflächen mit hohen Glasflächenanteilen tragen nicht zu einer Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes bei. Dies gilt besonders für Ost- und Westfenster, die im Sommer und während der Übergangszeiten erheblich zur Überhitzung der Räume im Gebäude beitragen. Die aktiven und passiven solaren Gewinne sind von der Sonnenstundenzahl und vom Klimastandort abhängig.<sup>944</sup>

Hemmnisse in der städtebaulichen Planung wie Verschattung durch den angrenzenden Gebäudebestand und die Vegetation sowie Veränderungen des optischen Erscheinungsbildes durch die Baukonstruktion sind zu berücksichtigende Einflussgrößen. Fassadenkollektoren sind eher als technische Anwendungen im Neubausektor planbar als im Stadtbau und in der Altbausanierung.<sup>945</sup>

Die Analyse von Fallbeispielen zeigt, dass bei einem solaren Deckungsgrad von 20% bis 40% eine 1,6-fache Erhöhung der Kollektorfläche von thermischen Solaranlagen im Gegensatz zu einer 45° geneigten Kollektorfläche erforderlich ist. Soll ein solarer Deckungsgrad von 70% erreicht werden, ist eine 2-fache verschattungsfreie Kollektorfläche vorzuhalten.<sup>946</sup>

Fassadenintegrierte Kollektoren ohne Hinterlüftungssysteme sind bei der Altbausanierung und im Neubau von Gebäuden als technische Systeme zur Erzeugung von saisonaler Wärme für die Gebäudeversorgung in die Versorgungsplanung einzubeziehen. Im Rahmen der Altbausanierung von Gebäuden des Stadtbaus und der solaren Stadtentwicklung sind mit Gestaltungssatzungen Solaranlagen Systeme für Gebäude mit Solararchitektur und Niedrigtemperaturwärmesysteme zu fördern und Befreiungen des örtlichen Baurechts zu bewirken.

---

<sup>944</sup>Vgl.: Portrait Sonnenhaus-Institut e.V.: Solares Bauen und Sanieren. Information im Internet URL <http://www.sonnenhaus-institut.de>. (2017).

<sup>945</sup>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Fassadenintegration von thermischen Sonnenkollektoren ohne Hinterlüftung, I. Bergmann und W. Weiß, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 13/2002, S.15

<sup>946</sup>Ebd.: S.96 ff. (Dimensionierung von Kollektoranlagen).

## 11.5. Marktstudien und regenerative Energien

Ziel der Studie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Bildung ist die Identifizierung relevanter Erneuerbare-Energien-Märkte weltweit und die Zuordnung von vordefinierten Marktkategorien. Die regenerativen und erneuerbaren Energien befinden sich weltweit weiterhin auf einem deutlichen Aufwärtstrend. Nie zuvor wurde so viel in alternative Energieformen investiert wie im Jahr 2015.<sup>947</sup>

Die Auswertung von aktuellen Markt- und Trendstudien zum Städtebau und zum Wohnen zeigt, dass sich die städtebaulichen Planungsziele auf eine städtische Nutzungsmischung, stadtnahes gesundes Wohnen an Stadträndern mit hoher Wohnqualität und Komfort beziehen. Energiesparende Bauweisen und ganzjährige Versorgungssicherheit mit Energie sind gleichwertige Anforderungen, die aus den Ergebnissen der Studien herauszustellen sind. Das energiebewusste Bauen und der bewusste Umgang mit Energie sind vor dem Ansatz des Klima- und Umweltschutzes in den Vordergrund gerückt. Der Energiesystem- und Heizanlagenvergleich über Investitionskosten, Wirkungsgrad und Heizleistung sowie Wärmeverbrauch und Energiepreise sind wesentliche Entscheidungen, die der Gebäudeeigentümer in der Gebäudeplanungsphase trifft.<sup>948</sup>

Die Forsa-Umfrage 2015 zur Energieversorgung und Energiewende zeigt, dass die Energiekosten und Versorgungssicherheit die höchste Priorität haben. Mehr als drei Viertel der Bevölkerung geben an, dass die Preise für Strom und Energie für alle Bürger bezahlbar bleiben müssen. 60% der Befragten ist relevant, dass die Energieversorgung jederzeit sicher und zuverlässig ist und die Energie klimaschonend erzeugt wird. Das Befragungsergebnis zeigt auch, dass die Energiewende als kritisch gesehen wird. Mehr als 60% sind dagegen der Meinung, dass die Umsetzung der Energiewende zu Problemen oder sogar Ausfällen in der Versorgung führen kann.<sup>949</sup>

Die sich jährlich verändernden Rohstoffpreise führen zu Wirtschaftlichkeitsüberlegungen über die Wahl des geeigneten Energieträgers und folglich zu Entscheidungen über nachhaltige Auswirkungen des täglichen Gesamtenergieverbrauchs. Die Gebäudeenergiever-

---

<sup>947</sup>Vgl.: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Marktanalyse 2016 – Stand und Entwicklung der weltweiten Erneuerbare-Energien-Märkte, Mittelstand Global Exportinitiative Energie, Berlin, Dezember 2016, S.13-17; S. 32-34.

<sup>948</sup>Heinze Marktstudie 2009: Architekten-Trendstudie, Architektenbefragung. Fachbeitrag in der Zeitschrift Flüssiggas Heft 6, S. 6/7, 2009.

<sup>949</sup>Vgl.: Forsa-Umfrage 2015 Energieversorgung und Energiewende. Information im Internet URL <https://www.wingas.com/mediathek/studien/forsa-umfrage-2015>.

sorgung setzt sich demnach aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, Holzpellets, Energiepflanzen etc. und Biogas zusammen. Energiesysteme wie Wärmepumpen, kontrollierte Wohnraumlüftung, solarthermische Anlagen, Holzpellets-Anlagensysteme liegen im Trend und werden insbesondere mit energiesparenden Gebäudetypologien kombiniert. Die Verwendung von Strahlungsheizsystemen für Wand- und Fußbodenheizungen, die Niedrigtemperaturwärme einsetzen finden im Gebäudeneubau immer mehr Akzeptanz. Insbesondere in den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz steht die Energieversorgung mit nachwachsenden Rohstoffen bereits in Konkurrenz zu den fossilen Energieträgern.

Der Gebäudebestand in Städten und Gemeinden ist über Etagenheizungen oder zentral betriebenen heizöl- und gasbetriebenen hausinternen Heizungsanlagen mit integrierten Warmwasserkesseln versorgt. Die Einsparung der Endenergie von Raumwärme, Warmwasser und Klimakälte erfolgt primär durch den Endenergieverbraucher, Eigentümer oder Vermieter. Hauseigentümer, Wohnungsbaugesellschaften und Liegenschaftsverwaltungen sind über die Investitionen und Nutzung von erneuerbaren und regenerativen Energien ausreichend zu informieren.

Fossile Energieträger sind auch nach Ausschöpfung aller Systemmöglichkeiten mit erneuerbaren und regenerativen Energien zur Deckung des Strom- und Wärmebedarfs im Rahmen des Energie-Mixes zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit einzubeziehen. Die Akzeptanz von zukünftigen Energieversorgungssystemen zur sicheren Energiebereitstellung im Gebäudebereich setzt voraus, dass die ganzjährige Versorgungssicherheit gewährleistet ist.

## 12. Ergebnisse der Potenzialanalyse städtischer Flächen

### 12.1. Auswertung der Befragung von Kommunen

Die Befragung der Akteure von Städten und Kommunen erfolgte mit 90 Fragebögen, die an die Kommunalverwaltungen der Städte versandt wurden. Im Rahmen dieser Befragung sind die Inselstandorte an der Nord- und Ostseeküste eingebunden worden. Die geringe Rücklaufquote der Fragebögen von 30% ist aufgrund der Datenschutzerfordernissen zu begründen. Die Fachbehörden von Stadtplanungs- und Umweltämtern der Städte Hannover, Bremen, Garmisch-Partenkirchen, Bad Kissingen, Meiningen und Inselverwaltungen Helgoland, Norderney, Borkum, Langeoog und Sylt sind an der Befragung beteiligt worden. Die Auswertung der Fragebögen zeigt, dass 25% der Befragten im Rahmen der städtebaulichen Konzepterstellung für den Stadtumbau, Stadtsanierung und Gebäudemodernisierung Klimaschutz- und Energieversorgungskonzepte in der Stadtentwicklung einbinden. Weitere Ergebnisse der Befragung sind:

- Die Wärmeversorgung von städtischen Altbauquartieren mit dezentralen Wärmespeicheranlagen ist nicht umgesetzt.
- Das solare Potenzial von städtischen Flächen wird nicht obligatorisch in der Stadtentwicklung erfasst.
- Die solare Strom- und Wärmeversorgung wird überwiegend für Einzelvorhaben des Neubau- und Altbaubestandes unabhängig von der Wärmebedarfsdichte, Wohnungsdichte und Nahwärmeversorgung des urbanen Gebietes geplant. Zwei Studien über die solare Stadtentwicklung sind in der Vorbereitung.
- Städtische Quartiere wie Gewerbe-, Sonder- und Kerngebiete werden nicht mit thermischen großflächigen Solaranlagen ausgestattet. Der Einfluss von Förderprogrammen der Bundesministerien und Landesverwaltungen zeigt, dass insbesondere Wohngebäude und öffentliche Gebäude (Schulen, Verwaltungen, Krankenhäuser) gebäudeeigene Wärmeversorgungskonzepte nutzen.
- Die Antworten beziehen sich auf Lösungen durch Wärmespeicheranlagenkonzepte für Gebäude des Altbaubestandes. Natürliche und künstliche Wärmespeicheranlagenkonzepte sind in der städtischen Wärmeversorgungsplanung als Modellprojekte umgesetzt.
- Die Erfassung und Messung von standortbezogenen Wetterdaten in den Städten erfolgt je nach Stadtflächengröße über eine oder zwei stationäre Messstationen.

- Eine Nahwärmeversorgung ist in Gemeinden ab einer Einwohnerzahl von 5.000 und eine Fern- und Nahwärmeversorgung ab 10.000 Einwohnern geplant worden. Die Bereitstellung von Heizwärme und Brauchwasser erfolgt durch gebäudeeigene Etagenheizungen. Die Wärmeversorgung von Gebäuden in Städten wird überwiegend durch Erdgas und Heizöl gewährleistet.
- Die ganzjährige städtische Strom- und Wärmeversorgung ist abgesichert durch zentrale Heizkraftwerke, Heizwerke und mit KWK sowie BHKW-Anlagen. Energieträger wie Biomasse, Holzpellets, Raps, Pflanzenöl etc. werden in Einzelfällen zur Versorgung von Gebäuden in ländlichen Randgebieten eingesetzt. Drei Städte mit einer Einwohnerzahl von mehr als 100.000 gaben an, die städtische Wärmeversorgung zusätzlich mit Erdwärme, Holz, Biomasse sowie Wärme aus Müllverbrennungsanlagen zu unterstützen. Drei Kommunalverwaltungen nutzen das im städtischen Umland erzeugte Biogas aus Biogasanlagen. Die Einspeisung von Biogas in das städtische Erdgasnetz wird von zwei Städten genutzt.
- Das GIS-basierte städtische Wärmebedarfskataster ist in einer Stadt angewandt worden. Der städtische jährliche mittlere Jahresheizwärmebedarf des Gebäudebestandes erfolgt auf der Grundlage von Wärmeverbrauchsschätzungen.
- Die Frage, welche Energieversorgungsstrategien für die städtische Wärmeversorgung zukünftig mehr an Bedeutung gewinnen wird, wurde sehr kontrovers beantwortet. Einige Städte ab einer Einwohnerzahl von mehr als 100.000 nutzen die dezentrale Wärmeversorgung mit großvolumigen Warmwasserspeichern in städtischen Quartieren. Dieses Wärmeversorgungsmodell erhält Vorzug vor einer zentralen Versorgung mit einer gebäudeinternen Warmwasserbereitstellung.
- 30% der Kommunen nutzen die landwirtschaftlichen Nutzflächen (10 bis 30%, bezogen auf die Gesamtfläche des Versorgungsgebietes) für eine unterstützende Versorgung mit Biogas- und Biomasseerzeugung zur Einspeisung von Biogas in das städtische Erdgasnetz und Versorgung von Randgemeinden.
- Zwei Kommunen sind in einem kommunalen Planungsverband mit den Nachbargemeinden vertraglich im Rahmen der Energieversorgung verbunden.
- 50% der Städte und Kommunen ab einer Einwohnerzahl von 100.000 verwenden im Rahmen der städtischen Entwicklungsplanung ein städtisches Leitbild und ein kommunales Energiekonzept.
- Die Stadtentwicklungsplanung stützt sich insbesondere auf städtebauliche Planungsinstrumente wie die Sanierungssatzung (50%), den Erschließungsvertrag (50%) und

städtebaulichen Vertrag (70%), den Vorhaben- und Erschließungsplan (80%), den Stadtumbauvertrag (30%), die Denkmalschutz- und Gestaltungssatzung (50%) und den Umweltbericht des Bebauungsplans (90%).

- 20% der Kommunen haben in den Gemeindeordnungen gesetzliche Regelungen zur Fern- und Nahwärmeversorgung festgelegt.
- Ein Konzessionsvertrag zwischen der zu versorgenden Kommune und dem regionalen oder städtischen Energieversorger besteht bei allen Städten und Kommunen. Eine Regelung zum Anschluss an das kommunale Nahwärmenetz mit einem Anschluss- und Benutzungszwang durch Vertragsbindung ist bei 30% der Kommunen festgelegt.
- Ein Zusammenschluss der Gemeinden in einem kommunalen Planungsverbund<sup>950</sup> liegt bei einer Kommune vor.
- Eine städtische dezentrale Versorgung mit Nahwärmenetz und Wärmespeicheranlagen ist unter Berücksichtigung von Hemmnissen positiv bewertet worden. Klimaschutz, Ressourcenschonung, Luftreinhaltung und Umweltschutz sind wesentliche Ziele der Raum- und Stadtentwicklung.
- Die Wärmeversorgung von Regionen und Städten mit der Unterstützung von regenerativen Energien und dezentraler Wärmespeicherung ist als nachhaltig bewertet worden, jedoch unter dem Aspekt der Stärkung regionaler Wertschöpfung, Förderung der Energieautonomie und Energieträgersubstitution sowie der Energieimportunabhängigkeit.
- An den Ergebnissen des Dissertationsvorhabens sind 70% der Befragten interessiert.

---

<sup>950</sup>Vgl.: Kommunale Planungsverbände und Aufgaben des Rates der Region. Information aus dem Internet URL <http://www.planungsverband.de> (2015).

## 12.2. Datenbasis für die solare Potenzialanalyse in Städten

Die wissenschaftliche Arbeit untersucht das versiegelte und unversiegelte städtische Flächenpotenzial in Modellgebieten von Klimaregionen für die solare städtische Niedrigtemperaturwärmeversorgung (NT).

Die Bestandsaufnahme von Städten und Gemeinden in Klimaregionen ist aufgrund der statistischen Daten der DESTATIS Datenbanken durchgeführt worden. Die statistischen Datenwerte zu den städtischen Bodenflächen nach Art der tatsächlichen Nutzung (31.12.2015) wie Siedlungs- und Verkehrsflächen, Gebäude- und Freiflächen (Wohnen, Gewerbe, Industrie), Betriebsflächen, Grünanlagenflächen, Verkehrsflächen (Straße, Weg, Platz) und Landwirtschaftsflächen sind der Regionaldatenbank entnommen worden.<sup>951</sup> Die Flächenbilanz (ha) in Deutschland, die für eine Nutzung des solaren Niedrigtemperaturwärmepotenzials genutzt werden könnte, setzt sich wie folgt zusammen:

		Versiegelte Flächen (ha)			Unversiegelte Flächen (ha)		
Bodenfläche gesamt (ha)	Siedlungs- und Verkehrsfläche (ha)	Wohnen	Gewerbe, Industrie	Straße, Weg, Platz	Grünanlage	Landwirtschaftsfläche	Abbauland
35.740.911	4.906.638	1.333.330	344.304	1.573.024	291.483	1.8433.248	155.871

Tabelle 9: Bodenflächen nach Art der tatsächlichen Nutzung in Deutschland

Das zur Verfügung stehende jährliche solare Wärmepotenzial von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen ist über thermische Solaranlagen (Dachflächen), Straßenflächen, Wege, Plätze und Grünanlagen, Landwirtschaftsflächen und Abbauland bis zu einer Bodentiefe von  $t < 2,00\text{m}$  generierbar. Die mittleren Wärmeflussdichten von städtischen Flächen und Bodenschichten sind aufgrund von Literaturangaben, die sich auf Bodennesswerte, Bodenuntersuchungen und Labor- und Feldversuchen stützen, wie folgt für die Abschätzung des NT-Wärmepotenzials anzusetzen:

Saisonale Wärmeflussdichte ( $\text{W}/\text{m}^2$ )							
		Versiegelte Flächen $t < 80\text{cm}$			Unversiegelte Flächen $t > 0,80 < 2,00\text{m}$		
Bodenfläche gesamt (ha)	Siedlungs- und Verkehrsfläche (ha) - versiegelt und unversiegelt	Wohnen (Dachflächen mit Solaranlagen)	Gewerbe, Industrie (Dachflächen mit Solaranlagen)	Straße, Weg, Platz (Tragschichten)	Grünanlage (Bodenschichten)	Landwirtschaftsfläche (Bodenschichten)	Abbauland (Renaturierung und Bodenflächen)
50	25-50	80	80	<50	<25	<25	<25

Tabelle 10: Mittlere Wärmeflussdichte für versiegelte und unversiegelte Flächen

<sup>951</sup>Vgl.: DESTATIS Datenbanken: Siedlungs- und Nutzflächen der Regionaldatenbank (2013). Information im Internet URL <http://www.destatis.de> (2016).

Die Bestandsaufnahme der städtischen unversiegelten und versiegelten Flächenbilanz ist aufgrund des Versiegelungsgrades der Regionaldatenbank gewährleistet. Die Oberflächenstruktur der versiegelten Tragschichten (Asphalt- und Betonflächen) ist standortbezogen am Versorgungsstandort zu erfassen, da die Regionaldatenbank keine auswertbaren Daten zur Verfügung stellt. Die Verschattungsverhältnisse von Gebäudeflächen auf versiegelte und unversiegelte städtische Flächen sind am Versorgungsort aufzunehmen und mit Hilfe von städtebaulichen 3D-Planungsprogrammen zu simulieren. Die solaren Strahlungskarten<sup>952</sup> für Deutschland sind Datengrundlage zur Auswertung der solaren Strahlung in Klimaregionen, Städten und Kommunen.

Der mittlere jährliche solare Ertrag von thermischen Anlagen mit Flachkollektoren<sup>953</sup>, die nach Süden ausgerichtet sind, beträgt je nach solarem Strahlungsangebot an Standorten zwischen 400 bis 600 kWh/m<sup>2</sup>a. In den Regionen Deutschlands beträgt die mittlere Jahressumme der solaren Globalstrahlung circa 1.000 kWh/m<sup>2</sup> a und in Regionen Südeuropas 1.221 bis 1.260 kWh/m<sup>2</sup> a, gemessen über horizontale Oberflächen. Die DWD-Datenbasis der Wettermessstationen in Regionen und Städten steht für einen Zeitraum von 40 Jahren für die Potenzialanalyse zur Verfügung.

Der Datenbestand von rechtskräftigen Bauleitplänen ist den Datenbanken der Landesbehörden<sup>954</sup>, regionalen Instituten<sup>955</sup> und Kommunen<sup>956</sup> zu entnehmen. Die mittleren solaren Strahlungswerte stehen in solaren Datenbanken zur Verfügung.<sup>957</sup>

---

<sup>952</sup>Quelle: METEOTEST Strahlungskarte von Deutschland. Daten als langjähriges Mittel. Produktion: 7.4.2008/fd Scale 1:2'800'000; Projektion: DHDN\_3\_Degree\_Gauss\_Zone\_3 (ArcGIS 9.2/2007).

<sup>953</sup>Vgl.: Auslegung von Solaranlagen; Information im Internet URL <http://www.impulsprogramm.de> (2011).

<sup>954</sup>Vgl.: Geographische und geologische Datenbanken (deNIS), (geoDAK), Geo - Fachdatenatlas Bayern – Detailinformationen -, Information aus dem Internet URL <https://www.denis.bund.de> (2015).

<sup>955</sup>Vgl.: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Geozentrum Hannover Information aus dem Internet URL <http://www.lbeg.niedersachsen.de> (2015).

<sup>956</sup>Vgl.: Geologischer Dienst Bremen, Bohrdatenbank, Information aus dem Internet URL <http://www.gdfb.de> (2015).

<sup>957</sup>Quaschnig, Volker: Datenbanken für Solarstrahlung, Fachartikel erschienen in Sonne, Wind & Wärme 8/2001, S. 39-41, Information im Internet URL <http://www.bva-solar.de> (2001), Autor vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und PL an der Plataforma Solar de Almería in Spanien.

## 12.3. Auswertungsergebnisse der solaren Potenzialanalyse

### Regional- und Stadtentwicklung für eine solare NT-Wärmeversorgung

Die Entwicklung von regionalen und städtischen solaren Leitbildern stärkt die Förderung von regenerativen Energien in Regionen und urbanen Gebieten. Leitbilder für die solare Stadtentwicklung mit städtischen Energieversorgungskonzepten sind von Städten und Gemeinden in Einzelfällen entwickelt worden.<sup>958</sup> Eine solar unterstützte NT-Wärmeversorgung erfordert eine solare Stadtentwicklung mit einem städtischen solaren Klimaschutzkonzept und einem städtischen Leitbild mit einem dezentralen Langzeitwärmespeicherkonzept für städtische Quartiere mit Versorgungsinseln. Städtische Nahwärmenetze unterstützen die dezentrale Energieversorgungsstrategie.

Die statische Auswertung zur Entwicklung der Flächenbilanz von Städten in Deutschland nach dem Regionalatlas DESTATIS zeigt, dass der städtische Versiegelungsgrad durch Zubau von versiegelten Flächen wie Verkehrsstraßen, Betriebsflächen, Abstellflächen und Plätzen langfristig zunimmt. Der Versiegelungsgrad der Stadt Herne erreicht mit einem Siedlungs- und Verkehrsflächenanteil 77,7%. Stadtstaaten wie Berlin (70,2%), Hamburg (59,3%) und Bremen (58,8%) weisen einen prozentual hohen Anteil an Siedlungs- und Verkehrsfläche der städtischen Gesamtfläche aus und sind geeignet für die NT-Wärmeversorgung von versiegelten Flächen. Die Flächenländer weisen einen geringeren Versiegelungsanteil zum Beispiel von 8% (Mecklenburg-Vorpommern) bis 20% (Saarland) auf und stellen ein solares Potenzial über die unversiegelten Flächen wie landwirtschaftliche Nutzflächen) zur Verfügung.

Der Gesetzgeber hat durch die Verankerung städtebaulicher Planungsleitsätze abstrakt das Thema „Klimaschutz und erneuerbare Energien“ für die Bauleitplanung eingeführt. Die Klimaschutzklausel nach § 2 Abs. 2 Nr. 6 und 7 ROG für das Raumordnungsrecht ist verbindlich. Der Klimaschutz ist in § 1 Abs. 5 Satz 2 BauGB sowie die Nutzung erneuerbarer Energien, sowie die sparsame und effiziente Nutzung von Energie verankert. Das Verhältnis zwischen Bauleitplanung und Energiefachrecht ist kritisch zu hinterfragen in der städtebaulichen Entwicklungsplanung. Bebauungsplanrechtliche Festsetzungen regeln langfristig den planungsrechtlichen Rahmen für Einzelvorhaben und können mit der Entwicklung der Energiegesetzgebung nicht Schritt halten. Das Verhältnis von Bauleitplanung und Energiefachrecht ist daher so auszugestalten, dass der Bebauungsplan den städ-

---

<sup>958</sup>Vgl.: Städtisches Leitbild der Freien Hansestadt Bremen, Bremen 2020, Information aus dem Internet URL <http://www.komm-mit-nach-morgen.de/pdf> (2015).

tebaulichen Rahmen bildet, um die energiefachrechtlichen Anforderungen für die Nutzung erneuerbarer Energien und energieeffizienten Bauens umsetzen zu können. Für Bebauungspläne steht nur das nach § 9 BauGB und der Bau-NVO zur Verfügung gestellte Festsetzungsinstrumentarium zur Verfügung. Die Festlegung von Eignungsgebieten z.B. für solare Anlagen, Windenergie und Biomasseanlagen aber auch die Festlegung konkreter Standorte für Sondergebiete nach § 11 Abs. 2 Bau-NVO „für Anlagen, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung erneuerbarer Energien, wie Wind- und Sonnenenergie, dienen“, ist gegeben. Auf der Ebene des Flächennutzungsplans finden die Aspekte „Klimaschutz“ und „erneuerbare Energien“ Berücksichtigung. Städtebauliche Festsetzungen dürfen nicht zu Nutzungseinschränkungen für Eigentümer zur Folge haben und keinen erheblichen wirtschaftlichen Aufwand mit sich bringen. Diese Belastungen des Grundstückseigentümers sind städtebaulich zu rechtfertigen und im Rahmen der Abwägung durch gewichtige städtebauliche Gründe zu bewerten. Städtebauliche Verträge sind geeignet die Nutzung von Netzen und Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung sowie von Solaranlagen für die Wärme-, Kälte- und Elektrizitätsversorgung viel flexibler zu gestalten als konkrete Bebauungsplanfestsetzungen. Private Initiativen zur Stadtentwicklung und Planung von regenerativen Energien (Solarthermische Anlagen) sind nach §§141 BauGB gegeben. Stadtumbau und städtebauliche Sanierungen zur Verbesserung des energetischen Gebäudebestandes (Reduzierung Wärmebedarf) sind durch städtebauliche Verträge und Kooperationsverträge zwischen Kommune und Sanierungsbeteiligten für die NT-Wärmeversorgung umsetzbar. Die Aufstellung kommunaler Klimaschutzkonzepte, die als Grundlage für die Umsetzung von Bauleitplänen einerseits aber auch für konkrete Einzelbauvorhaben und die energetischer Sanierung von Gebäuden sein können, sind geeignete Planungsinstrumente zur Sicherstellung einer solaren NT-Wärmeversorgung für städtische Quartiere.

Städtebauliche Planungsinstrumente und Planungshilfen wie der städtische Solarflächenatlas, Wärmebedarfsdichteatlas, Daten über Baualtersklassen, Siedlungskategorien und Gebäudetypologien, meteorologische Messstationsdaten, Brach- und Freiflächenkatasteratlas, geologische und hydrogeologische Standortdaten sind im Rahmen der solaren Energieversorgungsplanung für die kommunale Bauleitplanung bereitzustellen. Die Einwohnerdichte und der Pro-Kopf-Wärmebedarf von städtischen Quartieren sind nach Klimaregionen und topografischer Lage im Planungsstadium zu berücksichtigen. Industrie- und Gewerbegebiete weisen einen hohen Versiegelungsgrad auf und sind als NT-Wärmeinsel zur Versorgung von benachbarten Wohngebieten geeignet. Der Vergleich

von Grundflächenzahl, Geschossflächenzahl und Baumassenzahl von rechtskräftigen Bebauungsplänen zeigt, dass urbane Gebiete mit einer leitungsgebunden Nahwärmeversorgung ab einer Geschossflächenzahl (GFZ) von  $>1,2$  und einer Baumassenzahl von  $>10$  für eine Aufnahme solarer NT-Wärme geeignet sind.

Die Planung von solaren Stadtentwicklungskonzepten für den Gebäudebestand wie auch für Neubaugebiete erfordert geeignete städtebauliche Planungsinstrumente, die eine Anbindung von NT-Wärme an Nahwärme- und Niedrigtemperaturwärmenetze und Wärmespeichernetze in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gewährleisten. In diesem Zusammenhang sind weitere Forschungsvorhaben der energetischen Stadtentwicklung erforderlich, die städtische Wärmeinsellösungen, intelligente Steuersysteme (GRID-Systeme) und standortbezogene Niedrigtemperaturwärmekonzepte für eine dezentrale Wärmeversorgung von städtischen Quartieren untersuchen. Eine hohe Anschlussdichte an ein städtisches Nahwärme- und NT-Wärmenetz zur Aufnahme des solaren Wärme- und Bodenwärmepotenzials ist in der vorbereitenden Bauleitplanung zu gewährleisten.

Die solare Stadtentwicklung und der energetische Stadtumbau erfordern eine Reduzierung des Wärmebedarfs von Gebäuden nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) in Verbindung mit einer Solararchitektur und effizienten Heizungsanlagentechnik. Die Umstellung von einer städtischen fossilen Wärmeversorgung zu einer dezentralen Quartiersversorgung mit Wärmeinseln und solarer NT-Wärmeversorgung mit Nahwärmenetzen erfordert, dass der Wärmebedarf durch Gebäude in Niedrigenergie- und Passivhausbauweise reduziert wird.

Aufgrund des tagesabhängigen Bedarfs von Wärmelasten in Wohngebieten (WA/WB) ist eine solare NT-Wärmeversorgung zusätzlich nur über gebäudeeigene thermische Solaranlagen wirtschaftlich, da Spitzenwärmelasten mit einem Energiemix aufgefangen werden müssen. Die Versorgungssicherheit einer quartiersbezogenen städtischen solaren Wärmeversorgung ist ohne die Unterstützung von regenerativen Energien und einem Energiemix nicht gewährleistet.

Die Datenbereitstellung über den Endwärmebedarf von Gebäuden ist für die Planung von Baugebieten des Stadtumbaus, der Innenentwicklung und der Gebäudemodernisierung mit einer NT-Wärmeversorgung erforderlich. Die Verpflichtung zur Bereitstellung der Verbrauchsdaten durch die Energieversorgungsunternehmen und Stadtwerken ist verbindlich rechtlich festzulegen.

Aus den Ergebnissen der Modellauswertung ist abzuleiten, dass geeignete Planzeichen nach der Planzeichenverordnung für Anlagen zur Nutzung und Speicherung von Solar-

energie für die NT-Wärmeversorgung zum Beispiel als „solare unversiegelte/ versiegelte Energieerzeugungsfläche“ und „Standort für NT-Wärmespeicheranlagen“ für die städtische Bauleitplanung erforderlich sind.

Die dezentrale städtische NT-Wärmeversorgung erfordert ein Langzeitspeicheranlagenetz in städtischen Quartieren. Die Förderung für die Umrüstung auf Wärmepumpen, Solarthermie-Anlagen und Biomasseheizungen sowie Bau von zentralen Warmwasserspeichersystemen ist stärker für Wohnungsbaugesellschaften und Kommunen gesetzlich festzulegen. Die zentrale Wärmespeicherung in städtischen Quartieren ist städtebaulich durch Reservierung von Nutzflächen für den Bau von oberirdischen und unterirdischen Warmwasseranlagen zu gewährleisten. Warmwasserspeicheranlagen sind als bauliche Anlage mit der Nutzung zur Versorgung von Baugebieten in die Bau-NVO aufzunehmen. Die rechtliche Begutachtung des Baugesetzbuches (BauGB) und der Baunutzungsverordnung (Bau-NVO) zeigt, dass angemessene städtebauliche Regelungen für den Stadtumbau und für innerstädtische Sanierungsgebiete für regenerative Energien festzulegen sind. Dazu zählen die Deregulierung von Gestaltungssatzungen und Erleichterungen für energieoptimiertes Bauen im Gebäudebestand für Bauherren und Wohnungsbaugesellschaften. Die Gründung von Energiesparpartnerschaften für regenerative Anlagensysteme und Energiegenossenschaften zur Versorgung von städtischen Quartieren fördert die solare NT-Wärmeversorgung. Die Aufgabe der Energiesparpartnerschaften ist, dass das Energieeinsparpotenzial verbindlich für Gebäudeeigentümer vorgegeben wird.

Die Flexibilisierung der Ausführung des BauGB mit Verordnungen lässt die Planung einer solaren Stadtentwicklung mit Nahwärme- und NT-Wärmenetzen planungs- und baurechtlich zu. Die Festsetzungen der Bau-NVO beziehen sich auf baulich untergeordnete Anlagen zur Nutzung solarer Strahlungsenergie in, an oder auf Dach- und Außenwandflächen oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen innerhalb von Gebäuden in den festgesetzten Baugebieten, wenn die erzeugte Energie (Strom, Wärme, Kälte) vollständig oder überwiegend in das öffentliche Netz eingespeist wird.

Die technische Anlagenplanung von Kollektormodulen in versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen zur Generierung von solarer Wärme und Bodenwärme ist baurechtlich in Landesbauordnungen aufzunehmen. Das Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden und die Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden sind verbindlich im Rahmen des Planungsprozesses für eine solare Stadtentwicklung und für einen solaren Stadtumbau anzuwenden. Die Umsetzung des Niedrighausstandards und Passivhausstandards zur Gewährleistung ei-

ner städtischen solaren NT-Wärmeversorgung ist als Bedingung im Planungsprozess festzulegen.

Die NT-Wärmeversorgung ist im EEWärmeG und im Rahmen des sogenannten Marktanzreizprogramm zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (MAP) in Verbindung mit der Planung von Nahwärmenetzen für städtische Quartiere im Rahmen der Förderung von erneuerbaren Energien zur Erzeugung von Wärme und Kälte aufzunehmen.

Die Nutzung von solarer Strahlungsenergie über städtische versiegelte und unversiegelte Flächen ist nach Maßgabe des Gesetzes so festzulegen, dass der Wärmeenergiebedarf zu mindestens 100 Prozent aus solarem Potenzial von städtischen Quartieren gedeckt wird.

Die Pflicht zur NT-Wärmeversorgung kann erfüllt werden, dass Verpflichtete, deren Gebäude in räumlichem Zusammenhang stehen, ihren Wärmeenergiebedarf insgesamt durch mehrere Anlagen zur Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Energien decken. Der Betrieb von Kollektormodulen und die Leitungsverlegung sind durch die Benutzung der Grundstücke durch Nachbarn zu dulden. Erneuerbare Energien und Ersatzmaßnahmen sind zur Erfüllung der Pflicht nach dem Gesetz untereinander und miteinander zu kombinieren. Der Anschluss- und Benutzungszwang zur Abnahme der NT-Wärme ist durch ein Netz der öffentlichen Nah- oder Fernwärmeversorgung festzulegen, auch zum Zwecke des Klima- und Ressourcenschutzes. Auf der Grundlage von § 9 Abs. 1 Nr. 23 b BauGB ist die Festsetzung eines Anschluss- und Benutzungszwang nicht gegeben. Als Rechtsgrundlage sind Gemeindeordnungen in Verbindung mit §16 EEWärmeG anzusetzen. Die Regelungen lassen in der Regel für Neubaugebiete die Festlegung eines Anschluss- und Benutzungszwanges für die Nutzung von öffentlichen Nah- und Fernwärmenetzen auch zum Zwecke des Klima- und Ressourcenschutzes zu.

Die kommunale Energieversorgung ist für die Planung und dezentrale Nutzung von NT-Wärmeversorgungsnetzen zu gewinnen, damit das solare Wärmepotenzial von städtischen Oberflächen und Bodenschichten den Endenergienutzern als Wärme bereitgestellt werden kann. Unterstützend ist die Förderung der Autonomie zur selbständigen Wärmeversorgung von Kommunen und Gemeinden. Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ist geeignet die NT-Wärmeversorgung als festen Bestandteil der städtischen Nahwärmeversorgung aufzunehmen. Für die Zulassung des Neu- und Ausbaus von Wärmenetzen ist ein Vorbescheid durch den Wärmenetzbetreiber beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle zu stellen, wenn der Neu- oder Ausbau des Wärmenetzes die Voraussetzungen erfüllt.

Die Planung und Nutzung von unversiegelten städtischen Flächen und Flächen zur Nutzung des solaren Potenzials im städtischen Umland ist durch das Bundesnaturschutzgesetz festgelegt. Der Schutzanspruch von Natur und Landschaft und die biologische Vielfalt, die Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts, seine Regenerationsfähigkeit, die nachhaltige Nutzung von Naturgütern, Vielfalt und Schönheit von Natur und Landschaft sind dauerhaft zu sichern.

### Solares Wärmepotenzial von versiegelten und unversiegelten urbanen Flächen

Der Vergleich der untersuchten Modellgebiete in Klimaregionen zeigt, dass der solare Wärmeertrag über versiegelte und unversiegelten Flächen für eine NT-Wärmeversorgung für städtische Quartiere insbesondere von den saisonalen meteorologischen Verhältnissen, städtischem Versiegelungsgrad, Siedlungskategorien, Gebäudetypologien und von der Baudichte und Wärmebedarfsdichte abhängig ist. Die beigefügte Daten-CD stellt die Ergebnisse der Untersuchung zur solaren Potenzialanalyse für eine NT-Wärmeversorgung von urbanen Modellgebieten dar. Die nachstehende Tabelle zur Berechnung des solaren Potenzials zeigt den mittleren jährlichen solaren Wärmeertrag von versiegelten und unversiegelten Flächen am Beispiel der Stadt Köln. Der durchschnittliche jährliche solare Wärmeertrag von städtischen Flächen für die NT-Versorgung von Gebäuden ist nachstehend dargestellt:

	Stadt Köln		Südlich ausgerichtete Dachflächen (m <sup>2</sup> ) mit Faktor 0,5		Städtische Flächen als Tragschichten (Asphalt/Beton)	Unversiegelte städtische Flächen		
	Städtische Bodenfläche gesamt (m <sup>2</sup> )	versiegelte und unversiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche (m <sup>2</sup> )	Wohngebäude (thermische Solaranlage)	Gewerbe- und Industriegebäude (thermische Solaranlage)	Straße, Weg, Platz (Albedo 0,5)	Grünflächen	Landwirtschaft	Abbauland (Renaturierung und Bodenabbaufächen)
km <sup>2</sup>	405,02	247,57	60,63	20,73	40,14	35,04	68,83	0,95
m <sup>2</sup>	405.020.000,00	247.570.000,00	60.630.000,00	20.730.000,00	40.140.000,00	35.040.000,00	68.830.000,00	950.000,00
mittlere jährliche solare Strahlungsleistung (kWh/m <sup>2</sup> a)	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
mittlere Solare Stunden/a	2.400,00	2.400,00	2.400,00	2.400,00	2.400,00	4.800,00	4.800,00	4.800,00
Faktor (Albedo, Technischer Nutzungsgrad)	0,5	0,5	0,8	0,8	0,5	0,3	0,3	0,3
Gesamt solares NT-Wärmepotential (kWh/a)	24.301.200.000,00	14.854.200.000,00	4.656.384.000,00	1.592.064.000,00	2.408.400.000,00	1.261.440.000,00	2.477.880.000,00	34.200.000,00
JHW-Bedarf Gebäude (kWh/a)	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00	30.000,00
<b>solare NT-Versorgung für n-Gebäude / Haushalte</b>	<b>810.040,00</b>	<b>495.140,00</b>	<b>155.212,80</b>	<b>53.068,80</b>	<b>80.280,00</b>	<b>42.048,00</b>	<b>82.596,00</b>	<b>1.140,00</b>

Tabelle 11: Solares NT-Wärmepotenzial für die Gebäudeversorgung der Stadt Köln

Die Anzahl (n) der mit solarer NT-Wärme zu versorgenden Gebäude, auf der Berechnungsgrundlage der städtischen Gesamtfläche mit thermischen Solaranlagen auf Gebäuden, wird für die Stadt Köln mit n=810.040 prognostiziert. Die Gesamtdachflächen der städtischen Gebäude versorgen mit thermischen Solaranlagen 208.000 Gebäude. Unver-

siegelte Flächen des Stadtgebietes stellen ein solares Wärmepotenzial für die NT-Wärmeversorgung für 124.600 Gebäude zur Verfügung. Die Analyse des solaren Potentials in urbanen Gebieten zeigt, dass eine tägliche Datenerfassung der meteorologischen und geophysikalischen Verhältnisse am Versorgungsstandort erforderlich ist. Es ist daher unerlässlich geothermische, geologische und meteorologische Standortdaten täglich zu messen und zu analysieren, damit eine wirtschaftliche und effiziente NT-Wärmeversorgungsplanung von städtischen Quartieren erfolgen kann.

Die Flächendaten der städtischen Bodenflächen nach Art der tatsächlichen Nutzung stehen in der Regionaldatenbank (Stand 31.12.2015) zur Verfügung. Als Grundlage zur Auswertung der Modellgebiete sind Bauleitpläne (Flächennutzungsplan, rechtskräftiger Bebauungsplan mit Satzung) ausgewertet worden.

Die Ergebnisse der Flächenauswertung von Städten zeigen, dass aufgrund eines hohen städtischen Versiegelungsgrades durch versiegelte Flächen wie Gebäude-, Straßen-, Wege- und Stellflächen ein solares Wärmepotenzial und gleichzeitig ein Bodenwärmepotenzial zur Verfügung stehen. In hoch verdichteten städtischen Quartieren einer Stadt von 100.000 bis 500.000 Einwohnern stehen aufgrund des günstigen Verhältnisses zwischen Gebäudehöhe und Straßenbreite großflächige solare Nutzflächen mit Geh-, Radweg, Parkbuchten und Fahrbahnfläche zur Verfügung. Innerstädtische Stellplatzflächen erweitern das Flächenangebot mit Gebäudedach- und Fassadenflächen von Parkhäusern, Großgaragen in Stadtzentren oder integrierten Stellplatzflächen. In Städten von 20.000 bis 50.000 Einwohnern verringern sich die innerstädtischen solaren Nutzflächen. Die großflächigen Stellplatzflächen sind dezentral im urbanen Stadt und am Stadtrand als Park & Ride Angebote angeordnet. Industrie-, Gewerbe- und Sondergebiete (Erholung, Sport, Schulen, Gesundheit) zeichnen sich aus über großflächige Stellplatzflächen auf dem Betriebsgrundstück sowie Dach- und Fassadenflächen. Gemeinden bis 5.000 Einwohnern weisen ein reduziertes versiegeltes Flächenangebot im Vergleich zu städtischen Quartieren auf. Nutzbar für die NT-Wärmeversorgung versiegelte Flächen stehen im Außenbereich als ausgewiesene Gewerbegebiete zur Verfügung. Eine Nahwärmeversorgung ist nicht vorhanden. Das NT-Wärmeangebot ist über Nahwärmeleitungen zum Gemeindekern oder zu benachbarten Wohngebieten (MFH) mit einer hohen Wärmebedarfsdichte zur Verfügung zu stellen. Nutzbar unversiegelte Flächen stehen im städtischen Umland als landwirtschaftliche Nutzflächen und als Park- und Grünflächen in Städten zur Verfügung.

Die Berechnungsgrundlage der solaren NT-Wärmerversorgung von Modellgebieten stützt sich auf die Festlegung eines in städtischen Quartieren häufig vorkommendes Referenzgebäude mit einer Grundfläche von 200m<sup>2</sup>, Wohnfläche von 780m<sup>2</sup> mit drei Geschossen, ausgebautem Dachgeschoss und einem nach Süden geneigten Satteldach. Die Berechnung des jährlichen Jahresheizwärmebedarfs ist mit dem bauphysikalischen Berechnungsprogramm der Universität Siegen erfolgt. Die mittleren Jahressummen der Globalstrahlungswerte für Städte in Regionen sind der solaren Strahlungskarte basierend auf Sattelitendaten und Bodenwerten des Deutschen Wetterdienstes entnommen worden. Die Datenwerte der untersuchten Modellgebiete in Städten nach Klimaregionen sind in den nachstehenden Tabellen dargestellt. Die Auswertung erfolgt nach Klimaregionen, Versiegelungsgrad, Anteil der NT-Versorgung durch solarthermische Anlagen und Anteil der solaren NT-Versorgung nach Kollektormodulen von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen an der Gesamtfläche des Modellgebietes. Die detaillierte Darstellung der tabellarischen Berechnung ist der beiliegenden Daten-CD zu entnehmen.

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse und Datenwerte führt zu folgenden Ergebnissen:

- Der Datenvergleich des jährlichen Jahresheizwärmebedarfs des Referenzgebäudes von 12 Klimaregionen zeigt geringfügige Unterschiede. Die mittlere solare Globalstrahlung der Klimaregionen hat geringen Einfluss auf das solare Potenzial von städtischen Flächen in den jeweiligen Klimaregionen.
- Die Gebietsausweisung Sondergebiete (SO) mit einem hohen Versiegelungsgrad für die Nutzung Schule, Krankenhaus, Gemeinschaftszentrum etc. stellt ein hohes solares NT-Wärmepotenzial bis zu 65% zur Verfügung. Das solare NT-Wärmeversorgungspotenzial wird über die städtische Wärmeinsel (SO) generiert und für die Wärmeversorgung benachbarter städtischer Baugebiete bereitgestellt.
- Allgemeine Wohngebiete (WA/WR) mit einem hohen Grünflächenanteil stellen ein solares Wärmepotenzial bis zu 75% für die NT-Wärmeversorgung des urbanen Gebietes zur Verfügung. Dachflächen der Einfamilienhausbebauung eignen sich für eine dezentrale Wärmeversorgung mit solarthermischen Anlagen, da das solare Wärmepotenzial nur für den Eigenbedarf bereitgestellt werden kann für eine effiziente und wirtschaftliche Tagesversorgung.

- Urbane Gebiete mit innerstädtischen Kerngebieten, die einen hohen Versiegelungsgrad aufweisen, stellen einen Anteil von solarem NT-Wärmepotenzial bis zu 22% zur Verfügung.
- Landwirtschaftliche Nutzflächen stellen als „solare Energieerzeugungsflächen“ aufgrund der Verschattungsfreiheit und hoher Wärmespeicherfähigkeit ein ganzjähriges NT-Wärmepotenzial zur Verfügung. Die Nutzflächen befinden sich im städtischen Umland und erfordern einen Anschluss an die städtische leitungsgebundene Wärmeversorgung (Nahwärmenetze). Die Länge der Wärmeversorgungsleitungen führen zu einer Abnahme des Wirkungsgrades und zu Wärmeverlusten.
- Innerstädtische großflächige Grünanlagen und Nutzflächen mit Zweckbestimmung als Stellplatzflächen erzeugen ganzjährig ein solares NT-Potenzial. Zur saisonalen Wärmespeicherung des solaren Wärmepotenzials ist ein zentrales städtisches Wärmespeicheranlagenetz erforderlich. Die Versorgung mit NT-Wärme wird dezentral den benachbarten städtischen Quartieren über kurze Nahwärmenetzlängen zugeführt.
- Inselstandorte verfügen über großflächige Freiflächen mit sandigen Böden, die ein ganzjähriges solares Wärmepotenzial von anstehenden Bodenschichten generieren. Die leitungsgebundene Wärmeversorgung ist aufgrund der kurzen Nahwärmenetzlängen effizient und wirtschaftlich. Ein Wärmespeicheranlagenetz ist zur Versorgung für angrenzende verdichtete urbane Gebiete vorzuhalten. Die Wärmebedarfsdichte von Städten und Gemeinden ist geringer als in urbanen Gebieten auf dem Festland.
- Die Auswertung von Gebäudedachflächen in den untersuchten urbanen Gebieten zeigt, dass ein hohes solares Wärmepotenzial von südlich geneigten Flächen ganzjährig zur Verfügung steht. Das über solarthermische Anlagen generierte Wärmepotenzial in hochverdichteten urbanen Gebieten ist zusammenzuführen und in zentralen Latentwärmespeicheranlagen für die saisonale Wärmeversorgung vorzuhalten. Insbesondere großflächige Gebäude von Industrie- und Gewerbegebieten (Wärmeinsel) sind geeignet über solarthermische Anlagen das solare Wärmepotenzial für den Heizwärme- und Warmwasserbedarf den städtischen Quartieren über Nahwärmenetze zuzuführen.
- Gebietsausweisungen (MI, MK) mit einem hohen Versiegelungsgrad an städtischen Flächen unterstützen anteilig bis zu 11% die eigene NT-

Wärmeversorgung von Gebäuden des urbanen Gebietes. Die Zuführung der solaren NT-Wärme ist dem Wärmeversorgungsnetz zur Bereitstellung von Warmwasser saisonal zur Verfügung zu stellen.

- Das solare Wärmepotenzial von versiegelten urbanen Flächen (Straßen und Plätze) in MI und MK-Gebieten führt zu einer geringen NT-Wärmeversorgung, da die nutzbaren solaren Straßenflächen durch die verdichtete Bebauung stark eingeschränkt werden. Der Einfluss der Verschattung durch angrenzende Gebäude mit einem städtebaulichem Maß von größer als 1:1 führt zu einer reduzierten Nutzung der ganzjährigen solaren Strahlung. Das Potenzial der oberflächennahen Geothermie steht bis zu einer Tiefe von 20m in urbanen verdichteten Gebieten zur Verfügung. Einschränkungen sind für die technische Auslegung von Kollektormodulen durch die Verdichtung der städtischen Versorgungsleitungen zu erwarten.
- Die Grundvoraussetzung für die wirtschaftliche Nutzung von oberflächennaher Erdwärme aus Bodenschichten oder wassergesättigten Sedimenten (unversiegelte Flächen) in den untersuchten urbanen Gebieten ist ein hohes Wärmetransportvermögen des Untergrundes. Eine wichtige Kenngröße ist hier die Wärmeleit- und Wärmespeicherfähigkeit.

Die städtischen Quartiere sind in folgenden Städten von 12 Klimaregionen als Modellgebiete untersucht worden:

- Stadt Meiningen
- Hansestadt Bremen
- Hansestadt Hamburg
- Stadt Freiburg i. Breisgau
- Stadt Gera
- Stadt Bonn
- Stadt Duisburg
- Gemeinde Gerolstein
- Gemeinde Oppenau i. Schwarzwald
- Insel Helgoland
- Burg auf Fehmarn
- Garmisch-Partenkirchen

Die beigelegte Daten-CD stellt die Methodik der Auswertung wie auch die Datenerhebung und Datenanalyse der Modellgebiete dar.

1	2	3	4	5	6	Gesamt solare Niedrigtemperaturwärmeverorgung über n-WE							solare NTW-Versorgung ohne solares Dachflächenpotenzial			14 (Sp13x100 /Sp14)	Meinungen
						7	8	9	10	11	12	13	n WE Referenzgebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl gesamt A=200m²	solare NTW-Versorgung in % von Gesamfläche Gebäude ohne technische Solarthermie		
Modellgebiete (MG)	Gesamtfläche nach B-Plan (m²)	Versiegelungsgrad gesamt (%)	Gesamtfläche Gebäude (m²)	Gebietsausweisung nach BauNVO	Solares Potenzial Dachflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Solares Potenzial Straßenflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Solares Potenzial Grünlandflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Summe n-Anzahl Wohneinheiten bezogen auf Referenzgebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl gesamt A=200m²	11 (Sp10x100 /Sp11)	12 (Sp 7+8)	13 (Sp12x200)	14 (Sp13x100 /Sp14)	Meinungen			
MG 1	13000	20	2600	WA	6	0	3	9	1800	69,23077	3	600	23,07692	Meinungen			
MG 2	6936	21,10727	1464	SO/MI	1	0	0	1	200	13,6612	0	0	0	Meinungen			
MG 3	96000	14,27083	13700	WA	30	2	29	61	12200	89,05109	31	6200	45,25547	Meinungen			
MG 4	111175	7,195862	8000	SO	18	1	6	25	5000	62,5	7	1400	17,5	Meinungen			
MG 5	76078	21,03105	16000	MI/SO	35	1	17	53	10600	66,25	18	3600	22,5	Meinungen			
MG 6	10614	27,13397	2880	MK	6	1	0	7	1400	48,61111	1	200	6,9444444	Meinungen			
MG 7	140000	1,114286	1560	SO	0	0	44	44	8800	564,1026	44	8800	564,1026	Meinungen			
MG 8	6250	51,04	1560	SO	3	0	2	5	1000	64,10256	2	400	25,64103	Meinungen			

1	2	3	4	5	Gesamt solare Niedrigtemperaturwärmeversorgung über n-WE							solare NTW-Versorgung ohne solares Dachflächenpotenzial			
					6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Modellgebiete (MG)	Gesamtfäche nach B-Plan (m <sup>2</sup> )	(Sp4/Sp2) Versiegelungsgrad gesamt (%)	Gesamtfäche Gebäude (m <sup>2</sup> )	Gebietsausweisung nach BauVO	Solares Potenzial Dachflächen bezogen auf JHV-Bedarf	Referenzgebäude Solares Potenzial	Strassenflächen bezogen auf JHV-Bedarf	Referenzgebäude Solares Potenzial	Grünlandflächen bezogen auf JHV-Bedarf	Summe n-Anzahl Wohnheiten bezogen auf Referenzgebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl gesamt A=200m <sup>2</sup>	Solare NTW-Versorgung in % (Sp10xSp10) /Sp4	Solare NTW-Versorgung in % (Sp12x200) /Sp4	ohne technische Solartermie von Gesamtfäche Gebäude	16
MG 1	12000	100	12000	SO	34	0	0	34	0	6800	57	0	0	0	Bremen
MG 2	19000	89,4736842	17000	SO	48	1	0	49	0	9800	58	1	200	1,17647059	Bremen
MG 3	21600	55,5555556	12000	WA	34	1	3	38	0	7600	63	4	800	6,66666667	Bremen
MG 4	21600	18,5185185	4000	MI	11	0	8	19	0	3800	95	8	1600	40	Bremen
MG 5	50259	31,8350942	16000	WA/WR	45	2	16	63	0	12600	79	18	3600	22,5	Bremen
MG 6	25200	28,5714286	7200	WA/WB/MI/MK	20	8	0	28	0	5600	78	8	1600	22,2222222	Bremen
MG 7	130200	10,7528882	14000	WA	40	2	51	93	0	18600	133	53	10600	75,7142857	Bremen
MG 8	36000	44,4444444	16000	WA	45	4	6	55	0	11000	69	10	2000	12,5	Bremen
MG 1	178525	83,3333333	61717	SO	215	45	0	260	0	52000	84	45	9000	14,582692	Bremen
MG 8	36000	83,3333333	16000	WA	29	3	2	34	0	6800	43	5	1000	6,25	Bremen
MG 1	34236	29,3871948	10061	SO	29	1	8	38	0	7600	76	9	1800	17,8908657	Freiburg
MG 2	16200	30,6790123	4970	WA	15	2	3	20	0	4000	80	5	1000	20,1207243	Freiburg
MG 3	236250	0,77037037	1820	SO	0	4	0	4	0	800	44	4	800	43,956044	Freiburg
MG 4	1511845	11,4110243	172517	SO	506	14	460	980	0	196000	114	474	94800	54,9511063	Freiburg
MG 5	7738	64,9134143	5023	WA	15	1	0	16	0	3200	64	1	200	3,98168425	Freiburg

1	2	3	4	5	6	Gesamt solare Niedrigtemperaturwärmeversorgung über n-WE							solare NTW-Versorgung ohne solares Dachflächenpotenzial				
						7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Modellgebiete (MG)	Gesamtfläche nach B-Plan (m <sup>2</sup> )	Verriegelungsgrad gesamt (%)	Gesamtfläche Gebäude (m <sup>2</sup> )	Gebietsausweisung nach BauNVO	Solares Potenzial Dachflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Solares Potenzial Straßenflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Solares Potenzial Grünlandflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Summe n-Anzahl Wohnheiten bezogen auf Referenzgebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl (Sp9xSp10)	Referenzfläche Gebäudeanzahl gesamt A=200m <sup>2</sup>	solare NTW Versorgung in % von Gesamtfläche Gebäude	n WE Referenzgebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl gesamt A=200m <sup>2</sup>	solare NTW Versorgung in % von Gesamtfläche Gebäude ohne technische Solarthermie	19	20	21
MG 1	23576	63,7555141	15031	WA	33	2	21	58	11200	75	23	4600	30,6034198	Heigoland			
MG 2	85000	2,78923077	1800	WA	4	1	18	23	4800	256	19	3800	211,1111111	Heigoland			
MG 1	94402	9,00722442	8503	SO	12	1	27	40	8000	94	28	5600	65,8591085	Burg Fehmarn			
MG 2	24594	76,5389933	18824	MK	18	2	0	20	4000	21	2	400	2,12494688	Burg Fehmarn			
MG 1	105072	17,8591823	18765	SO	0	0	9	9	1800	10	9	1800	9,59232614	Bonn			
MG 2	23403	100	23403	MK	15	4	0	19	3800	16	4	800	3,41836517	Bonn			
MG 1	22772	66,0943264	15051	WA	34	1	1	36	7200	48	2	400	2,65763072	Gera			
MG 2	55142	55,1303906	30400	SO	5	9	4	18	3600	12	13	2600	8,55263158	Gera			
MG 3	44188	9,27853716	4100	SO	9	5	0	14	2800	68	5	1000	24,3902439	Gera			
MG 1	48248	66,3260653	32001	GE	20	7	2	29	5800	18	9	1800	5,62482422	Oppenau			

1	2	3	4	5	6	Gesamt solare Niedrigtemperaturwärmeversorgung über n-WE							solare NTW-Versorgung ohne solares Dachflächenpotenzial				
						7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Modellgebiete (MG)	Gesamtfläche nach B-Plan (m <sup>2</sup> )	(Sp4/Sp2)	Verriegelungsgrad gesamt (%)	Gesamtfläche Gebäude (m <sup>2</sup> )	Gebietsausweisung nach BauVO	Solares Potenzial bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Solares Potenzial Straßenflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Solares Potenzial Grünlandflächen bezogen auf JHW-Bedarf Referenzgebäude	Summe n-Anzahl Wohnheiten bezogen auf Referenzgebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl (Sp9xSp10)	Referenzfläche Gebäudeanzahl gesamt A=20m <sup>2</sup>	solare NTW-Versorgung in % (Sp 10x100 /Sp4)	solare NTW-Versorgung in % von Gesamtfläche Gebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl n WE Referenzgebäude	Referenzfläche Gebäudeanzahl gesamt A=20m <sup>2</sup>	solare NTW-Versorgung in % von Gesamtfläche Gebäude ohne technische Solartermie	
MG 1	54900	0	0	0	SO Parkanlage	0	0	16	16	3200	3200	0	0	16	3200	0	Duisburg
MG 2	35244	22,1711497		7814	SO	17	1	0	18	3600	3600	46	46	1	200	2,55950857	Duisburg
MG 3	46374	33,8120499		15680	SO	8	2	0	10	2000	2000	13	13	2	400	2,55102041	Duisburg
MG 4	632035	14,3268965		90551	SO Sportpark	99	8	15	122	24400	24400	27	27	23	4600	5,08001016	Versorgung
MG 5	143698	61,239544		88000	IG	94	12	41	147	29400	29400	33	33	53	10600	12,0454545	Versorgung
MG 6	11338	84,3446816		9563	WA	13	1	0	14	2800	2800	29	29	1	200	2,09139391	Duisburg
MG 7	126881	22,1309731		28080	SO Schule	36	2	10	48	9600	9600	34	34	12	2400	8,54700855	Duisburg
MG 8	111114	26,3045161		29228	SO Klinik	37	2	3	42	8400	8400	29	29	5	1000	3,42137676	Duisburg
MG 1	298832	54,6005783		163164	IG	189	18	32	239	47800	47800	29	29	50	10000	6,12880292	Gerolstein
MG 1	36000	83,3333333		16000	lanw.Nutzfl	0	0	45	45	9000	9000	56	56	45	9000	56,25	Garmisch
MG 2	9647	100		9647	SO Kur	5	2	0	7	1400	1400	15	15	2	400	4,14636675	Garmisch
MG 3	25149	94,0355481		23649	Stellplatz	4	5	0	9	1800	1800	8	8	5	1000	4,22850861	Garmisch
MG 1	73305	31,6799673		23223	MI	46	5	0	51	10200	10200	44	44	5	1000	4,30607587	Hamburg
MG 2	17300	61,0924855		10569	MK	21	1	0	22	4400	4400	42	42	1	200	1,89232662	Hamburg
MG 3	26993	25,1102138		6778	MK	14	4	0	18	3600	3600	53	53	4	800	11,8028917	Hamburg

## Meteorologie und solare Strahlung

Der meteorologische Datenvergleich von Klimaregionen in Deutschland durch Langzeitmessungen des Deutschen Wetterdienstes zeigt, dass insbesondere die Regionen des nördlichen und südlichen Oberrheingrabens, Franken und nördliches Baden-Württemberg weit höhere mittlere Jahrestemperaturwerte aufweisen als das westdeutsche Tiefland, Nord- und Ostseeregion oder die Schwarzwaldregion. Der Datenvergleich zwischen maximalen Lufttemperaturwerten und minimalen Lufttemperaturwerten zeigt, dass im südlichen Oberrheingraben, in der Region Franken, im Ruhrgebiet, Donaubecken und in der Bodenseeregion die größte jährliche Temperaturdifferenz zwischen den Monaten Juli-August und in den Monaten Januar und Februar besteht. Eine deutliche Erhöhung der Globalstrahlungswerte ist in den genannten Regionen nachgewiesen worden. Die Auswertung der solaren Strahlungskarten der Regionen zeigt, dass in den Klimaregionen mit den höheren mittleren Jahrestemperaturwerten solare Globalstrahlungswerte zwischen 800 und 1150kWh/m<sup>2</sup> gemessen worden sind. Der Datenvergleich zwischen den solaren Globalstrahlungswerten und den mittleren atmosphärischen Lufttemperaturwerten lässt die Auswirkungen auf das solare Wärmepotenzial von urbanen Flächen aufgrund von verschiedenen Einflussfaktoren nicht nachweisen. Die täglichen Messdatenwerte der Solarstunden stellen eine Momentaufnahme der mittleren solaren Strahlung in urbanen Gebieten dar, da durch Bewölkungsgrad, Schattenbildung und Windströmungen die solare Strahlungsleistung beeinflusst wird. Durch die Erhöhung der Temperaturdifferenz der atmosphärischen Lufttemperaturwerte ist ein Anstieg des Wärmepotenzials in den Bodenschichten durch Erwärmung der urbanen Luftmassen in Feldversuchen nachzuweisen. Die standortbezogenen meteorologischen Daten stehen als Jahresmittelwerte der Klimaregionen in Klimadatenreihen der Wetterdienste zur Verfügung. Zur Analyse der instationären Einflussgrößen aufgrund der geographischen Lage und meteorologischen Situationen wie solaren Strahlungswerten, Solarstunden, Lufttemperaturwerten, Bewölkungsgrad in Klimaregionen und urbanen Gebieten ist in städtischen Quartieren ein standortbezogenes meteorologisches engmaschiges Messstationennetz vorzuhalten. Der Vergleich meteorologischer Messdatenwerte zeigt, dass im Jahresmittel die solaren Strahlungswerte, Anzahl der Regentage, Bewölkungsgrade und atmosphärischen Lufttemperaturwerte in den Klimaregionen deutlich voneinander abweichen. Die Messergebnisse sind als Korrekturfaktoren zur Berechnung der Wärmeflussdichte in versiegelten und unversiegelten Flächen anzuwenden.

Die Windgeschwindigkeiten in urbanen Gebieten sind gegenüber dem städtischen Umland durch Luftströmungsmessungen nachgewiesen worden. Die durch die städtische Bebauung erhöhte Bodenrauigkeit verhindert die freie Strömung der Luftmassen und kann im Jahresmittel bis zu 30% niedriger als im städtischen Umfeld sein. Die Häufigkeit von windstillen Zeiträumen nimmt bis zu 20% in Städten zu. Infolge der täglich wechselnden atmosphärischen Temperaturschwankungen zwischen der Grenzschicht (Luft) oberhalb von städtischen Oberflächen und anstehenden Bodenschichten bilden sich Temperaturschwankungen und Änderungen der Wärmestromrichtung durch die stündlich wechselnden Oberflächentemperaturwerte infolge des Abkühlens oder Erwärmens der atmosphärischen Luftmassen.

Die städtischen Lufttemperaturwerte sind im Vergleich zum städtischen Umland im Jahresmittel um 1 bis 2K erhöht. Im Fall von Minustemperaturwerten während der Heizperiode entstehen durch die urbanen und anthropogenen Einflüsse Lufttemperaturunterschiede, die während den Nachtstunden 10 bis 15K betragen. Die langwellige atmosphärische solare Gegenstrahlung erwärmt die atmosphärischen Luftmassen und führt zu einem lokalen Treibhauseffekt in urbanen Gebieten. Das in Gebäuden und versiegelten Oberflächen tagsüber gespeicherte solare Wärmepotenzial wird durch kalte atmosphärische Luftmassen entzogen und führt folglich zur Erwärmung der städtischen Luftmassen. Forschungsergebnisse zeigen, dass das kurzwellige Reflexionsverhalten (Albedo) der solaren Strahlung an städtischen Oberflächen von der Farbgebung (Beton, Asphalt) und Oberflächenstruktur (Pflasterung) abhängig ist. Die Wirkung der reflektierten solaren Strahlung auf benachbarte urbane Flächen zur Erhöhung des Wärmepotenzials ist durch Thermographieaufnahmen und Temperaturmessungen nachzuweisen.

Die Bewertung der solaren Strahlung über Gebäudeflächen und städtischen Flächen in Regionen und Städten ist nach den digitalen PVGIS-solaren Strahlungskarten gegeben.<sup>959</sup>

Die Berechnung der solaren Erträge von nach Süden ausgerichteten thermischen Solaranlagen auf geneigten Gebäudedachflächen und Fassadenflächen wird durch Solaranlagenhersteller und Solarrechner in Abhängigkeit des technischen Anlagenwirkungsgrades gewährleistet.

---

<sup>959</sup>European Commission (JRC): PVGIS-Strahlungskarte – Yearly sum of global irradiation (kWh/m<sup>2</sup>). Authors: M. Suri, T. Cebecauer, T. Huld, E.D. Dunlop. 2001-2008. Information im Internet URL <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (2015).

## **Wärmebedarfsdichte und Nahwärmenetze mit NT-Wärmeversorgung**

Die Wärmebedarfsdichte von Städten und städtischen Quartieren ist ein wesentliches Planungskriterium für die NT-Wärmeversorgung. Aufgrund von GIS-Daten und digitalen Stadtplanungsportalen sind Siedlungskategorien, Gebäudeklassen sowie Gebäudekategorien auswertbar. Städte mit einem Wärmebedarfsdichteplan stellen eine Datenbasis für die solare Stadtentwicklungsplanung mit einer NT-Wärmeversorgung zur Verfügung. Die Wärmebedarfsdichte des städtischen Quartiers ist durch Endenergieverbrauchsdaten durch Energieversorgungsunternehmen zu korrigieren.

## **Dezentrale städtische NT-Wärmeversorgung**

Die Nutzung des solaren Wärmepotenzials von städtischen Flächen für die NT-Wärmeversorgung erfordert ein dezentrales Energieversorgungssystem für städtische Quartiere. Die Untersuchung der städtischen Infrastruktur anhand der Siedlungstypologie nach (Roth, 1980) und von urbanen Raummodellen von Städten zeigt, dass insbesondere die Bevölkerungsdichte, Gebäudeheizwärmebedarf und städtebaulichen Nutzflächen in Beziehung stehen. Die zentrale Wärmeversorgungsplanung ist in eine dezentrale solare städtische NT-Wärmeversorgung zu überführen. Die solare NT-Wärmeversorgung ist an ein städtisches Nahwärmeversorgungsnetz mit integrierten thermischen Langzeitspeichersystemen anzubinden. Thermische Solaranlagen von Dach- und Fassadenflächen sind zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit für die Warmwasserversorgung erforderlich. Unterstützende Energieanlagensysteme wie Kraftwärmekopplung, Heizkraftwerke, Blockheizkraftwerke, Biomasseanlagen sowie Wärmepumpen- und Erdwärmeeinrichtungen führen zu einer Sicherstellung der Wärmegrundlast. Unterstützend zur Steigerung des erforderlichen ganzjährigen Wärmepotenzials für innerstädtische Quartiere sind zusätzliche Anlagensysteme wie Erdwärmesonden, thermische Solaranlagen an Fassaden und Dachflächen, Kraftwärme-Kopplungsanlagen und Nahwärmenetze erforderlich. Zur Speicherung der gewonnenen solaren Wärme sind dezentral angeordnete quartierseigene Warmwasserspeichersystemnetze erforderlich.

Die Reduzierung des Heizwärmebedarfs von Bestandsgebäuden und die Umwandlung der konventionellen Wärmeversorgung in NT-Wärme als Fußboden- und Wandflächenheizung sowie zur unterstützenden Warmwasserversorgung stärkt die solare Stadtentwicklung mit einer saisonalen Abnahme des Wärmebedarfs. Der Stand der Forschung von Latentwärmespeichersystemen stützt sich insbesondere auf die Entwicklung von effizienten Wärmespeichern und Wärmedämmkomponenten auf der Basis von Salzhydrat und Na-

nomaterialien, die über ein Sol-Gel-Verfahren hergestellt werden. Die derzeitige Entwicklung des Speichermaterials in Latentwärmespeicheranlagen stützt sich auf Salzhydrat mit einem fest-flüssigen Phasenwechsel bei 29 °C. Bei konstanter Temperatur ist eine Speicherung von hohen Wärmemengen möglich. Phasenwechselmaterialien (engl. phase change materials - PCM) können im Bereich der Phasenwechseltemperatur große Wärmemengen speichern und gelten dadurch als hervorragendes Speichermedien für Anwendungen mit geringem Temperaturhub. Die Entwicklung innovativer Speicherkonzepte mit thermochemischen und latenten Wärme- und Kältespeicheranlagen sowie die Erprobung neuer Methoden zur Leistungsverbesserung von Latentwärmespeichern mit hocheffizienten Isolierungen sind in Forschungsprojekten weiter zu entwickeln.

### **Physikalischer Nachweis des solaren Potenzials von städtischen Flächen am Versorgungsort**

Das Oberflächenmaterial der Straßenflächen besteht insbesondere aus Beton, Asphalt, Pflastersteinen oder wassergebundenen Oberflächen. Ergebnisse von Feldversuchen zur Messung der Temperaturwerte in Tragschichten von Straßenoberflächen zeigen, dass in den Bodenschichten bis zu einer Tiefe von 40cm ein dem atmosphärischen Lufttemperaturverlauf abhängiges zeitlich versetztes Temperaturverhalten nachgewiesen werden kann. Ab einer Bodentiefe von mehr als 40cm stellt sich ein Temperaturverlauf mit geringen Temperaturveränderungen in den Bodenschichten unter versiegelten Flächen ein. Die Temperaturwerte sind ab einer Bodenschichttiefe von 2,00m zwischen 10°C bis 12°C ganzjährig konstant. Die Auswertung der Temperaturmessungen aus Modellvorhaben und Feldversuchen von versiegelten und unversiegelten Flächen zeigt, dass das Temperaturverhalten in den Bodenschichten durch den Bodenwärmestrom beeinflusst wird, der im Tages- und Nachtgang die vertikale Fließrichtung ändert. Zur Tageszeit wird die Wärmemenge mit einer Größenordnung von circa 45 W/m<sup>2</sup> von der Straßenoberfläche in den anstehenden Boden geleitet. Zur Nachtzeit hingegen bewirken die höheren Untergrundtemperaturen, dass der Bodenwärmestrom mit einem Betrag von circa 5 bis 20 W/m<sup>2</sup> in Richtung der Straßenoberfläche fließt. Der maximale Wärmeertrag des Bodens ist von den physikalischen Eigenschaften wie Dichte und spezifische Wärmekapazität der Bodenschichten abhängig.

Durch die Zirkulation der Trägerflüssigkeit wird sich der Bereich um die Kollektorsysteme abkühlen und somit einen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und eine Abnahme der spezifischen Wärmekapazität nach sich ziehen. Hydrogeologische Bedingungen wirken ins-

besondere auf den konvektiven Wärmetransport durch Grundwasseransammlungen. Die bestimmenden Faktoren der Entzugsleistung sind in Feldversuchen am Versorgungsstandort zu untersuchen. Die Wärmeenergiebilanz von versiegelten Flächen in städtischen Regionen gegenüber den unversiegelten Flächen außerhalb des bebauten Stadtgebietes wird durch die unterschiedlichen meteorologischen Verhältnisse, Bebauungsdichten und Infrastruktur für die Versorgung stark verändert.

Die Auswertung von Bodenmessdaten der Säkularstation Potsdam durch den Verfasser zeigt, dass sich in den anstehenden Bodenschichten aufgrund des täglichen atmosphärischen Lufttemperaturwechsels ein instationärer Wärmestrom bildet und innerhalb der Bodenschichten zeitlich versetzt übertragen wird. Unterhalb einer Bodenschichttiefe von 2,00m bis 12,00m bildet sich ganzjährig unter versiegelten wie unversiegelten Flächen eine mittlere konstante Bodentemperatur von 10°C bis 12°C je nach Wärmeleitfähigkeit der Bodenschichten. Die Auswertung langjähriger Bodentemperaturmesswerte der Referenzstation in Potsdam und Bodenmessstationen des Deutschen Wetterdienstes zeigt, dass die Einwirkung der solaren Strahlung während der Tagstunden zu einem zeitlich verzögerten Temperaturanstieg in den anstehenden Bodenschichten insbesondere unter unversiegelten Oberflächen führt. Der Vergleich der Bodentemperaturmesswerte an verschiedenen Bodenprofilen in den Regionen zeigt, dass aufgrund der instabilen solaren Strahlungsleistung und schwankenden Anzahl der täglichen solaren Stunden nicht auf eine deutliche Veränderung des monatlichen Wärmestromfließverhaltens im Boden geschlossen werden kann. Die Temperaturdifferenz zwischen den Grenzschichten der Bodenschichten verursacht einen Bodenwärmestrom, der während der Nachtzeit die Fließrichtung zu den abgekühlten Bodenschichten ändert. Der Wärmetransport stellt sich in den übereinanderliegenden Bodenschichten zeitversetzt ein. Das Potenzial der thermischen Ertragsleistung erhöht oder verringert sich aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit, Bodenfeuchte, Gehalt an organischem Material und Porenvolumen des anstehenden Bodens.

Die thermische Kapazität der Bodenschichten ist mit der vorhandenen Diffusivität des Bodens zu berechnen. Die numerische Simulation des Temperaturverhaltens und die thermische Entzugsleistung nach den standortbezogenen physikalischen Eigenschaften des Bodens sind in Feldversuchen nachzuweisen.

Aufgrund der saisonal sich reduzierenden spezifischen Wärmekapazität durch Abkühlung der Bodenschichten infolge des Wärmeentzugs ist eine Vereisung der Bodenschichten, insbesondere während der Heizperiode, durch geeignete Maßnahmen abzuwehren.

Die Schichttemperaturwerte von versiegelten Flächen zur Planung einer NT-Wärmeversorgung sind in Abhängigkeit der mittleren monatlichen und jährlichen solaren Strahlung durch Thermographie-Bildaufnahmen zu untersuchen. Zur Analyse der solaren Strahlungsverhältnisse unter Berücksichtigung der Verschattungsverhältnisse sind Simulationsprogramme zur technischen Auslegung von Kollektoren in versiegelten und unversiegelten Flächen in den Planungsprozess zu integrieren. Eine detaillierte Begutachtung der thermischen Speicherleistung durch solare Strahlung in städtischen Flächen und Bodenschichten ist durch Thermographieaufnahmen und Pyranometermessungen standortbezogen begleitend zu gewährleisten. Die mittlere tägliche Wärmeflussdichte von Bodenschichten ist in Feldversuchen nachzuweisen.

### **Technische Auslegung zur Umwandlung der solaren Wärme und Bodenwärme durch Kollektormodulsysteme**

Das Prinzip der künstlichen Erwärmung von Straßenoberflächen in den Wintermonaten durch innenliegende mit einem warmwassergeführten Rohrregister zur Verbesserung des winterlichen Straßenzustandes ist als Modellbeispiel für die solare NT-Wärmeversorgung anzusetzen. Die bautechnische Umsetzung zur Aufnahme und Weiterleitung der gespeicherten solaren Wärme erfolgte über ein solegeführtes Rohrregister in > 7cm Schichttiefe unterhalb der Belagsoberfläche in einem bituminösen Belag kombiniert mit Zementbeton.<sup>960</sup> Die Erweiterung des Rohrsystems ist für eine großflächige technische solare Wärmeaufnahme nicht ausreichend. Daher ist eine Auslegung von großflächigen in Trag- und Bodenschichten innenliegendes Kollektormodulsystem zur Aufnahme und Speicherung der solaren Wärme und Bodenwärme über städtische versiegelte und unversiegelte Flächen ist in städtischen Quartieren nach den vorhandenen städtebaulichen Verhältnissen angemessen zu planen. Eine horizontale und senkrechte Anordnung von Kollektormodulen unter städtischen Flächen erhöht die Reaktionsfläche zur Absorption des Wärmestrompotenzials in den Trag- und Bodenschichten. Die Steuerung des in den Trag- und Bodenschichten eingelassenen Modulsystems mit einem Zweirohrsystem (Kreislaufsystem für Wärme- und Klimakälteversorgung) erfolgt über Wetterinformationssysteme mit Schichtmessstellen zur Wärmelastregelung.

---

<sup>960</sup>Vgl.: Deutsches Ingenieurblatt: Eisfrei mit Erdwärme: Die Geothermie könnte auf unseren Straßen im Winter für mehr Verkehrssicherheit sorgen; Autor Dipl.-Ing. Kolks, Wilhelm; Ministerium für Bauen und Verkehr NRW: Dr.-Ing. Marzahn, Gero, 03 / 2007; <http://www.geoversi.nrw.de> (2007).

Zur Verbesserung des thermischen Übergangs zwischen den Kontaktflächen Boden und Kollektormodulaußenflächen ist ein wärmeleitendes Material mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit (Kupfer) erforderlich. Die Umwandlung der aufgenommenen Bodenwärme erfolgt in Kollektormodulen, die mit einem Wärmespeichermaterial, das eine hohe Wärmespeicherzahl besitzt, ausgestattet sind. Die Anordnung von Abstandhaltern zwischen den doppelwandigen Rohrsystemen vermeidet einen thermischen Kurzschluss zwischen Vor- und Rücklauf des Wärmeträgers. Doppelwandige Rohrleitungssysteme, die mit einem Wärmeträgerfluid (Sole) betrieben werden, entziehen dem Wärmespeichermaterial die gespeicherte Wärme. Die während der Tag- und Nachtzeit in den Trag- und Bodenschichten entstehenden richtungswechselnden Wärmeströme sind durch großflächige horizontal oder vertikal angeordnete Kollektorsysteme zu erfassen, zu speichern und in NT-Wärme umzuwandeln.

Die technische Umwandlung der in versiegelten, unversiegelten Flächen und in Bodenschichten saisonal generierten gespeicherten solaren Wärme in NT-Wärme erfolgt durch dezentrale Sole- und Wasserwärmepumpen des städtischen Quartiers. Dezentrale Wärmepumpenanlagen eignen sich für die NT-Wärmeversorgung mit niedrigen Vorlauftemperaturen für urbane Gebiete mit Bestandsgebäuden, die einen niedrigen Heizwärmebedarf vorweisen.

Die baulichen Anforderungen an Asphalt- und Betonfahrbahnen sind in den ZTV Asphalt-StB, für Betondecken und Vliesstoff in den TL Beton-StB bzw. den ZTV und für Pflasterdecken in den ZTV Pflaster-StB festgelegt. Bauweisen mit Asphaltdecken, Asphalttragschichten und hydraulisch gebundenen Tragschichten sind bauphysikalisch geeignet die saisonale Speicherung der solaren Wärme aufzunehmen. Verkehrsstraßen mit Betonfahrbahnoberflächen besitzen eine Schichtdicke von 50cm. Die unter den Tragschichten befindliche Frostschutzschicht von 15 bis 35cm besteht aus abgestuften Gesteinskörnungen mit geringem Feinkornanteil, damit die Wasserdurchlässigkeit sichergestellt ist. Die generelle Speicherung des saisonalen solaren Wärmepotenzials in den Tragschichten von Beton- und Asphaltfahrbahnschichten und das Speicherverhalten sind durch Feldversuche nachzuweisen und messtechnisch zu untersuchen.

Die bebauten Randzonen des städtischen Fahrbahnunterbaus begrenzen den Straßenkörper und erhöhen das Wärmepotenzial mehr als in der Mitte des Straßenkörpers. Ein Anstieg des Wärmepotenzials wird zusätzlich durch Abwärmeverluste von Abwasserleitungen sowie Fern- und Nahwärmenetzen in Bodenschichten unterstützt. Die ganzjährige Leistungsfähigkeit von Sandwich- oder Kollektormodulsystemen zur Erfassung von sai-

sonalen und tageszeitabhängigen Wärmeströmen in Trag- und Bodenschichten ist in Langzeitfeldversuchen zu untersuchen.

Messtechnische Untersuchungen durch Feldversuche zum Frostverhalten an versiegelten Asphalt- und Betonoberflächen während den Wintermonaten zeigen, dass unterhalb der versiegelten Fahrbahnoberfläche ein instationäres Temperaturverhalten in den Tragschichten nachgewiesen worden ist. Der Wärmetransport bildet sich zeitversetzt tagsüber durch die solare Strahlungseinwirkung in den Tragschichten aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmekapazität und Materialdichte. Die Auswertung von Bodenmesswerten, die unter versiegelten Straßenquerschnitten innerhalb von städtischen Quartieren gemessen worden sind, zeigt, dass sich in den Bodenschichten bis zu einer Tiefe von 60cm ein sinusförmiger Verlauf der Wärmeflussdichte bei gleicher Wärmekapazität bildet und sich zeitlich versetzt an die solare Strahlung angleicht. Ab einer Bodentiefe von größer als 60cm stellt sich ein gleichmäßiger Temperaturverlauf in den Bodenschichten unter den versiegelten Oberflächen des Straßenunterbaus ein. Ein stabiler Temperaturverlauf ist erst ab einer Bodenschichttiefe von 2,00m im und unter dem Bereich der Frostschutzschicht des Straßenkörpers innerhalb der Sommermonate nachweisbar. Die gegenseitige thermische Beeinflussung der Kollektormodule während der Leistungsaufnahme ist durch einen ausreichenden Abstand zwischen den Modulen zu gewährleisten. Eine Simulation der technischen Modulsysteme oder ein Thermal Response Test zur Analyse der thermischen Wirkungen auf anstehende Bodenschichten ist in Feldversuchen durchzuführen. Die Entzugsleistung und Speicherfähigkeit der Modulsysteme ist in Laboruntersuchungen nach Materialqualität, Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit nachzuweisen.

Die Größenordnung des Wärmestroms in Trag- und Bodenschichten von versiegelten und unversiegelten Flächen wird in der Fachliteratur als Minimal- und Maximalwert je nach Materialstärke und Bodenschicht angegeben, da städtebauliche, geologische und meteorologische Standortbedingungen in den Regionen variieren. Eigene modellierte Berechnungen zum Nachweis der thermischen Ertragsleistung von versiegelten Trag- und Bodenschichten bestätigen Werte zwischen  $5 \text{ W/m}^2$  bis  $120 \text{ W/m}^2$  in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Bodenschicht, Temperaturdifferenz und Wärmeleitfähigkeit. Während der Nachtzeit führt das Abkühlen der Bodenschichttemperaturen durch den Wechsel der atmosphärischen Lufttemperaturen dazu, dass ein mittlerer Bodenwärmestrom von  $5$  bis  $20 \text{ W/m}^2$  in entgegengesetzter Fließrichtung zur kühleren Bodenschicht geführt wird. Die Dichte der anstehenden Bodenschichten und die spezifische Wärmekapazität sind auf-

grund der vorhandenen thermischen Diffusivität zu berücksichtigen. Die Auswirkungen von hydrogeologischen Verhältnissen wie Niederschlags- und Grundwasservorkommen sind bei der Berechnung und Bewertung der Wärmeströme zu berücksichtigen.

### **13. Schlussbetrachtung**

Die wissenschaftliche Arbeit untersucht das solare Wärmepotenzial von versiegelten und unversiegelten städtischen Flächen in urbanen Gebieten zur Bereitstellung von Niedrigtemperaturwärme (NT) von Bestandsgebäuden in Städten unter standortbezogenen meteorologischen und oberflächennahen geothermischen Verhältnissen. Das Vorhaben erfordert einen interdisziplinären Forschungsansatz. Die Erforschung des solaren Wärmepotenzials von städtischen Flächen für die städtische dezentrale Quartiersversorgung ist der Grundlagenforschung zuzuordnen und bezieht sich insbesondere auf die Forschungsbereiche Thermophysik von Oberflächen und Bodenschichten, Geophysik, Architektur und Bauphysik. Städtebauliche solare Forschungsvorhaben mit einer regenerativen NT-Wärmeversorgung stellen hohe Anforderungen an die Regional- und Stadtentwicklung unter Berücksichtigung der städtischen Versorgungsinfrastrukturplanung.

Die These der wissenschaftlichen Arbeit wird durch die Berechnungsergebnisse der solaren Potenzialanalyse von städtischen Quartieren (Modellgebiete) bestätigt, dass eine saisonale solare NT-Wärmeversorgung ( $50^{\circ}/25^{\circ}$ ) für Städte über versiegelte und unversiegelte Flächen, Trag- und Bodenschichten und Gebäudeoberflächen gegeben ist.

Zur Umsetzung einer saisonalen solarunterstützten städtischen NT-Wärmeversorgung sind in der Phase der vorbereitenden Bauleitplanung zentrale und dezentrale quartiersbezogene Wärmeversorgungskonzepte mit Langzeitwärmespeicherstrategien gegenüberzustellen. Die detaillierte Berechnung der Wärmebedarfsdichte des mit NT-Wärme zu versorgenden urbanen Gebietes ist Voraussetzung im städtischen Planungsprozess. Versorgungsdaten über den täglichen Wärmebedarf von Gebäuden sind durch Energieversorgungsunternehmen bereitzustellen. Die solare NT-Wärmeversorgung steht in Konkurrenz zu der fossilen Wärmeversorgung mit Erdgas und Heizöl. Forschungsarbeiten zu Modellvorhaben und Feldversuchen zeigen, dass innovative- (solare) Stadtentwicklungsprojekte die Ziele des globalen Klimaschutzes zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen (2-Grad-Ziel) bis zum Jahr 2050 aktiv unterstützen.

Die tägliche solare Erwärmung und gleichermaßen Abkühlung von städtischen Flächen in den Nachtstunden ist von meteorologischen Schwankungen abhängig. Insbesondere ist die solare Strahlung, Windströmungsrichtung, Niederschlagsmenge und Bewölkungsgrad verantwortlich für das urbane solare Wärmepotenzial zur Bereitstellung von Niedrigtemperaturwärme. Instabile meteorologische Situationen in Regionen lassen eine solare Potenzialabschätzung im Planungsstadium nur zu, wenn standortbezogene Modellvorhaben

und Feldversuche durch meteorologische Messprogramme und bodenkundliche Untersuchungen begleitet werden.

Eine zentrale Herausforderung für die kommunalen Entscheidungsträger und Energieversorgungsunternehmen ist die Konzipierung einer städtischen dezentralen solaren NT-Wärmeversorgungsstrategie unter Berücksichtigung der zentralen Wärmeversorgungsstruktur. Kommunen können im Stadtentwicklungsprozess Energieversorgungsunternehmen und Stadtwerke gewinnen, um die Integration einer solaren NT-Wärmeversorgung mit Nahwärmekonzepten langfristig zu fördern. Eine Anpassung an das Vertragswesen zur Wärmelieferung, Anbindung an Kraft-Wärme-Kopplung und Nahwärmenetzen sowie die Entwicklung von Alternativen zu kommunalen Konzessionsverträgen sind zu untersuchen. Die Aufnahme der solaren NT-Wärmeversorgung mit einer dezentralen Warmwasserspeicherung in das Energiewirtschaftsgesetz und Erneuerbare-Energien-Gesetz ist langfristig durch Verbände herbeizuführen. Die Integration von regenerativen Energien in Städten unter Berücksichtigung einer solaren NT-Wärmeversorgung ist durch die aktive Einbindung des „Bürgers“ in städtische Planungsprozesse durch Kommunen und Entscheidungsträger zu fördern. Die Gründung von Energiegenossenschaften für eine autarke solare Quartiersversorgung mit Wärme, Kälte und Strom ist gesetzlich zu erleichtern.

Die regionale solare Strom-, Kälte- und Wärmeversorgung für Regionen mit Solar- und Erdwärmeversorgungssystemen, Niedrigtemperaturwärmenetzen und Fern- und einer Nahwärmeversorgung mit BHKW-Anlagen und CO<sub>2</sub>-armen Energieträgern erfordert eine nachhaltige Regionalentwicklung mit einer Beteiligung der regionalen und städtischen Energieversorger, Bürger, Institutionen und Verbände. Die solare Energieversorgungsplanung mit regenerativen Energien erfordert konkrete Planungsziele und angepasste Energieversorgungskonzepte und Leitbilder, die richtungsweisend für die NT-Wärmeversorgung in Städten und urbanen Quartieren stehen. Solare und nachhaltige Energieleitbilder für die „Strom-, Wärme- und Kälteversorgung“ in Regionen und Städten stellen die Planungsgrundlage dar zur Einbindung von Erdwärme, Biomasse und Windkraft. Die solare Wärme- und Kälteversorgung in Regionen erfordert Strategien für regionale Versorgungskonzepte, die das Steuerungsinstrument des regionalen Versorgungsnetzverbundes nutzen.

Wärmeverbundnetze in Regionen führen zu einer Kombination mit bestehenden Fern- und Nahwärmenetzen, die Überschusswärme aus dem Städte- Gemeindeverbund konzentrieren und die Einspeisung der NT-Wärme ermöglichen. Landesraumordnungsprogramme zur Planung der Energieversorgung in Regionen sind strategisch für eine solare NT-

Wärmeversorgung auszurichten. Der Ausbau von Wärmeverbundnetzen ist zwingende Voraussetzung für den weiteren Ausbau der NT-Wärmeversorgung sowie für die Einspeisung des solaren Wärmepotenzials von regenerativen Energien. Die politischen Ausbauziele der Bundesregierung für regenerative Energien sind mit der solaren regionalen und städtischen Energieversorgung durch Solarthermie, NT-Wärmeversorgung, Geothermie in Verbindung mit der Kraft-Wärmekopplung und Biomasse langfristig zu erreichen. Zur Förderung der energetischen Sanierung von Wohngebäuden im Bestand sind geeignete regionale Anreizprogramme für Solarstädte, die mit den solaren Ausbauzielen in Städten und Gemeinden der Solarregion korrespondieren, im Landesraumordnungsprogramm zu verankern.

Ein Anschluss- und Benutzungszwang an ein Netz der öffentlichen Nahwärme- oder Nahkälteversorgung in Gemeinden und Gemeindeverbänden ist nach Landesrecht zum Zwecke des Klima- und Ressourcenschutzes grundsätzlich festzulegen.

Die städtische solare NT-Wärmeversorgung ist strategisch an Nahwärmenetze zur Versorgung von städtischen Quartieren anzubinden. Großflächig versiegelte und unversiegelte urbane Gebiete stellen in Städten „Wärmeinseln“ dar, die geeignet sind, benachbarte urbane Gebiete saisonal zu versorgen und durch Vernetzung das solare NT-Wärmepotenzial über Latentwärmespeicheranlagen bereitzustellen. Die Förderung und Bereitstellung des solaren Wärmepotenzials von städtischen Flächen und des Bodenwärmepotenzials erfordern ein dezentrales städtisches Wärmeversorgungssystem.

Die Auswertung von Brachflächenkatastern in Städten zeigt, dass unbebaute Flächen geeignet sind, unter- und oberirdische Wärmespeicheranlagen zur saisonalen Unterstützung einer Quartiersversorgung für die städtische Energieversorgungsplanung zur Verfügung zu stellen. Das erzeugte Wärmepotenzial von thermischen Solaranlagen und Geothermie ist in Verbindung mit Nahwärmenetzen über zentrale Wärmespeicheranlagen zusammenzuführen.

Voraussetzung für eine flächenbezogene städtische solare NT-Wärmeversorgung ist eine Null-, Niedrigenergie- oder Passivhausbauweise. Die Untersuchungsergebnisse aus den Modellgebieten zeigen, dass die Versorgungssicherheit des ganzjährigen Heizwärme- und Warmwasserbedarfs von Bestandsgebäuden mit einem hohen Jahresheizwärmebedarf unterstützende Wärmeversorgungssysteme erfordert. Die Förderung von nachhaltigen Stadt-sanierungsprojekten im Rahmen des solaren Stadtumbaus verlangt eine energieeffiziente Bauweise von Gebäuden, damit effiziente Wärmeversorgungssysteme mit regenerativen Energien berücksichtigt werden können.

Im Rahmen der solaren Stadtentwicklung sind Planzeichen in der Planzeichenverordnung festzulegen als „Energieerzeugungsfäche für die solare NT-Wärme“ von städtischen Flächen und Böden. Die Planzeichenverordnung ist mit den Planzeichen „Energieerzeugungsfäche Straßen, Wege und Plätze, Stellplatzflächen“ und „Speicheranlagen für die Langzeitwärmespeicherung“ zu ergänzen.

Die Umsetzung von städtebaulichen Projekten und Modelvorhaben zur Entwicklung der quartiersbezogenen solaren NT-Wärmeversorgung erfordert Langzeitbeobachtungen und saisonale Messungen der meteorologischen und oberflächennahen geothermischen Verhältnisse am Versorgungsstandort. Wissenschaftlich begleitete Feldversuche und Laboruntersuchungen sind erforderlich, um die ganzjährige solare Ertragsleistung von versiegelten und unversiegelten städtischen Oberflächen sowie von anstehenden Bodenschichten aufgrund von meteorologischen und geothermischen Einflüssen zu untersuchen.

## Literaturverzeichnis

- (1) AGFW 2002: Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 2001. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme – AGFW – e.V., Frankfurt 2002.
- (2) Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW 2000): Pluralistische Wärmeversorgung: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. Schlussbericht der AGFW-Studie, Band 1. Wissenschaftliche Projektleitung: Pfaffenberger, W. Bremer energie institut, Bremen, Frankfurt, 2000.
- (3) Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW 2000): Pluralistische Wärmeversorgung: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. Schlussbericht der AGFW-Studie. Wissenschaftliche Projektleitung: Pfaffenberger, W. Bremer energie institut, Bremen, Band 2, Teil 1: Wärmeversorgung des Gebäudebestandes, Teil 2: Technologienentwicklung und- bewertung, Frankfurt, August 2001.
- (4) Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft (AGFW): Pluralistische Wärmeversorgung: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien (Kurztitel). AGFW Hauptstudie, 2. Bearbeitungsabschnitt, Band 1 wirtschaftliche Rahmendaten, räumlich verteilter Energiebedarf, digitale Wärmekarte. Wissenschaftliche Gesamtprojektleitung Pfaffenberger, W., Wissenschaftliche Mitarbeiter Eikmeier, B, Pfaffenberger, W, Schulz, W.. Bremer energie institut, Frankfurt, März 2004.
- (5) Baehr, H.D., Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 4. Auflage, 2003.
- (6) BauÖk Papiere: Passive Sonnenenergienutzung in der Bauleitplanung, Sicherung der passiven Sonnenenergienutzung in der Bauleitplanung – Entwicklung und Anwendung des Programmpakets GOSOL-II. Nr. 55, Universität Stuttgart Institut für Bauökonomie, ISBN 978-3-926603-23-4, 1994.
- (7) Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie: Hinweise zum Energiesparen. Informationen des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Technologie in Zusammenarbeit mit der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern und in Zusammenarbeit mit dem Bauzentrum München. Beiträge zu Ausgaben Nr. 2 – 47, München, 2000.
- (8) Behling, Stefan und Sophia: Sol Power. The evolution of solar architecture, ISBN 3791316702, 9783791316703, 1996.
- (9) Bischoff-Gauss, I.; Kalthoff, N.; Fiebig - Wittmaack, M.: Auswirkungen eines Stausees auf das regionale Klima in einem ariden Andental in Chile. Forschungszentrum Karlsruhe Deutschland, Institut für wissenschaftliches

Rechen (IWR) und Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK), Forschungszentrum Karlsruhe/Universität Karlsruhe, Deutschland. Centro de Investigación Atmosférica de La Serena, CIALS, Universidad de La Serena, Chile, 14. Juli 2009, S.1-5.

- (10) Bohne, Dirk., Scherer, Udo: Wärme- und Kälteerzeugung mit oberflächennaher Geothermie. Verfasser: Bähr Ingenieure. Erläuterungsbericht zur Brunnenwassernutzung, Köln, 2006; BRG Brunnenprüfdienst: Brunnenprüfbericht S1 und S2, Buch am Erlbach, 2005; Stadt Köln: Wasserrechtliche Erlaubnis zur Grundwasserförderung, Köln, UbeG: Bewilligungsantrag zur Förderung des bergfreien Bodenschatzes Erdwärme, Wetzlar, 2006.
- (11) Bremerhavener Energiemanagement Agentur GmbH, Prosys Gesellschaft für produktionsorientierte Umweltsystemtechnologien- und management mbH: Potenzialstudie zur Abwasserabwärmenutzung in Bremerhaven. Im Auftrag der Bremer Energie Konsens, Bremerhaven, Januar 2004.
- (12) Bundesamt für Energie (Hrsg.): Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser. Technisches Handbuch, Planungsvorgehen und Praxis. Leiter des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Professor Dr. M. Zogg, Dezember 2000.
- (13) Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.): Örtliche und regionale Energieversorgungskonzepte. Untertitel - Umsetzung städtebaulicher Konzepte der Schadstoffminderung -. Selbstverlag der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Band 34, Bonn 1996.
- (14) Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.): Raumordnerische Aspekte und städtebauliche Aspekte des Ordnungsrahmens für Strom und Gas. Heft 68, 1995.
- (15) Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung: Örtliche und regionale Energieversorgungskonzepte – Teil der Entwicklungs- und Bauleitplanung. Mannheim - Seminar, Heft 1, Mannheim, 1981.
- (16) Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.): Energieversorgungskonzept Süßen. Untersuchung zur Versorgung kleinerer Gemeinden mit Wärmeenergie. IFEU Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umwelttechnik mbH., Lauchheim. Projektleitung und Bearbeitung: Laistner, Hermann; Hölzer, Bernd; Jonasson, Günter., Schriftenreihe 03 „Städtebauliche Forschung“, Heft Nr. 03.104, 1984.
- (17) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten. Verfasser: Balke, K.-D., Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Tübingen, Kley, W. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Forschungsbericht T 81-028, Krefeld, Februar 1981.
- (18) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Einsatzgrenzen bei der Nutzung der Wärme aus kommunalem Abwasser mittels Wärmepumpen.

Verfasser: Dreschmann, P, Pöppinghaus, K., Forschungsanstalt für Wassertechnologie an der RWTH Aachen, Forschungsbericht T 85-074, Aachen, August 1985.

- (19) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Entwicklung einer durch Primärenergie angetriebenen Absorptionswärmepumpenanlage für die Beheizung von Wohnhäusern. Verfasser: Schrader, K.-H., Stiebel Eltron GmbH & Co.KG, Holzminden, Dezember 1986.
- (20) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Grundsätzliche Untersuchung über die Möglichkeit der Abwärmenutzung im Haushalt. Verfasser: Ebersbach, K.-F., Gossenberger, M., Layer, G.T., Poschenrieder, J., Wegner, M., Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Forschungsbericht T 79-92, München, Dezember 1979.
- (21) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Niedertemperatur-Wärmeverbund im Ballungsraum Speyer-Ludwigs-hafen – Frankenthal - Worms („kalte Fernwärme“). Verfasser: Nunold, K. u. Krebs, A., Arbeitsgemeinschaft PLENAR Niedertemperaturverbund vertreten durch Roll GmbH Frankfurt, BMFT-FB-T 82-215, Dezember 1982.
- (22) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Primärenergiesparende Energieversorgung der Wohnsiedlung „Neue Stadt Wulfen“, Stadtkern West durch Ausnutzung natürlicher Wärmespeicher. Verfasser P. Broich, Entwicklungsgesellschaft Wulfen mbH Dorsten, Juli 1986.
- (23) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): Untersuchung eines Modells der Wärmeversorgung aus Abwärme. Autoren: Ebert, G. und Somoneit, H.W., aus: Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co. Planungs – KG, München, BMFT-FB T 79-118, Dezember 1979.
- (24) Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg): Rationelle Energieverwendung im Rahmen der kommunalen Entwicklungsplanung. Schriftenreihe Städtebau, Heft 03.083, S. 9 ff., Bonn, 1980.
- (25) Bundesministerium für Raumordnung, Städtebau und Bauwesen: Örtliche und regionale Energieversorgungskonzepte. Band 25, Bonn 1990.
- (26) Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Novellierung des Baugesetzbuches. Bericht der unabhängigen Expertenkommission, Berlin, August 2002.
- (27) Bundes Umweltstiftung: Leitfaden für eine bedarfsgerechte und systemintegrierende Planung kleiner und mittlerer Wärmeverteilungssysteme. Projektbeteiligung durch Partner: Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik; UMSICHT, Oberhausen Kooperationspartner VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf; Saarberg Fernwärme GmbH, Stadtwerke Schwäbisch Hall GmbH, Stadtwerke Lemgo GmbH, GEF Leimen, PEF Berlin, GERTEC Essen, 1997-1999.
- (28) Chmielewski, F.-M. (Hrsg.); Fohen, Thorsten: Beiträge zur Klima- und Meeresforschung, Berlin und Bayreuth, 2003, S.91-101.

- (29) Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V.: Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft. Fachausschuss BIOMET, Nr. 3, 1989, S. 51 – 53.
- (30) Deutscher Wetterdienst (DWD): Datenbank Klimadaten deutscher Stationen. Städte in Klimazonen unterteilt in Klimazonen 1 - 15. Gradtagzahl und Heizgradtage nach VDI 2067 und VDI 3807. Veröffentlicht beim Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2010.
- (31) Diefenbach, Nikolaus: Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen. Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt, (IWU)- Bestellnummer 08/02. November 2002.
- (32) Diem, Paul.: Bauphysik im Zusammenhang. 2. Auflage, Bauverlag, 1996.
- (33) Dötsch, C., Huang, Li.: PCM Slurries als Hochleistungskältespeicher / Kälteträger. Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, 2006.
- (34) Düttemeyer, Dirk., Barlag, Andreas-Bent., Kuttler, Wilhelm: Planungsrelevante Stadtklimatologie am Beispiel der beabsichtigten Flächenumwidmung einer Industriebranche. Veröffentlicht im UVP-Report Nr. 18 (1), S. 21-26, 2004.
- (35) Ebel, W. et al: Siedlungskategorien, energetischer, ökonomischer und ökologischer Vergleich. Energiesparpotenzial im Gebäudebestand, Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) Darmstadt, 1990.
- (36) Ebert, Hans-Peter: Grundlagenaspekte in der aktuellen PCM-Forschung. BMBF Verbundvorhaben LWSnet, FKZ 03SF0307F, Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE Bayern), 2007.
- (37) Eder, M., Fink, C., Streicher, W., Themeßl, A., Weiss, W., et.al.: Heizen mit der Sonne. Arbeitsgemeinschaft Regenerative Energie, 1997.
- (38) Eikmeier, B., Schulz. W.: Digitale Wärmekarte Deutschlands. Aufbereitung, Konvertierung und Ergänzung von Gebäude- und Siedlungsdaten durch ein auf Statistiken und örtlichen Daten beruhendes Verfahren, Teil 3, bremer energie institut, 2003.
- (39) Eitel, B.: Bodenversiegelung: Folgen, Gegenmaßnahmen. Hausarbeit zum Referat am 14.05.1996 von Christian Steck, Hauptseminar „Mensch und Umwelt“ (SS1996), Universität Passau, 1996, S. 1-18.
- (40) Entress, Jörg., Steinborn, Friedhelm: Kombiniertes Einsatz von solarer Wärme und Kraft-Wärme-Kopplung – eine Perspektive für die Nahwärme. Veröffentlicht im Forschungsverbund Sonnenenergie „Themen 97/98“, Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, 1997/98, S.30-36.
- (41) European Environment Agency (Hrsg.): Die Umwelt in Europa: Der zweite Lagebericht. Städtische Umwelt (Kapitel 12), 1997.

- (42) Fink, C., Purkarthofer, G.: Garantierte Wärmelieferung aus thermischen Solaranlagen im Wohnbau. Arbeitsgemeinschaft Regenerative Energie, 2000.
- (43) Fink, C., Müller, A.: Thermische Sonnenenergienutzung im Mehrfamilienwohnbau. Arbeitsgemeinschaft Regenerative Energie, 1999.
- (44) Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg. Projektträger Jülich): Thermische Energiespeicherung – mehr Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen -. Freiburg, November 2006.
- (45) Fraktion Bündnis 90/der Grünen: Antrag der Fraktion Bündnis 90/der Grünen, Klimaschutz konkret: „Im Jahr 2020 müssen in NRW mindestens 25 % des Stroms in Kraft-Wärme-Kopplung produziert werden!“, Drucksache 14/4855, 2007.
- (46) Freie Universität Berlin: Abschlussbericht zur digitalen Bearbeitung der Thermaldaten für das Berliner Stadtgebiet. Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik, 1992.
- (47) Fromm, Bernhard: Natürliche Klimatisierung: Energieagentur Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Baupraxis Birkhäuser, 2004.
- (48) Freie Universität Berlin: Katalog meteorologischer Daten: Gradtagzahlen, Heizgradtage von Berlin-Dahlem, 2000-2005.
- (49) Gaentzsch, Günter: Das neue Baugesetzbuch 2004. Kommentar zum Baugesetzbuch, 2004.
- (50) GAISMA (Hrsg.): Sunrise, sunset, dawn and dusk times around the World - *Gaisma*, Sunrise, sunset, dawn and dusk times for the whole year in a graph, day length and changes in lengths in a table. Datenbank für Wetterdaten der Regionen und Städte weltweit, 2005 – 2010.
- (51) Gemeinsame Arbeitsgruppe der Umwelt- und Wirtschaftsministerkonferenz: Bericht zur Bewertung der Vorschläge der EU-Kommission zur integrierten Klimaschutz und Energiepolitik, Düsseldorf/Mainz, 12.02.2008.
- (52) GERTEC/ARENHA: Gebäudetypologie für verschieden Städte und Landkreise. Landkreis Nienburg/Weser, Schwalm-Eder-Kreis, Hannover, Bielefeld, Lübeck, Rostock, Erfurt, Duisburg, Solingen, Remscheid, Essen, Wiesbaden, 1988.
- (53) GIS - gestützte Konzeption zur umweltverträglichen Biomassenutzung in der Uckermark, Standortansprüche und Anbaumerkmale von Energiepflanzen, S.13-18.
- (54) Gossmann, H.: Satelliten Thermalbilder. Ein neues Hilfsmittel für die Umweltforschung? in: Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau, Nr.16, Bonn, 1984.
- (55) Grage, T. und Pareidt, H.: Innovative Kälteversorgung öffentlich genutzter Gebäude in Niedersachsen – Strategien der Kältebereitstellung unter

ökologischen und ökonomischen Kriterien. Fernwärme Forschungsinstitut in Hannover e.V., 2000.

- (56) Grage, T.: Fachthema Wärmeverteilung: Einsatzfähigkeit von Fernwärmerohrsystemen für die Kälteversorgung, Untertitel Klimatisierung und Prozesskälteversorgung, Fernwärme Forschungsinstitut in Hannover e.V., 2000, S.1-4.
- (57) Gross, G.: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Deutscher Wetterdienst (DWD): Modellversion MUKLIMO\_3, Klima- und Umweltberatung, Offenbach.
- (58) Großklos, Marc: Kumulierter Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und Energieversorgungen. Veröffentlicht über Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, S. 1 - 2, 9.01.2006.
- (59) Haberäcker, P.: Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen und Anwendungen, Hanser-Verlag, München, 1995.
- (60) Haussmann, Thomas., Schossig, Peter: Baustoffe mit Phasenwechselmaterialien als Kältespeicher für energieeffiziente Gebäude. Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (ISE), Freiburg.
- (61) Hegger, Manfred et al.: Nachhaltiges Entwerfen (Seminar)., Fachgebiet Entwerfen und energieeffizientes Bauen, TUD FB15. Technische Universität Darmstadt,
- (62) Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Erdwärmennutzung in Hessen. Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 KW, 2., überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2005.
- (63) Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (Hrsg.): Umweltprüfung in der Flächennutzungsplanung. Erfahrungsbericht. Lösungsvorschläge und offene Fragen am Beispiel des Flächennutzungsplans der Stadt Fulda – eine Handreichung, Planungsgruppe Natur und Umwelt, 1. Auflage, Juni 2006.
- (64) Hofmann, Karina: Erkundung und Nutzung geothermaler Energie. Geothermale Hydrogeologie, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Freiberg / Sachsen, Oberseminar Geoökologie.
- (65) Huenges, Ernst: Nutzbarmachung klüftig-poröser Speichergesteine zur abnehmernahen geothermischen Energieversorgung. GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ), Sektion 5.2 Geothermie – Potsdam (aDIS/BMS OPAC), 2005.
- (66) Hug, Rolf: Forschungserfolge für Wärme und Kälte aus Regenerativen Energien. Veröffentlichung in: Der Solarserver vom 15.11.2005, S. 1-6.
- (67) Huhn, Robert u. Tödter, Jens: Kurzbericht AIF 12588 B. Institut für Energietechnik. Technische Universität Dresden und Fernwärmeforschungsinstitut in Hannover e.V., Hemmingen, Dresden, S.1-9, 2002.

- (68) Impuls-Programm Hessen (Hrsg.): Energie-Pass Heizung/Warmwasser, Energetische Qualität von Baukörpern und Heizungssystemen. Institut Wohnen und Umwelt (IWU) Darmstadt, 1995.
- (69) Institut für Geographie und Raumforschung: Thermal-Nachtaufnahmen für Klimakarten (LANDSAT-TM). Universität Graz, 2008.
- (70) Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS): Möglichkeiten und Grenzen der Fernwärmeversorgung im Wohnungsbau. Minister für Landes – und Stadtentwicklung des Landes NRW, Wohnungsbau - Kommunalen Hochbau, Dortmund, 1981.
- (71) Institut für Wirtschaft und Umwelt (IWU): Entwicklung einer wärmetechnischen Wohngebäudetypologie für die neuen Bundesländer. Erhebung von Investitionskosten für die wärmetechnische Gebäudesanierung sowie Darstellung der besonderen Hemmnisse und erforderlichen Instrumente für die neuen Bundesländer. Teil A: Gebäudetypologie und Wohnungsbestand in den neuen Bundesländern. Vorläufiger Bericht für die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“, IWU / LBFI, 1994.
- (72) Institut für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Deutsche Gebäudetypologie, Dokumentation, Katalog, 2003.
- (73) Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Potenziale zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden in Hessen bis 2012. Studie im Rahmen von INKLIM 2012 (Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen 2012), April 2007.
- (74) Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Deutsche Gebäudetypologie, Systematik und Ansätze, Darmstadt, 18.12.2003.
- (75) Jordan, U., Vajen, K.: Load Profile on a One-Minute Time Scale. IEA-Task 26, Solar Combisystems, Stuttgart, Germany, 1999.
- (76) Kirchner, Brigitte: Mittlere Temperaturverteilung in austauscharmen Strahlungsnächten. Landeshauptstadt Dresden, Amt für Umweltschutz, Umweltatlas Dresden, 1996.
- (77) Klein, S.A., Beckmann, W.A et al.: A Transient System Simulation Program - Version 14.2 (TRNSYS). Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA, Vertrieb in Deutschland: Transsolar Energietechnik GmbH, Nobelstraße 25, 70569 Stuttgart, Deutschland.
- (78) Koblin, W. et al: Handbuch Passive Nutzung der Sonnenenergie. Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.), Bonn 1984, S.65.
- (79) Koeningsdorff, Roland., Reuß, Manfred: Erdwärmesonden als geothermische Wärmeüberträger; Technologie und Planungswerkzeuge, Hochschule Biberach und ZAE Bayern, 2009.
- (80) Köhler, Silke et al.: Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Aquiferspeicher, GeoForschungsZentrum Potsdam in

Zusammenarbeit mit der TU Berlin –Institut für Energietechnik-, Geothermie Brandenburg GmbH und der Umweltchemie Universität Lüneburg, 2004.

- (81) Krusche, M., Althaus, P., Gabriel, I.: Ökologisches Bauen. Bauverlag GmbH, 1982.
- (82) Kuttler, W., Barlag, A. - B.: Angewandte Stadtklimaforschung im Ruhrgebiet. Universität Essen, Fachbereich 9, Abt. Angewandte Klimatologie u. Landschaftsökologie Essen, 2002.
- (83) Kuttler, Wilhelm., Barlag, Andreas - Bent: Mehr als städtische Wärmeinseln. Angewandte Stadtklimaforschung: veröffentlicht in Essener Unikate 19/2002, S. 85-97.
- (84) Lammers, Gadso: Energie im Städtebau. Rahmenthema einer Vortragsreihe veranstaltet vom Institut für Städtebau und Landesplanung der Universität Karlsruhe (Hrsg.), Karlsruhe, 1982.
- (85) Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Solaratlas. Übersicht mittlere jährliche Solareinstrahlung (kWh/m<sup>2</sup>) in Baden-Württemberg, Juni 2007.
- (86) Landeshauptstadt München (Umweltschutzreferat) (Hrsg.): Umweltatlas München, Band II, Verlag Löhr & Partner GmbH, München, 1990.
- (87) Langniß, Ole., Pehnt, Martin (Hrsg.): Energie im Wandel. Politik, Technik und Szenarien einer nachhaltigen Energiewirtschaft. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt. Institut für Technische Thermodynamik, Pfaffenwaldring 38-40, Stuttgart. ISBN 3-540-41329-4, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2001.
- (88) Lippert, Michael: Energiewirtschaftsrecht. Gesamtdarstellung für Wissenschaft und Praxis, Fachverlag Deutscher Wirtschaftsdienst GmbH & Co.KG, Köln, 2002, ISBN 3-87156-501-6.
- (89) Loga, Tobias u. Knissel, Jens u. Diefenbach, Nikolaus u. Born, Ralf: Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils für Gebäude. Kurzverfahren Energieprofil, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Januar 2005.
- (90) Lohmeyer, G.: Praktische Bauphysik, Teubner-Verlag, 1995.
- (91) Mählenhoff, S.: Ökologische Folgen der Bodenversiegelung. in: Mitteilungen der Niedersächsischen Naturschutzakademie, 4/91, 1989, S. 6 – 16.
- (92) Mangold, D. u. Schmidt, T.: Status der solaren Nahwärme in Deutschland. Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT), Veröffentlichung des Vortrages von der Arbeitsgemeinschaft regenerative Energie (AEE Intec, Institut für Nachhaltige Technologien) auf der Status-Tagung „ Solare Kombianlagen für Mehrfamilienhäuser im europäischen Vergleich“, Graz, Österreich, 14.11.2003, S. 1-9.

- (93) Mangold, D.: Solare Nahwärme – Projekte, Potenziale, Perspektiven. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Stuttgart, S. 1-10, 2000.
- (94) Mangold, Dirk u. Müller-Steinhagen, Hans: Solar unterstützte Nahwärme mit Langzeit-Wärmespeicher in Deutschland, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Forschungskonzept Solarthermie 2000+ aus: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 1998, S. 1-7.
- (95) Mischner, Jens: Primärenergieeinsparung in der dezentralen Energieversorgung. Fachhochschule Erfurt, Fachbereich Versorgungstechnik, 2001 (aDIS/BMS OPAC).
- (96) Müskens, Andreas: Die Wärmeinsel der Stadt Münster, Diplomarbeit, Westfälischen Wilhelms - Universität Münster, Fachbereich Geowissenschaften, Institut für Landschaftsökologie, Gutachter: Prof. Dr. O. Klemm, Dr. T. Wrzesinsky, 2004.
- (97) Nachbarschaftsverband Stuttgart: Klimauntersuchung für den Nachbarschaftsverband Stuttgart und angrenzende Teile der Region Stuttgart (Klimaatlas), Stuttgart, 1992.
- (98) Nagl, Andreas: Geländeklimatologische Messungen mit Mobilgeräten, Diplomarbeit, Institut der Geographie der Friedrich - Alexander-Universität, Erlangen - Nürnberg, Betreuer: Dr. M. Richter, Rednitzhembach, 1997, S. 1-10.
- (99) Nast, Michael: Energiewirtschaftliche Bewertung integrierter Nahwärmesysteme auf der Basis von solarer Wärme und Kraft-Wärme-Kopplung. veröffentlicht im: „Arbeitskreis Energieberatung des Freistaates Thüringen“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 1/2000, S. 1-10.
- (100) Nikolic, V. et al.: Bau und Energie. Studie im Auftrag des BMFT, in: Statusbericht Rationelle Energieverwendung 1980, TÜV-Verlag, Köln 1981.
- (101) Noack, C.C., Franke, J. (Hrsg.): Energie für die Stadt der Zukunft. Das Beispiel Bremen –Der Abschlussbericht des Bremer Energiebeirats-, SP-Verlag, 1989, S.53-63, S. 72-86.
- (102) Pfaffenberger, W., Scheele, U., Ströbele, W., Windelberg, J.: Auswirkungen des EG - Binnenmarktes für Energie auf die räumliche Energieversorgung. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Volkswirtschaftliche Beiträge, Band 137, Idstein 1992.
- (103) Pfeil, Markus; Koch, Holger: Kies/Wasserwärmespeicher, Langzeitwärmespeicherung ökologisch und kostengünstig, PKi - Pfeil und Koch Ingenieure-, Stuttgart, 1997.
- (104) Püttmann, Heike: Bioklimatische Bewertung von Bebauungsstrukturen am Beispiel zweier Wohngebiete in Halle/S., Dissertation, Gutachter: PD Dr. Thomas Littmann, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Haltern, 18.03.1968.

- (105) Raab, S.: Einfluss des Klimas auf die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit solar unterstützter Nahwärmesysteme. Veröffentlichung des Vortrages auf der OTTI, 14. Symposium: Thermische Solarenergie, Kloster Banz vom 12.-14.05.2004, Universität Stuttgart. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Stuttgart, 2004, S.1-5.
- (106) Ranft, F.: Energetische Überarbeitung des B-Plans Nr.41 in Wetter-Oberwengern, 1995.
- (107) Rockendorf, Janßen: Facade Integrated Solar Collectors, Institut für Solarenergieforschung GmbH, Hameln, Auflage 1996, Bauverlag.
- (108) Rose, Henry: Der KÖP-Wert in der ökologisch orientierten Stadtplanung, Untertitel: Zur Bewertung umweltrelevanter Faktoren im Rahmen der kommunalen Umweltverträglichkeitsprüfung. Mannheimer Geographische Arbeiten (Hrsg.), Heft 33. von Dörrer, Ingrid; Frankenberg, Peter; Gaebe, Wolf; Höhl Gudrun; Jentsch, Christoph, 1991.
- (109) Roth, U., Volwahren, A.: Rationelle Energieverwendung im Rahmen der kommunalen Entwicklungsplanung, Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.) aus: Städtebauliche Forschung 03/083; 1980.
- (110) Roth, U. et al.: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.) aus: Städtebauliche Forschung 03/083; 1980.
- (111) Sasse, Christian; Schnürer, Herdis; Fisch, Norbert: Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude, Institut für Gebäude- und Solartechnik, TU Braunschweig, 2004.
- (112) Senatorin für Frauen, Gesundheit, Jugend und Soziales: Umweltschutz in Bremen: Integration der rationellen Energieverwendung in der Bauleitplanung. Freie Hansestadt Bremen (Auftraggeber), Bremer Energieinstitut, Carl von Ossietzky Universität, 02/2001.
- (113) Scherer, Dieter: Eigenschaften und Ursachen des Stadtklimas, Fachbeitrag aus Stadtklima-Umweltpanorama Heft 10 –November 2005-, Institut für Ökologie der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Klimatologie.
- (114) Schirmer, H. et al.: Meyers Kleines Lexikon, Meteorologie, Meyers Lexikon Verlag, Mannheim, 1987.
- (115) Schirmer, Ullrich: Solares Heizen mit Großanlagen – Chancen und Perspektiven, Technische Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik, Projektgruppe Solarthermie, Chemnitz, S. 1-22, 2000.
- (116) Schmid, Jürgen: Energiekonzept 2050: Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % Regenerativen Energien. Beitrag der Institute: Fraunhofer IWES, ISFH, IZES gGmbH und Fraunhofer ISE, Fraunhofer IBP, ZAE Bayern und ZSW Berlin, Juni 2010.
- (117) Schott, J.R., Volchock, W.J.: Thematic mapper infrared calibration. – Photogramm Eng. remote Sens.-, 51, 9, 1985, S. 1351 – 1357.

- (118) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (Hrsg.): Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe, Karte 04.02., 1:50 000. Langjähriges Mittel der Lufttemperatur (1961 - 1990), Nr. 1993a, 1992.
- (119) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (Hrsg.): Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.04., 1:50 000. Temperatur- und Feuchteverhältnisse in mäßig austauscharmen Strahlungsnächten, Nr. 1993b, 1992.
- (120) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (Hrsg.): Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.05 1:50 000. Stadtklimatische Zonen Nr. 1993c, 1992.
- (121) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (Hrsg.): Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.07 1:50 000. Klimatische Funktionsräume, Nr. 1993d, 1992.
- (122) Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (Hrsg.): Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1992, Karte 04.03 1:50 000. Bodennahe Windverhältnisse, Nr. 1994, 1992.
- (123) Sievers, U.: Dreidimensionelle Simulation in Stadtgebieten. In Umweltmeteorologie: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein, Schriftenreihe Band 15, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf, 1990.
- (124) Simader, Günter R.: Klimatisierung, Kühlung und Klimaschutz; Technologien, Wirtschaftlichkeit und CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale. Austrian Energy Agency, Wien, 2005.
- (125) Stadermann, Gert: Wärme und Kälte – Energie aus Sonne und Erde-. Jahrestagung des Forschungsverbundes in Kooperation mit der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS). Themen 2005, 09/2005.
- (126) Stadt Gießen: Umweltbericht: vorhabenbezogener Bebauungsplan Nr. KL 09/05 „Waldweide“ vom 14.08.2007.
- (127) Stadtdirektor der Stadt Münster: Stadtklima Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz, Nr. 1, Münster, 1992.
- (128) Statistisches Bundesamt: Nutzungsartenkatalog für die Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung. Auszug aus dem Nutzungsartenverzeichnis, 1991.
- (129) Statistisches Bundesamt: Mikrozensus 2002. Ergebnisse der Mikrozensus-Befragungen von 2002, Wiesbaden, 2003.
- (130) Steinicke & Streifeneder: Klimauntersuchung Nachbarschaftsverband Heidelberg-Mannheim. Auftraggeber: Nachbarschaftsverband Heidelberg-Mannheim, Abschlussbericht, Freiburg, Juni 2002.

- (131) Studie Zukunft Stadt 2000: Städtebauliche Planung (Abschnitt 2.1). Die kommunalen Planungsinstrumente und Methoden im Einzelnen (Abschnitt 2). S.25-45. Schlussfolgerungen für die kommunale Planung, S.211-214.
- (132) Tamme, Rainer: Hochtemperatur- und Latentwärmespeicher für Prozessdampf und solare Kraftwerkstechnik. DLR – Institut für Technische Thermodynamik- in Zusammenarbeit mit SGL Carbon Technologies GmbH, Meitingen. Stuttgart, 27.04.2009.
- (133) Theilen, Wiebke: Powerhouse - Städtebau. TU Darmstadt, Fachbereich Architektur, Paper db/248 id 42;s Papers,fb15, S.1-8, 2010/2011.
- (134) Umweltbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg: Energetische Empfehlungen zur Siedlungs- und Gebäudeplanung, Hamburg, 1993.
- (135) Umweltbundesamt (Hrsg.): Soziodemographischer Wandel in Städten und Regionen – Entwicklungsstrategien aus Umweltsicht -, Forschungsbericht 20516100, Texte 18/07. Projektleitung: Prof. Dr. Dr. h. c. B. Müller, Leibnitz Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR) Dresden, April 2007.
- (136) Umweltbundesamt (UBA): Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung, Zwischenbericht, 2006.
- (137) Umweltbüro GVV: Bericht zur Umweltbilanz der Stadt Donaueschingen, Kapitel 7 bis 8.1, S. 27-39, Donaueschingen, 1999.
- (138) Universität für Bodenkultur Wien: Wärmeinsel Linz und belüftungsrelevante Strömungssysteme. Endbericht des Instituts für Meteorologie und Physik, Grüne Reihe, Bericht Nr.7/2002.
- (139) UTEC/GERTEC: Haustypologie des Landes Schleswig-Holstein. Endbericht erstellt im Auftrag der Investitionsbank Schleswig-Holstein, Bremen - Hannover, 1998.
- (140) Wagner, Gerhard: Auswirkungen einer CO<sub>2</sub>-Energie - Steuer aus städtebaulicher Sicht. Artikel aus: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Nr. 42, Heft 12Jg,1992.
- (141) Wagner, Gerhard: Dezentrale Stromerzeugung als Instrument der Flächeneinsparung und Landschaftsschonung. Artikel aus dezentrale Aspekte der räumlichen Planung, Heft 4/5, 1987.
- (142) Warnecke, Günter: Meteorologie und Umwelt - Eine Einführung-, Freie Universität Berlin, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991.
- (143) Wetterdatenbank - Aegeriwetter: Datenerfassung der Sonnenscheindauer in Abhängigkeit zum Bewölkungsgrad. Katalog Heizgradtage von 2000 bis 2005. Datenerfassung über Niederschlag, Lufttemperatur, Luftdruck, Regen, Wind, Windböen, Taupunkt, Luftfeuchte, Unterägeri, Schweiz, Juni 2007.
- (144) Willkomm, Wolfgang; Schuetze, Thorsten: Klimagerechtes Bauen in Europa. Fachhochschule Hamburg, Architektur und Bauingenieurwesen, Abschlussbericht, 2000.

- (145) Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.): Energiesparendes Bauen und gesundes Wohnen. Eine Planungshilfe für Bauherren, Architekten und Ingenieure, Baden-Württemberg, 1995, S. 18 ff, S. 94 ff.
- (146) Wirtschaftsministerkonferenz: Beschluss - Sammlung der Wirtschaftsministerkonferenz am 4./5.Juni 2007 in Eisenach, Klimaschutz, Nr. 5.1ff. der Tagesordnung, Berlin, 21. Juni 2007.
- (147) Wissensnetz Energiemeteorologie (Wisent): Ertragsmodell für eine Deckung der Kosten zum Betrieb einer Communityspezifischen Grid – Infrastruktur. Beteiligte Organisationen: DLR, meteocontrol, OFFIS, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2008.
- (148) Wright, David: Sonne Natur Architektur, Verlag Anstalt, 1980.
- (149) Wuppertal-Institut: Energiegerechtes Bauen und Modernisieren, Planungsbüro Schmitz, Birkhäuser Verlag, Basel 1999.
- (150) WWF International: Power Switch! Campaign: Europe feels the heat, the power sector and extreme weather. Fachbericht: John Ashton (Verfasser), Schweiz, 2005.
- (151) Wypych, Sebastian; Bokwa, Anita: Klima in Städten – Basis städtischer Wärmeinseln: Bericht in Environmental Science Published for everybody round the earth, S.1 - 3., Jagiellonian University - Cracow /Poland. Supporter: Anna Gorol.
- (152) Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: Analyse der atmosphärischen Grenzschicht in Wien während zweier Sommersmog – Episoden mit dem Windfeldmodell Tamosw und Grenzschichtparametrisierung. Untersuchung durch Mag. Kathrin Baumann im Auftrag des Magistrats der Stadt Wien, MA 22-Umweltschutz, MA 22-254/00, 6930/99-U, März 2000, S. 3-21.
- (153) Zolitschka, M., Drews, A., Schaal, P. und Heinemann, D.: Solar Energy Conferences 2010. Bestimmung regionaler Solarstrompotenziale für freistehende Photovoltaik-Kraftwerke an Beispielen aus Baden-Württemberg und Niedersachsen. Proc. 25, Symposium Photovoltaische Solarenergie, S. 5 –7, March 2008, Staffelstein, 2010.
- (154) Zweckverband Raum Kassel: Stadtklimatische Untersuchung für das Gebiet des Zweckverbandes, 1991.

### **Gesetze, Verordnungen, Normen**

Richtlinie 2001/42/EG: Europäisches Parlament und des Rates vom 27. Juni 2001 über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme – Plan-UP-Richtlinie -, Novellierung des Baugesetzbuches zum 20.07.2004 durch das Europarechtsanpassungsgesetz Bau-EAG Bau.

Richtlinie 2001/0098 (COD): Europäischen Parlaments und des Rates über die Energieprofile von Gebäuden, 2001.

Richtlinie 2002/91/EG: Europäisches Parlament und des Rates über die Gesamteffizienz von Gebäuden vom 16. Dezember 2002 (Abl. EG Nr. L1 vom 4. Januar 2003), S.65.

Raumordnungsgesetz (ROG) vom 22.12.2008 (BGBl. I S. 2986): zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert.

Baugesetzbuch (BauGB) vom 23.06.1960: Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Juli 2011 (BGBl. I S. 1509).

Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz –EEWärmeG) vom 7. August 2008.

Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) vom 19.03.2002.

Gesetz zur Neuregelung des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) im Strombereich vom 21.Juli 2004.

Baunutzungsverordnung: Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (BauNVO) vom 26.06.1962.

Biomasseverordnung (BiomasseV): Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse vom 21.06.2001.

Verordnung über den energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung ENEV) vom 24.07.2007.

Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung – BauNVO) vom 26.06.1962 (BGBl.I.S.429) in der Fassung vom 23.01.1990 (BGBl.I.S.132).

Raumordnungsverordnung (RoV) vom 13.12.1990, Raumordnungsverordnung vom 13. Dezember 1990 (BGBl. I S. 2766), zuletzt durch Artikel 5 Absatz 35 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert.

DIN 12831: Leitfaden zur Heizlastberechnung, Wärmebedarf und Heizlast, Heizgradtage (HGT, HGT 20/12), Energiesparhaus (Österreich),07/2007.

#### Daten CD zur Potenzialanalyse

- Methodik der Datenauswertung von Regionen und städtischen Quartieren
- Auswertung Daten von Regionen und Städten (Nutzflächen)
- Auswertung Daten von städtischen Quartieren (Modellgebiete)
- Fragebogen Kommunen
- Auswertung Bodendatenmesswerte der Säkularstation Potsdam
- Berechnungsgrundlagen

