

Solarstrahlungsvorhersage auf der Basis numerischer Wettermodelle

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

von

Marco Girodo

geboren am 16.09.1975
in Soltau

Erstgutachter: Prof. Dr. Jürgen Parisi
Zweitgutachterin: Prof. Dr. Ulrike Feudel

Tag der Disputation: 07.06.2006

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Verfahren zur Vorhersage der solaren Einstrahlung zur Anwendung in der Solarenergie für einen Vorhersagehorizont bis zu 3 Tagen auf der Basis verschiedener numerischer Wettermodelle analysiert und weiterentwickelt. Dazu wurde das mesoskalige Modell MM5 systematisch auf die Verwendbarkeit zur Strahlungsmodellierung analysiert. Des Weiteren wurde eine im Vergleich dazu besser geeignete Vorhersage der Solarstrahlung vom europäischen Wetterdienst (ECMWF) in Bezug auf die Anwendung optimiert. Die Vorhersagequalität der Verfahren wird über eine detaillierte Genauigkeitsanalyse untersucht. Die optimierte ECMWF-Vorhersage liefert im Vergleich mit bestehenden Verfahren insbesondere für wolkenfreie Fälle bessere Ergebnisse. Ein Schwerpunkt der Analyse ist die Differenzierung von meteorologischen Situationen unterschiedlicher Vorhersagegüte. Neben der Vorhersage der Globalstrahlung wird auch die Direkt- und Diffusstrahlungsvorhersage betrachtet.

Abstract

The aim of this work was to analyse and to develop methods to forecast the surface solar irradiance for solar energy applications with a forecast horizon of up to 3 days based on different numerical weather models. The mesoscale model MM5 was systematically analyzed with respect to its usability for irradiance modelling. Furthermore, a more suitable forecast of the irradiance by the European weather service (ECMWF) has been enhanced for solar energy applications. The accuracy of the forecasting methods were investigated by a detailed quality assessment. The enhanced forecast of the ECMWF achieves, in comparison with existing methods and especially for clear sky situations, improved results. One main focus of the investigation has been the separation of the forecast accuracy according to the meteorological situation. In addition to the forecast of the global surface irradiance also the forecasted direct and diffuse irradiance was considered.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Grundlagen	10
2.1	Strahlungstransport in der Atmosphäre	10
2.1.1	Extinktion	11
2.1.2	Strahlungstransportgleichung	15
2.2	Physikalische Modelle	17
2.2.1	Numerische Wettermodelle	17
2.2.2	Strahlungstransport in MM5	22
2.2.3	Strahlungstransport im Atmosphärenmodell des ECMWF	27
2.3	Statistisches Modell - MOS	29
2.4	Fehlermaße	31
3	Datenbasis	34
3.1	Vorhersagen von Wettermodellen als Antrieb für MM5	34
3.2	ECMWF eigene Strahlungsvorhersage	35
3.3	Messungen und Referenzen	35
3.3.1	Punktvorhersage	36
3.3.2	Regionale Vorhersage	37
3.4	Vergleichsdaten bestehender Vorhersagen	42
3.4.1	Operationelles MOS-Verfahren	42
3.4.2	Persistenz	42
4	Mesoskalige Modellierung der Globalstrahlung	43
4.1	Modellierung der Einstrahlung über MM5	44
4.1.1	Wolkenfreier Fall	47
4.1.2	Durchbrochene Bewölkung	50
4.1.3	Geschlossene Bewölkung	52
4.1.4	Zusammenfassung	56
4.2	Vorhersage der Einstrahlung über MM5	57
4.2.1	Fallstudien zu verschiedenen DWD-Datensätzen	58
4.2.2	DWD und ECMWF basierte MM5-Strahlungsvorhersage	62
4.2.3	Regionale MM5-Strahlungsvorhersage	62
4.2.4	Standortaufgelöste MM5-Strahlungsvorhersage	67
4.2.5	Zusammenfassung	70
5	Optimierung der ECMWF-Strahlungsvorhersage	72
5.1	Direkte Modellvorhersage der Globalstrahlung	72
5.2	Weiterentwicklung für Einzelstandorte	77
5.2.1	Optimierung der räumlichen Auflösung	77
5.2.2	Optimierung der zeitlichen Auflösung	81

5.2.3	Vergleich mit MM5	87
5.3	Regionale Strahlungsvorhersage	87
5.3.1	Vergleich mit MM5	93
5.4	Zusammenfassung	93
6	Genauigkeitsanalyse	95
6.1	Eindimensionale Fehleranalyse	95
6.1.1	Verschiedene Sonnenstände	96
6.1.2	Verschiedene Wolkenvariabilitäten	99
6.1.3	Verschiedene Clearsky-Indizes	100
6.2	Zweidimensionale Fehleranalyse	106
6.3	Cluster-Analyse	113
6.3.1	Verfahrensbeschreibung	113
6.3.2	Anwendung für Strahlungsvorhersage	114
6.4	Zusammenfassung	120
7	Diffus- und Direktstrahlungsvorhersage	122
7.1	Modellbeschreibung	122
7.2	Vorhergesagte Diffus- und Direktstrahlung	125
7.3	Zusammenfassung	131
8	Fazit und Ausblick	133
9	Anhang	136

1 Einleitung

Die erneuerbaren Energien stellen einen stetig anwachsenden Anteil am Energiemarkt dar. Ähnlich wie im Bereich der Windenergienutzung bereits geschehen, wird für die nächsten Jahre eine deutlich zunehmende Verwendung der Solarenergie erwartet. So wird die Vergütung von aus erneuerbaren Energien gewonnenen Stroms über staatliche Regelungen finanziell gefördert. Beispiele sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) der Bundesrepublik Deutschland oder das spanische Einspeisegesetz vom März 2004. Ziel des EEG ist es, den Anteil aller erneuerbaren Energien bis 2010 auf mindestens 12,5 % und bis 2020 auf mindestens 20 % zu erhöhen. Zur Förderung werden über das EEG attraktive Einspeisetarife garantiert. Auch in Spanien ist die entscheidende Neuerung die gesetzliche Garantie der Einspeisetarife über die gesamte Betriebszeit der Anlage. Für Anlagen mit einer installierten Leistung $> 10 \text{ MW}$ ist damit jedoch die Auflage verbunden, dass eine Vorhersage der für die nächsten Tage zu erwartenden Solarenergie zur Verfügung steht [Ragwitz (2005)].

Aufgrund der hohen Variabilität der Energieproduktion aus erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne ist eine Vorhersage der zu erwartenden Leistung besonders wichtig. Erst diese Information ermöglicht eine ökonomisch sinnvolle Steuerung von Systemen, die diese Energiequellen nutzen. Dazu gehört neben einem Last- und Speichermanagement die Notwendigkeit, zusätzliche Energiequellen bereitzustellen, wenn der Bedarf nicht ausreichend über erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Je genauer nun die Vorhersage der Wind- und Solarenergie ist, desto kleiner kann der kostenintensive Anteil der Regelenergie sein, der zur Absicherung des Energiebedarfs bereitgestellt werden muss.

Je höher der Anteil des Solarstroms am gesamten Energiemix ist, desto wichtiger wird es, dass eine angepasste Regelung zwischen dem stark fluktuierenden Energieangebot und den regelbaren Erzeugern zum einen und den Verbrauchern bzw. der Last zum anderen stattfindet. Für eine entsprechende Kraftwerksplanung von mehreren Tagen im Voraus ist eine Prognose der Wind- und Solarleistung unumgänglich.

Darüber hinaus stellt die Solarstrahlungsvorhersage für das Gebäudemanagement im Rahmen einer thermischen Steuerung ebenfalls eine wichtige Voraussetzung dar. Die Regelung der Innentemperatur von Gebäudekomplexen erfolgt über Steuerungsmaßnahmen, die nur sehr träge reagieren. Diese Trägheit des Systems aufgrund von langsam ablaufenden Transportvorgängen zur Energiezufuhr oder -abfuhr verlangt eine vorausschauende Planung. Diese kann nur in Zusammenhang mit einer Prognose der Solarstrahlung in Kombination mit einer Temperaturvorhersage erfolgen.

Damit wird der Vorhersage der kurzfristigen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien in Zukunft eine große Bedeutung in der Energieversorgung zukommen. Dabei ist insbesondere der hohen Fluktuation aufgrund der Abhängigkeit von meteorologischen Randbedingungen Rechnung zu tragen.

Gegenwärtig beruht das hohe Interesse der Energiewirtschaft an einer Solarstrahlungsvorhersage im Wesentlichen auf dem Nutzen für eine verbesserte Lastabschätzung. Für

regional und überregional agierende Energieversorgungsunternehmen ist eine möglichst genaue Vorhersage eine wichtige Voraussetzung zur Ermittlung des nötigen Energiebedarfs. Dabei sind konkrete Vorhersagen für bestimmte Standorte von installierten Solaranlagen, z.B. für große Solarkraftwerke, für die Abschätzung der von diesen Anlagen produzierten Energie von besonderem Nutzen. Darüber hinaus stellen auch regionale Vorhersagen für die Versorgungsgebiete der Energiewirtschaft wichtige Informationen dar.

Je nach Anwendung kann sowohl die Global- als auch die Direktstrahlung von Interesse sein. So ist die Direktstrahlungsvorhersage eine wichtige Größe zur Abschätzung des zu erwartenden Ertrags von solarthermischen Kraftwerken.

Eine Vorhersage der solaren Einstrahlung am Erdboden erfordert Kenntnisse über den Zustand der Atmosphäre und insbesondere über die Bewölkung und deren Einfluss auf die Solarstrahlung. Derartige Beschreibungen stehen über makro- und mesoskalige Vorhersagemodelle zur Verfügung. Die vorhergesagten Größen der Wettermodelle können genutzt werden, um die solare Einstrahlung am Boden zu bestimmen.

Ziele

Bisher wurden nur wenige Studien durchgeführt, die sich speziell mit der Vorhersage der solaren Einstrahlung beschäftigen [Armstrong (2000)], [Zamora et al. (2003)]. In dieser Arbeit werden erstmals unterschiedliche Ansätze zur Vorhersage der Einstrahlung systematisch untersucht. Ein Schwerpunkt ist die Anpassung, Optimierung und Analyse zweier verschiedener Verfahren an die Erfordernisse für Solarenergieanwendungen. In diesem Zusammenhang wird die Genauigkeit dieser derzeit zur Verfügung stehenden Verfahren zur Solarstrahlungsvorhersage mit einem Vorhersagehorizont von bis zu 72 h untersucht. Für derartige Vorhersagezeiträume über mehrere Tage ist es nötig, auf die Vorhersagen von numerischen Wettermodellen zurückzugreifen. Daher nutzen alle Verfahren in verschiedener Form die Ausgaben von operationellen Wettervorhersagen.

Es werden zwei Ansätze zur Strahlungsvorhersage untersucht. Ein Aspekt ist die systematische Untersuchung der Konfiguration des mesoskaligen Modells MM5. Dieses Modell wird gezielt auf die Verwendbarkeit zur Strahlungsvorhersage hin analysiert. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Weiterentwicklung der Strahlungsvorhersage des globalen Vorhersagemodells des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Es wird untersucht, inwieweit die relativ grob aufgelösten Vorhersagen für solarenergetische Anwendungen optimiert werden können.

Eine detaillierte Genauigkeitsanalyse auf der Basis der optimierten ECMWF-Vorhersage zeigt mögliche Defizite und Stärken auf. Eine Fehleranalyse, die Auskunft über die Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit einer Vorhersage gibt, ist sowohl für die Bewertung des Verfahrens als auch für mögliche kommerzielle Anwendung von sehr hohem Wert. Wichtige Ziele dieser Analysen sind zum einen meteorologische Situationen mit verschiedener Vorhersagegüte zu unterscheiden, zum anderen soll geklärt werden, ob und wie es möglich ist, verschiedenen Situationen einen jeweils zu erwartenden Vorhersagefehler zuzuweisen. Dieser situationsabhängige Vorhersagefehler stellt als zusätzliche Größe eine wichtige Information für operationelle Anwendungen dar.

Die Ergebnisse der numerisch-physikalisch basierten Verfahren werden untereinander und mit den Vorhersagen eines statistischen Verfahrens verglichen. Die dazu untersuchten Strahlungsvorhersagen eines Model-Output-Statistics (MOS) Verfahrens werden von einem kommerziellen Wetterdienstleister zur Verfügung gestellt.

Die Anpassung und Optimierung bestehender Verfahren zur Strahlungsvorhersage und eine darauf aufbauende detaillierte Analyse geben die Möglichkeit, Fehlerquellen und Verbesserungspotential aufzudecken. Dies bildet die Grundlage für die weitere Entwicklung der Verfahren.

Aufbau

Nach dieser Einleitung folgt im zweiten Kapitel eine Darstellung der Grundlagen des Strahlungstransportes und eine Präsentation der untersuchten Vorhersagesysteme. Es werden die hier genutzten physikalischen Modelle vorgestellt. Dies ist zum einen das mesoskalige System MM5 und zum anderen das globale Wettermodell des ECMWF. Der Schwerpunkt liegt jeweils bei der Beschreibung der Strahlungsparametrisierung. Zudem wird das statistische Model-Output-Statistics Verfahren beschrieben, das als Referenz-Verfahren zum Vergleich hinzugezogen wird. Darüber hinaus werden die grundlegenden Fehlermaße eingeführt, die in dieser Arbeit Verwendung finden.

Kapitel 3 enthält eine kurze Beschreibung der verwendeten Datensätze, die in den folgenden Kapiteln verwendet werden. Die Validierung erfolgte in der Regel gegen Messungen der Solarstrahlung von Bodenstationen. Als zusätzliche Referenz, insbesondere bei der Betrachtung von Regionsmitteln, werden aber auch Daten genutzt, die Messungen des europäischen Wettersatelliten Meteosat 7 verwenden. In diesem Zusammenhang wird das dazu nötige Heliosat-Verfahren in seinen wesentlichen Zügen vorgestellt. Zusätzlich stellt das Heliosat-Verfahren außer der Globalstrahlung noch weitere Größen zur Verfügung, die hier eingeführt werden. Die Größen werden im Rahmen der Fehleranalyse verwendet und dienen der Bestimmung unterschiedlicher meteorologischer Situationen.

In Kapitel 4 wird die mesoskalige Modellierung der Strahlungsvorhersage mittels MM5 beschrieben. Nach der Bestimmung einer geeigneten Gesamtkonfiguration von MM5 zur Strahlungsberechnung und der entsprechenden Anpassung werden sowohl Regionsmittel als auch die Vorhersagen für Einzelstandorte analysiert. Die Untersuchung wurde für zwei unterschiedliche Datensätze durchgeführt, die das MM5-Modell antreiben. Die Ergebnisse werden mit den MOS-Vorhersagen verglichen.

In Kapitel 5 wird die Strahlungsvorhersage des globalen numerischen Wettermodells des ECMWF analysiert und weiterentwickelt. Die räumlich und zeitlich grob aufgelöste Vorhersage wird mittels verschiedener Verfahren optimiert. Die Ergebnisse werden mit denen des MOS-Verfahrens und der Persistenz verglichen. Die Validierung und Diskussion wird für Regionsmittel sowie für Einzelstandorte durchgeführt.

Auf der Basis der in Kapitel 5 gewonnenen Daten wird anschließend eine ausführliche Genauigkeitsanalyse in Kapitel 6 durchgeführt. Das vorrangige Ziel ist es, die Unterscheidbarkeit von Situationen verschiedener Vorhersagequalität zu untersuchen. Nach einer ein-dimensionalen Analyse der Abhängigkeit des Fehlers vom Vorhersagezeitpunkt folgt eine

zweidimensionale Fehleranalyse. Diese klärt, wie meteorologische Situationen unterschiedlicher Vorhersagegüte über eine Kombination verschiedener Parameter zu unterscheiden sind. Eine anschließende Cluster-Analyse soll klären, inwieweit die untersuchten Daten über einen automatisierten Algorithmus in möglichst homogene Klassen unterteilt werden können. In diesem Zusammenhang werden verschiedene Parameter berücksichtigt, die den Zustand der Atmosphäre beschreiben. Diese dienen auch zur Analyse der einzelnen Klassen.

Auf der Basis der in Kapitel 5 untersuchten vorhergesagten Globalstrahlung werden Vorhersagen der Diffus- und Direktstrahlung in Kapitel 7 abgeleitet. Das dazu genutzte Diffusmodell von [Skartveit et al. (1998)] wird beschrieben und die Ergebnisse werden diskutiert. Ein Fazit der vorgestellten Arbeit und ein Ausblick erfolgt im abschließendem 8. Kapitel.

2 Grundlagen

Die Vorhersage der Einstrahlung am Boden setzt ein grundsätzliches Verständnis des Strahlungstransports in der Atmosphäre voraus. Es ist also sinnvoll, sich zunächst einen Überblick über die physikalischen Vorgänge zu verschaffen. Daher beginnt dieses Kapitel mit einer entsprechend grundlegenden Einführung, die auf Beschreibungen und Ausführungen von [Liou (1992)], [Lenoble (1993)], [Girodo (2003)], [Früh (2000)] und [Stammes (1999)] basiert.

Zur Strahlungsvorhersage, die neben dem deterministischen Tagesgang insbesondere durch die hoch variable und teilweise stochastische Bewölkung beeinflusst wird, können derzeit verschiedene physikalische oder statistische Modelle verwendet werden. Zunächst erfolgt eine Präsentation der grundlegenden Funktionsweise numerischer Wettermodelle und inwieweit der Strahlungstransport berücksichtigt wird [Dudhia et al. (2003)], [COMET® (2002)].

Im Rahmen dieser Arbeit wird das mesoskalige numerische Modell MM5 untersucht, das basierend auf [Anthes (1978)] kontinuierlich weiterentwickelt wurde. Es wurde für diverse wissenschaftliche Studien erfolgreich eingesetzt [Bright (2002)], [Grell et al. (2000)]. Darüber hinaus wird es auch bei verschiedenen Organisationen als operationelles Wettermodell verwendet [Hass et al. (1990)]. Die im Folgenden vorgenommene Beschreibung des Modells basiert auf Darstellungen von [Dudhia et al. (2003)], [Grell et al. (1995)] und [Stephens (1978)].

Als weiteres numerisches Wettermodell werden die Vorhersagen des Atmosphärenmodells des ECMWF genutzt. Das ECMWF ist ein von den europäischen Staaten und deren nationalen Wetterdiensten gemeinsam betriebenes Zentrum. Die Aufgabe ist es, numerische Wettermodelle mit einem Vorhersagehorizont von bis zu 10 Tagen zu entwickeln und operationell zu betreiben [Person (2003)]. Die in diesem Kapitel folgende Beschreibung des Strahlungstransports sowie der Ermittlung des Bewölkungsgrades und deren Berücksichtigung, basiert auf den Arbeiten von [Morcette (1991)], [Morcette (2000)].

Neben der Verwendung von numerischen Wettermodellen eignen sich auch statistische Verfahren zur Vorhersage der globalen Einstrahlung. Ein solcher Ansatz ist das MOS-Verfahren, das in seiner allgemeinen Funktionsweise eingeführt wird [Glahn (1972)], [Storch (1999)]. Abschließend werden die in dieser Arbeit verwendeten Fehlermaße beschrieben.

2.1 Strahlungstransport in der Atmosphäre

Bei der Modellierung des Strahlungstransports in der Atmosphäre ist die Kenntnis der vorhandenen Partikel und deren Wechselwirkungseigenschaften mit der Strahlung notwendig. Der Absorption durch Ozon und Wasser sowie der Streuung und Absorption durch Aerosolpartikel, Wasserdampf und Wolkentropfen kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Diese Extingenten bestimmen zusammen mit der über die Rayleigh-Theorie beschriebenen Streuung in klarer Luft die optische Dicke der Atmosphäre und damit die Transmission der solaren Einstrahlung. Die optische Dicke ist daher ein Maß für die in der Atmosphäre stattfindende Abschwächung der Strahlung durch Absorption und Streu-

ung. Die Wolken und deren Wolkenteilchen haben den stärksten Einfluss auf die solare Einstrahlung. Der Effekt wird durch die auch für Aerosole gültige Mie-Theorie beschrieben. Im folgenden Unterkapitel wird auf die wichtigsten Effekte beim Strahlungstransport durch Absorption und Streuung eingegangen und die Rayleigh- und Mie-Theorie in ihren wesentlichen Zügen vorgestellt.

Die Strahlungstransportgleichung fasst alle Einflüsse auf die solare Einstrahlung in der Atmosphäre zusammen und wird im abschließenden Unterkapitel vorgestellt.

Die elektromagnetische Strahlung der Sonne steht in permanenter Wechselwirkung mit den Extingenten der terrestrischen Atmosphäre. Die Absorption, Streuung und Emission von Strahlung in der Atmosphäre und am Erdboden bestimmen wesentlich die Temperatur der Atmosphäre. Damit nehmen diese Vorgänge Einfluss auf die dynamischen, thermischen und photochemischen Prozesse, welche in der Atmosphäre stattfinden. Die Bestimmung und das Verständnis des atmosphärischen Strahlungstransports ist deshalb eine grundlegende Voraussetzung zur Simulation des Zustands der Atmosphäre. Der Strahlungstransport beschreibt die Wechselwirkung zwischen der solaren Einstrahlung und der Atmosphäre. Der Strahlungsfluss $\Phi = dW/dt$ [W] gibt die Strahlungsenergie dW pro Zeiteinheit durch eine beliebige Fläche an und enthält keine Information über die Strahlungsverteilung oder Richtung. Die Strahlungsflussdichte F beschreibt nun den Fluss von Strahlungsenergie dW pro Zeit dt durch eine bestimmte Fläche dA :

$$F = \frac{d^2W}{dt dA} [W/m^2]. \quad (2.1)$$

Die Strahldichte L berücksichtigt zusätzlich den Raumwinkelbereich, aus dem die Strahlung einfällt:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA} [W/(m^2 sr)]. \quad (2.2)$$

Die Strahldichte bzw. Radianz L ist also der Strahlungsfluss $d^2\Phi$, der bezüglich des Raumwinkelelements $d\Omega$ eine Einheitsfläche dA senkrecht zur Ausbreitungsrichtung durchströmt.

Eine Quelle in der Strahlungstransportgleichung ist die solare Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre. Im Wellenlängenbereich kleiner ca. 300 nm wird diese durch molekularen Sauerstoff und Stickstoff sowie durch Ozon schon in der hohen Stratosphäre fast vollständig absorbiert. Zur Untersuchung des Strahlungstransports in der Troposphäre reicht daher eine Betrachtung der Strahlung mit Wellenlängen größer als ca. 300 nm aus. Weitere Quellen und Senken bzgl. der Strahlungstransportgleichung sind die in der Troposphäre stattfindende Absorption durch Ozon und Stickstoffdioxid und die Streuung an atmosphärischen Luftmolekülen und Partikeln. Die Absorption und Streuung werden über die Betrachtung der Extinktion gemeinsam berücksichtigt.

2.1.1 Extinktion

Das Potential eines Mediums Strahlung zu streuen oder zu absorbieren wird durch den Extinktionskoeffizienten ausgedrückt. Dieser Extinktionskoeffizient $k_e [m^{-1}]$ ist definiert

über die Summe des Absorptions- und Streukoeffizienten und hängt wie auch die folgenden Größen von der Wellenlänge λ ab:

$$k_e = k_a + k_s. \quad (2.3)$$

Absorption

Wenn ein Atom die Energie eines Photons aufnimmt, bezeichnet man das als Absorption. Dabei wechselt ein Elektron des Atoms in ein höheres Energieniveau und das Atom geht in einen angeregten Zustand über. Über Zusammenstöße mit anderen Atomen kann ein angeregtes Atom seine gewonnene Energie wieder abgeben. Die dadurch frei werdende Energie wird der kinetischen Energie der Atome zugeführt. Die Absorption führt also zu einer Schwächung der Strahlung und einer Erwärmung des betrachteten Mediums. Damit geht dem Strahlungsfeld über die Absorption Energie verloren. Der die Absorption beschreibende Absorptionskoeffizient k_a ist definiert über:

$$dL = -k_a L dx. \quad (2.4)$$

Dabei gibt dL die Änderung der Strahldichte durch Absorption an, wenn ein Strahl der Strahldichte L durch eine Schicht der Dicke dx strömt. Die optische Dicke τ_a bezüglich der Absorption ist definiert als

$$\tau_a = \int_{x_1}^{x_2} k_a(x) dx. \quad (2.5)$$

Hier beschreibt das Integral von x_1 bis x_2 den Weg der Strahlung durch die absorbierende Schicht. Damit lässt sich über τ_a die Abschwächung der Strahlung durch Absorption beschreiben.

Streuung

Führt man neben dem Streukoeffizient k_s ein kleines Streuvolumen dv ein, auf das die über die eingestrahlte Flussdichte F charakterisierte Strahlung trifft, so ergibt sich der durch dv in den Raumwinkelbereich $d\Omega$ gestreute Strahlungsfluss als

$$d^2\Phi = f(\theta) F dv d\Omega. \quad (2.6)$$

Hierbei unterscheidet sich die neue von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung durch den Streuwinkel θ . Die Streufunktion $f(\theta)$ [$m^{-1}sr^{-1}$] beschreibt die Stärke und Winkelverteilung der Streustrahlung. Hier wird vorausgesetzt, dass die Teilchen keine Asymmetrien aufweisen, also kugelförmig sind, andernfalls wäre die Streufunktion auch vom Azimutwinkel abhängig. Für die Streufunktion und den Streukoeffizienten gilt die Beziehung:

$$k_s = \int_{4\pi} f(\theta) d\Omega. \quad (2.7)$$

Die optische Dicke τ_s bezüglich der Streuung ergibt sich analog zur Definition von τ_a , s. Gl. (2.5). Die normierte Streufunktion oder Phasenfunktion $P(\theta)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon in eine bestimmte Richtung gestreut wird. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon in irgendeine Richtung der Kugel (Raumwinkel 4π) gestreut wird, ist eins. Daher gilt die Normierung

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} P(\theta) d\Omega = 1. \quad (2.8)$$

Die Phasenfunktion und Streufunktion sind verknüpft über:

$$P(\theta) = \frac{4\pi}{k_s} f(\theta). \quad (2.9)$$

Die Streuung an kleinen Teilchen, welche um Größenordnungen kleiner sind als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung, kann mit der Rayleigh-Theorie beschrieben werden. Insbesondere die Größe der Luftmoleküle mit Radien um ca. $10^{-4} \mu m$ ist klein gegenüber den Wellenlängen der in der Atmosphäre vorkommenden Strahlung. Die Rayleigh-Theorie beschreibt das Streuverhalten von solchen kugelförmigen Teilchen über die relativ einfache Phasenfunktion

$$P(\theta) = \frac{3}{16} \cdot (1 + \cos^2(\theta)). \quad (2.10)$$

Bei der Rayleigh-Streuung ist der Betrag der gestreuten Strahlung in den Halbraum der Vorwärts- und Rückwärtsrichtung gleich und erreicht bei diesen Winkeln sein Maximum. Senkrecht zur Ausbreitungsrichtung findet sich das Minimum der gestreuten Strahlung. Der Streukoeffizient der Rayleigh-Streuung nimmt mit zunehmender Wellenlänge mit der 4. Potenz der Wellenlänge ab. Das führt dazu, dass Strahlung im Bereich kürzerer Wellenlängen wesentlich stärker gestreut wird. Daher wird der diffuse Anteil der Strahlung bei kleinen Teilchen in diesem Wellenlängenbereich erhöht.

Mie-Theorie

Die Streuung kann unter Verwendung der Mie-Theorie analytisch exakt formuliert werden, sofern die Streukörper sphärisch sind. Die Mie-Theorie selbst ist eine vollständige Theorie zur Beschreibung der Wechselwirkungen von ebenen Wellen mit dielektrischen Sphären. Die Maxwell-Gleichungen bilden die Grundlage, aus denen die Vektorwellengleichungen in Kugelkoordinaten hergeleitet werden können. Über Variablenseparation kann die Lösung der elektrischen und magnetischen Vektorfelder für die einfallende Welle über eine Reihe von mathematischen Funktionen ausgedrückt werden. Bei der Streuung kommt es zu Wechselwirkungen einer elektromagnetischen Welle mit isolierten Streukörpern in der Atmosphäre wie Luftmoleküle, Aerosolpartikel, Wolken- und Regentropfen oder Eisteilchen. Die Annahme sphärischer Streukörper ist aufgrund dieser möglichen Vielfalt nur bedingt zutreffend und muss im Einzelfall überprüft werden.

Zur Beschreibung der Partikelgröße wird der effektive Radius r_{eff} genutzt. Der effektive

Radius ist definiert als der Radius, den die Partikel annehmen würden, wenn ihr aktuelles Volumen auf exakte Kugelform gebracht würde. Insbesondere Wolkentropfen sind im Gegensatz zu Regentropfen oder Eisteilchen in guter Näherung kugelförmig.

Neben der Annahme sphärischer Streukörper ist eine weitere Vereinfachung, dass die Streukörper hinreichend weit auseinanderliegen, so dass die vom Streuzentrum ausgehende Kugelwelle im Fernfeld wieder als ebene Welle behandelt werden kann. Somit reduziert sich dieses Problem auf die Streuung einer monochromatischen, ebenen elektromagnetischen Welle an einem sphärischen Teilchen, für das die Mie-Theorie eine vollständige Lösung zur Verfügung stellt. Trifft nun eine elektromagnetische Welle auf ein isoliertes Teilchen, so wird die Wellenfront gestört, da sich die magnetischen und elektrischen Eigenschaften eines Streukörpers von denen der Umgebung unterscheiden und dadurch die Homogenität des Mediums stören. Die Folgen dieser Störung sind zum einen die Verringerung der Wellenamplitude und zum anderen die Entstehung einer zusätzlichen, sich vom Partikel entfernenden Kugelwelle, deren Ausgangspunkt der Streukörper ist. Die Energie dieser zusätzlichen Welle ist die gestreute Energie.

Aufgrund der hohen Komplexität eignet sich die Mie-Theorie nicht für die Anwendung in numerischen Wettermodellen, da die benötigten Rechenzeiten für einen operationellen Betrieb zu hoch wären. Auf eine detaillierte Beschreibung kann daher im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden. Stattdessen wird auf die Literatur verwiesen [Lenoble (1993)], [van de Huls (1981)].

Bezüglich der Extinktion ergibt sich die totale optische Dicke τ über Addition der optischen Dicken von Absorption τ_a und Streuung τ_s . Die optische Dicke findet im Lambert-Beer Gesetz Verwendung, über welches die Abschwächung der am Rand der Atmosphäre eintreffenden Strahlung I_0 bestimmt werden kann:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\tau m). \quad (2.11)$$

Der dimensionslose Airmass-Faktor $m = 1/(\sin(\text{sunel}))$ ergibt sich über den Sonnenstandswinkel *sunel* (engl. sun elevation) der Sonne.

Die Einfachstreueralbedo ω gibt an, welcher Anteil der extingierten Strahlung durch Streuung verursacht ist:

$$\omega = \frac{k_s}{k_e} \quad \text{wobei} \quad 1 \geq \omega \geq 0. \quad (2.12)$$

Im Grenzfall $\omega = 1$ findet keine Absorption statt, dagegen bedeuten kleine Werte von ω , dass die Streuung im Vergleich zur Absorption vernachlässigt werden kann.

Bisher wurde lediglich die elastische Streuung berücksichtigt. Dabei verändert sich die Wellenlänge der gestreuten Strahlung nicht. Neben der elastischen Streuung existiert die unelastische Streuung. Diese hat eine Frequenzverschiebung zur einfallenden Strahlung zur Folge und wird als Raman-Streuung bezeichnet. Weil die unelastische Streuung um mehrere Größenordnungen geringer ist als die elastische Streuung [Lenoble (1993)], wird sie bei diesen Betrachtungen vernachlässigt. Die Raman-Streuung wird daher auch bei der Strahlungsparametrisierung in numerischen Wettermodellen bisher in der Regel ebenfalls nicht berücksichtigt.

2.1.2 Strahlungstransportgleichung

Die beschriebenen Wechselwirkungen in der Atmosphäre von Absorption und Streuung aber auch von zusätzlicher Emission werden über die Strahlungstransportgleichung zusammengefasst. Die Strahlungstransportgleichung ist eine Bilanzgleichung für die Strahlung, die ein Volumenelement dV am Ort \mathbf{r} in Richtung $\boldsymbol{\Omega}$ durchläuft. Beim Durchgang durch dV findet eine Wechselwirkung in Form von Emission, Streuung und Absorption statt. Die Summe aus Streuung und Absorption ergibt die Extinktion, welche die Strahldichte L gemäß dem Beerschen Gesetz reduziert, so das gilt:

$$dL(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t) = -k_e L(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t) ds. \quad (2.13)$$

Zusätzlich zu dieser Schwächung der Strahldichte existiert ein Quellterm $J(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t)$, welcher zum einen die Emission oder Temperaturstrahlung und zum anderen die Streustrahlung in das betrachtete Volumenelement berücksichtigt. Dieser führt zu einem zusätzlichen Beitrag und zur Änderung der Strahldichte im betrachteten Volumenelement in folgender Form

$$dL(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t) = k_e J(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t) ds, \quad (2.14)$$

und es gilt allgemein

$$J = \frac{1}{k_e} \frac{dL}{ds}. \quad (2.15)$$

Dabei beschreibt $\frac{1}{k_e}$ die mittlere freie Weglänge eines Photons beim Durchlaufen des betrachteten Volumenelements bevor es absorbiert oder gestreut wird. Das Wegelement ds kann auch über folgenden Differentialoperator ausgedrückt werden [Liou (1992)]:

$$\frac{d}{ds} = \boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla. \quad (2.16)$$

Die gesamte Änderung der Strahldichte im Volumenelement ergibt sich über das Zusammenfassen der Gl. (2.13) und Gl. (2.14) zu

$$\frac{1}{k_e} \boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla L = -L + J. \quad (2.17)$$

Zur Bestimmung der Quellfunktion wird zunächst die Temperaturstrahlung am Ort \mathbf{r} in Richtung $\boldsymbol{\Omega}$ betrachtet. Da die terrestrische Strahlung im sichtbaren Spektralbereich sehr viel geringer ist als die solare Strahlung, wird die Temperaturstrahlung bei vielen Betrachtungen, z.B. bei Strahlungstransportmodellen, vernachlässigt. Bei numerischen Wettermodellen wird die langwellige Strahlung i.d.R. berücksichtigt. Daher sollen aus Gründen der Vollständigkeit auch die bei der Temperaturstrahlung auftretenden Zusammenhänge verdeutlicht werden.

Die isotrope Schwarzkörperstrahlung nach dem Planckschen Strahlungsgesetz lautet:

$$B(T, \nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2 \left(\exp \left[\frac{h\nu}{kT} \right] - 1 \right)} \quad (2.18)$$

mit der Planckschen Konstante h , der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c , der Boltzmann-Konstante k und der Frequenz ν . B ist die isotrope Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers bei der Temperatur T im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht des Volumenelements dV am Ort \mathbf{r} . Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz gilt, dass das Verhältnis der emittierten Strahlung $E(T, \nu)$ eines Körpers der Temperatur T zu seinem Absorptionsvermögen $a(\nu)$ dem Betrage nach gleich der Ausstrahlung eines schwarzen Körpers $B(T, \nu)$ bei der Temperatur T ist, d.h.

$$\frac{E(T, \nu)}{a(\nu)} = B(T, \nu). \quad (2.19)$$

Hierbei beschreibt $a(\nu)$ das Verhältnis zwischen absorbierter und auftreffender Strahlung. Für einen idealen Schwarzkörper ist also $a(\nu) = 1$.

Die über $a(\nu)$ berücksichtigte Absorption steht in direktem Zusammenhang mit der Transmission. Die Transmission Γ beschreibt den nicht extingierten Anteil der Strahlung

$$\Gamma = \exp\left(-\int_0^s k_e ds\right). \quad (2.20)$$

Die Streuung ist wellenlängenabhängig und nimmt für größer werdende Wellenlängen ab. Daher kann man für die Temperaturstrahlung die Streuung vernachlässigen, so dass die Extinktion lediglich von der Absorption bestimmt wird. Somit lässt sich $a(\nu)$ auch als Differenz zwischen 1 und Γ ausdrücken, was zu folgender Beziehung führt

$$a(\nu) = 1 - \Gamma = 1 - \exp\left(-\int_0^s k_a ds\right). \quad (2.21)$$

Dieser Ausdruck lässt sich umschreiben [Lenoble (1993)], wodurch $a(\nu)$ ausgedrückt werden kann über

$$a(\nu) = k_a ds. \quad (2.22)$$

Die emittierte Strahlung E liefert den Beitrag dL zum Strahlungsfeld mit

$$\frac{dL}{ds} = k_a B(T, \nu). \quad (2.23)$$

Aus Gl. (2.23) und Gl. (2.15) ergibt sich für den Teil der Quellfunktion, der die Temperaturstrahlung beschreibt:

$$J_1 = \frac{1}{k_e} \frac{dL}{ds} = \frac{k_a}{k_e} B(T, \nu). \quad (2.24)$$

Mit Hilfe der Einfachstreueralbedo Gl. (2.12) lässt sich Gl. (2.24) umschreiben zu

$$J_1 = (1 - \omega) B(T, \nu). \quad (2.25)$$

Ein weiterer Quellterm zur Erhöhung der Strahldichte ist die diffuse bzw. gestreute Strahlung. Die aus den Richtungen Ω' einfallende Strahlung wird im Volumenelement dV am

Ort \mathbf{r} in Richtung $\boldsymbol{\Omega}$ gestreut. D.h. aus allen Raumrichtungen $\boldsymbol{\Omega}'$ wird in das Volumenelement dV eingestrahlt. Ein Teil dieser Strahlung wird in Richtung $\boldsymbol{\Omega}$ gestreut. Der Anteil der Strahlung, welcher aus der Richtung $\boldsymbol{\Omega}'$ in Richtung $\boldsymbol{\Omega}$ gestreut wird, wird von der Phasenfunktion $P(\mathbf{r}, \cos(\theta), \nu, t)$ beschrieben. Die in die Richtung $\boldsymbol{\Omega}$ gestreute Strahlung führt unter Beachtung von Gl. (2.2), (2.6), (2.9) zu einer Erhöhung der Strahldichte von

$$dL(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t) = \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} P(\mathbf{r}, \cos(\theta), \nu, t) L(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}', \nu, t) d\boldsymbol{\Omega}' ds. \quad (2.26)$$

Damit ergibt sich mit Gl. (2.15) der zweite Anteil der Quellfunktion

$$J_2 = \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} P(\mathbf{r}, \cos(\theta), \nu, t) L(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}', \nu, t) d\boldsymbol{\Omega}'. \quad (2.27)$$

Die beiden Funktionen J_1 und J_2 addieren sich zur Quelle der Strahldichte J in Gl. (2.17). Damit lautet die Strahlungstransportgleichung

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_e} \boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla L(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t) &= -L(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, \nu, t) + (1 - \omega) B(T, \nu) \\ &+ \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \int_{4\pi} P(\mathbf{r}, \cos(\theta), \nu, t) L(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}', \nu, t) d\boldsymbol{\Omega}'. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Diese Gleichung beschreibt die Wechselwirkung des gesamten Strahlungsfeldes mit den atmosphärischen Extingenten. Die Änderung der spektralen Strahldichte L (linke Seite in Gl. (2.28)) ist abhängig von der Strahldichte L (1. Term der rechten Seite in Gl. (2.28)), der Temperaturstrahlung (2. Term) und der gestreuten Strahlung (3. Term).

Wie der Strahlungstransport in der Atmosphäre unter Berücksichtigung der Extinktionsprozesse im Rahmen von physikalischen Modellen parametrisiert wird, beschreibt das folgende Kapitel.

2.2 Physikalische Modelle

In diesem Abschnitt werden zunächst einige Grundlagen erarbeitet, die für numerische Wettermodelle im Allgemeinen gültig sind. Es wird beschrieben, wie diese prinzipiell aufgebaut sind und welche physikalischen Gesetzmäßigkeiten die Basis bilden. Daran schließt sich eine einführende Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten MM5-Modells an. Der Schwerpunkt liegt auf der Erläuterung des Strahlungsalgorithmus und darauf, wie insbesondere die Bewölkung und deren Wirkung auf die Solarstrahlung parametrisiert wird. Mit dem gleichen Schwerpunkt wird darauf folgend das ECMWF Modell eingeführt.

2.2.1 Numerische Wettermodelle

Die zeitabhängige Modellierung physikalischer Prozesse in der Atmosphäre, mit dem Ziel eine Vorhersage der zukünftigen Entwicklung abzuleiten, wird als numerische Wettervorhersage bezeichnet. Ausgehend vom aktuellen Zustand der Atmosphäre simulieren leistungsfähige Rechner das weitere atmosphärische Geschehen. Die Grundlage dafür bilden

die physikalischen Gesetze, die die Prozesse in der Atmosphäre beschreiben. Die mathematische Formulierung dieser Gesetzmäßigkeiten führt zu einem Gleichungssystem, das die zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Zustandvariablen, wie z.B. Druck, Wind oder Temperatur, beschreibt. Da es sich bei den beschreibenden Gleichungen um nicht-lineare Differentialgleichungen handelt, ist eine eindeutige analytische Lösung nicht möglich. Die Gleichungssysteme können aber mit numerischen Verfahren näherungsweise gelöst werden [COMET® (2002)].

Man unterscheidet numerische Wettermodelle danach, ob sie den gesamten Erdball abdecken oder auf einen Ausschnitt begrenzt sind. Entsprechend spricht man von globalen und räumlich begrenzten Modellen. Eine Beschränkung des Modellgebietes auf eine Region beschränkt nicht nur den räumlichen Gültigkeitsbereich der Vorhersage. Dies kann vielmehr auch zu fehlerhaften Simulationen im Inneren des Modellgebietes führen, wenn atmosphärische Entwicklungen, die ihren Ursprung außerhalb der Region haben, im Verlauf des Vorhersagezeitraums in die Region eindringen. Dieses Eindringen und die damit einhergehenden Entwicklungen werden aber bei einem räumlich stark begrenzten Modell nicht berücksichtigt. Dadurch können insbesondere längerfristige Vorhersagen stark verfälscht werden. Der Vorteil von räumlich begrenzten Modellen liegt in der Möglichkeit, die frei gewordenen Rechnerkapazitäten zu nutzen und mit einer deutlich höheren Auflösung zu arbeiten. Die atmosphärischen Vorgänge können dadurch detaillierter beschrieben und simuliert werden, was eine höhere Genauigkeit verspricht.

Des Weiteren unterscheidet man zwischen hydrostatischen und nicht-hydrostatischen Modellen. Die hydrostatischen Modelle nehmen ein hydrostatisches Gleichgewicht an, in welchem die abwärtsgerichtete Gravitationskraft der Atmosphäre im Gleichgewicht ist mit der aufwärtsgerichteten Gradientkraft. Die Annahme des hydrostatischen Gleichgewichts ist für makroskalige Systeme sowie für einige mesoskalige Phänomene gültig. Nicht-hydrostatische Prozesse und deren Einfluss werden dann von Bedeutung, wenn die vertikale Ausdehnung eines Phänomens näherungsweise gleich seiner Höhe ist. Da die Höhe der meisten atmosphärischen Phänomene durch die Höhe der Troposphäre begrenzt ist, bekommt diese Bedingung dann Gültigkeit, wenn die jeweiligen Phänomene Ausdehnungen von 10 km oder weniger haben. Beispiele für signifikante nicht-hydrostatische Wetterphänomene sind konvektive Stürme oder Böen von einziehenden Wetterfronten. Nicht-hydrostatische Wettervorhersagemodelle besitzen Gleichungen zur Beschreibung der vertikalen Bewegung, die hydrostatische Modelle nicht besitzen. Daher können nicht-hydrostatische Modelle auch die Wetteränderungen direkt vorhersagen, die durch Vertikalbewegungen aufgrund Auftriebsänderungen und anderer Vertikalbeschleunigungen verursacht werden. Dagegen können hydrostatische Modelle Wetterphänomene, die aus Vertikalbewegungen resultieren, nur annähern und nicht direkt berechnen.

Aktueller Zustand der Atmosphäre

Der eigentliche Prozess der Modellierung beginnt mit der Analyse des aktuellen Zustandes der Atmosphäre. Dazu verwenden die Betreiber der Wettermodelle den Erdball umspannende Netzwerke von Messstationen. Die Beschreibung des Anfangszustandes basiert mitt-

lerweile nicht mehr nur auf diesen reinen Messungen, deren Informationen auf vordefinierte Punkte eines Gittermodells extrapoliert werden. Stattdessen wird häufig ein vorangegangener kurzer Vorhersagelauf genutzt. Die Messungen werden dann dazu verwendet, diese Kurzvorhersage so zu optimieren, dass man eine bestmögliche Beschreibung des aktuellen Zustandes der Atmosphäre erhält. Über eine solche Rückkopplung zwischen Messungen und Modellergebnissen können auch Satellitendaten verarbeitet werden. Diese Art eines Analyse-Verfahrens wird auch als 4DVAR (engl. four-dimensional variational data assimilation) bezeichnet. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit einer global gleichmäßig aufgelösten Zustandsbeschreibung.

Physikalische Größen und Grundgleichungen

Es genügen sieben physikalische Größen, um die Atmosphäre für die Wettermodellierung ausreichend zu beschreiben. Dies sind der Luftdruck, die Temperatur, der Partialdruck des Wasserdampfes, die Luftdichte, die zwei Komponenten des horizontalen Windvektors und die Vertikalgeschwindigkeit. In der Regel versteht man unter einer Wettervorhersage die Prognose der Verteilung dieser sieben meteorologischen Elemente. Informationen über Temperatur und Windgeschwindigkeiten können zwar direkt abgelesen werden, aber Prognosen von Bewölkung, Niederschlag oder der Einstrahlung am Boden stehen nicht direkt zur Verfügung. Daher lässt sich jede Vorhersage in grundsätzlich zwei Schritte gliedern. Als erstes erfolgt die Modellierung und möglichst exakte Vorhersage der Verteilungen von Luftdruck, Temperatur, Windströmung u.s.w. und als zweites die Interpretation dieser prognostizierten Größen im Hinblick auf weitere Größen, die von Interesse sind. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit insbesondere die globale Einstrahlung am Boden.

Um den beschriebenen ersten Schritt gehen zu können, sind zur Bestimmung der genannten Variablen entsprechende Gleichungen nötig. Diese prognostischen Gleichungen sollen hier nur kurz beschrieben werden, für eine detaillierte Einführung und Beschreibung siehe [Reuter (1976)], [Holton (1992)], bzgl. des MM5 Modells [Grell et al. (1995)] und des ECMWF-Modells [White (2002)].

Für die drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors stehen über die Newtonsche Mechanik (2. Newtonsches Gesetz) die drei *Bewegungs-* bzw. *Navier-Stokes-Gleichungen* zur Verfügung. Diese stellen eine Beziehung zwischen dem Geschwindigkeitsvektor, den äußeren Gravitationskräften, dem Druckgradienten und der Dichte dar. Hinzu kommt die *Kontinuitätsgleichung* als Ausdruck der Erhaltung der Masse. Des Weiteren gilt die aus der Thermodynamik bekannte *Zustandsgleichung*. Im einfachsten Fall eines idealen Gases, das auch in numerischen Wettermodellen angenommen wird [Person (2003)], ist der Druck proportional zu dem Produkt aus Temperatur und Dichte. Hierbei wird der Proportionalitätsfaktor als Gaskonstante bezeichnet.

Damit sind fünf Gleichungen angegeben und es fehlen noch die Gleichungen für die in der Zustandsgleichung auftauchende Temperatur und den variablen Wasserdampfgehalt. Für die Temperatur gilt der *Energiesatz der Thermodynamik* (1. Hauptsatz). Der Wasserdampf wird über eine *Bilanzgleichung* ähnlich der Kontinuitätsgleichung beschrieben. Diese postuliert, dass der gesamte in der Atmosphäre vorhandene Wasserdampfgehalt er-

halten bleibt. Voraussetzung dafür ist, dass die Quellen und Senken über Verdunstung und Niederschlag in der Atmosphäre und insbesondere an der Erdoberfläche bekannt sind.

Auch die Formulierung des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik setzt voraus, dass die äußere Energiebilanz, welches im Wesentlichen die Strahlungsbilanz ist, als bekannte Funktion vorgegeben ist. Da dies nicht der Fall ist, muss eine achte Variable eingeführt werden und zur Determinierung des Problems eine *Strahlungsbilanzgleichung*. Bei der achten Variablen handelt es sich um eine Größe, die geeignet ist, die in der Atmosphäre durch Absorption und Emission beeinflussten Strahlungsströme zu beschreiben. Diese ist deswegen erforderlich, da zwar die am Rand der Atmosphäre einfallende Strahlung bekannt ist, aber die in der Atmosphäre abgeschwächte Strahlungsenergie mit den anderen meteorologischen Größen, insbesondere mit dem Wasserdampfgehalt und der Temperatur, verknüpft ist. In diesem Zusammenhang werden die sensiblen und latenten Wärmeflüsse modelliert. Beim sensiblen Wärmefluss ist die Wärme über die kinetische Energie der Moleküle definiert, die durch gegenseitige Stoßübertragung weitergeleitet wird. Anders ausgedrückt ist sie die Wärme, die während eines Temperaturwechsels einer Substanz absorbiert oder transmittiert wird, ohne das damit ein Phasenübergang verbunden ist. Der latente Wärmefluss ist dagegen die Wärme, die von einem System während eines Phasenüberganges abgegeben oder absorbiert wird. Der sich aus der Summe von sensiblen und latenten Wärmefluss ergebende Nettowärmefluss steht in Beziehung zu Temperatur, Wasserdampfdruck, Luftdruck und Windgeschwindigkeit.

Über die beschriebenen Gleichungen lassen sich die benötigten Größen modellieren und vorhersagen. Es ist noch zu erwähnen, dass die theoretisch erforderlichen Größen von Luftdichte und Vertikalgeschwindigkeit nicht direkt zu beobachten sind. Die Luftdichte kann mit Hilfe der Zustandsgleichung aus Druck und Temperatur bestimmt werden.

Diskretisierung auf Gittermodell

Die Beschreibung der physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre und die Bestimmung der Größen erfolgt über eine Darstellung auf einem Gittermodell. Die Atmosphäre wird über eine diskrete Anzahl von Gitterpunkten auf bestimmten Höhenleveln simuliert. Die Höhenlevel reichen vom Boden bis in die höhere Atmosphäre. Auf diese Weise wird ein dreidimensionales Gitter erschaffen, auf dem alle nötigen mathematischen Berechnungen stattfinden. Die modellinterne zeitliche Auflösung beträgt wenige Sekunden bis einige Minuten. Die kontinuierliche Berechnung der physikalischen Vorgänge führt zu einer Wettervorhersage für die nächsten Stunden, Tage oder Wochen. Je dichter das Gitter ist, umso realistischer können die Vorgänge in der Atmosphäre modelliert werden. Dieser Forderung steht jedoch als beschränkender Faktor die endliche Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Rechner gegenüber. Da der Rechenaufwand mit der Gitterpunktzahl wächst, eine Vorhersage aber über einen Zeitraum von einigen Tagen in wenigen Stunden berechnet werden muss, ist die Zahl der Gitterpunkte entsprechend der Rechnerkapazität zu wählen.

Die horizontale Auflösung eines numerischen Wettervorhersagemodells steht in direkter Beziehung mit der räumlichen Ausdehnung der zu simulierenden Wetterphänomene. Je

höher die Auflösung, je kleiner also der Abstand zwischen den Gitterpunkten, desto kleinskaliger kann das vom Modell beschreibbare Phänomen sein. Typischerweise sind mindestens fünf bis sieben Gitterpunkte nötig, um ein Phänomen in einem Gitterpunktmodell zu definieren. Dies bedeutet, dass bei einer horizontalen Auflösung von z.B. 20 km das Modell keine Phänomene vorhersagen kann, die kleinskaliger sind als 100 km. Eine höhere horizontale Auflösung bedeutet aber auch mehr Rechenzeit. Darüber hinaus wird in der Regel mit einer höheren räumlichen Auflösung auch die zeitliche Auflösung erhöht. Das bedeutet, dass der Zeitraum zwischen den Vorhersageschritten verkleinert wird. Das Inkaufnehmen einer längeren Rechenzeit bei höherer Auflösung ist dennoch in vielen Fällen sinnvoll. So werden dadurch die Möglichkeiten des Modells verbessert, das Terrain und die dadurch beeinflussten Phänomene zu beschreiben.

Wenn es darum geht eine geeignete horizontale Auflösung zu wählen, geht man davon aus, dass es nötig ist sicherzustellen, dass ähnliche Phänomene an jedem Punkt innerhalb der Domäne, also des betrachteten Gebietes, mit gleicher Genauigkeit vorhergesagt werden. Dies führt dazu, dass eine gleichmäßige Verteilung der Gitterpunkte gewählt wird. Bei der Bestimmung der optimalen vertikalen Auflösung kann dagegen die Tatsache genutzt werden, dass bestimmte atmosphärische Prozesse i.d.R. auf eine bestimmte Region in der Vertikalen beschränkt sind. Daher können die höheren vertikalen Auflösungen auf die Regionen beschränkt werden, die benötigt werden. So sollte die vertikale Auflösung in Bodennähe höher sein, um dort z.B. den Transfer von Wärme und Feuchtigkeit in die atmosphärische Grenzschicht durch die Einstrahlung und Erwärmung am Tage beschreiben zu können. Dagegen ist in der mittleren Troposphäre keine so hohe Auflösung nötig, obwohl sie unterhalb und in der Nähe der Tropopause wieder erhöht werden sollte, um z.B. Jetstreams, also charakteristische starke Windströme, korrekt beschreiben zu können.

Numerische Wettermodelle nutzen verschiedene Arten, um die Vertikalkoordinaten zu repräsentieren. Weit verbreitet ist es, die vertikale Schichtung mit Hilfe von Sigma-Koordinaten zu bestimmen. Diese Sigma-Koordinate ist definiert über

$$\sigma = (p - p_t)/(p_s - p_t). \quad (2.29)$$

Hierbei ist p der Druck, p_t ein bestimmter konstanter Druck am oberen Ende der betrachteten Atmosphäre und p_s der Oberflächendruck. In einem Sigma-Koordinatensystem wird für die unterste und oberste Schicht angenommen, dass dort die vertikalen Bewegungen vernachlässigbar sind. Die unterste Schicht liegt in unmittelbarer Nähe zum Erdboden ($\sigma = 1.0$) und die oberste liegt bei einem geringen Wert für den Luftdruck ($\sigma = 0.0$). Nahe der Oberfläche nehmen die Sigma-Schichten den Höhenverlauf des Terrain an, während mit zunehmender Höhe und kleineren Sigmas der Verlauf der Schichten immer mehr abflacht und schließlich näherungsweise horizontal verläuft, s. Abb. 2.1. Die Sigma-Koordinaten vermeiden im Gegensatz zu Drücken oder Höhen Komplikationen, die entstehen, wenn die Fläche konstanten Drucks oder einer bestimmten Höhe die Erdoberfläche, z.B. an einem Berg, durchschneidet. Da sich die unteren Schichten in einem Sigma-Koordinaten-System dem Verlauf der Topographie anpassen, kann die vertikale Auflösung nahe der Erdoberfläche leicht durch Erhöhung der Anzahl der Schichten erwei-

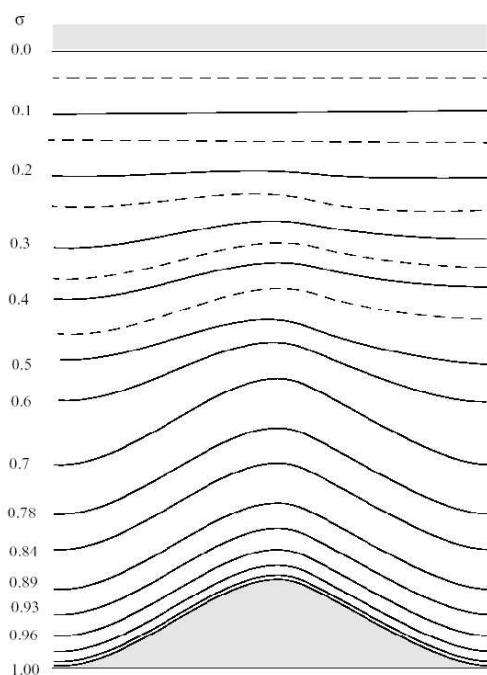


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines vertikalen Sigma-Koordinaten-Systems. Der Verlauf der Höhenschichten passt sich dem Terrain an; entnommen aus [Dudhia et al. (2003)].

tert werden. Dadurch können Grenzschicht-Prozesse besser modelliert werden. Im Folgenden wird nun ausgeführt, wie die hier verwendeten Modelle die zusätzliche Größe der globalen Einstrahlung bestimmen.

2.2.2 Strahlungstransport in MM5

MM5 ist ein mesoskaliges, nicht-hydrostatisches Modell, das am National Center for Atmospheric Research (NCAR) der Penn State University/USA entwickelt wurde. Es basiert auf einem mesoskaligen Modell, das von Anthes in den frühen Siebzigern entwickelt und später dokumentiert wurde [Anthes (1978)]. Seitdem wurde das Modell kontinuierlich weiterentwickelt.

Ein mesoskaliges Modell ist ein numerisches Wettervorhersagemodell mit einer hohen horizontalen und vertikalen Auflösung. Die atmosphärischen Prozesse werden in einer räumlichen Skala von etwa 1 bis 50 km und einer zeitlichen Auflösung von 1 bis 12 Stunden dargestellt.

Die mesoskalige Meteorologie beschäftigt sich mit der Untersuchung und Vorhersage von mittel- und großskaligen Wetterphänomenen, wie tropischen Zyklonen, Wirbelstürmen, Tornados, Gewittern oder lokalen Niederschlägen. Im Gegensatz dazu untersucht die mikroskalige Meteorologie kleinskalige Prozesse, wie die atmosphärische Turbulenz, den Transport von Wärme, Feuchtigkeit und Impuls zwischen der Oberfläche und der Atmo-

sphäre oder kleinskalige Phänomene, wie z.B. die Bildung von Hagel und deren Beitrag zu größer-skaligen Klimasystemen. Unter makroskaligen Prozessen versteht man Phänomene, die das globale Klima betreffen.

Mesoskalige Wettermodelle sind bezüglich des modellierten Gebietes sowohl horizontal als auch vertikal begrenzt. Die Randbedingungen sind die meteorologischen Bedingungen, die die Ränder des betrachteten Gebietes bestimmen. Die Modellrechnungen müssen mit den Randbedingungen konsistent sein. Zudem gibt es in MM5 die Möglichkeit, über das sog. Nesting die horizontale Auflösung schrittweise zu vergrößern bzw. den Abstand zwischen den Gitterpunkten zu verringern. Mesoskalige Modelle erhalten ihre Initialisierungs- und Randbedingungen über globale oder regionale Modelle mit substantiell größerer Gitterauflösung und können nur so gut sein, wie es die an sie weitergeleiteten Informationen sind.

Eine detaillierte Beschreibung und Einführung in den Aufbau des MM5 Modell findet sich in [Dudhia et al. (2003)], [Grell et al. (1995)]. Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere die Modellierung des Strahlungstransports von Interesse.

Parametrisierungen

Es gibt grundsätzlich zwei unterschiedliche Parametrisierungen des kurzwelligen Strahlungstransports in MM5. Hierbei ist die Beschreibung der Vorgänge in bewölkten Situationen von besonderer Bedeutung, da Wolken der entscheidende Faktor für die Schwächung der Solarstrahlung in der Atmosphäre sind. Daher werden im Folgenden insbesondere die in MM5 implementierten Parametrisierungen der Abschwächung der Solarstrahlung durch Wolken erläutert. Eine der beiden Parametrisierungen basiert auf der Bestimmung des Wolkenbedeckungsgrades, während die andere Informationen über den Flüssigwasserpfad nutzt. Der Flüssigwasserpfad ist der integrierte Wolken- und Regenwassergehalt einer Atmosphärensäule. Zunächst soll die einfachere Parametrisierung mittels des Wolkenbedeckungsgrades erläutert werden.

Parametrisierung mittels Wolkenbedeckungsgrad

Die Parametrisierung mittels des Wolkenbedeckungsgrades basiert auf der Arbeit von [Benjamin (1983)]. Es wird dabei zwischen einem tiefen, mittleren und hohen Bedeckungsgrad unterschieden. Wird ein Oberflächendruck von 1000 hPa angenommen, bestimmen alle Wolken unter 800 hPa den tiefen Bedckungsgrad, alle Wolken zwischen 800 hPa und 450 hPa den mittleren und die Wolken über 450 hPa den hohen Bedeckungsgrad. Die Abschwächung der kurzwelligen Strahlung durch diese Wolkenschichten wird über die Absorptions- und Streuungstransmissivitäten τ_{ac} und τ_{sc} beschrieben. Diese gesamten Transmissivitäten ergeben sich über das Produkt der Absorptions- und Streuungstransmissivitäten τ_{ai} und τ_{si} für jede Wolkenschicht. Dabei werden die von der Wolkenschicht abhängigen Transmissivitäten über den Wolkenbedeckungsgrad n_i gewichtet. Die Indizes $i = 1, 2, 3$ repräsentieren die tiefe, mittlere und höhere Wolkenschicht. Die Transmissivitäten τ_{ai} und τ_{si} wurden für die drei Wolkenschichten von [Benjamin (1983)] bestimmt

und werden für MM5 einer Tabelle entnommen [Grell et al. (1995)]. Der Wolkenbedeckungsgrad basiert auf der Nutzung der relativen Feuchte RH (engl. relative humidity) und ist für die tiefen und mittleren Schichten ($i = 1, 2$) gegeben über:

$$n = 4.0 * RH - 3.0. \quad (2.30)$$

Für die hohen Wolken ($i = 3$) gilt:

$$n = 42.5 * RH - 1.5. \quad (2.31)$$

Hierbei ist die eingesetzte relative Feuchte RH diejenige, die sich als das Maximum bzgl. der jeweils vorhandenen Höhenlevel des Gittermodells in der tiefen, mittleren bzw. hohen Schicht ergibt.

Eine andere Parametrisierung steht innerhalb von MM5 durch die direkte Nutzung des Flüssigwasserpfades zur Verfügung.

Parametrisierung mittels Flüssigwasserpfad

Die Parametrisierung unter Verwendung des Flüssigwasserpfades basiert auf den Arbeiten von [Stephens (1978)] und [Coakley (1975)]. Die abwärtsgerichtete Komponente der kurzwelligen Einstrahlung wird unter Berücksichtigung der folgenden Punkte bestimmt:

1. Einfluss des Sonnenzenitwinkels, der die Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre bestimmt,
2. Wolken und deren Reflektions- und Absorptionseigenschaften,
3. die klare Atmosphäre und die dadurch verursachte Streuung sowie die Absorption durch Wasserdampf.

Damit wird die kurzwellige Einstrahlung S_d bestimmt über

$$S_d(z) = \mu S_0 - \int_z^{top} (dS_{cs} + dS_{ca} + dS_s + dS_a), \quad (2.32)$$

wobei μ der Kosinus des Sonnenzenitwinkels und S_0 die Solarkonstante ist (cs = cloud scattering, ca = cloud absorption, s = scattering in clear air, a = absorption in clear air). Der Wolkenanteil in einer Gitterzelle ist entweder 0 oder 1, da für eine einzelne Gitterzelle eine horizontal homogene Struktur der Wolken angenommen wird. Die Wolken-Rückstreuung bzw. Albedo dS_{cs} und die Absorption durch Wolken dS_{ca} werden mit Hilfe von Lookup-Tabellen innerhalb von MM5 bilinear interpoliert. Die Tabellen enthalten Werte von μ und $\ln(W/\mu)$, wobei W der vertikal integrierte Wolkenwassergehalt ist. Diese Lookup-Tabellen sind eine eigenständige Weiterentwicklung einer Parametrisierung, die auf den theoretischen Ergebnissen von [Stephens (1978)] basiert.

Stephens Parametrisierung der kurzwelligigen Solarstrahlung gründet auf der Annahme, dass die auf die Wolkenoberkante treffende Strahlung in der Form eines direkten Strahls erscheint und damit nur vom Sonnenzenitwinkel abhängig ist. Wird zudem die untere Grenzschicht als nicht reflektierend angenommen, ergeben sich die Reflektion Re sowie die Transmission Tr durch eine Schicht der optischen Dicke τ in Abhängigkeit von der Einfachstreueralbedo ω [Coakley (1975)]. Für nicht absorbierende Medien mit $\omega = 1$ gilt

$$Re(\mu) = \frac{\beta(\mu)\tau/\mu}{1 + \beta(\mu)\tau/\mu}, \quad (2.33)$$

$$Tr(\mu) = 1 - Re(\mu). \quad (2.34)$$

Dabei ist τ die optische Dicke der Wolke und β der zurückgestreute Anteil der unter dem Sonnenzenitwinkel μ eintreffenden Strahlung. Dieser Rückstreuanteil ist eine Funktion von μ und beinhaltet ein Integral über die Phasenfunktion der Streuung. Für absorbierende Medien mit $\omega < 1$ gilt

$$Re(\mu) = (u^2 - 1)\exp(\tau_{eff}) - \exp(-\tau_{eff})/R, \quad (2.35)$$

$$Tr(\mu) = 4u/R \quad (2.36)$$

mit

$$u^2 = [1 - \omega + 2\beta(\mu)\omega]/(1 - \omega), \quad (2.37)$$

$$\tau_{eff} = ((1 - \omega)[1 - \omega + 2\beta(\mu)\omega])^{1/2}\tau/\mu, \quad (2.38)$$

$$R = (u + 1)^2\exp(\tau_{eff}) - (u - 1)^2\exp(-\tau_{eff}). \quad (2.39)$$

Damit ergibt sich die Absorption A zu

$$A(\mu) = 1 - Re(\mu) - Tr(\mu). \quad (2.40)$$

Diese Gleichungen repräsentieren das two-stream-model von [Coakley (1975)]. [Stephens (1978)] unterteilt nun das Solarspektrum in zwei Wellenlängenbänder. Das erste reicht von 0.3 bis 0.75 μm . Da die Absorption von Wolkentropfen hier sehr gering ist, werden hierfür die Lösungen für die konservative Streuung bzw. nicht absorbierende Medien angewendet, s. Gl. (2.33) und (2.34). Die Absorption von Wolken wird auf das zweite Wellenlängenband von 0.75 bis 4.0 μm beschränkt, s. Gl. (2.35) und (2.36).

Die optische Dicke τ ist der entscheidende Parameter, der zur Bestimmung von Re , Tr und A benötigt wird. Stephens entwickelte für die beiden Spektralbereiche zwei Funktionen, die die breitbandige optische Dicke in Abhängigkeit vom Flüssigwasserpfad LWP (engl. liquid water path) darstellt [Stephens (1978)]. Als Basis für die Funktionen dienen die modellierten Ergebnisse für je acht verschiedene Wolkentypen, die über die Mie-Theorie bestimmt wurden. Die an diese Ergebnisse angepassten Funktionen lauten für die konservative Streuung, $\omega = 1$, $0.3 \mu m < \lambda <= 0.75 \mu m$:

$$\log_{10}(\tau_1) = 0.2633 + 1.7095 \log_e[\log_{10}(LWP)], \quad (2.41)$$

sowie für die nicht-konservative Streuung, $\omega < 1$, $0.75 \mu m \leq \lambda \leq 4.0 \mu m$:

$$\log_{10}(\tau_2) = 0.3492 + 1.6518 \log_e[\log_{10}(LWP)]. \quad (2.42)$$

Mittels der Gl. (2.41) und (2.42) lässt sich die optische Dicke bestimmen. Für eine Reihe verschiedener optischer Dicken wurden die Reflexion, Absorption und Transmission mittels der Gl. (2.33) bis Gl. (2.40) über das two-stream-model durchgeführt. Die Ergebnisse wurden dann durch Anpassungen der Parameter ω und β an die entsprechenden Resultate eines detaillierteren theoretischen Modells von [Stephens (1978)] noch einmal optimiert. Auf diesem Wege wurden Lookup-Tabellen erstellt, in denen Werte für $1 - \omega$ und β in Abhängigkeit vom Zenitwinkel μ und der optischen Dicke τ_N enthalten sind. Dabei wird der Parameter β nochmals aufgrund des betrachteten Wellenlängenbandes unterschieden [Stephens (1978)].

Damit sind alle nötigen Größen bestimmbar. Über den Flüssigwassergehalt wird τ bestimmt und über τ und μ können die Parameter ω und β mit Hilfe der Lookup-Tabellen von Stephens festgestellt werden. So kann die Reflexion und Absorption von Wolken berechnet werden. Die Abb. 2.2 gibt noch einmal einen zusammenfassenden Überblick.

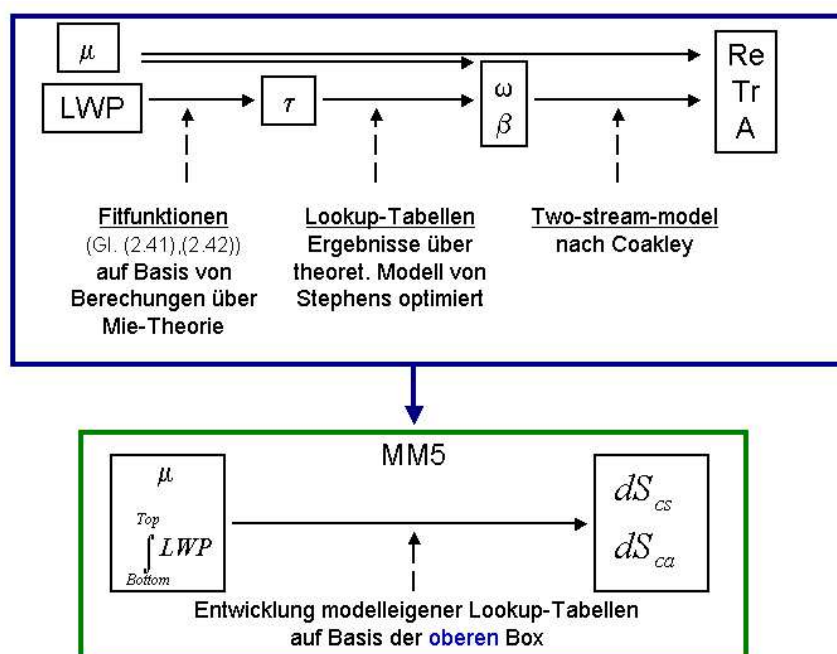


Abbildung 2.2: Überblick der Parametrisierung der Wolkeneigenschaften mittels Flüssigwasserpfad. Die obere Box fasst die Entwicklung von Reflexion Re , Transmission Tr und Absorption A aus den zu Grunde liegenden Parametern des Sonnenzenitwinkels μ und dem Flüssigwasserpfad LWP nach den Arbeiten von [Stephens (1978)] zusammen. Darauf basierend sind für MM5 (untere Box) eigene Lookup-Tabellen entwickelt worden, um die Wolkenabsorption dS_{ca} und Wolkenstreuung dS_{cs} zu bestimmen [Grell et al. (1995)].

Befindet sich die Atmosphäre nun noch über einer reflektierenden Oberfläche, müssen die vielfachen Reflexionen zwischen Wolkenschicht und Boden berücksichtigt werden. Dazu benötigt man die Oberflächenalbedo a , mit deren Hilfe sich die Reflexion und Transmission des kombinierten Systems wie folgt ergibt:

$$Re' = Re + aTr^2/(1 - aRe), \quad (2.43)$$

sowie

$$Tr' = Tr/(1 - aRe). \quad (2.44)$$

Damit ist beschrieben, wie der Einfluss der Bewölkung auf die solare Einstrahlung in MM5 modelliert wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird der zweite vorgestellte Ansatz unter Berücksichtigung des Flüssigwasserpfades für die Bestimmung der solaren Einstrahlung verwendet.

2.2.3 Strahlungstransport im Atmosphärenmodell des ECMWF

Das European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) betreibt unter anderem ein Atmosphärenmodell zur Wettervorhersage mit einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und einer zeitlichen Auflösung von maximal drei Stunden. Im Gegensatz zu MM5 handelt es sich hierbei um ein globales, makroskaliges und hydrostatisches Modell. Das ECMWF bestimmt über ein eigenes Strahlungstransportmodell und auf der Basis ihrer eigenen Wettervorhersage die Globalstrahlung in entsprechender Auflösung. Da im Verlauf dieser Arbeit mit diesen Daten gearbeitet wird, soll hier kurz auf das verwendete Strahlungsmodell eingegangen werden. Bezüglich einer detaillierten Erklärung des Strahlungsalgorithmus sei auf die entsprechenden Arbeiten hingewiesen [Morcette (1991)], [Morcette (2000)]. Das Modell für kurzweilige Strahlung basiert auf verschiedenen Arbeiten zur Parametrisierung der Vorgänge von Absorption, Streuung und Reflexion in der Atmosphäre für bewölkte und unbewölkte Situationen [Fouquart (1980)], [Coakley (1975)]. Die Beschreibung in diesem Kapitel lehnt sich an die Darstellung in [Morcette (2000)] an. Dieses Verfahren wird ständig weiterentwickelt und daher kann das aktuelle Verfahren im Einzelnen von der Darstellung hier abweichen.

Die Berechnungen des Strahlungsmodells für den Kurzwellenbereich erfolgen für zwei Spektralintervalle. Die Begründung hierfür ist, dass die Reflexion der Vegetation als wichtige Eigenschaft der Oberflächenalbedo stark im nahen Infrarotbereich ansteigt. Des Weiteren absorbiert Wasserdampf nicht unter $0.68 \mu m$. Daher erfolgt eine Aufteilung in die spektralen Intervalle für den sichtbaren Bereich von $0.2 - 0.68 \mu m$ und dem nahen Infrarot von $0.68 - 4.0 \mu m$. Zudem kann so der Rechenaufwand verringert werden, da die Wechselwirkungen zwischen der Absorption durch Wasserdampf und Gase und den Streuungsprozessen nur für den nahen Infrarotbereich berücksichtigt werden.

Unter der Annahme einer homogen geschichteten Atmosphäre sind die abwärts- und aufwärtsgerichteten Flüsse F^- und F^+ an der Schnittstelle j zweier Schichten gegeben

über:

$$F^-(j) = F_0 \prod_{k=j}^N T_{bot}(k) \quad (2.45)$$

$$F^+(j) = F^-(j) R_{top}(j-1) \quad (2.46)$$

Hierbei sind $R_{top}(j)$ die Reflektivität am oberen Ende (engl. top) und $T_{bot}(j)$ die Transmissivität am unteren Ende (engl. bottom) der j -ten Atmosphärensicht. Die am oberen Ende der Atmosphäre eintreffende Strahlung ist über F_0 gegeben. Die Berechnungen von R_{top} beginnen an der Oberfläche und steigen nach oben, während die von T_{bot} am oberen Ende der Atmosphäre beginnen und nach unten wandern. Beide Größen berücksichtigen das Vorkommen von Bewölkung:

$$R_{top}(j) = C_{cld}(j) R_{cld}(j) + (1 - C_{cld}(j)) R_{clr}(j) \quad (2.47)$$

$$T_{bot}(j) = C_{cld}(j) T_{cld}(j) + (1 - C_{cld}(j)) T_{clr}(j), \quad (2.48)$$

mit $C_{cld}(j)$ als der Wolkenanteil in der betrachteten Schicht. Die Abkürzung *cld* steht für die bewölkten (engl. cloudy) und *clr* für die wolkenfreien (engl. clearsky) Anteile der betrachteten Atmosphärensicht.

Der bewölkte und unbewölkte Anteil der Reflektivität und Transmissivität wird für jede Atmosphärensicht einzeln bestimmt. Für möglichst genaue Näherungen von Phasenfunktionen mit ausgeprägten Vorwärtsspeak sind viele Entwicklungsterme notwendig, was zu hohen Rechenzeiten führt. Eine anerkannte Lösung des Problems ist die Näherung der Phasenfunktion über die Delta-Eddington Approximation. Dabei wird zwischen aufwärts- und abwärtsgerichteten Strahlungsflüssen unterschieden. Mittels dieser Approximation wird die Strahlungstransportgleichung Gl.(2.28) durch zwei Differentialgleichungen erster Ordnung ersetzt, die relativ einfach analytisch zu lösen sind. Die Radianz L kann mit Hilfe von Legendre-Polynomen und nur unter Verwendung der ersten beiden Termen geschrieben werden als $L(\tau, \mu) = L_0(\tau) + \mu L_1(\tau)$. Ergebnis ist letztlich ein Satz von zwei Gleichungen, die unter der Ausnutzung von gültigen Randbedingungen gelöst werden können [Liou (1992)], [Stamnes (1999)], [Morcette (1991)].

Die entscheidenden Eingangsgrößen, die zur Bestimmung von Reflektivität und Transmissivität und damit zur Lösung des Satzes aus zwei Gleichungen Verwendung finden, sind die optische Dicke τ , der Asymmetriefaktor g und die Einfachstreueralbedo ω . Die über diese Größen beschriebenen optischen Eigenschaften von Wolken ergeben sich für Wasserwolken (Index *c*) nach [Fouquart (1986)] und für Eiswolken (Index *ic*) nach [Ebert (1992)]. Die optische Dicke τ_c wird über den Flüssigwasserpfad LWP bestimmt:

$$\tau_c = \frac{3LWP}{2r_{eff}}. \quad (2.49)$$

Dabei ist r_{eff} der mittlere effektive Radius der Größenverteilung von Wasserwolkenpartikeln. Diese Größe wird über eine lineare Funktion über die Höhe parametrisiert und nimmt Werte zwischen $10\mu m$ an der Oberfläche und $45\mu m$ an der oberen Atmosphäre an. Über

diesen empirischen Ansatz wird berücksichtigt, dass sich der Wasserwolkentyp mit der Höhe ändert. In niedrigen stratusförmigen Wolken werden eher kleinere Wolkentropfen beobachtet, während in mittelhohen cumulusförmigen Wolken größere Tropfen nachgewiesen werden können.

Die Winkelverteilung der Streustrahlung wird über die Phasenfunktion beschrieben. Da die Bestimmung dieser Funktion aber mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden sein kann, wird diese über den Asymmetriefaktor g approximiert. Für die zwei Spektralintervalle ist g_c festgelegt mit 0.865 bzw. 0.910. Die Einfachstreueralbedo ω_c ist als Funktion von τ_c gegeben [Fouquart (1986)]:

$$\omega_{c1} = 0.9999 - 5 \cdot 10^{-4} \exp(-0.5\tau_c) \quad (2.50)$$

$$\omega_{c2} = 0.9999 - 2.5 \cdot 10^{-3} \exp(-0.5\tau_c) \quad (2.51)$$

Diese Parameter wurden für In-situ-Messungen für Stratocumulus Wolken angepasst [Bonnel et al. (1983)].

Für die optischen Eigenschaften von Eiswolken gilt:

$$\tau_{ic} = IWP(a_i + b_i/r_{eff}) \quad (2.52)$$

$$\omega_{ic} = c_i - d_i r_{eff} \quad (2.53)$$

$$g_{ic} = c_i + f_i r_{eff} \quad (2.54)$$

Die Koeffizienten a_i , b_i , c_i , d_i und f_i wurden von [Ebert (1992)] für die zwei Spektralbänder bestimmt und r_{eff} ist mit $40\mu m$ konstant.

Die hier vorgestellten Parameter τ , ω und g dienen zur Beschreibung der optischen Eigenschaften des Wolkenanteils einer Schicht und können für diesen Fall genutzt werden, um die Reflektivität und Transmissivität zu bestimmen [Morcette (1991)]. Entsprechende Beschreibungen gibt es auch für den wolkenfreien Anteil, bei dem der kombinierte Effekt von Aerosol- und Rayleigh-Streuung berücksichtigt wird. Zudem wird auch die Mehrfachreflexion zwischen den Schichten berücksichtigt.

2.3 Statistisches Modell - MOS

Neben den bisher vorgestellten physikalisch motivierten Modellen gibt es auch einen statistischen Ansatz zur Vorhersage. Ein solcher Ansatz wird im Rahmen eines operationellen und kommerziellen Verfahrens bereits genutzt. Da im Laufe dieser Arbeit Daten dieses Systems zur Analyse genutzt werden, soll dieses Verfahren kurz in seinen Grundzügen vorgestellt werden.

Operationell betriebene makroskalige numerische Wettermodelle besitzen in der Regel eine grobe räumliche und zeitliche Auflösung. Zur Verbesserung für lokale Prognosen können neben mesoskaligen Modellen, wie z.B. MM5, auch statistische Verfahren hinzugezogen werden. Solch ein statistischer Ansatz ist das in den USA entwickelte MOS (engl. Model Output Statistics) [Glahn (1972)], [Storch (1999)]. Diesem statistischen Postprozessor liegt

der Gedanke zugrunde, statistische Beziehungen zwischen Zeitreihen von Modellvorhersagen und lokalen Messungen zu finden. So können über das MOS-Verfahren systematische Fehler ausgeglichen werden. Zudem kann auf diese Weise von den prognostizierten Größen der numerischen Wettermodelle auf zusätzliche Größen an einem beliebigen Ort innerhalb des Modellgebietes geschlossen werden. Das MOS-Verfahren kann also zum einen dazu dienen, Größen zu bestimmen, die von den numerischen Modellen nicht bestimmt werden. Zum anderen kann die Lücke zwischen der Feldverteilung der Größen des Modells und der lokalen Verteilung vor Ort geschlossen werden.

Grundlagen eines MOS-Verfahrens sind multiple lineare Regressionen. Zuerst wird für einen bestimmten Ort und für eine bestimmte vorherzusagende Größe, in diesem Fall also die globale Einstrahlung am Boden, aus einem möglichst großen und repräsentativen Datensatz an Vorhersage- und Messwerten eine Vorhersagegleichung folgender Form entwickelt:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 \dots + a_kX_k \quad (2.55)$$

Dabei ist Y die vorherzusagende Größe, der sog. Prädiktand, die a_i sind die Regressionskonstanten bzw. -koeffizienten und die X_i sind die bekannten Modellgrößen, die sog. Prädiktoren. Die Prädiktoren sind verschiedene physikalische Größen und der gewünschte Endparameter muss nicht Teil der Prädiktoren sein. Ziel ist, dass die Zeitreihe der MOS-Prognose des gewünschten Endparameters möglichst gut mit der Zeitreihe der Messungen übereinstimmt.

Im Weiteren wird die auf einer ausreichenden Datenbasis ermittelte Gleichung auf davon unabhängige neue Datensätze angewandt. Die Auswahl der Prädiktoren bestimmt wesentlich die Regressionsgleichung. Je besser über diese der Verlauf und die Intensität der vorherzusagenden Größe wiedergegeben wird, desto besser ist die Prognose. Über die Entwicklung der Vorhersagegleichung kann das MOS-Verfahren nur die systematischen Fehler der Vorhersage korrigieren. Dagegen können unsystematische Schwankungen oder Fluktuationen nicht vermindert werden. Insgesamt ergibt sich eine Prozesskette entsprechend Abb. 2.3.

Eine Schwäche der MOS-Verfahren besteht in ihrer trägen Reaktion auf Änderungen der eingehenden Modellparameter, da das MOS-System immer erst eine bestimmte Einschwingzeit benötigt, um auf derartige Änderungen zu reagieren. MOS-Verfahren besitzen folgende Vorteile, sie

- berücksichtigen und korrigieren den systematischen Bias der Modellvorhersage,
- berücksichtigen und korrigieren die systematische Phasenverschiebung der Modellvorhersage,
- berücksichtigen einige regionale und lokale Effekte,
- berücksichtigen regionale Klimabedingungen,
- prognostizieren Parameter, die nicht direkt über die numerischen Wettermodelle berechnet werden,

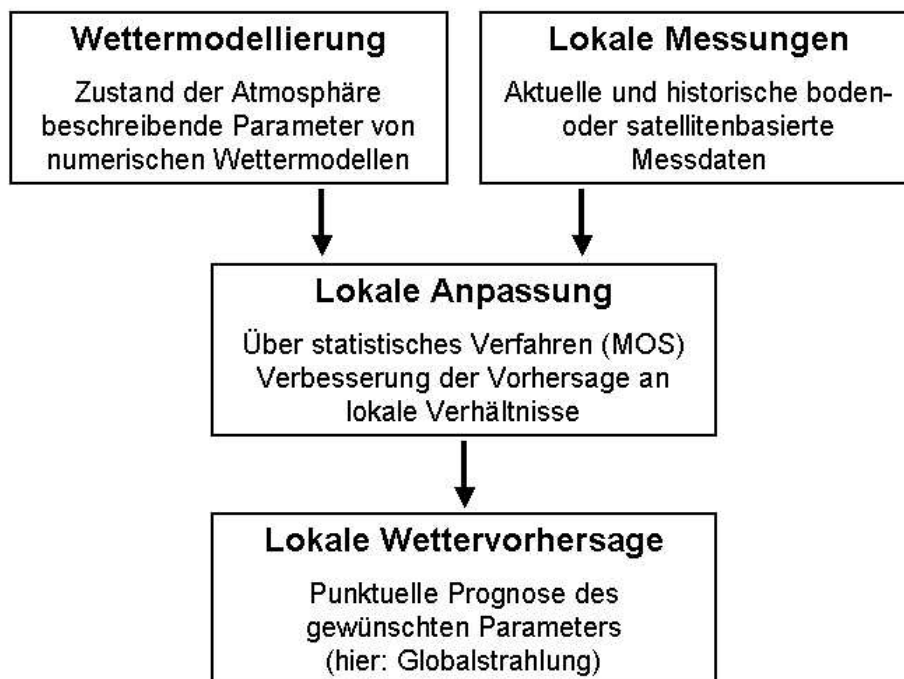


Abbildung 2.3: Darstellung der Prozesskette eines MOS-Verfahrens. Die Beschreibung des zukünftigen Zustandes der Atmosphäre über Daten eines numerischen Wettermodells wird über lokale Messungen mit Hilfe des MOS-Verfahrens verfeinert und auf den gewünschten Parameter bezogen.

- liefern Informationen über die Vorhersagegüte

Mögliche Defizite von MOS-Verfahren sind, dass sie

- zufällige Fehler des numerischen Modells nicht berücksichtigen,
- nicht mit extremen Wetterphänomenen/klimatischen Bedingungen umgehen können,
- nur den Bias des numerischen Modells, der für bestimmte meteorologische Situationen auftritt, berücksichtigen und der in der Trainingsmenge enthalten war,
- Veränderungen des Modellsystems nicht berücksichtigen,
- nicht die vollen Einflüsse der lokalen Zirkulation und der orographischen Effekte berücksichtigen.

2.4 Fehlermaße

Nachdem nun einige Grundlagen bzgl. des Strahlungstransports in der Atmosphäre, der Funktionsweise von numerischen Wettermodellen, der Strahlungsalgorithmen des MM5-

und ECMWF-Modells sowie des MOS-Verfahrens gelegt worden sind, folgt nun noch eine Übersicht der verwendeten Fehlermaße.

Im Laufe der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse von Analysen unterschiedlicher Art dargestellt. In diesem Zusammenhang finden eine Reihe von unterschiedlichen Fehlermaßen Verwendung, die in diesem Abschnitt eingeführt werden. Zudem werden die Abhängigkeiten der Fehlermaße untereinander und deren Bedeutung geklärt. Der Fehler einer Einzelvorhersage ist definiert als

$$\epsilon = G_{Vorhersage} - G_{Messung}. \quad (2.56)$$

Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. Root Mean Square Error, RMSE) zwischen zwei Zeitreihen von $G_{Vorhersage}$ und $G_{Messung}$ ist definiert durch

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \epsilon_i^2}. \quad (2.57)$$

Der $RMSE$ kann auch über den Mittelwert des Fehlers ($bias$) und der Standardabweichung des Fehlers ($stderror$) dargestellt werden,

$$RMSE^2 = bias^2 + stderror^2, \quad (2.58)$$

mit

$$bias = \frac{1}{N} \sum_i \epsilon_i = \bar{G}_{Vorhersage} - \bar{G}_{Messung}, \quad (2.59)$$

$$stderror = \sigma(\epsilon) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2}. \quad (2.60)$$

Der Balken indiziert dabei jeweils das zeitliche Mittel. Die Standardabweichung des Fehlers lässt sich wiederum zerlegen in

$$stderror^2 = stdbias^2 + disp^2, \quad (2.61)$$

mit

$$stdbias = \sigma(G_{Vorhersage}) - \sigma(G_{Messung}), \quad (2.62)$$

$$disp^2 = 2\sigma(G_{Vorhersage})\sigma(G_{Messung})(1 - korr). \quad (2.63)$$

Der Standardbias $stdbias$ gibt die Differenz der Standardabweichungen der beiden betrachteten Zeitreihen an und ergibt sich über eine falsch prognostizierte Variabilität der Vorhersagewerte. Die Dispersion $disp$ ist durch die Korrelation $korr$ und die Standardabweichungen der Zeitreihen bestimmt. Bei gegebener Standardabweichung der Messzeitreihe ist über die Korrelation die Qualität der Vorhersage bestimmt, die sich durch lineare Umformung der Vorhersagezeitreihe bestenfalls erreichen lässt. Bei gleicher Korrelation

der Zeitreihen ist die Dispersion nur noch von der Variation der Zeitreihen um ihre jeweiligen Mittelwerte abhängig. Der *RMSE* besteht also im Wesentlichen aus drei unterschiedlichen Termen, die durch unterschiedliche Effekte verursacht werden und zusammen die statistischen Eigenschaften der beiden Zeitreihen beschreiben,

$$RMSE^2 = bias^2 + stdbias^2 + disp^2. \quad (2.64)$$

Der *bias* berücksichtigt die unterschiedlichen Mittelwerte von der Vorhersage- und Messzeitreihe. Die Standardabweichung des Fehlers *stderror* gibt ein Maß für die Fluktuation des Fehlers um den Mittelwert an. Der *stdbias* ist zusammen mit dem *bias* ein Fehlermaß für den Amplitudenfehler. Die Dispersion *disp* beschreibt dagegen den Anteil durch Phasenfehler am *RMSE*.

3 Datenbasis

Da im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Daten unterschiedlicher Quellen Verwendung finden, soll in diesem Kapitel ein entsprechender Überblick gegeben werden. Zunächst werden die Daten aus numerischen Wettermodellen vorgestellt, die entweder als Antrieb für MM5 genutzt werden oder direkt zu Strahlungsvorhersagen höherer Güte weiterverarbeitet werden. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der Mess- und Referenzwerte. Dieses sind zum einen Bodenmessungen zur Analyse von Punktvorhersagen und zum anderen über das satelliten-gestützte Heliosat-Verfahren gewonnene Referenzwerte für regionale Vorhersagen. Das Heliosat-Verfahren eignet sich besonders gut, um Referenzwerte der Einstrahlung am Boden für Regionen zu gewinnen. Da im Laufe dieser Arbeit auch Regionsmittel betrachtet werden, soll kurz das zu Grunde liegende Heliosat-Verfahren beschrieben werden. In diesem Zusammenhang wird auch auf die zugehörige Genauigkeit eingegangen. Beendet wird das Kapitel mit einer Beschreibung der Vorhersagedaten des bestehenden operationellen MOS-Verfahrens und der Einführung der Persistenz als eine weitere Möglichkeit der Vorhersage.

3.1 Vorhersagen von Wettermodellen als Antrieb für MM5

Es werden Daten verschiedener numerischer Wettermodelle verwendet. Das mesoskalige Modell MM5 ist auf Eingangsdaten, die von einem übergeordneten Wettermodell stammen, angewiesen. Bei den Eingangsparametern für MM5 handelt es sich um mindestens sieben den Zustand der Atmosphäre beschreibende Größen. Dies sind die Lufttemperatur T , die u und v Komponenten der Windgeschwindigkeit, die relative Feuchte, das Geopotential, der Oberflächendruck und die Oberflächentemperatur. Als Geopotential Ω wird die Arbeit bezeichnet, die nötig ist, um ein Luftpaket (mit Einheitsmasse) vom Meeresspiegel auf ein Niveau Z zu heben. Die hier genannten Größen stimmen aufgrund der verwendeten Modellarchitektur nicht vollständig mit den in Kapitel 2.2.1 genannten sieben Größen überein. So werden z.B. die hier scheinbar fehlenden Informationen über den Luftdruck im Modell sehr wohl berücksichtigt. Die Größen werden ja ursprünglich auf Höhenlevel in Abhängigkeit vom Druck angegeben und anschließend in Sigma-Koordinaten umgerechnet. MM5 kann nun zusätzliche Größen wie die solare Einstrahlung am Boden berechnen. Die Größen, die MM5 antreiben, können von verschiedenen Modellen geliefert werden. Für erste Fallstudien wurden Reanalyse-Daten des amerikanischen National Centers for Environmental Prediction (NCEP) genutzt. Diese Daten stehen in einer räumlichen Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$, was etwa $100 \times 100 \text{ km}^2$ entspricht, und in einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden zur Verfügung. Bei Reanalyse-Daten handelt es sich nicht um eine Vorhersage, sondern um modellierte Daten, die anschließend über Messungen korrigiert wurden. Diese Daten sind daher gut geeignet, den Zustand der Atmosphäre für Zeitpunkte in der Vergangenheit zu beschreiben und um Fallstudien durchzuführen, über die geklärt werden soll, wie MM5 die Einstrahlung prinzipiell modellieren kann. Mögliche zusätzliche Ungenauigkeiten durch die Verwendung von Vorhersagedaten zum Antrieb von MM5 können so ausgeschlossen werden und nur der Algorithmus selbst kann getestet werden.

Die Reanalyse-Daten von NCEP wurden für drei je zwei Tage umfassende Fallstudien im Sommer 2003 genutzt. Mittels MM5 wird von einem europaweitem Ausschnitt auf einen $150 \times 150 \text{ km}^2$ Regionsausschnitt in Norddeutschland heruntergerechnet.

Ziel ist es aber, MM5 für die Vorhersage der Globalstrahlung zu nutzen. Daher werden entsprechende Antriebsdaten für MM5 aus übergeordneten Vorhersagemodellen benötigt. Um nun auch den Einfluss unterschiedlicher Quellen auf das Ergebnis untersuchen zu können, werden in dieser Arbeit zwei Quellen für die Vorhersage über MM5 genutzt. Zum einen werden Vorhersagedaten des ECMWF verwendet, um MM5 anzutreiben. Die Daten des ECMWF Modells liegen alle 3 Stunden und in einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ vor. Alternativ dazu werden zum anderen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Der DWD betreibt zwei Modelle [Adrian et al. (2002)], [Schrodin et al. (2002)]. Die Auflösung des globalen Modells GME entspricht mit 3 Stunden und $60 \times 60 \text{ km}^2$ in etwa der des ECMWF. Zusätzlich betreibt der DWD das auf dem GME basierende höher aufgelöste Lokalmodell LM mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde und einer räumlichen Auflösung von $7 \times 7 \text{ km}^2$. Beide Modelle liefern die für MM5 nötigen Eingangsparameter und werden im Folgenden genutzt. Sowohl die DWD- als auch die ECMWF-Daten werden entweder für die oben genannten Fallstudien verwendet oder aber für eine 40 Tage umfassende Studie im Sommer 2003. Bei dieser zeitungsfassenderen Studie wird MM5 jeweils genutzt, um von einem Europaausschnitt auf ein maximal $200 \times 200 \text{ km}^2$ großes Gebiet in Ostdeutschland herunterzurechnen.

3.2 ECMWF eigene Strahlungsvorhersage

Auf der Basis der ECMWF basierten Vorhersage, betreibt das ECMWF aber auch ein eigenes Strahlungsmodell [Morcette (1991)]. Daher bietet der ECMWF eine eigene Vorhersage der globalen Einstrahlung in der Auflösung seines Vorhersagemodells an. Also in einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden. Diese Daten werden in dieser Arbeit genutzt und zu Daten höherer Güte weiterverarbeitet. Wichtig ist hier also die Unterscheidung zwischen den sieben, den Zustand der Atmosphäre beschreibenden Größen des ECMWF, die zum Betrieb vom MM5 benötigt werden und der ECMWF eigenen Strahlungsvorhersage. Der untersuchte Datensatz umfasst die vollständigen Jahre 2003 und 2004. Es wurden Analysen für 18 Standorte durchgeführt sowie für einen maximal $200 \times 200 \text{ km}^2$ Regionsausschnitt in Ostdeutschland.

3.3 Messungen und Referenzen

Zur Analyse der vorhergesagten Einstrahlung werden verschiedene Mess- und Referenzdaten genutzt. Dies ist abhängig davon, ob eine Punktvorhersage für einen bestimmten Standort oder eine regionale Vorhersage für ein Gebietsmittel betrachtet wird.

3.3.1 Punktvorhersage

Für den Vergleich mit Punktvorhersagen liefern Bodenmessungen die bestmögliche Genauigkeit. Es werden Bodenmessungen aus dem Wettermessnetz des privaten Wetterdienstleisters meteomedia und des DWD verwendet. Diese Messungen liegen in einstündiger Auflösung und für bestimmte Standorte vor. Aus einer Menge von ca. 60 Bodenstationen innerhalb von Deutschland wurden maximal 18 für die eigentlichen Untersuchungen ausgewählt. Die Bodenmesswerte wurden einer Qualitätskontrolle unterzogen. Ausgewählt wurden nur Stationen, die einen möglichst vollständigen Datensatz für den betrachteten Untersuchungszeitraum haben und keine Auffälligkeiten besitzen, die darauf schließen lassen können, dass der Datensatz nicht korrekt ist. Dazu gehört z.B., dass die Stationen ausgeschlossen werden, deren Nachtwerte von Null verschieden sind. Der Untersuchungszeitraum beträgt maximal zwei Jahre und erstreckt sich über 2003 und 2004. Wie sich zeigen wird, unterscheiden sich diese beiden Jahre deutlich. So ist zu erkennen, dass das Jahr 2003 sehr viel stärker durch wolkenfreie Schönwettersituationen geprägt ist als 2004. Dies führt in der Analyse zu verschiedenen Ergebnissen für die beiden Jahre. Daher ist es sinnvoll, beide Jahre getrennt voneinander zu betrachten. Die linke Darstellung in Abb. 3.1 zeigt die Verteilung der verwendeten 18 Bodenstationen für die Jahre 2003 und 2004.

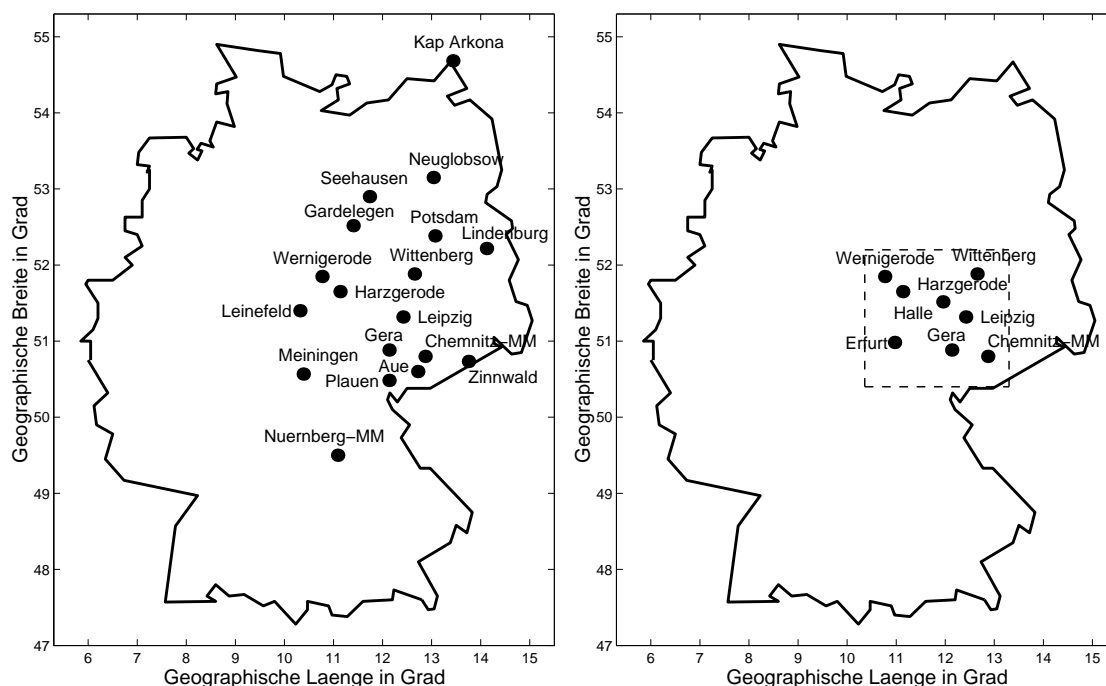


Abbildung 3.1: Links: Verteilung der 18 Bodenstationen, die für den Untersuchungszeitraum 2003/2004 Verwendung finden. Es handelt sich um 16 Stationen betrieben vom DWD und zwei von meteomedia (MM). Rechts: Verteilung von acht Bodenstationen, die für die Analyse eines 200 x 200 km² großen Regionsausschnittes genutzt werden.

3.3.2 Regionale Vorhersage

In einigen Abschnitten dieser Arbeit wird ein Regionsausschnitt von $200 \times 200 \text{ km}^2$ untersucht. Im Rahmen dieser Analyse werden teilweise auch Bodenmessungen verwendet. In diesem Fall kommen nur acht Stationen bei der Auswertung zum Zuge, s. rechte Darstellung in Abb. 3.1.

Ebenfalls als Referenz sowie zur situationsabhängigen Analyse werden Daten des satelliten-gestützten Heliosat-Verfahrens genutzt. Über diese Methoden kann über Messungen am Satelliten Meteosat die Einstrahlung berechnet werden. Zusätzlich können noch weitere Größen gewonnen werden, die Informationen über die Bewölkung und die Wolkenvariabilität beinhalten. Diese können für weitergehende Analysen genutzt werden. Es wurden Heliosat-Daten sowohl für die in Abb. 3.1 dargestellten Standorte als auch für zwei $150 \times 150 \text{ km}^2$ bzw. $200 \times 200 \text{ km}^2$ Regionen in Nord- und Ostdeutschland verwendet. Der maximale Untersuchungszeitraum umfasst wieder die Jahre 2003 und 2004. Das Heliosat-Verfahren wird in seinen Grundzügen im Folgenden vorgestellt.

Das Heliosat-Verfahren

Das Heliosat-Verfahren ist eine Methode, mit der aus Satellitendaten die globale Einstrahlung am Boden bestimmt werden kann. Dazu wird die von der Erde und der Atmosphäre zurückgestreute und reflektierte Strahlung mit Satelliten der Meteosat-Reihe gemessen. Die räumliche Auflösung beträgt in Abhängigkeit vom Breitengrad für Daten des hier verwendeten Meteosat 7 maximal $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ bei einer zeitlichen Auflösung von 30 Minuten. Zum Vergleich mit den hier verwendeten stundenaufgelösten Boden- und Vorhersagewerten werden die Heliosat-Daten in eine stündliche Auflösung umgerechnet. Die rückgestreute und am Satelliten gemessene Strahlung ist im sichtbaren Spektralbereich proportional zur atmosphärischen Reflexion inklusive Bodenalbedo. Die Reflexion der Atmosphäre ist wiederum abhängig vom Bewölkungsgrad. Daher kann aus der am Satelliten gemessenen Strahlung ein Maß für die vorhandene Bewölkung abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser Größe kann auf die Transmissionseigenschaften und damit auf die sich ergebende Globalstrahlung geschlossen werden.

Das Verfahren wurde bereits in einer Vielzahl anderer Arbeiten detailliert vorgestellt. Die Heliosat-Methode wurde ursprünglich von [Cano et al. (1986)] eingeführt und von [Beyer et al. (1996)] und [Hammer (2000)], [Hammer et al. (2003)] modifiziert. Darstellungen des Verfahrens finden sich auch in [Hammer (2000)], [Girodo (2003)] oder [Lorenz (2004)].

In einem ersten Schritt wird aus dem Radiometer-Signal C des im sichtbaren Spektralbereichs arbeitenden Messinstrumentes die relative Reflektivität ρ bestimmt,

$$\rho = \frac{C - C_0}{f \cos(\theta_z)}. \quad (3.1)$$

Dabei ist C_0 der zusammengesetzte Offset aus dem Offset des Satelliteninstrumentes und der Atmosphäre, f ein Korrekturfaktor für die Abweichung vom mittleren Abstand Erde-Sonne und θ_z der Sonnenzenitwinkel. Ist die Reflektivität für ein vollständig bewölktes

Pixel ρ_{max} und die Reflektivität des Erdbodens für den unbewölkten Fall ρ_{min} bekannt, lässt sich der Cloudindex n als ein Maß für die Bewölkung berechnen,

$$n = \frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}}. \quad (3.2)$$

Die Bodenreflektivität ρ_{min} wird durch die Wahl der niedrigsten Reflektivität im Verlaufe eines Monats bestimmt. Die Größe ρ_{max} wird aus einem Histogramm der Reflektivitäten gewonnen.

Als nächstes wird über den Cloudindex die Transmission der Atmosphäre berechnet. Das Maß für die Transmission ist der Clearsky-Index k^* . Er ist definiert als Quotient aus am Boden bestimmter Globalstrahlung G und der Globalstrahlung bei klarem Himmel G_{clear} :

$$k^* = \frac{G}{G_{clear}}. \quad (3.3)$$

Der Clearsky-Index k^* lässt sich auch über den Cloudindex n und die n-k*-Relation bestimmen. Für einen großen Bereich des Cloudindexes gilt $k^* = 1 - n$ mit Modifikationen für $n \rightarrow 0$ und $n \rightarrow 1$:

$$\begin{aligned} n < -0.2 & \quad k^* = 1.2 \\ -0.2 \leq n < 0.8 & \quad k^* = 1 - n \\ 0.8 \leq n < 1.1 & \quad k^* = 2.0667 - 3.6667 \cdot n + 1.6667 \cdot n^2 \\ 1.1 < n & \quad k^* = 0.05 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Die Globalstrahlung G_{clear} setzt sich aus der Direktstrahlung $G_{dir,clear}$ und der Diffusstrahlung $G_{diff,clear}$ bei klarem Himmel zusammen über

$$G_{clear} = G_{diff,clear} + \cos(\theta_z) \cdot G_{dir,clear}. \quad (3.5)$$

Für die Berechnung der Direktstrahlung wird das Modell von [Page (1996)] und für die Diffusstrahlung das Modell von [Dumortier (1995)] genutzt. Damit lässt sich mit Hilfe von Gl. (3.3) die Globalstrahlung aus den Satellitendaten berechnen.

Heliosat-Genauigkeit

Seit Bestehen des Heliosat-Verfahrens wurden immer wieder Studien zur Genauigkeit durchgeführt [Hammer (2000)], [Lorenz (2004)]. Die Fehleranalysen beschränkten sich aber in der Regel auf die Untersuchung der Genauigkeit im Vergleich zu Punktmessungen oder zu Regionsmitteln, die über eine Mittelung von Punktmessungen gewonnen wurden. Diese Regionen haben eine räumliche Ausdehnung von maximal $45 \times 31 \text{ km}^2$ [Lorenz (2004)]. Da in den folgenden Untersuchungen jedoch mit Regionen mit bis zu $200 \times 200 \text{ km}^2$ gearbeitet werden soll und zudem die Bewölkungssituation ein Kriterium sein soll, wurde zusätzlich zu den bekannten Ergebnissen eine kurze Studie zur Genauigkeit des Heliosat-Verfahrens für eine Region von ca. $150 \times 150 \text{ km}^2$ durchgeführt.

Um den Fehler des Heliosat-Verfahrens für ein Regionsmittel zu bestimmen, wäre ein möglichst dichtes Messnetzwerk für das entsprechende Gebiet ideal. Leider steht ein derartiges Bodenmessnetzwerk für eine so große Region nicht zur Verfügung. Man muss sich daher darauf beschränken, die Daten einzelner Messstationen für ein entsprechendes Gebiet zu mitteln. Für diese Studie wurden die Daten von 8 Stationen genutzt, die in Ostdeutschland ein Gebiet von ca. $150 \times 150 \text{ km}^2$ abdecken, s. rechte Darstellung in Abb. 3.1. Der untersuchte Zeitraum beträgt 12 Monate (März 2003 bis Februar 2004). Die Daten liegen in stündlicher Auflösung vor und es wurden nur die Zeitpunkte zur Analyse hinzugezogen zu denen alle 8 Stationen einen Messwert haben sowie die Einstrahlung am Boden größer als Null ist. Durch die letzte Bedingung wird der Datensatz auf die Tageswerte reduziert. Die Anzahl der Datenpunkte reduziert sich dadurch insgesamt von 8760 auf 4044.

Eine mögliche Interpretation der Mittelung der 8 Bodenstationen über das gesamte Gebiet ist, dieses Mittel als repräsentativ für die gesamte Region anzunehmen. Dies setzt voraus, dass die wenigen Stationen die gesamte Region mit hoher Genauigkeit wiedergeben können. Bei Untersuchungen hierzu wurde das Mittel über alle 8 Stationen mit den Mitteln von Unterdatensätzen mit einmal 6 und zweimal 4 Stationen verglichen. Dabei zeigte sich, dass der *RMSE* für Stundenwerte zwischen 6 und 10 % liegt. Dieser Fehler sinkt zwar erwartungsgemäß für Tagessummen auf 3 bis 5 % ab, letztlich lässt sich aber feststellen, dass die 8 Stationen, die näherungsweise gleichmäßig über die Region verteilt sind, nicht ausreichen um diese vollständig repräsentieren zu können.

Um dies zu zeigen, vergleicht man das Mittel der 8 Stationen mit dem Mittelwert, der sich über das Heliosat-Verfahren für die gleiche Region ergibt. Dieser Vergleich zwischen dem gemittelten Bodenwerten und den Satellitenwerten für die $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region liefert für die Stundenwerte einen *RMSE* von 38,9 % und für die entsprechend errechneten mittleren Tageswerte einen Fehler von 20,5 %. Damit liegt der Fehler aber über dem zu erwartenden Fehler, der sich für entsprechende Stunden- und mittlere Tageswerte im Vergleich mit einer Bodenpunktmessung ergeben sollte. Die im Vergleich mit einer einzelnen Bodenmessung zu erwartenden Fehler liegen bei ca. 22 % bzw. 12 % [Lorenz (2004)], [Hammer (2000)]. Da hier aber über eine sehr große Region gemittelt wird, sollten die Fehler durch diese zusätzliche räumliche Mittelung deutlich kleiner sein als die für eine Punktmessung. Die Ursache dafür liegt darin, dass die 8 Stationen die gesamte Region nicht ausreichend repräsentieren und wiedergeben können. Daher ist diese Möglichkeit der Interpretation der Stationsmittelung nicht anwendbar.

Da es nicht möglich ist, direkt den Fehler des Heliosat-Verfahrens für eine Region zu berechnen, muss man diesen sinnvoll abschätzen. Dazu nutzt man die räumlich verteilten Bodenmessstationen, mittelt diese wie zuvor und vergleicht dieses Ergebnis mit dem Mittelwert der Heliosat-Werte. Jetzt werden jedoch nur die Heliosat-Werte bzw. Satellitenpixel berücksichtigt, die in unmittelbarer Umgebung der jeweiligen Bodenstation liegen. Ähnliche Untersuchungen finden sich auch in [Lorenz (2004)] und [Hammer (2000)], zudem ist dort festgestellt worden, dass sich gute Übereinstimmungen zwischen Bodenwert und Heliosat-Wert ergeben, wenn der Heliosat-Wert über eine Mittelung von etwa 5×5 Pixel erfolgt. Zusätzlich gewinnt man über den mittleren Cloudindex für diese Pixelmen-

ge auch eine Standardabweichung, die als Variabilitätsindex genutzt werden kann [Girodo (2003)].

Zunächst betrachtet man den Fehler der sich bei der Analyse der einzelnen Stationen ergibt, anschließend wurden zweimal 4 Stationen, die möglichst gleichmäßig sowie komplementär zueinander über die Region verteilt sind, gemittelt und der Fehler zum entsprechenden Heliosat-Mittel für die jeweils 4 Stationen bestimmt. Dasselbe wurde für einmal 6 und einmal alle 8 Stationen wiederholt. Es ist zu erwarten, dass der Fehler für eine größere Anzahl von Mittelungen abnimmt und damit sollte es möglich sein, den Fehler für die Heliosat-Mittelung für die gesamte Region abzuschätzen. Die Abb. 3.2 zeigt das Ergebnis einer solchen Untersuchung für Stunden- und Tagesstundenmittel. Aufgrund der

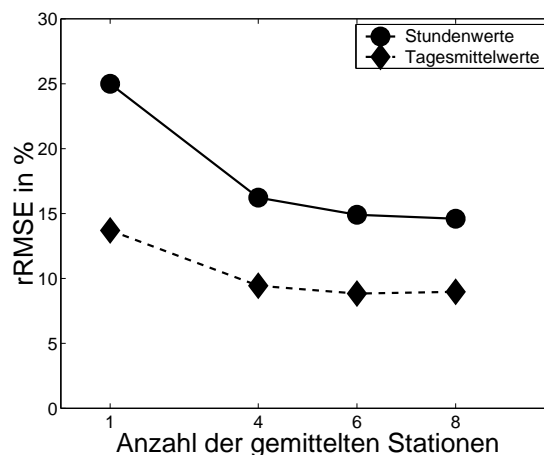


Abbildung 3.2: Der $rRMSE$ des Heliosat-Verfahrens durch Vergleich mit Bodenmessungen in Abhängigkeit von der Anzahl der gemittelten Stationen. Der Untersuchungszeitraum ist März 2003 bis Februar 2004.

zusätzlichen zeitlichen Mittelung über den Tag, liegt der Fehler für den Tagesstundenmittelwert immer deutlich unter dem des Stundenmittels. Bei durchbrochener Bewölkung führt die Betrachtung des Tagesmittels zu einer Reduktion des Fehlers, der durch eine zeitlich falsche Zuordnung von Wolken entstehen kann. Das bedeutet, dass sich der Phasenfehler reduziert, der dadurch entsteht, dass eine Wolke für einen bestimmten Standort entweder etwas zu früh oder zu spät vorhergesagt wird. Sowohl für Stunden- als auch Tagesmittel ist die deutlich abnehmende Tendenz des Fehlers mit zunehmender Stationszahl zu erkennen. Der Stundenmittelfehler reduziert sich von ca. 25 % auf 15 % und der des Tagesstundenmittel von ca. 14 % auf 9 %. Aufgrund dessen kann man annehmen, dass der Heliosatfehler für ein Regionsmittel von ca. $150 \times 150 \text{ km}^2$ bei Stundenmitteln bei unter 15 % und bei Tagesstundenmitteln bei unter 9 % liegen muss. Jedoch ist dies eine recht allgemeine Feststellung ohne Berücksichtigung der Bewölkungssituation. Bisher wurde über alle Bewölkungssituationen gemittelt. Es ist aber bekannt, dass das Heliosat-Verfahren abhängig von der Bewölkungssituation unterschiedliche Fehler aufweist. So ist der Fehler für eine wolkenfreie Situation (engl. clearsky) deutlich geringer als für die komplexeren Situationen bei durchbrochener (engl. broken clouds) oder auch geschlossener

Bewölkung (engl. overcast) [Lorenz (2004)]. Daher wurde die gerade beschriebene Untersuchung in Abhängigkeit von der Bewölkungssituation wiederholt. Mit Hilfe des mittleren Cloudindexes sowie der zugehörigen Standardabweichung als Variabilitätsmaß können die drei Bewölkungszustände clearsky, broken clouds und overcast unterschieden werden. Die Kriterien wurden dabei wie folgt festgelegt:

clearsky: $n < 0.05$ und $stdev < 0.1$

broken clouds: $0.2 < n < 0.6$ und $stdev > 0.1$

overcast: $n > 0.8$ und $stdev < 0.1$

Studien haben gezeigt, dass eine Standardabweichung des Cloudindexes von 0.1 einen guten Schwellwert darstellt, um zwischen durchbrochener und homogener Bewölkung zu unterscheiden [Girodo (2003)]. Die Ergebnisse der Berechnungen für diese verschiedenen Bewölkungssituationen sind in Abb. 3.3 zu sehen. Es wird deutlich, dass eine Unter-

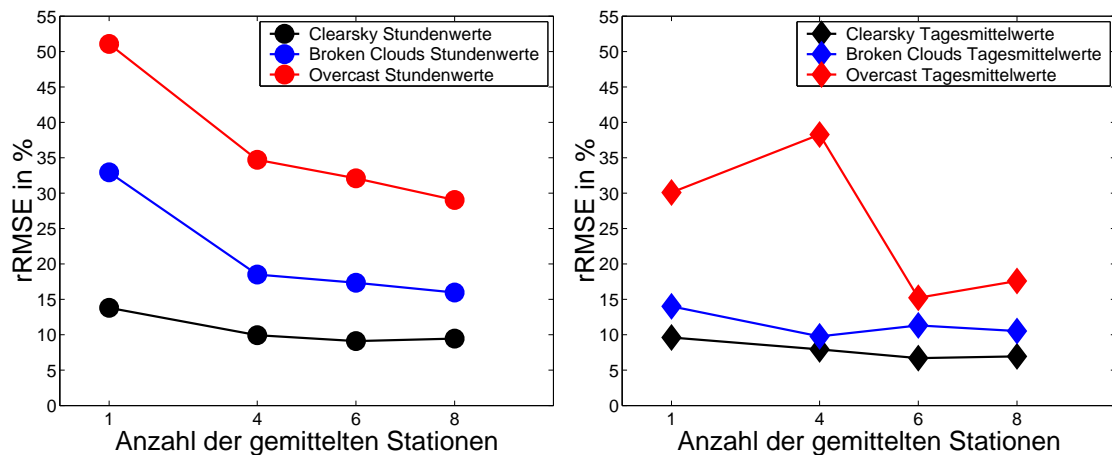


Abbildung 3.3: Der $rRMSE$ des Heliosat-Verfahrens durch Vergleich mit Bodenmessungen in Abhängigkeit von der Anzahl der gemittelten Stationen und dem Bewölkungszustand der Atmosphäre. Die linke Darstellung zeigt die Ergebnisse für Stundenwerte und die rechte für Tagesmittel.

scheidung nach der Bewölkungssituation sinnvoll ist. So sinkt der Fehler für wolkenfreie Situationen im Vergleich zur Mittelung über alle Bewölkungszustände für die betrachtete Region für Stundenmittel von ca. 15 % auf unter 9 %. Entsprechend auch für Tagesstundenmittel von ca. 9 % auf unter 7 %. Bei durchbrochener Bewölkung ergeben sich dagegen Fehler kleiner als 16 % bzw. 10 %. Der Fehler für die Overcast-Situationen liegt wegen der sehr geringen absoluten Einstrahlung bei ca. 29 % bzw. 18 %. Die Schwankungen bei den Tagesstundenmitteln für Overcast Situationen ist durch die relativ geringen Datenmengen für diese Bewölkungssituation zu begründen.

Die hier in Abhängigkeit von der Bewölkungssituation abgeschätzten Fehler für Stundenmittel und Tagesstundenmittel sind gültig für Regionen mit einer Größe von ca. $150 \times 150 \text{ km}^2$. Diese Fehler müssen bei den folgenden Vergleichen von Heliosat-Regionenmitteln

mit den entsprechenden Vorhersagen berücksichtigt werden. Insgesamt konnte bestätigt werden, dass das Heliosat-Verfahren für die Analyse von Regionsmitteln die bestmögliche Referenz darstellt.

3.4 Vergleichsdaten bestehender Vorhersagen

Die Vorhersagequalität der in dieser Arbeit untersuchten Verfahren muss einem Vergleich mit bestehenden Methoden standhalten. Dazu gehören Vergleichsergebnisse eines bestehenden MOS-Verfahrens und die Vorhersage über die Annahme der Persistenz.

3.4.1 Operationelles MOS-Verfahren

Das in Kapitel 2.3 vorgestellte MOS-Verfahren kann zur Bestimmung der vorherzusagenden Einstrahlung verwendet werden. Ein entsprechendes operationelles Verfahren wird vom kommerziellen Wetterdienstleister meteocontrol angeboten. Das Verfahren nutzt historische Daten, um die Koeffizienten a_i für die Prädiktoren in der Gl. (2.55) zu bestimmen. Dazu können sowohl Daten aus Bodenmessungen als auch Daten über Satellitenverfahren Verwendung finden. Für die in dieser Arbeit untersuchten Standorte wurden die Ergebnisse der MOS-Vorhersage zur Verfügung gestellt und dienen damit als wichtige Vergleichsdaten. Es wird dabei zwischen MOS-Bodendaten und MOS-Satellitendaten unterschieden, je nachdem, ob die lokalen Messungen zur Bestimmung der Koeffizienten von Bodenmessungen oder von Satellitenmessungen stammen [Bofinger et al. (2004)]. Die Vorhersagedaten des numerischen Wettermodells, die als Prädiktoren X_i in die Vorhersagegleichung Gl. (2.55) eingehen, stammen vom ECMWF. Darin sind nicht die ECMWF eigenen Strahlungsvorhersagen enthalten. Die Vergleichsdaten des MOS-Verfahrens stehen für die Jahre 2003 und 2004 für die in Abb. 3.1 gezeigten Stationen zur Verfügung.

3.4.2 Persistenz

Die einfachste Vorhersage ist anzunehmen, dass sich der derzeitige Zustand der Atmosphäre in der Zukunft nicht ändert. Damit ist die Einstrahlung nur von deterministischen Randbedingungen wie dem Sonnenstand abhängig. Daher wird als zusätzliche Vorhersage die Persistenz der Globalstrahlung in einigen Abschnitten dieser Arbeit betrachtet. Das bedeutet, es wird angenommen, dass der vorherzusagende Tagesverlauf dem vorangegangenen entspricht. Die Persistenz wird für die Standorte in Abb. 3.1 für den Untersuchungszeitraum der Jahre 2003 und 2004 analysiert.

4 Mesoskalige Modellierung der Globalstrahlung

In diesem Kapitel wird das in Kapitel 2 vorgestellte mesoskalige Modell MM5 zur Berechnung der vorhergesagten Einstrahlung verwendet und die Ergebnisse werden analysiert. Zunächst wird eine systematische Untersuchung von verschiedenen MM5-Konfigurationen anhand von Fallstudien durchgeführt, um die zur Bestimmung der Globalstrahlung am besten geeignete Gesamtkonfiguration festzustellen. Innerhalb von MM5 werden verschiedene physikalische Vorgänge in der Atmosphäre über unterschiedliche Parametrisierungen berücksichtigt. Es werden verschiedene Parametrisierungen zur Auswahl angeboten, die die gleichen Phänomene beschreiben. Dabei ist nicht immer eindeutig gegeben, welche Art der Parametrisierung für den gewünschten Zweck, hier die Bestimmung der Globalstrahlung am Boden, am besten geeignet ist. Daher ist es nötig, verschiedene sinnvolle Konfigurationen zu analysieren, um die Gesamtkonfiguration bestimmen zu können, die am besten zur Bestimmung der Einstrahlung geeignet ist. Dazu wird erstmals anhand von Fallstudien ein entsprechender Konfigurationsvergleich auf der Basis von Reanalyse-Daten durchgeführt. Die Einschränkung auf Fallstudien erfolgt aufgrund des hohen Rechenzeitaufwandes. Da das Verfahren nicht für einen operationellen Betrieb optimiert ist, beträgt die Rechenzeit für eine zweitägige Prognose auf einem Standard-PC bis zu 12 h. Hier kommt noch der Zeitaufwand zur Vor- und Nachbereitung der Daten hinzu. Wenn man zu Vergleichszwecken eine größere Anzahl von Modellläufen durchführen will, muss der Untersuchungszeitraum daher begrenzt werden.

Nach der Untersuchung von verschiedenen MM5-Konfigurationen folgen Fallstudien zur Verwendung von zwei unterschiedlichen Datenquellen des DWD, die zum Antrieb von MM5 genutzt werden. Es wird geklärt, ob mit den Vorhersagen des GME- oder des LM-Modells eine höhere Genauigkeit erzielt wird.

Unter Verwendung der vorher bestimmten Gesamtkonfiguration erfolgt eine Analyse bzgl. der Verwendbarkeit von MM5 zur Vorhersage der Einstrahlung über einen längeren Zeitraum. In diesem Zusammenhang wird untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Datenquellen für den Antrieb von MM5 auf das Ergebnis haben. Es werden zum einen Antriebsdaten des ECMWF und zum anderen des LM-Modells vom DWD verwendet. Die MM5-Vorhersage wird sowohl für Regionsmittel als auch für Standorte von Bodenmessstationen untersucht. Die Betrachtung sowohl von Regionsmittel als auch Einzelstandorten ergibt sich neben einer rein wissenschaftlichen Motivation über die verschiedenen Anwendungsgebiete. Standortabhängige Vorhersagen bieten sich z.B. für die Abschätzung der produzierten Energie von Solaranlagen oder Solarkraftwerken an, während Regionsmittel zur Lastabschätzung dienen können.

Die MM5-Vorhersagen werden mit Vorhersagen eines operationellen MOS-Verfahrens verglichen, um das Potential des physikalisch basierten Verfahrens im Vergleich zu dem statistischen Ansatz bestimmen zu können.

4.1 Modellierung der Einstrahlung über MM5

Es wurden bisher nur wenige Arbeiten durchgeführt, die sich mit MM5 und der Bestimmung der solaren Einstrahlung befassen [Armstrong (2000)], [Zamora et al. (2003)]. Keine dieser Studien beschäftigt sich mit der Bestimmung der mittleren Einstrahlung für Regionen unterschiedlicher Größe. Daher ist es sinnvoll zu untersuchen, mit welcher Qualität die Einstrahlung am Boden mit MM5 bestimmt werden kann. Hierfür eignet sich die Verwendung von Reanalyse-Daten, weil hier Fehler durch die Anpassung der Analyse-Daten an Messdaten reduziert werden. Da MM5 unterschiedliche Parametrisierungen für die Vorgänge in der Atmosphäre zur Verfügung stellt, ist es zudem nötig, unterschiedliche Gesamtkonfigurationen zu analysieren. Über eine systematische Untersuchung kann die Konfiguration festgestellt werden, die am besten geeignet ist, die globale Einstrahlung für verschiedene Bewölkungssituationen mit dem geringsten Fehler zu bestimmen.

Es wird über eine Region von ca. $150 \times 150 \text{ km}^2$ gemittelt. Die Region ist in Norddeutschland im Großraum der Lüneburger Heide angesiedelt. Diese Region wurde bewusst für diese Untersuchung ausgewählt. Es sollten zunächst die prinzipiellen Möglichkeiten des Modells festgestellt werden, ohne dabei die Interpretation der Ergebnisse durch komplexe äußere Einflüsse zu erschweren. Dafür erscheint die ausgewählte Region gut geeignet, da das Terrain wenig komplex, die Vegetation relativ einheitlich ist und nicht wesentlich durch den urbanen Einfluss von Großstädten gestört wird. Zudem führen hohe zeitliche und räumliche Auflösungen insbesondere bei durchbrochener Bewölkung in der Regel zu hohen Fehlern. Für zeitliche und/oder räumliche Mittel sollte dagegen der Grad der Bewölkung und deren Eigenschaften wie Transmission und Absorption besser wiedergegeben werden. Daher ist die räumliche Mittelung besonders für den Fall der durchbrochenen Bewölkung sinnvoll.

Die Untersuchung wird aufgrund der benötigten Rechenzeiten anhand von Fallstudien durchgeführt. Betrachtet werden drei unterschiedliche Bewölkungssituationen, um darüber zu möglichst repräsentativen Ergebnissen zu kommen. In diesem Zusammenhang muss verdeutlicht werden, dass die Ergebnisse von Fallstudien nur unter Vorbehalt bzgl. ihrer statistischen Relevanz zu bewerten sind. Durch die Auswahl unterschiedlicher Situationen wird die Bedeutung des Gesamtergebnisses erhöht. Die Einzelergebnisse können aber unter Umständen großen Schwankungsbreiten unterliegen. Die unterschiedlichen Bewölkungssituationen sind wie in Kapitel 3.3.2 ein möglichst wolkenfreier Fall, ein Fall mit durchbrochener Bewölkung und eine geschlossen bewölkte Situation. Je Situation wird ein Zeitraum von je 2 Tagen aus dem Sommer des Jahres 2003 betrachtet und analysiert. Die Tage wurden anhand des visuellen Eindrucks über die Betrachtung von Satellitenbildern sowie der Tagesverläufe der Globalstrahlung bestimmt. Für den wolkenfreien Fall wurden die Tage 152 und 153 des Jahres 2003 ausgewählt, also der 1. und 2. Juni 2003. Für die Situation mit durchbrochener Bewölkung wurden die Tage 171 und 172 (20./21. Juni) gewählt und für den Fall der geschlossenen Bewölkung die Tage 185 und 186 (4./5. Juli). Entsprechend der unterschiedlichen Bewölkungssituationen werden die Ergebnisse in Unterkapiteln vorgestellt.

Im Folgenden werden sieben verschiedene MM5-Konfigurationen untersucht und mit dem

Heliosat-Mittel als Referenzwert verglichen. Als Eingangsdaten werden die NCEP-Daten mit einer räumlichen Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ verwendet (Kapitel 3.1). Für die MM5-Resultate wurde eine räumliche Auflösung von $3 \times 3 \text{ km}^2$ gewählt. Da die Eingangsdaten mit $1^\circ \times 1^\circ$ eine Auflösung von ca. $100 \times 100 \text{ km}^2$ besitzen, ist es nötig, die Auflösung über ein MM5 internes Nesting, also einer räumlichen Skalierung, zu erhöhen. Insgesamt wird mit drei Domänen gearbeitet. Unter einer Domäne versteht man ein Gebiet bestimmter Ausdehnung mit einer definierten horizontalen räumlichen Auflösung des Gittermodells. Da das Verhältnis der räumlichen Auflösungen der Domänen untereinander mit 1:3 per Definition in MM5 festgelegt ist, beträgt die Auflösung für die erste Domäne $27 \times 27 \text{ km}^2$, für die zweite Domäne $9 \times 9 \text{ km}^2$ und damit für die dritte Domäne die gewünschten $3 \times 3 \text{ km}^2$. Der Vorteil bei der Verwendung von Domänen liegt in der Reduktion von Rechenzeiten. Die größeren Domänen legen mit ihrer größeren räumlichen Auflösung die Randbedingungen fest, die auf die kleineren Domänen wirken. Die rechenintensiven hohen räumlichen Auflösungen können auf die Gebiete beschränkt werden, die von Interesse sind. Die Abb. 4.1 stellt Lage und Verteilung der Domänen dar.

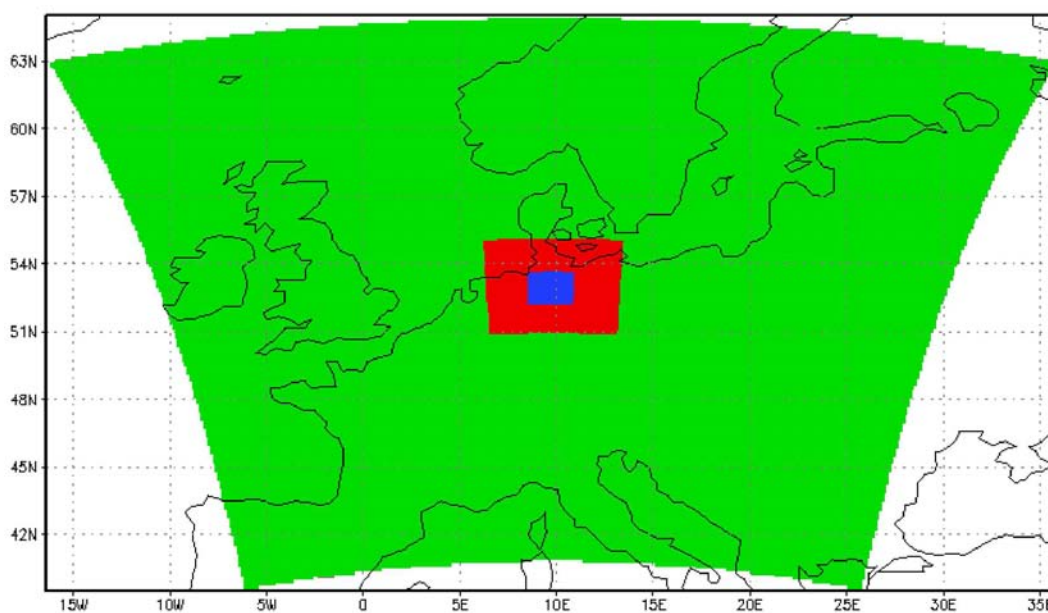


Abbildung 4.1: Darstellung der Domänen, die für den Konfigurationsvergleich genutzt werden. Da die Eingangsdaten mit $1^\circ \times 1^\circ$ sehr grob räumlich aufgelöst sind, ist ein Nesting über drei Domänen nötig. Die räumliche Auflösung der kleinsten Domäne (blau) beträgt $3 \times 3 \text{ km}^2$. Die Daten eines Regionsausschnittes von $150 \times 150 \text{ km}^2$, der etwa der dritten Domäne entspricht, werden für die Untersuchung genutzt.

Parametrisierungen und Konfigurationen

Für das Hauptziel, die Bestimmung der Einstrahlung am Boden, ist nicht eindeutig von vornherein festzustellen, welche Parametrisierungen und welche Gesamtkonfiguration von MM5 am besten geeignet ist. Zu den zur Bestimmung der globalen Einstrahlung nötigen Parametrisierungen gehört natürlich die Strahlungstransport-Parametrisierung. Für die Bestimmung der globalen Einstrahlung im kurzwelligen Bereich und unter Berücksichtigung von Wolkeneffekten steht nur eine Parametrisierung in MM5 zur Verfügung. Dabei handelt es sich um die in Kapitel 2.2.1 vorgestellte Parametrisierung in Abhängigkeit vom Flüssigwasserpfad (MM5: Cloud Radiation Scheme). Für die Beschreibung der strahlungsabhängigen Phänomene stehen keine echten Alternativen, die getestet werden müssten, zur Verfügung.

Dass Wolken einen erheblichen Einfluss auf die solare Einstrahlung haben, ist offensichtlich. Entsprechend ist zu erwarten, dass die Wahl der Parametrisierungen zur Wolkenentstehung (MM5: Cumulus Parameterization) und zur expliziten Behandlung der Feuchte in der Atmosphäre (MM5: Explicit Moisture Schemes) zu veränderten Resultaten führen. Daher erscheint hier eine Untersuchung unterschiedlicher Kombinationen sinnvoll, wobei die Cumulus und Feuchte Parametrisierungen sowohl gleichzeitig als auch die Feuchte Parametrisierung nur für sich berücksichtigt werden können. Auf eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Parametrisierungen wird hier verzichtet und stattdessen auf die entsprechende Literatur verwiesen [Dudhia et al. (2003)], [Grell et al. (1995)].

Vielleicht weniger offensichtlich erscheinen dagegen die Einflüsse der Vorgänge in der oberflächennahen Grenzschicht (engl. Planetary Boundary Layer, PBL). In der atmosphärischen Grenzschicht hat die Erdoberfläche aber starke Auswirkungen auf Temperatur, Wind und Feuchtigkeit und hat somit auch einen Einfluss auf die Bewölkung und damit auf die solare Einstrahlung. Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass bereits eine Änderung der PBL-Parametrisierung zu erheblichen Veränderungen im Resultat führt. Zudem zeigen die folgenden Untersuchungen den Einfluss der Kombinationen der unterschiedlichen Parametrisierungen. Es ist nicht ausreichend, die einzelnen Parametrisierungen für sich zu betrachten, sondern es ist auch von Bedeutung, in welcher Kombination die Parametrisierungen eingesetzt werden.

Zum Vergleich herangezogen wurde als erste Konfiguration die Voreinstellung von MM5, wie sie sich nach der Installation der Version 3 von MM5 darstellt [Dudhia et al. (2003)], [Grell et al. (1995)]. Diese Konfiguration wurde dann in mehreren Schritten verändert. So wurde z.B. für die zweite getestete Konfiguration die Parametrisierung der PBL von der Parametrisierung *MRF* zu *Blackadar* geändert, alles andere aber entsprechend der Voreinstellung belassen. Die Bezeichnung Vor-BA hierfür ergibt sich als Kürzel für Voreinstellung und *Blackadar*. Bei der dritten getesteten Konfiguration wurde die Cumulus-Parametrisierung von *Kain – Fritsch* auf die erweiterte Version *Kain – Fritsch2* geändert (Vor-KF2). Anschließend wurde die Kombination von verändertem PBL-Schema und veränderter Cumulus Parametrisierung getestet (Vor-BA-KF2). Darauf aufbauend wurde auch das Explicit Moisture Scheme von *Goddard* auf *Reisner2* geändert (Vor-

BA-KF2-Reisner2). Dabei zeichnet sich die Feuchte Parametrisierung Goddard durch eine höhere Komplexizität aus, die eine Vielzahl von physikalischen Vorgängen bzgl. der Feuchte in der Atmosphäre berücksichtigt [Dudhia et al. (2003)]. Da entsprechend der Beschreibung von MM5 für Domänen mit räumlichen Auflösungen $\leq 5 - 10 \text{ km}^2$ ange-raten wird, auf die Verwendung von Cumulus-Parametrisierungen zu verzichten und nur die Explicit Moisture Schemes zu verwenden, wurden noch zwei weitere Konfigurationen getestet, die dies berücksichtigen. In beiden Fällen wurden die Einstellungen entsprechend der Konfiguration Vor-BA-KF2 verwendet, in dem einen Fall wurde aber in der kleinsten Domäne mit der räumlichen Auflösung von $3 \times 3 \text{ km}^2$ auf die Verwendung der Cumulus-Parametrisierung verzichtet (Vor-BA-KF2-exp1). In einem zweiten Fall wurde zusätzlich auch in der mittleren Domäne mit der Auflösung von $9 \times 9 \text{ km}^2$ auf die Cumulus-Parametrisierung verzichtet (Vor-BA-KF2-exp2). Zur Übersicht sind die verschiedenen Konfigurationen und Bezeichnungen in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Bei den hier getesteten Konfigurationen handelt es sich nur um eine Auswahl möglicher Konfigurationen. Neben den hier verwendeten Parametrisierungen stehen noch eine Reihe weiterer aber in der Regel einfacherer Parametrisierungen zur Verfügung. Ein Teil anderer möglicher Konfigurationen im Zusammenhang mit der Bestimmung der Globalstrahlung wurde von [Zamora et al. (2003)] getestet (PBL: Blackadar, MRF oder Burk-Thompson, Cumulus: Grell, Moisture: Simple ice). Wie sich im Folgenden zeigen wird, können die Ergebnisse von [Zamora et al. (2003)] bestätigt werden.

4.1.1 Wolkenfreier Fall

Zunächst werden die verschiedenen Konfigurationen für den wolkenfreien Fall untersucht und mit dem Heliosat-Mittel als Referenz verglichen. Für die Ergebnisse ist in diesem Fall keine starke Abhängigkeit von der untersuchten Konfiguration zu erwarten. Schließlich stellt diese die einfachste zu modellierende Situation dar. Diese Erwartung wird durch die Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt, wie in Abb. 4.2 zu erkennen ist. Die Tagessummen weichen zwischen ca. 1 % und -15 % für Tag 152 und zwischen 3 % und -3 % für Tag 153 vom Heliosat-Mittel für die betrachtete Region ab. Wie in Kapitel 3.3.2 erläutert, ist das Heliosat-Mittel abhängig von der Bewölkungssituation mit einem bestimmten Fehler behaftet, der bei wolkenfreien Situationen, und wie Abb.3.3 zu entnehmen ist, im Mittel bei etwa 7 % liegt. Für Tag 152 liegen alle Konfigurationen innerhalb dieses Fehlerbereiches, nur die sechste Konfiguration (Vor-BA-KF2-Reisner2) liegt deutlich unter der zu erwartenden Einstrahlung. Für Tag 153 liegt auch diese Variante innerhalb des Fehlerbereiches des Heliosat-Mittels.

Es wird deutlich, dass es selbst bei einer einfachen wolkenfreien Situation je nach verwendeter MM5-Konfiguration unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. So erzielt die Konfiguration mit der Bezeichnung Vor-BA-KF2-Reisner2 ein Resultat, das am Tag 152 um -15 % vom Heliosat-Wert abweicht und sich damit deutlich von den anderen Varianten unterscheidet. Dabei ist zu betonen, dass sich diese Konfiguration von der wesentlich besseren Kombination mit der Bezeichnung Vor-BA-KF2 nur durch eine andere Feuchte Parametrisierung unterscheidet. Diese hat aber offensichtlich einen erheblichen Einfluss

Konfiguration	Bezeichnung	Änderung gegenüber Voreinstellung
1	Voreinstellung - Vor	
2	Vor-BA	PBL:Blackadar
3	Vor-KF2	Cumulus:Kain-Fritsch 2
4	Vor-BA-KF2	PBL:Blackadar Cumulus:Kain-Fritsch 2
5	Vor-BA-KF2-Reisner2	PBL:Blackadar Cumulus:Kain-Fritsch 2 Moisture:Reisner 2
6	Vor-BA-KF2-exp1	PBL:Blackadar Cumulus:Kain-Fritsch 2 nur Moisture Schema für Domäne 3
7	Vor-BA-KF2-exp2	PBL:Blackadar Cumulus:Kain-Fritsch 2 nur Moisture Schema für Domäne 2 u. 3

Tabelle 4.1: Übersicht der verschiedenen untersuchten MM5-Konfigurationen und deren Bezeichnungen. Angegeben ist die Änderung in Bezug auf die Voreinstellung (PBL: MRF, Cumulus: Kain-Fritsch, Moisture: Goddard), die sich bei Installation der Version 3 von MM5 ergibt. Bei den Konfigurationen 6 und 7 wird für die angegebenen Domänen auf eine Cumulus-Parametrisierung verzichtet und nur die explizite Feuchte Parametrisierung der Voreinstellung verwendet.

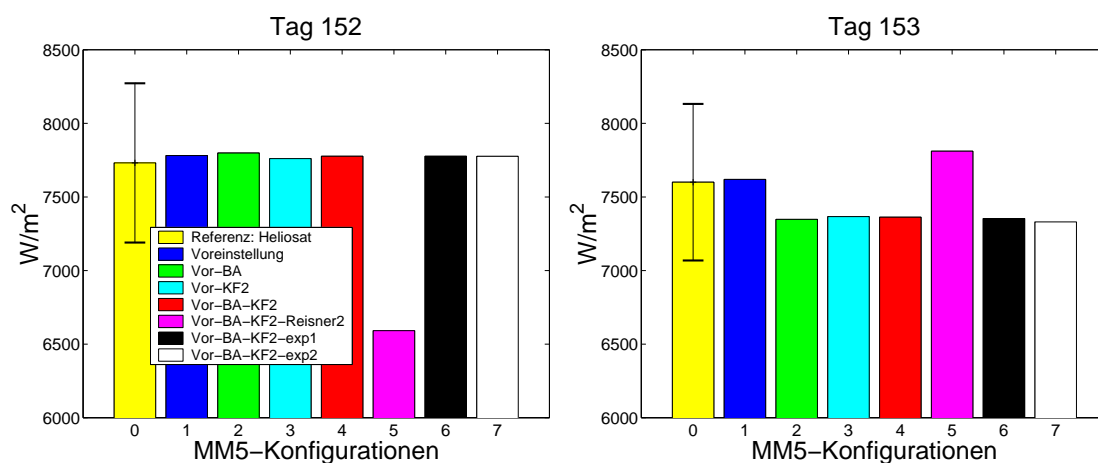


Abbildung 4.2: Tagessummen der Einstrahlung für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region in Abhängigkeit von verschiedenen MM5-Konfigurationen. Die betrachteten Tage 152 und 153 des Jahres 2003 sind durch Wolkenfreiheit charakterisiert. Als Referenz dient das Ergebnis des Heliosat-Mittels für die Region, das im wolkenfreien Fall im Mittel mit einer Ungenauigkeit von etwa 7 % behaftet ist. Es ist auf die eingeschränkte Skala zu achten.

auf die Bestimmung der globalen Einstrahlung. Die bessere Feuchte Parametrisierung Goddard zeichnet sich durch eine höhere Komplexizität aus [Dudhia et al. (2003)].

Die Analyse von stundenaufgelösten Einstrahlungswerten anhand von Tagesgängen zeigt, dass alle untersuchten Konfigurationen den Tagesgang gut wiedergeben. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass die teilweise sehr guten Übereinstimmungen mit den Heliosat-Werten auf Mittelungseffekte zurückzuführen sind. So unterschätzen fast alle Konfigurationen die solare Einstrahlung in den Morgen- und Abendstunden, welches durch eine Überschätzung in den Mittagsstunden in der Tagessumme wieder ausgeglichen wird. Die linke Darstellung in Abb. 4.3 zeigt dies am Beispiel der Konfiguration Vor-BA-KF2. Mittels des Vergleiches der Stundenwerten anhand des Tagesganges kann man nun auch erkennen, warum sich die Konfiguration Vor-BA-KF2-Reisner2 insbesondere für Tag 152 von den anderen derart deutlich unterscheidet. Wie die rechte Darstellung in Abb. 4.3 zeigt, unterschätzt diese Kombination die Strahlung über den gesamten Tag, welches sich dann natürlich auch in der Tagessumme wiederfindet.

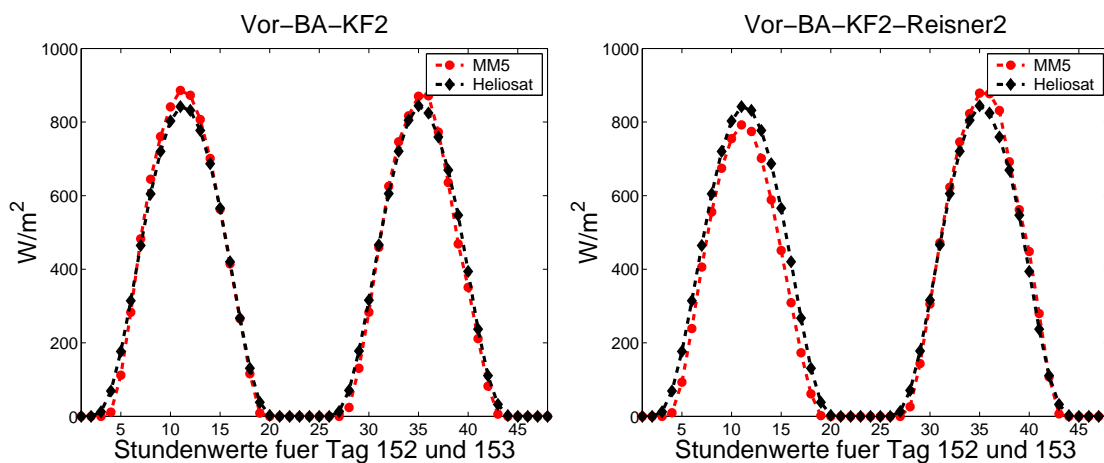


Abbildung 4.3: Tagesverläufe der Einstrahlung in $[W/m^2]$ für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region und für die beiden Konfigurationen Vor-BA-KF2 (links) und Vor-BA-KF2-Reisner2 (rechts). Die MM5-Ergebnisse (rot) werden mit den Heliosat-Werten (schwarz) verglichen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass fast alle getesteten Konfigurationen im wolkenfreien Fall sehr ähnliche Resultate liefern. Auffällig ist die überall auftretende Unterschätzung der Einstrahlung in den Morgen- und Abendstunden, sowie die fast bei jeder Konfiguration zu beobachtende Überschätzung in den Mittagsstunden. Dies lässt darauf schließen, dass das in MM5 integrierte Modell zur Parametrisierung der Clearsky-Strahlung nicht optimal ist. Aufgrund der hohen absoluten Einstrahlung sind die Differenzen zum Referenzwert in diesem Fall jedoch nicht überzubewerten. Für praktische Anwendungen, ist MM5 unter Verwendung einer geeigneten Konfiguration gut geeignet, die Einstrahlung im wolkenfreien Fall zu modellieren.

4.1.2 Durchbrochene Bewölkung

Die durchbrochene Bewölkung stellt eine schwierig zu modellierende und vorherzusagende Situation dar. Das Hauptproblem besteht darin, nicht nur Wolken mit den korrekten optischen Eigenschaften zu modellieren, sondern ebenfalls deren zeitliche und räumliche Struktur zu beschreiben. Bei hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung führen die verwendeten Parametrisierungen in der Regel zu hohen Fehlern. Für zeitliche und/oder räumliche Mittel dagegen sollten die Parametrisierungen in der Lage sein, den Grad der Bewölkung und deren Eigenschaften wie Transmission und Absorption wiederzugeben. Daher ist die hier vorgenommene räumliche Mittelung über die untersuchte Region von $150 \times 150 \text{ km}^2$ besonders für diesen Fall sinnvoll.

Die Komplexität bei der Modellierung der durchbrochenen Bewölkung führt aber auch bei der Mittelung über eine Region dazu, dass sich die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Konfiguration teilweise erheblich unterscheiden. Obwohl die Konfigurationen zum Teil nur wenig differieren, weichen ihre Resultate doch signifikant voneinander ab. Dies wird in Abb. 4.4 deutlich, in der die Tagessummen der Einstrahlung in Abhängigkeit von den verschiedenen Konfigurationen dargestellt sind. Die Abweichungen in den Tagessummen

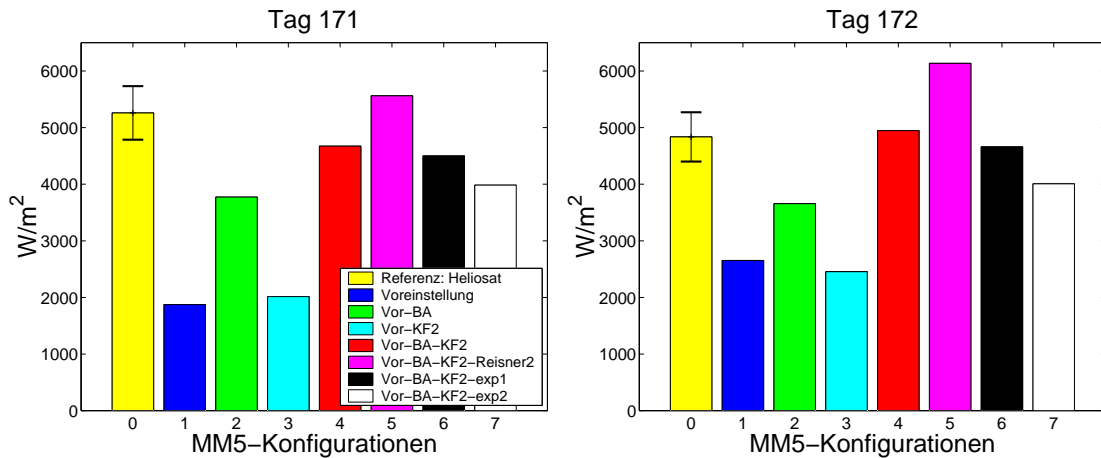


Abbildung 4.4: Tagessummen der Einstrahlung für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region in Abhängigkeit von verschiedenen MM5-Konfigurationen. Die betrachteten Tage 171 und 172 des Jahres 2003 sind durch durchbrochene Bewölkung charakterisiert. Als Referenz dient das Ergebnis des Heliosat-Mittels für die Region, das im durchbrochen bewölkten Fall im Mittel mit einer Ungenauigkeit von etwa 10 % behaftet ist.

zum Heliosat-Wert liegen für Tag 171 zwischen 6 % und - 64 % und nur eine Konfiguration liegt innerhalb des Fehlerbereiches des Heliosat-Mittels (Vor-BA-KF2-Reisner2). Für Tag 172 liegen die Abweichungen zwischen 27 % und -49 %. Hier liegen zwei Konfigurationen innerhalb des Toleranzbereiches bezüglich des Heliosat-Mittels (Vor-BA-KF2 und Vor-BA-KF2-exp1) und die Konfiguration Vor-BA-KF2 liefert mit einer Abweichung von 2,3 % das beste Ergebnis. Etwas schlechtere aber immer noch gute Resultate liefert die Konfiguration Vor-BA-KF2-exp1 für beide Tage. Die Beschränkung der höher

aufgelösten Domänen auf die explizite Feuchte-Parametrisierung und der Verzicht auf die Cumulus-Parametrisierung führt in dieser Situation zu etwas schlechteren Resultaten. Dies wird auch dadurch bestätigt, dass die Ergebnisse noch stärker von der Referenz abweichen, wenn zusätzlich auch in der mittleren Domäne auf die Cumulus-Parametrisierung verzichtet wird (Vor-BA-KF2-exp2). Die schlechtesten Ergebnisse mit einer starken Unterschätzung erzielen die Konfigurationen Vor-KF2 und die nach der Voreinstellung. Insgesamt ist eine Tendenz zur Unterschätzung festzustellen.

Die erheblichen Unterschiede in den Tagessummen spiegeln sich auch in Abb. 4.5 beim Vergleich der Stundenwerte anhand des Tagesganges wieder. So erkennt man deutlich

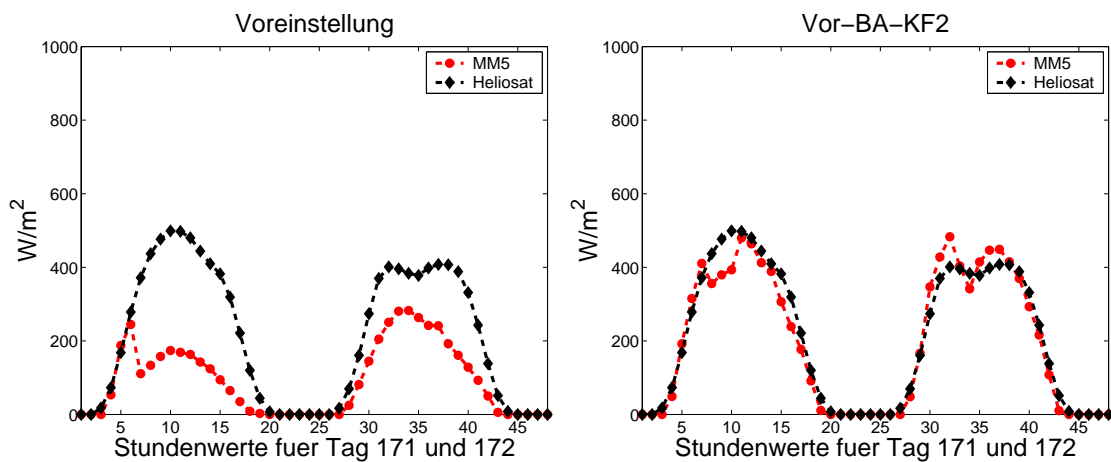


Abbildung 4.5: Tagesverläufe der Einstrahlung in $[W/m^2]$ für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region und für die beiden Konfigurationen Voreinstellung (links) und Vor-BA-KF2 (rechts). Die MM5-Ergebnisse (rot) werden mit den Heliosat-Werten (schwarz) verglichen.

wie stark MM5 in der Voreinstellung die Einstrahlung unterschätzt und den realen Tagesverlauf nicht wiedergeben kann. Dagegen zeigt die Konfiguration Vor-BA-KF2, dass MM5 durchaus in der Lage ist, auch für durchbrochene Bewölkung den Tagesgang gut darzustellen. Im Vergleich zu den Heliosat-Werten schwanken die MM5-Resultate zwar stärker, geben aber den prinzipiellen Verlauf korrekt wieder. Damit wird auch noch einmal deutlich, dass nicht nur die Betrachtung der einzelnen Parametrisierungen in MM5 von Bedeutung ist, sondern auch die richtige Kombination dieser zu einer Gesamtkonfiguration in Bezug auf die Bestimmung des gewünschten Parameters, hier die globale Einstrahlung am Boden.

Mit einer geeigneten Konfiguration lässt sich also die Einstrahlung auch für durchbrochene Bewölkung gut modellieren. Es kann festgestellt werden, dass die meisten getesteten Konfigurationen in dieser Fallstudie dazu neigen, die Einstrahlung zu unterschätzen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Bewölkung in den hier untersuchten Fällen überschätzt wurde.

4.1.3 Geschlossene Bewölkung

Auf den ersten Blick erscheint eine geschlossenen bewölkte Situation deutlich einfacher modellierbar zu sein als eine Situation mit durchbrochener Bewölkung. Man könnte also eher ein Ergebnis entsprechend einer wolkenfreien Situation erwarten. Jedoch darf nicht vernachlässigt werden, dass man es in der realen Atmosphäre nie mit horizontal homogenen Bewölkungsschichten zu tun hat, wie man sie in vielen Strahlungsmodellrechnungen unter Annahme einer planparallelen Schichtung der Atmosphäre vorgibt. Eine starke durchgehende Bewölkung kann in sich durchaus inhomogen sein, was genauso wie bei der durchbrochenen Bewölkung zu Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Einstrahlung führt [Cahalan et al. (1994)]. Hinzu kommt, dass die geringen absoluten Einstrahlungen bei entsprechenden Abweichungen zu hohen relativen Fehlern führt.

Eine Darstellung der Einstrahlung für den Standort Soltau innerhalb der betrachteten Region macht dies deutlich. In Abb. 4.6 sind halbstündig aufgelöste Einstrahlungswerte dargestellt, die über das Heliosat-Verfahren gewonnen wurden. Es ist zu erkennen, dass aufgrund einer starken und homogen geschlossenen Wolkendecke nicht auf eine variationsfreie Einstrahlung geschlossen werden darf. Obwohl an den beiden betrachteten Tagen,

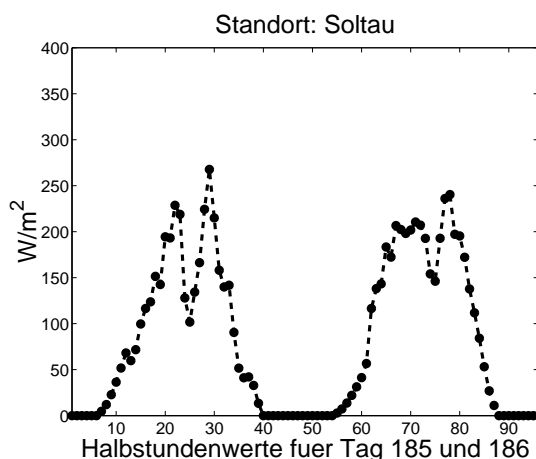


Abbildung 4.6: Halbstündige Heliosat-Werte der Einstrahlung für die Tage 185 und 186 für den Standort Soltau, der innerhalb der bisher betrachteten Region liegt. Diese Tage sind durch eine geschlossene Bewölkung charakterisiert.

Tag 185 und 186 des Jahres 2003, eine geschlossene Wolkenschicht sowohl über den betrachteten Standort Soltau als auch über der gesamten Region liegt und die maximale Einstrahlung 300 W/m^2 nicht überschreitet, gibt die Abb. 4.6 keinen typischen wolkenfreien Tagesgang wieder, der nur gedämpft ist. Stattdessen sind starke Fluktuationen zu erkennen, die eher einer durchbrochenen Bewölkungssituation entsprechen. Dies ist auf die Inhomogenität der geschlossenen Wolkenschicht zurückzuführen.

Entsprechend deutlich unterscheiden sich in Abb. 4.7 die Resultate für die Tagessummen in Bezug auf die unterschiedlichen Konfigurationen. Die Abweichungen vom Heliosat-Mittel liegen zwischen -9% und -46% für Tag 185. Es ist zu berücksichtigen, dass die

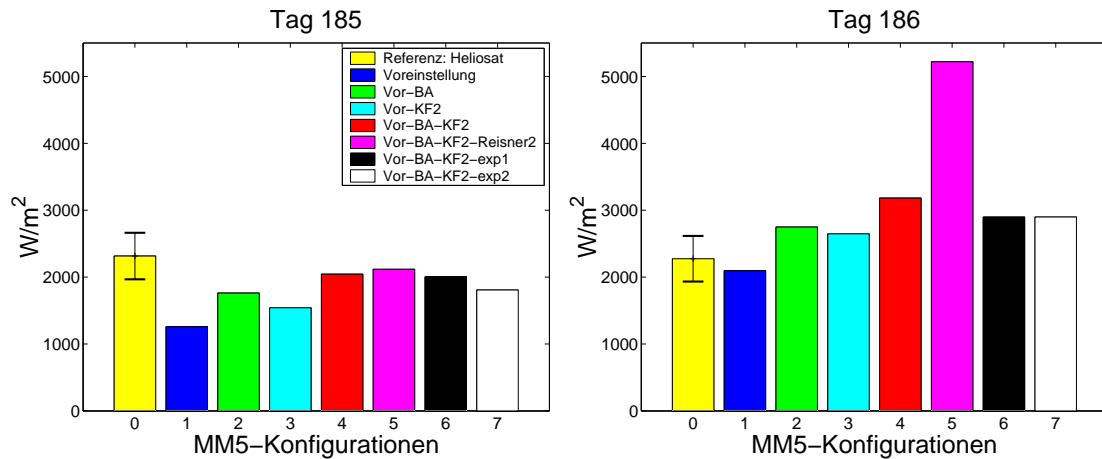


Abbildung 4.7: Tagessummen der Einstrahlung für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region in Abhängigkeit von verschiedenen MM5-Konfigurationen. Die betrachteten Tage 185 und 186 des Jahres 2003 sind durch eine geschlossene Bewölkung charakterisiert. Als Referenz dient das Ergebnis des Heliosat-Mittels für die Region, das im stark bewölkten Fall mit einer Ungenauigkeit im Mittel von etwa 18 % behaftet ist. Es sind die unterschiedlichen Skalen zu beachten.

absoluten Werte hier deutlich geringer sind als bei den zuvor untersuchten Bewölkungssituationen. Für Tag 185 erzielen die Kombinationen Vor-BA-KF2-Reisner2, Vor-BA-KF2 und Vor-BA-KF2-exp1 die besten Resultate. Die beiden besten Konfigurationen (Vor-BA-KF2-Reisner2, Vor-BA-KF2) für Tag 185 liefern für den darauf folgenden Tag 186 die schlechtesten Ergebnisse. Für Tag 186 liegen die Abweichungen vom Heliosat-Mittel zwischen 130 % und -8 %. Nur die Konfiguration in der Voreinstellung liegt innerhalb des Fehlerbereiches des Heliosat-Mittels. Für beide Tage zeigen sich damit sehr unterschiedliche Ergebnisse. Während alle getesteten Konfigurationen die Einstrahlung für Tag 185 unterschätzen, dreht sich dieser Trend für Tag 186 um und es kommt zu einer teilweise massiven Überschätzung. Dies kann als Hinweis auf die oben beschriebene geringere statistische Relevanz von Einzelergebnissen bei der Untersuchung von Fallstudien verstanden werden. Es wird aber angenommen, dass über die Betrachtung aller Fallstudien letztlich ein belastbares Ergebnis bzgl. der Bestimmung einer geeigneten Gesamtkonfiguration erzielt werden kann.

Die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Tage werden besonders deutlich, wenn man sich den Verlauf der Stundenwerte im Vergleich zu den Heliosat-Mitteln in Abb. 4.8 ansieht. Entsprechend der Heliosat-Mittel ist zu erkennen, dass sich für das Regionsmittel an Tag 185 ein fast typisch wolkenfreier Tagesverlauf ergibt, der im Wesentlichen nur durch die Bewölkung gedämpft ist. Dieser Verlauf kann auch von den meisten getesteten Konfigurationen wiedergegeben werden. An Tag 186 ergibt sich laut Heliosat-Werten aber ein abweichender Tagesgang. Hier ist die Einstrahlung in der Mitte des Tages fast konstant, was darauf schließen lässt, dass in dieser Zeit eine besonders starke Bewölkungsschicht durchgezogen ist. Wie sich zeigt, kann der Tagesgang dieser Situation von keiner der ge-

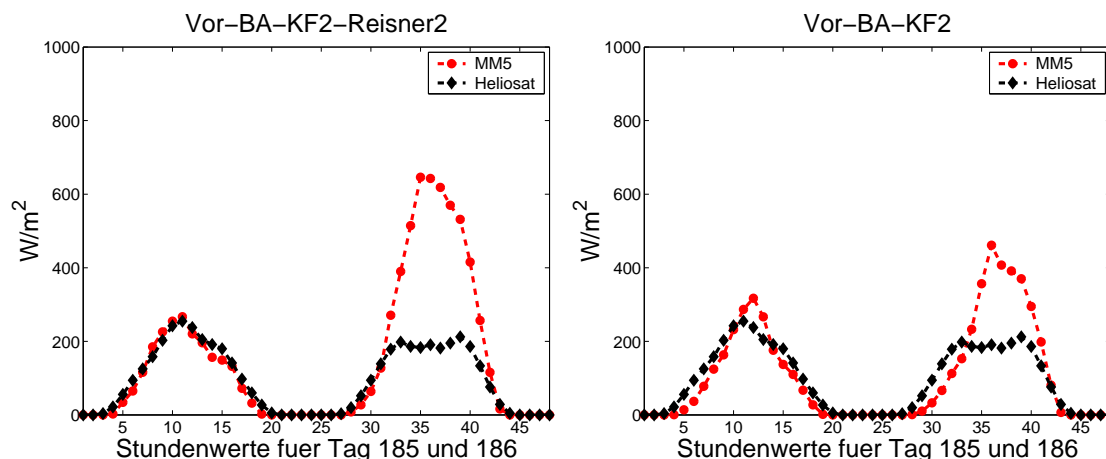


Abbildung 4.8: Tagesverläufe der Einstrahlung in $[W/m^2]$ für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region und für die beiden Konfigurationen Vor-BA-KF2-Resiner2 (links) und Vor-BA-KF2 (rechts). Die MM5-Ergebnisse (rot) werden mit den Heliosat-Werten (schwarz) verglichen.

testeten Konfiguration korrekt modelliert werden und damit scheint diese Situation eine besondere Schwierigkeit darzustellen.

Weitergehende Analyse der Ergebnisse für Tag 186

Da der Tagesgang von Tag 186 der untersuchten stark bewölkten Situation von keiner Konfiguration korrekt modelliert werden konnte, soll durch weitere Untersuchungen eine mögliche Erklärung dafür gefunden werden. Dazu wird der Tagesgang der Stundenwerte, der sich durch die Heliosat-Mittel laut Abb. 4.8 für die Region ergibt, betrachtet. Es fällt auf, dass man dort keinen durch die starke Bewölkung nur gedämpften Tagesgang erkennen kann, wie das für den Tag zuvor noch möglich ist. Stattdessen sinkt die Einstrahlung über die Mittagszeit wieder etwas ab, verläuft dann nahezu konstant, um dann in den frühen Nachmittagsstunden wieder kurz etwas anzusteigen.

Zunächst wurde der Tagesgang des Heliosat-Verfahrens mit Bodenmessungen überprüft. Hierzu wurden die Tagesverläufe auf Stundenbasis von einigen Bodenmessstationen für den Tag 186 betrachtet. Da für die untersuchte Region keine Bodenmessstationen zur Verfügung standen, mussten Stationen am Rande der Region ausgewählt werden. Entsprechend der Ausbreitungsrichtung der Wolken, die auf den Satellitenbildern zu erkennen ist, wurden dafür Stationen ausgewählt, die süd-östlich der untersuchten Region und somit unter einer sehr ähnlichen Wolkenstruktur liegen. Es zeigte sich, dass sich der Tagesverlauf der Heliosat-Mittel in den Bodenmessungen wiederfinden lässt. Beispielfhaft dafür zeigt Abb. 4.9 einen entsprechenden Verlauf für die Bodenstation Harzgerode. Beachtet man, dass die Heliosat-Werte über die Region von $150 \times 150 \text{ km}^2$ gemittelt sind und sich dadurch ein Glättungseffekt einstellt, sind die Ergebnisse des Heliosat-Verfahrens damit bestätigt. Auch im Vergleich mit den Heliosat-Werten für den Standort Soltau kann, wie Abb. 4.6 zu entnehmen ist, ein ausreichend ähnlicher Tagesverlauf festgestellt werden.

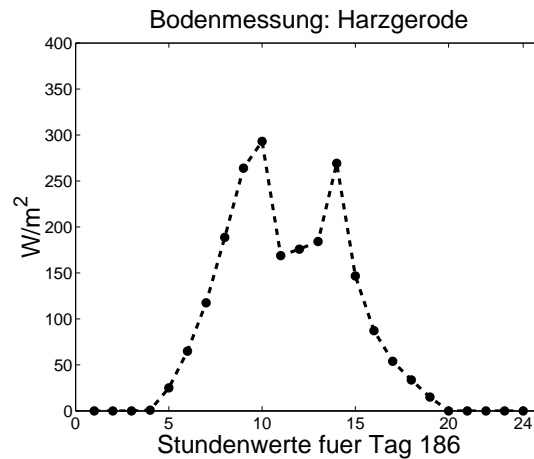


Abbildung 4.9: Bodenmessung der Einstrahlung für Tag 186 für den Standort Harzgerode. Der prinzipielle Tagesverlauf, wie er vom Heliosat-Verfahren modelliert wird, kann bestätigt werden, vgl. Abb. 4.6 und 4.8.

Die Unterschiede zwischen den MM5-Ergebnissen und den Heliosat-Mitteln konnten durch weitere Untersuchungen der Daten von Bodenmessstationen ansatzweise geklärt werden. So zeigten Bodenstationen, die mit 150 bis 200 km deutlich weiter östlich der eigentlich betrachteten Region lagen, einen ähnlichen Tagesverlauf, wie er von MM5 modelliert wird. Die Abb. 4.10 zeigt die Stundenwerte für die Bodenstation Teterow. Um diese Er-

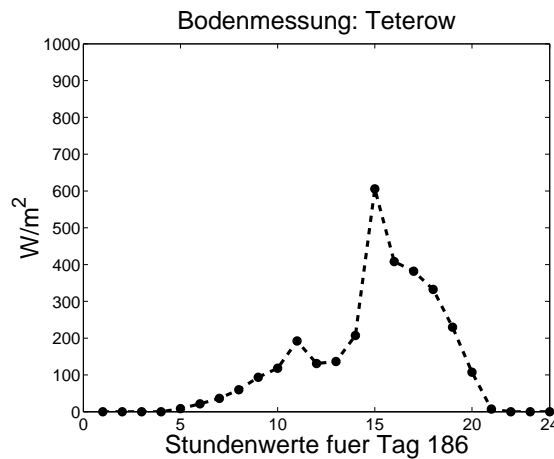


Abbildung 4.10: Bodenmessung der Einstrahlung für Tag 186 für den Standort Teterow. Dieser liegt ca. 200 km nordöstlich der modellierten Region. Es ergibt sich ein ähnlicher Tagesverlauf wie der von MM5 modellierte für die Region, vgl. Abb. 4.8.

kenntnis weiter zu prüfen, wurde nun eine Testregion zur Bestimmung der Heliosat-Mittel ca. 200 km weiter östlich festgelegt. Als MM5-Konfiguration wurde für diesen Test nur die Variante Vor-BA-KF2 verwendet. Die für diesen neuen Regionsausschnitt bestimmten Heliosat-Mittel wurden dann mit den MM5-Ergebnissen für die ursprüngliche Region ver-

glichen. Es zeigt sich, dass der prozentuale Unterschied in der Tagessumme für beide Tage deutlich zurückgeht. Für Tag 185 von -11.7 % auf -6.4 % und für den entscheidenden Tag 186 von 39.9 % auf 1.1 %. Diese deutliche Verbesserung wird durch die Betrachtung des Stundenverlaufs in Abb. 4.11 wieder etwas relativiert, da die Tagesgänge an beiden Tagen immer noch nicht übereinstimmen. Die sehr guten Tagessummen ergeben sich durch einen Ausgleich von Über- und Unterschätzung. Dieses Phänomen ist auch schon bei der Situation mit durchbrochener Bewölkung zu beobachten gewesen, vgl. Abb. 4.5.

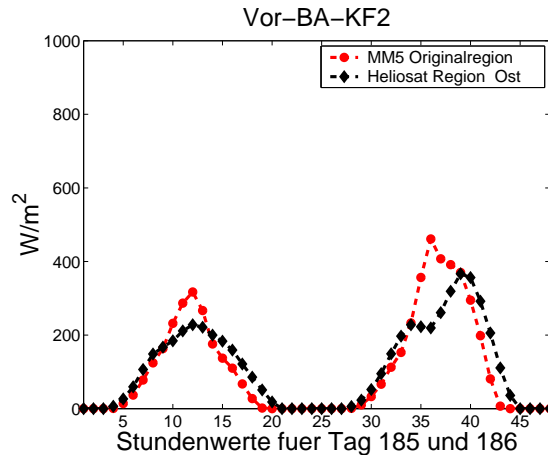


Abbildung 4.11: Tagesverlauf der Einstrahlung in $[W/m^2]$ für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region. Es wurde die Konfiguration Vor-BA-KF2 verwendet. Die MM5 Ergebnisse (rot) des ursprünglichen Regionsausschnittes werden mit den Heliosat-Werten (schwarz) eines ca. 200 km weiter östlich liegenden Ausschnittes verglichen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die korrekte Modellierung von Situationen mit Bewölkung davon abhängt, ob die zeitliche und räumliche Struktur der Bewölkung richtig beschrieben wird. Wie die Fallstudien von Tag 185 und 186 des Jahres 2003 zeigen, gelingt dies dem untersuchten Modell MM5 nur teilweise, was in Einzelfällen zu sehr hohen Fehlern führt. Die hohen absoluten Abweichungen sind besonders für solarenergetische Anwendungen zu groß.

4.1.4 Zusammenfassung

Mit der vorangegangenen systematischen Untersuchung soll festgestellt werden, welche Konfiguration von MM5 am besten geeignet ist, um die globale Einstrahlung zu bestimmen. Wie die Ergebnisse zeigen, ist dies mitunter nicht eindeutig zu bestimmen, da sich bereits für dieselbe Bewölkungssituation unterschiedliche Konfigurationen zu eignen scheinen. Dies kann, wie bereits erwähnt, als Hinweis auf die geringere statistische Relevanz von Einzelergebnissen bei der Untersuchung von Fallstudien verstanden werden. Über der Betrachtung aller Fallstudien und die Berücksichtigung unterschiedlicher Bewölkungssituationen kann aber angenommen werden, dass letztlich ein ausreichend belastbares Ergebnis bzgl. der Bestimmung einer geeigneten Gesamtkonfiguration erzielt werden kann.

Für die wolkenfreien Situationen lässt sich feststellen, dass fast alle getesteten Konfigurationen diese Situationen modellieren können. Nur die Konfiguration Vor-BA-KF2-Reisner2 ist aufgrund eines deutlich schlechteren Ergebnisses für Tag 152 eher ungeeignet. Im Falle der durchbrochenen Bewölkung ist die Konfiguration Vor-BA-KF2 am besten geeignet und bestätigt damit ihre gute Verwendbarkeit zur Modellierung der Globalstrahlung. Auch die geschlossen bewölkte Situation kann von diesen beiden Konfigurationen für Tag 185 am besten modelliert werden. Dagegen ist das Ergebnis der Vor-BA-KF2-Reisner2 Konfiguration für den Tag 186 besonders unbefriedigend.

Letztlich muss eine Konfiguration gefunden werden, die für alle auftretenden Bewölkungssituationen möglichst gute Ergebnisse bzgl. der globalen Einstrahlung liefert. Daher erscheint insgesamt die Konfiguration Vor-BA-KF2 für die hier betrachteten Fallstudien am besten geeignet zu sein. Es wird angenommen, dass die Ergebnisse der Fallstudien übertragbar sind. Aufgrund dessen wird die Konfiguration Vor-BA-KF2 für die folgenden Untersuchungen und Studien als Gesamtkonfiguration von MM5 festgelegt und als solche verwendet.

4.2 Vorhersage der Einstrahlung über MM5

Nachdem im vorangegangenen Kapitel unter Verwendung von Reanalyse-Daten geklärt worden ist, welche Konfiguration von MM5 zur Strahlungsmodellierung genutzt werden soll, wird nun die Vorhersage der Einstrahlung untersucht. Als Eingangsdaten zum Antrieb von MM5 werden entsprechende Felder des ECMWF und des DWD verwendet. Wie bereits beschrieben, stellt der DWD das globale Modell GME sowie das lokale Modell LM zur Verfügung. Es ist also sinnvoll, zunächst zu prüfen, mit welcher Datenquelle gearbeitet werden soll. In diesem Zusammenhang kann analysiert werden, welchen Einfluß die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen der Modelldaten auf die vorhergesagte Einstrahlung haben. Dies wird wie zuvor bei der Untersuchung von unterschiedlichen Konfigurationen anhand von Fallstudien für die bereits eingeführte $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region durchgeführt. Daher kann über einen Vergleich mit den Resultaten für die Reanalyse-Daten von NCEP der Einfluss der vorhergesagten Daten abgeschätzt werden. Nach der Festlegung auf ein DWD-Modell wird für eine Zeitreihe von 40 Tagen die Strahlung vorhergesagt. Der Vorhersagehorizont beträgt bis zu 48 h und die Berechnungen werden für zwei verschiedene Datenquellen (DWD, ECMWF) zum Antrieb von MM5 durchgeführt. Dadurch lässt sich feststellen, welchen Effekt die unterschiedlichen Eingangsdaten haben. Die Untersuchung berücksichtigt Regionsmittel über ein Gebiet von $200 \times 200 \text{ km}^2$, welches sich bzgl. der Lage von der bisher betrachteten Region unterscheidet. Als Referenz hierfür dienen wieder entsprechende Heliosat-Mittel. Des Weiteren wird die Genauigkeit der Vorhersage im Vergleich zu Bodenmessungen für bestimmte Standorte analysiert.

Der Zeitraum der Untersuchung umfasst 40 Tage vom 30.05. bis 8.07.2003. Diese Einschränkung erfolgt aufgrund des hohen Rechenzeitaufwandes. Für die Analyse wurde ein Zeitraum ausgewählt, der hauptsächlich durch Wettersituationen mit geringer Bewölkung geprägt ist und im Vergleich zum Jahresdurchschnitt weniger Tage mit durchbrochener

oder starker Bewölkung enthält. Hintergrund dafür ist die Annahme, die zugleich auch die Mindestanforderung an das Modell stellt, dass derartige Situationen besser und einfacher zu modellieren sein sollten, als durchbrochene oder stark bewölkte Situationen, wie es in Kapitel 4.1 festgestellt wird. Zudem sind dies die Fälle mit der höchsten absoluten Einstrahlung und die erreichbare Genauigkeit ist damit für praktische Anwendungen besonders kritisch. Sofern die Ergebnisse den Anforderungen genügen, wäre aber eine entsprechende Analyse über mindestens ein ganzes Jahr anzustreben.

4.2.1 Fallstudien zu verschiedenen DWD-Datensätzen

Zunächst soll geklärt werden, welche DWD-Datenquelle für die Untersuchung über den längerfristigen Zeitraum von 40 Tagen verwendet werden soll. Zum einen steht das globale GME-Modell mit einer räumlichen Auflösung von $60 \times 60 \text{ km}^2$ und einer maximalen zeitlichen Auflösung von 3h zur Verfügung. Zum anderen kann das auf dem GME beruhende lokale Modell LM mit einer höheren Auflösung von $7 \times 7 \text{ km}^2$ und 1h genutzt werden. In diesem Zusammenhang kann der Einfluss der unterschiedlich zeitlich und räumlich aufgelösten Antriebsdaten auf das MM5-Ergebnis untersucht werden. Zudem kann ein Vergleich der Genauigkeiten der Vorhersage mit den für die NCEP Reanalyse Daten gewonnenen Ergebnisse durchgeführt werden.

Sowohl die LM- als auch die GME-Daten werden nach einer entsprechenden zeitlichen Interpolation zunächst mit einer Auflösung von 6h verwendet. Damit können die Ergebnisse besser mit den aus NCEP-Daten gewonnenen MM5-Resultaten verglichen werden. Damit reduzieren sich die Unterschiede auf die höhere räumliche Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ zu $50 \times 50 \text{ km}^2$ bzw. $7 \times 7 \text{ km}^2$ sowie der Verwendung von Reanalyse bzw. Vorhersage-Daten. Anschließend wurden die Berechnungen für die jeweils höchst mögliche zeitliche Auflösung wiederholt (LM: 1h, GME: 3h).

Für die Untersuchungen werden entsprechend der Beschreibung in Kapitel 4.1 Fallstudien für verschiedene Bewölkungssituationen untersucht. In allen Fällen werden Tagessummen für die $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region betrachtet. Es ist anzumerken, dass die Domänen, die innerhalb von MM5 zur Berechnung definiert werden, an die unterschiedlichen räumlichen Auflösungen der DWD-Daten angepasst werden müssen. Das bedeutet, dass z.B. zur Verwendung der LM-Daten aufgrund der höheren Auflösung der Ausgangsdaten eine räumlich kleiner ausgedehnte Mutterdomäne gewählt werden kann und nur eine weitere Domäne zum Nesting nötig ist. Diese Domäne entspricht von der Ausdehnung wiederum exakt der dritten Domäne aus Abb. 4.1 für die Berechnungen mit den NCEP-Daten. Die Auflösung der kleinsten Domäne beträgt also immer $3 \times 3 \text{ km}^2$.

Die Tabelle 4.2 zeigt den prozentualen Bias der Tagessumme für die verschiedenen MM5-Ergebnisse und aufgrund eines Vergleichs mit dem Heliosat-Mittel für die $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region. Die Berechnungen sind für die in Kapitel 4.1 vorgestellten Fälle unterschiedlicher Bewölkung durchgeführt worden.

Zunächst erfolgt der Vergleich zwischen den MM5-Resultaten für die Reanalyse Daten von NCEP und den Vorhersagedaten vom DWD auf der Basis einer zeitlichen Auflösung von 6h. Die Ergebnisse machen deutlich, dass auch mit den DWD-Vorhersagedaten gute

Tag des Jahres 2003	NCEP	GME 6h	LM 6h	GME 3h	LM 1h
152	0.6 %	6.6 %	-1.9 %	6.3 %	-4.7 %
153	-3.1 %	3.2 %	-0.9 %	2.7 %	0.8 %
171	-11.2 %	-12.3 %	7.1 %	-11.4 %	9.1 %
172	2.3 %	13.2 %	6.8 %	13.9 %	8.4 %
185	-11.7 %	-32.7 %	46.3 %	-16.2 %	56.8 %
186	39.9 %	80.3 %	49.1 %	72.9 %	29.1 %

Tabelle 4.2: Bias der Tagessumme in Prozent für die MM5-Ergebnisse im Vergleich zu Heliosat-Mitteln für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region. MM5 wurde mit Eingangsdaten verschiedener Quellen und unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösungen betrieben. In **fett** sind die besten Ergebnisse auf Basis von Vorhersagedaten dargestellt.

Resultate erzielt werden können. Der in Tab. 4.2 beschriebene Bias für die NCEP-Daten ergibt sich für die in Kap. 4.1 bestimmte Gesamtkonfiguration Vor-BA-KF2. Alle anderen Ergebnisse wurden ebenfalls unter Verwendung dieser Konfiguration gewonnen. Die NCEP-Daten liefern tendenziell die besseren Resultate. Dies kann trotz der größeren räumlichen Auflösung damit begründet werden, dass es sich hierbei um Reanalyse-Daten handelt. Diese Modelldaten werden durch die Nutzung von vielfältigen Messungen an diese angepasst und damit verbessert. Daher können diese Daten den Zustand der Atmosphäre besser beschreiben als die reinen Vorhersagedaten. Die Daten des lokalen LM-Modells liefern wiederum bessere Resultate als das räumlich gröber aufgelöste GME-Modell. Das lässt darauf schließen, dass durch das LM-Modell die Skalierung der ursprünglichen GME-Daten zu einer höheren räumlichen Auflösung zu besseren Endergebnissen führt als die direkte Skalierung der GME-Daten nur über MM5. Insofern wirkt sich die höhere räumliche Auflösung des LM positiv aus.

Auffällig sind die schlechten MM5-Ergebnisse für die DWD-Modelle für die Situation geschlossener Bewölkung. Aufgrund der Erkenntnisse von Kap. 4.1.3 für den Tag 186 ist dieses Ergebnis aber erklärbar. Das bereits für die NCEP-Daten schlechte Resultat für Tag 186 konnte ansatzweise über ein Lokalisierungsproblem von MM5 für diese spezielle Situation erklärt werden. Außerdem kommt hinzu, dass es sich bei den DWD-Daten um reine Vorhersagen handelt und diese ebenfalls mit einem erhöhten Fehler im Vergleich zu den Reanalyse-Daten behaftet sind. Diese Fehlerkombination kann die erheblichen Abweichungen der MM5-Ergebnisse für die DWD-Eingangsdaten im Vergleich zu den NCEP-Reanalyse-Daten ansatzweise erklären.

Die MM5-Berechnungen wurden für die jeweils höchstmögliche zeitliche Auflösung wiederholt. Das bedeutet, dass die GME-Daten in dreistündiger Auflösung und die LM-Daten in einstündiger Auflösung vorliegen. Es ist festzustellen, dass die zeitlich höher aufgelösten GME-Daten zu leicht besseren MM5-Resultaten führen als die niedriger aufgelösten GME-Daten. Dagegen verschlechtern sich tendenziell die MM5-Resultate für die einstündig aufgelösten LM-Daten im Vergleich zu den sechsstündig aufgelösten Daten. Die LM-Eingangsdaten für MM5 liefern aber trotzdem auch hier wieder die besseren Er-

gebnisse für die solare Einstrahlung. Allerdings lässt sich aus den schlechteren Ergebnissen für die zeitlich höher aufgelösten LM-Daten annehmen, dass insbesondere die höhere räumliche Auflösung der LM-Daten von Vorteil ist. Das bedeutet wiederum, dass für die räumliche Skalierung der GME-Daten eher LM als MM5 geeignet ist. Dagegen scheint die hohe zeitliche Auflösung keinen zusätzlichen Vorteil zu erbringen. Stattdessen erscheint es sinnvoller MM5 für die Berechnung zeitlich hochaufgelöster Parameter zu verwenden. Die zeitliche Auflösung der MM5-Resultate beträgt 1h und es scheint besser diese Auflösung über die Berechnung von MM5 zu erreichen als sie direkt über die LM-Daten einfließen zu lassen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die LM-6h-Eingangsdaten in drei von sechs Fällen die besten MM5-Resultate liefern. In zwei anderen Fällen sind die LM-1h-Daten besser, wobei die Differenz für den Tag 153 mit 0.1 % vernachlässigbar ist. Es ist daher aufgrund dieser Untersuchung sinnvoll, die LM-Daten in einer Auflösung von 6h für die weiteren Studien zu verwenden.

Zur Vervollständigung dieser Untersuchung wurden auch die Tagesverläufe der Stundenwerte für die verschiedenen MM5-Resultate analysiert. Die Tagesverläufe bzgl. der unterschiedlichen Eingangsdaten für MM5 sind optisch ähnlich. Die Abb. 4.12 zeigt die MM5-Resultate am Beispiel der LM-6h-Daten für die untersuchten Fälle von wolkenlos (oben links), durchbrochen bewölkt (oben rechts) und geschlossen bewölkt (unten). Auch die Betrachtung der Tagesgänge bestätigt, dass die Ergebnisse auf Basis der LM-6h-Daten tendenziell am besten sind. Daher werden die weiteren Untersuchungen auf Basis der 6-stündig aufgelösten LM-Vorhersagedaten durchgeführt.

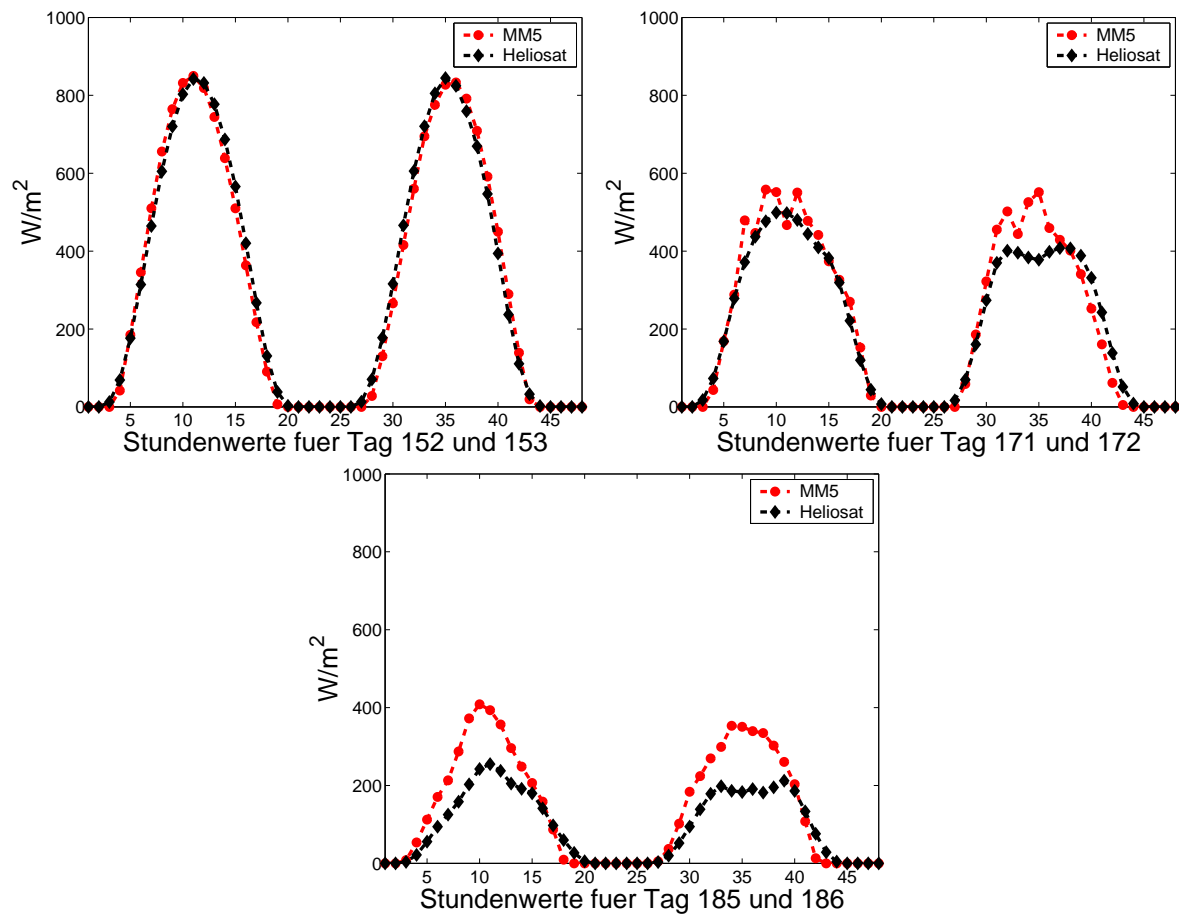


Abbildung 4.12: Exemplarische Tagesverläufe der Einstrahlung in $[W/m^2]$ für eine $150 \times 150 \text{ km}^2$ Region. Die MM5-Ergebnisse (rot) werden mit den Heliosat-Werten (schwarz) verglichen. Die MM5-Resultate ergeben sich für LM-6h-Daten des DWD.

4.2.2 DWD und ECMWF basierte MM5-Strahlungsvorhersage

Es folgt eine Auswertung der Qualität von MM5-Vorhersagen für einen längeren Untersuchungszeitraum von 40 Tagen (30.05-08.07.2003). Die Auswahl der verwendeten Gesamtkonfiguration Vor-BA-KF2, sowie der Vorhersagedaten zum Antrieb von MM5 basiert auf den Ergebnissen der vorangegangenen Fallstudien.

Das Modell wird in zwei voneinander unabhängigen Untersuchungen mit Antriebsdaten unterschiedlicher Datenquellen betrieben. Dies sind zum einen Eingangsdaten des DWD-Lokalmodells (LM) mit einer sechsständigen zeitlichen Auflösung und einer räumlichen Auflösung von $7 \times 7 \text{ km}^2$, zum anderen werden Daten des ECMWF zum Antrieb von MM5 genutzt. Die Auflösung dieser Daten liegt bei $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und drei Stunden. Durch die Wiederholung der Berechnungen mit Antriebsdaten zweier voneinander unabhängigen Modellen ist es möglich, den Einfluss unterschiedlicher Eingangsdatenquellen auf die vorherzusagende Globalstrahlung zu analysieren und so festzustellen, welche Datenquelle für die Strahlungsvorhersage mit MM5 besser geeignet ist.

Um neben einem Regionsmittel auch einen Vergleich mit Messungen von Bodenstationen durchführen zu können, wurde im Vergleich zu den vorangegangenen Fallstudien ein neuer Regionsausschnitt im Südosten von Deutschland gewählt. Innerhalb der dort untersuchten $200 \times 200 \text{ km}^2$ Region liegen 8 Bodenstationen. Die Verteilung der Bodenstationen ist der rechten Darstellung in Abb. 3.1 zu entnehmen. Die Abb. 4.13 zeigt den Regionsausschnitt und die Verteilung der Domänen bei Verwendung der ECMWF-Daten. Hierbei entspricht die kleinste Domäne der für beide Datenquellen untersuchten Region. Die räumliche Auflösung in dieser Domäne beträgt $3 \times 3 \text{ km}^2$ bei einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde.

4.2.3 Regionale MM5-Strahlungsvorhersage

Es erfolgt zunächst die Auswertung der Strahlungsvorhersage für Regionsmittel. Die globale Einstrahlung wurde für die $200 \times 200 \text{ km}^2$ große Region räumlich gemittelt. Zur Auswertung wird der in Kapitel 2.4 eingeführte relative Root Mean Square Error $rRMSE$, sowie der relative Mean Bias Error $rMBE$ verwendet. Die Regionsmittel werden entsprechend Kapitel 3.3.2 mit Mitteln des Heliosat-Verfahrens als beste verfügbare Referenzwerte verglichen. Zusätzlich sind zum Vergleich Ergebnisse des in Kapitel 3.4.1 vorgestellten operationellen MOS-Verfahrens aufgeführt. Dies ist hier insofern nützlich, als dass es damit besser möglich ist, die Ergebnisse der MM5-Vorhersagen qualitativ einzuschätzen. Bei diesem Vergleich muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die MOS basierten Regionsmittel durch Mittelung von Werten für acht Standorte ergeben, die entsprechend Abb. 3.1 innerhalb der Region liegen. Das als Referenz verwendete Heliosat-Mittel und die MM5-Mittel ergeben sich dagegen durch Mittelung eines über die Region gleichmäßig verteilten Datenfeldes in relativ hoher Auflösung.

Für die ersten 24 Stunden der Vorhersage (Vorhersagehorizont 1-24 h) ergibt sich für den $rRMSE$ der Stundenwerte der MM5-Globalstrahlungsvorhersage auf Basis der DWD-

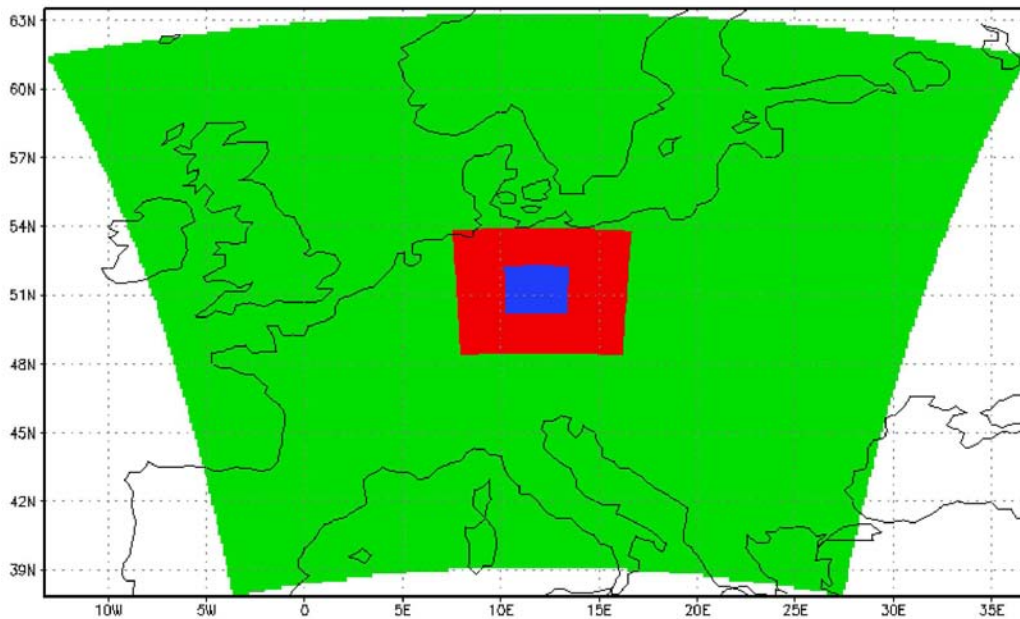


Abbildung 4.13: Darstellung der Domänen am Beispiel der verwendeten ECMWF-Daten zum Antrieb von MM5. Da die Eingangsdaten mit $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ räumlich grob aufgelöst sind, ist ein Nesting über drei Domänen nötig. Die räumliche Auflösung der kleinsten Domäne (blau) beträgt $3 \times 3 \text{ km}^2$. Die Lage und Größe der kleinsten Domäne ist für Antriebsdaten des LM identisch.

LM-Daten (MM5-LM) ein Wert von 33.9 %. Der entsprechende Wert für die MM5-Ergebnisse auf Basis der ECMWF-Vorhersagen (MM5-ECMWF) liegt bei 27.5 %. Die Darstellungen in Abb. 4.14 zeigen den $rRMSE$ und $rMBE$ der beiden MM5-Läufe für den ersten und zweiten Vorhersagetag. Die Ergebnisse der Mittelung der standortabhängigen MOS-Daten ergeben etwas geringere Fehler bzgl. des $rRMSE$. Zumindest für den hier untersuchten Zeitraum und der hier untersuchten Region können die acht MOS-Standorte die Region gut wiedergeben.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass im Vergleich der MM5-Läufe die MM5-ECMWF Globalstrahlungsvorhersagen bzgl. des $rRMSE$ um 3 bis 6 % besser sind als die von MM5-LM. Beide MM5-Läufe sind mit einem positiven Bias zwischen 2 und 9 % belegt. Die damit auftretende tendenzielle Überschätzung der Globalstrahlung deutet somit indirekt auf eine Unterschätzung der Bewölkung hin. Der Bias ist für MM5-LM stärker ausgeprägt als für MM5-ECMWF. Der deutliche positive Bias für beide Läufe und insbesondere für den ersten Vorhersagetag deutet darauf hin, dass nicht nur, wie in Kapitel 4.1.3 gezeigt, ein Lokalisationsproblem vorliegen könnte, vielmehr deutet dies auf ein prinzipielles Problem bei der Modellierung von Bewölkung hin. Die MOS-Resultate sind dagegen mit einem negativen Bias zwischen -6 und -10 % verknüpft. Mit einem $rRMSE$ von 28 bzw. 30 % zeigt das auf Bodendaten basierende MOS-Verfahren (MOS-Boden) die besten Ergebnisse. Der $rRMSE$ nimmt für alle Vorhersageansätze vom ersten zum zweiten Vorhersagetag um 3

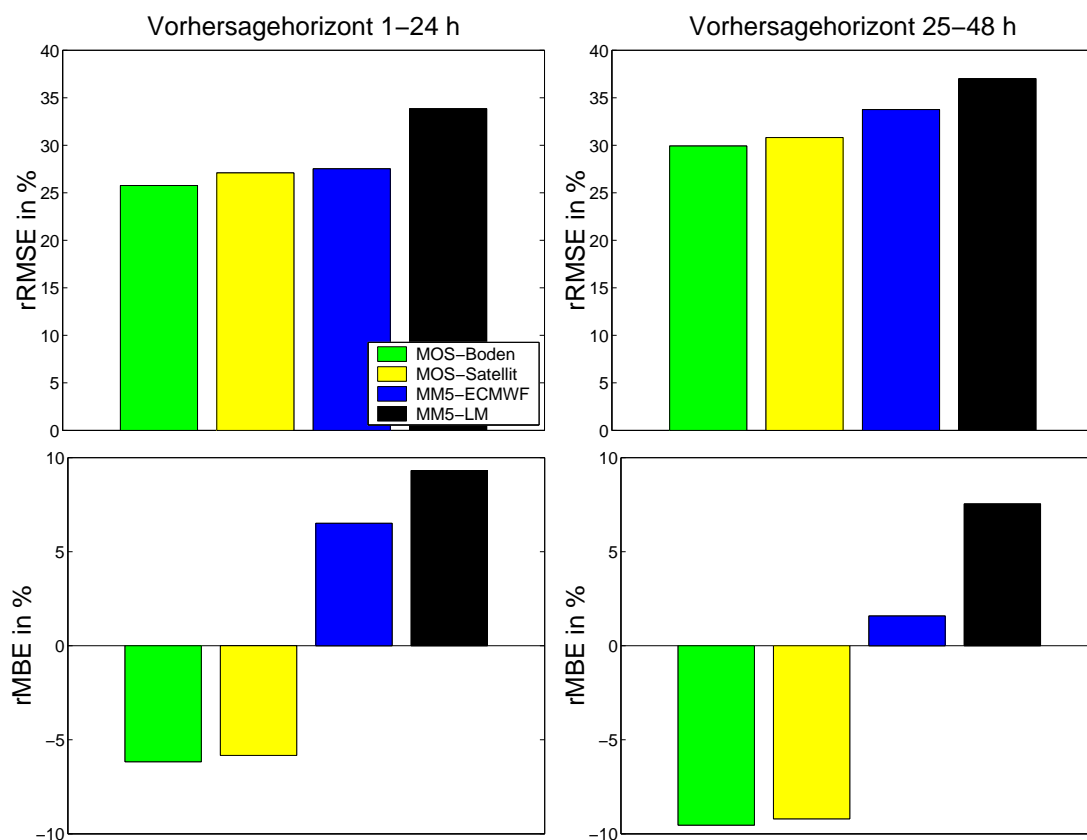


Abbildung 4.14: Darstellung des $rRMSE$ (oben) und $rMBE$ (unten) für die ersten 24 Stunden der Vorhersage (links: Vorhersagehorizont 1-24 h) und die zweiten 24 Stunden der Vorhersage (rechts: Vorhersagehorizont 25-48 h). Die Ergebnisse ergeben sich für ein Regionsmittel von $200 \times 200 \text{ km}^2$ und im Vergleich zu Heliosat-Mitteln. Die MOS-Regionsmittel basieren auf einer Mittelung von acht Standorten innerhalb der Region. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

bis 6 % zu.

Es wird deutlich, dass die Qualität der MM5-Vorhersage erheblich von den antreibenden Daten abhängt. Offensichtlich können die MM5 antreibenden Parameter des ECMWF den Zustand der Atmosphäre in dem hier untersuchten Zeitraum und für die ausgewählte Region besser und genauer beschreiben als die gleichen Größen vom DWD LM-Modell. Die festgestellten Zusammenhänge lassen sich auch bei der Betrachtung von einzelnen Tagesgängen für das $200 \times 200 \text{ km}^2$ Regionsmittel wiederfinden. Die Darstellungen in Abb. 4.15 zeigen exemplarisch den Tagesgang für sechs aufeinanderfolgende Tage für die ersten 24 Stunden der Vorhersage. Dabei werden verschiedene Bewölkungssituationen berücksichtigt. Es ist erkennbar, dass die MM5-Vorhersage zu einer Überschätzung der Globalstrahlung neigt, während die MOS basierte Vorhersage die Einstrahlung eher unterschätzt. Außerdem wird deutlich, dass alle Modelle gut geeignet sind, den Tagesgang für den wolkenfreien Fall zu modellieren, s. Tag 166-168. Dagegen kommt es ins-

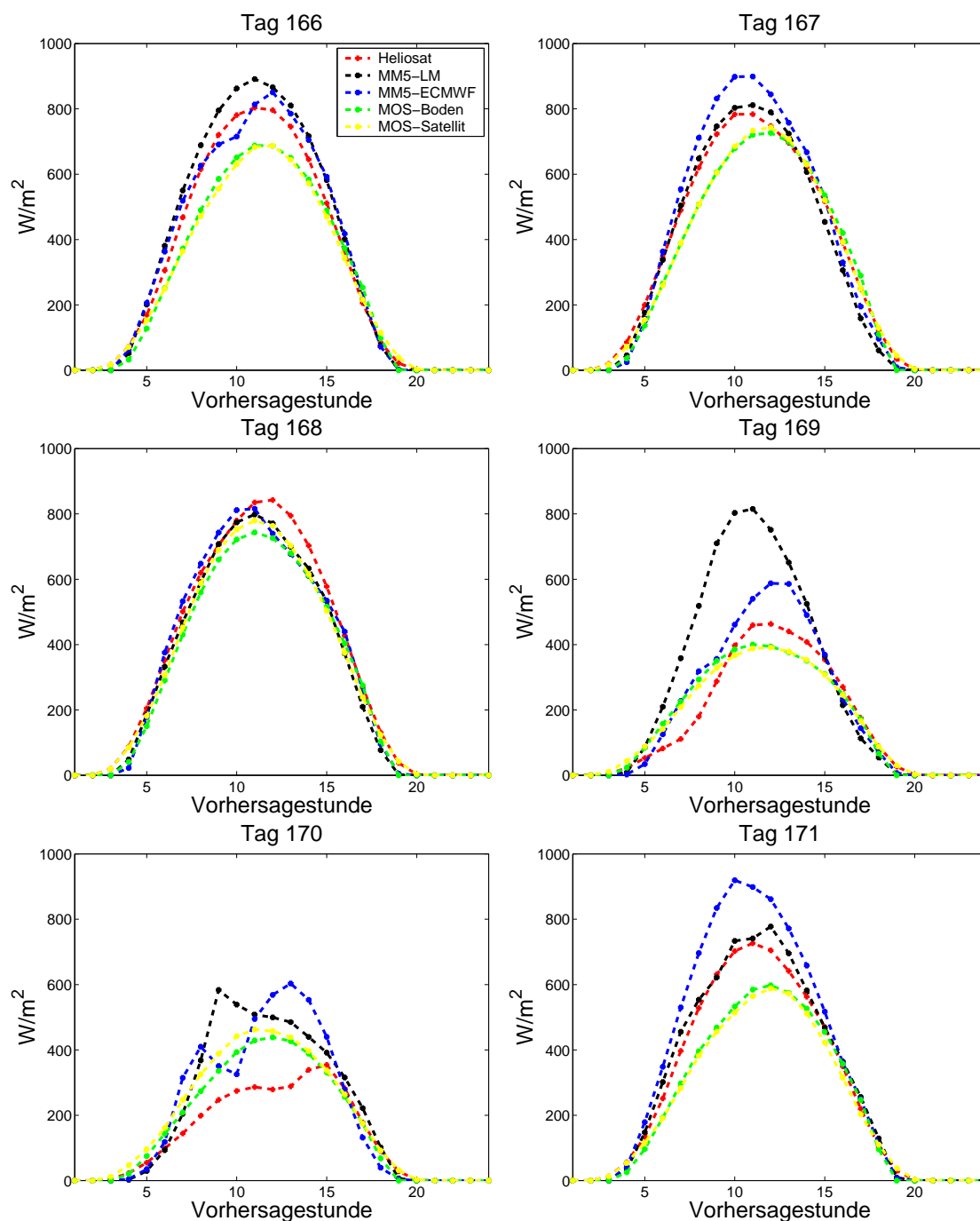


Abbildung 4.15: Darstellungen der Tagesgänge für sechs aufeinanderfolgende Tage für ein $200 \times 200 \text{ km}^2$ Regionsmittel und für die ersten 24 Stunden der Vorhersage. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

besondere zwischen den beiden MM5-Vorhersagen zu teilweise erheblichen Differenzen, wenn der Tagesgang durch Bewölkung beeinflusst wird, s. Tag 169. Die Tagesgänge der

MOS-Vorhersagen ähneln sich sehr und es ist auffällig, dass hier der Tagesgang in allen Fällen einem unterschiedlich gedämpften wolkenfreien Tagesgang entspricht. Dies führt zu Schwierigkeiten bei der Wiedergabe der Einstrahlung unter stark schwankender und wechselnder Bewölkung, wie sie selbst noch für dieses Regionsmittel zu beobachten ist, s. Tag 169 und 170. Die MM5-Ergebnisse dagegen zeigen größere Fluktuationen auf, diese decken sich aber nicht gut mit der Satellitenbeobachtung.

Im Vergleich zu den Fallstudien von Kapitel 4.1 fällt auf, dass hier eindeutig eine Überschätzung der vorhergesagten Strahlung vorliegt, während die Mehrzahl der untersuchten Konfigurationen eher zu einer Unterschätzung tendierten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass sich die Ergebnisse von Fallstudien als Einzelfälle aus einer größeren Datenmenge ergeben und somit nicht uneingeschränkt repräsentativ sein müssen. Die letztlich aber gewählte Gesamtkonfiguration Vor-BA-KF2 zeigt in den Fallstudien keine eindeutige Tendenz auf. Für jede untersuchte Bewölkungssituation wird jeweils ein Tag unterschätzt und einer überschätzt. Eine allgemeingültige Tendenz des Modells lässt sich nur über die Betrachtung eines längeren Zeitraumes feststellen. Die hier gezeigte Unterschätzung der Einstrahlung deckt sich mit Resultaten von [Zamora et al. (2003)]. [Zamora et al. (2003)] stellte ebenfalls fest, dass das Modell MM5 höhere Werte der Strahlung modelliert als von den Vergleichsmessungen bestimmt wurde.

Verschiedene Regionsgrößen

Neben der Betrachtung einer $200 \times 200 \text{ km}^2$ Region ist es interessant, die Entwicklung der Vorhersagequalität für kleinere Regionen festzustellen. Die Darstellungen in Abb. 4.16 zeigen diese Entwicklung für Regionen von $200 \times 200 \text{ km}^2$, $150 \times 150 \text{ km}^2$, $100 \times 100 \text{ km}^2$ und $50 \times 50 \text{ km}^2$. Über die verschiedenen Regionsgrößen ist nur eine moderate Zunahme

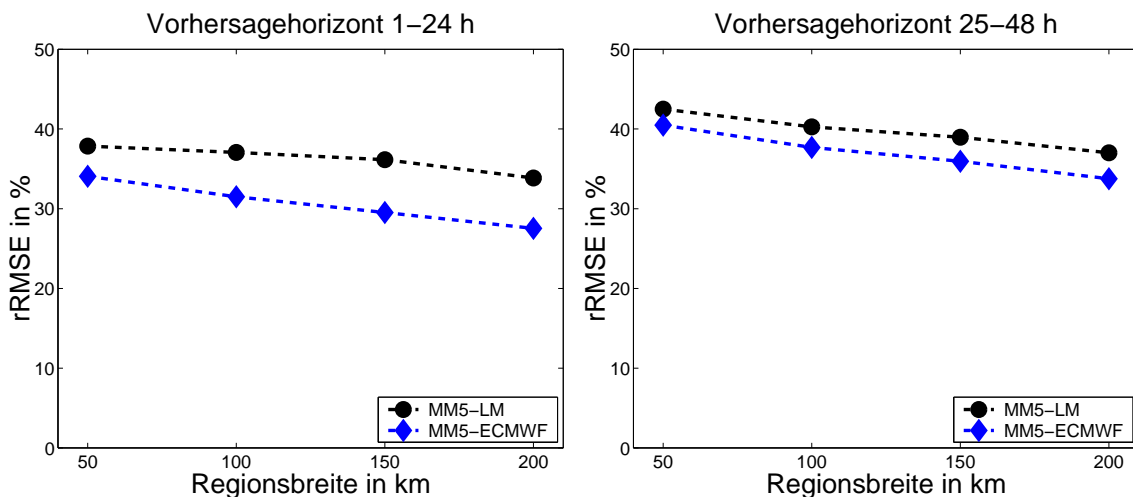


Abbildung 4.16: Darstellung des $rRMSE$ für unterschiedliche Regionsgrößen von $200 \times 200 \text{ km}^2$ über $150 \times 150 \text{ km}^2$ und $100 \times 100 \text{ km}^2$ bis $50 \times 50 \text{ km}^2$.

des $rRMSE$ um insgesamt 5 % festzustellen. Es bestätigt sich, dass die ECMWF basierte

Vorhersage besser zur Vorhersage der Globalstrahlung geeignet ist. Für Regionsmittel bis $50 \times 50 \text{ km}^2$ stellt MM5 auf Basis der ECMWF-Vorhersage eine gute Möglichkeit zur regional aufgelösten Vorhersage der Globalstrahlung dar. Ein besonderer Vorteil ist, dass es sich dabei um echte Regionsmittel handelt und nicht um Mittelungen von wenigen einzelnen Standortvorhersagen, deren Anzahl je nach Regionsausschnitt und Lage variiert. Wie in Kapitel 3.3.2 gezeigt wurde, kann eine Mittelung über Einzelstandorte eine Region in der Regel nicht ausreichend repräsentieren.

4.2.4 Standortaufgelöste MM5-Strahlungsvorhersage

Neben regionalen Vorhersagen der solaren Einstrahlung sind auch standortaufgelöste Strahlungsvorhersagen für solarenergetische Anwendungen von Bedeutung. Zur Bestimmung der Vorhersagequalität werden MM5- und MOS-Vorhersagen für acht Standorte mit Bodenmessungen verglichen. Die Standorte sind gleichmäßig innerhalb des zuvor betrachteten Regionsausschnittes entsprechend der rechten Darstellung in Abb. 3.1 verteilt. Zum Vergleich mit den MM5-Vorhersagen werden die Datenpunkte hinzugezogen, deren Gitterpunkt geographisch am nächsten zum jeweiligen Standort liegt. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung des Gitternetzes von $3 \times 3 \text{ km}^2$ liegt dieser Gitterpunkt immer sehr nah an dem jeweiligen Standort.

Anstatt den Einstrahlungswert des zur Station nächstgelegenen Gitterpunktes zu wählen, ist auch eine Mittelung der umliegenden Gitterpunkte möglich. So können zum Beispiel die nächstgelegenen und um einen Standort liegenden vier Gitterpunkte sowohl einfach arithmetisch als auch entfernungsabhängig gewichtet gemittelt werden. Entsprechende Berechnungen führten hier aber zu keinen signifikanten Verbesserungen, was wie folgt begründet werden kann: Wenn die für die Einstrahlung bestimmende Bewölkung an einem Punkt nicht korrekt bestimmt wird, kann aufgrund der hohen räumlichen Auflösung von $3 \times 3 \text{ km}^2$ davon ausgegangen werden, dass dies auch in einem Umkreis von ca. 3 km nicht der Fall ist. Dies wird durch eine Analyse der Einstrahlungswerte bestätigt, bei der sich zeigt, dass die Strahlungswerte in der Regel nur wenige W/m^2 voneinander abweichen. Dies führt auch dazu, dass die entfernungsabhängig gewichteten Mittel keinen weiteren Vorteil erzielen können.

Die in Abb. 4.17 dargestellten Resultate des $rRMSE$ und $rMBE$ stimmen tendenziell mit denen für das zuvor betrachtete $200 \times 200 \text{ km}^2$ Regionsmittel überein. Mit einem $rRMSE$ bezogen auf den Vorhersagehorizont von Stunde 1-24 bzw. 25-48 von 54 bzw. 58 % für die MM5-ECMWF Vorhersage und 57 bzw. 60 % für die MM5-LM-Vorhersage nimmt der $rRMSE$ um ca. 25 % im Vergleich zum $200 \times 200 \text{ km}^2$ Regionsmittel zu. Die ECMWF basierte MM5-Vorhersage liefert dabei wieder die besseren Ergebnisse als die MM5-LM-Vorhersage. Beide MM5-Läufe sind auch hier mit einem starken positiven Bias und damit mit einer Überschätzung der Einstrahlung verbunden. Die MOS-Boden Vorhersagen erreichen mit einem $rRMSE$ von 35 bzw. 38 % die höchste Genauigkeit, dicht gefolgt von den MOS-Satelliten-Daten mit 37 bzw. 40 %. Damit nimmt der $rRMSE$ der MOS-Vorhersage um ca. 10 % im Vergleich zum $200 \times 200 \text{ km}^2$ Mittel über alle acht Sta-

tionen zu. Der $rMBE$ der MOS-Vorhersagen ist hier wie bei den Regionsmitteln ebenfalls negativ, aber wesentlich geringer. Die Abnahme des Bias kann mit der problematischen Mittelung von Einzelstandorten für ein Regionsmittel erklärt werden. Zudem sind die hier ausgewerteten Stationen Teil der Stationsmenge mit denen das MOS trainiert wird, was ebenfalls zu einem geringen Bias führt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Abstand der Genauigkeiten zwischen MOS- und MM5-Vorhersage beim Übergang von Regionsmitteln zu Einzelstandorten deutlich zunimmt und etwa 20 % bzgl. des $rRMSE$ beträgt. Hierbei macht sich das Lokalisierungsproblem von MM5 bemerkbar. Dies wurde schon bei der Betrachtung von Regionsmitteln in Kapitel 4.1.3 festgestellt, wirkt sich aber prinzipiell auch beim Übergang von regionalen zu standort aufgelösten Vorhersagen aus. Für ein Regionsmittel ist eine leicht fehlerhafte Ortsbestimmung von Wolken nicht von größerer Bedeutung, wirkt sich auf die Vorhersagen für einzelne Standorte aber deutlich negativ aus.

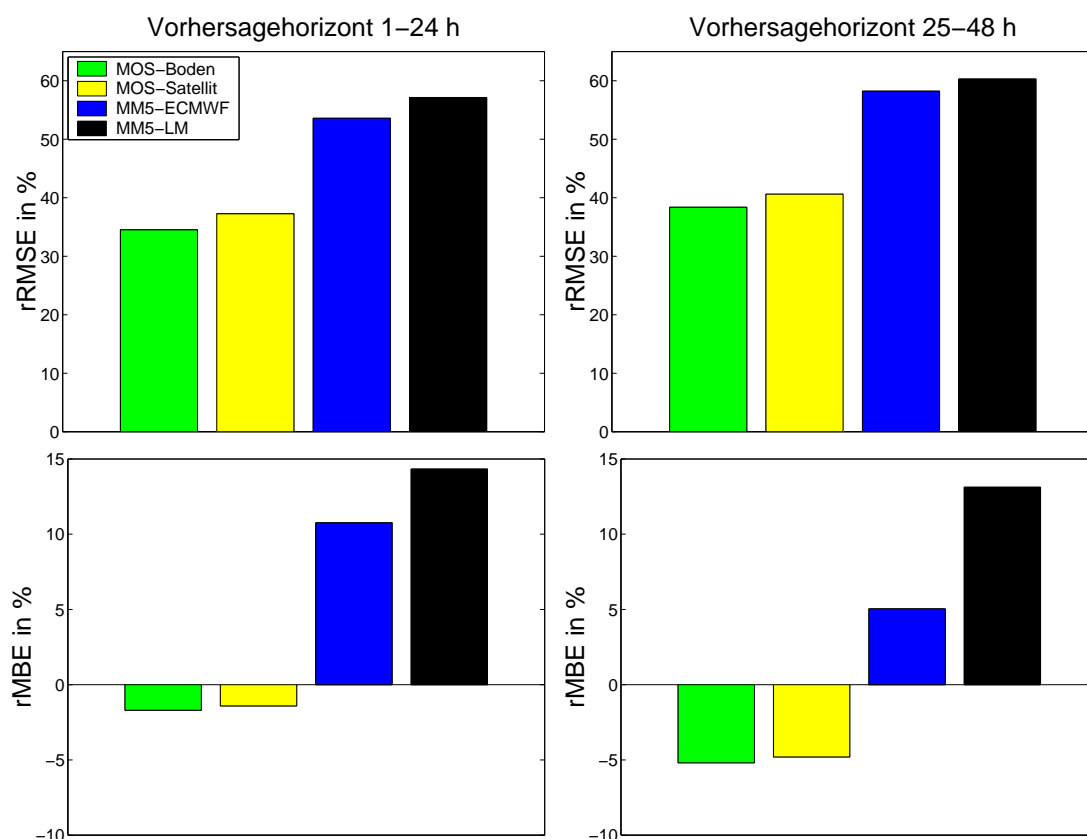


Abbildung 4.17: Darstellung des $rRMSE$ (oben) und $rMBE$ (unten) für die ersten 24 Stunden der Vorhersage (links: Vorhersagehorizont 1-24 h) und die zweiten 24 Stunden der Vorhersage (rechts: Vorhersagehorizont 25-48 h). Die Ergebnisse ergeben sich im Vergleich mit Bodenmessungen für acht Standorte. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

Als Beispiel zeigt Abb. 4.18 für den Standort Wernigerode verschiedene Tagesgänge für

die ersten 24 Stunden der Vorhersage. Betrachtet werden wieder die Tage 166 bis 171 als Ausschnitt aus dem gesamten 40 Tage umfassenden Untersuchungszeitraum. Es zeigt

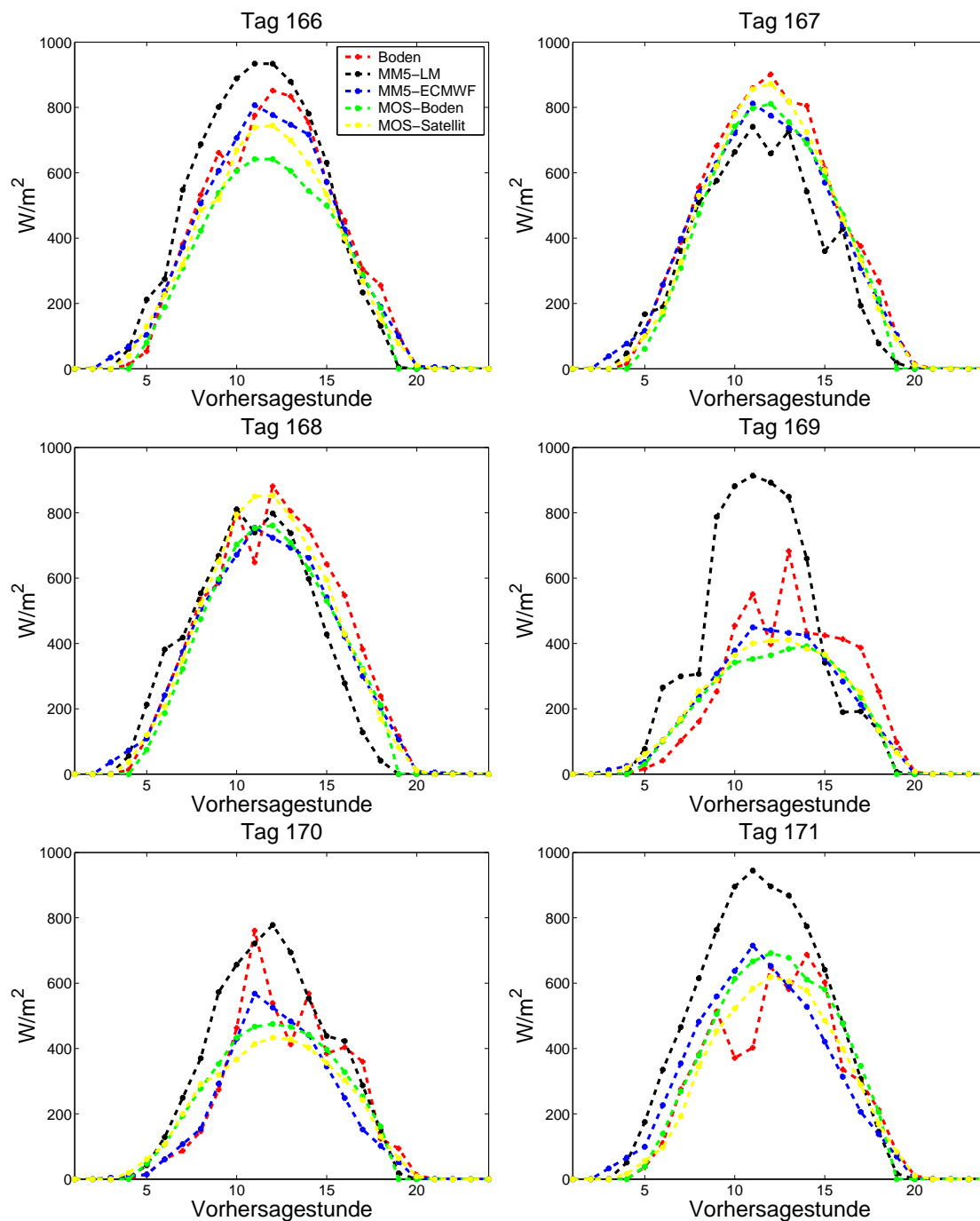


Abbildung 4.18: Darstellungen der Tagesgänge für sechs aufeinanderfolgende Tage für die ersten 24 Stunden der Vorhersage und den Standort Wernigerode. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

sich ein höherer Grad an Fluktuationen im Vergleich zum zuvor betrachteten Regionsmittel in Abb. 4.15. An diesem Beispiel wird erneut deutlich, dass die LM basierte MM5-Vorhersage insbesondere bei stärkerer Bewölkung zu einer erheblichen Überschätzung der Globalstrahlung neigt, s. Tag 169 - 171. Die ECMWF-Daten sind dagegen wesentlich geeigneter, den Zustand der Atmosphäre zu beschreiben und führen so zu einer besseren Vorhersage über MM5.

4.2.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei unterschiedliche Datenquellen zum Antrieb des mesoskaligen Modells MM5 verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass Daten des ECMWF besser zum Antrieb von MM5 geeignet sind als die des LM-Modells vom DWD. Im Vergleich zu einem operationellen MOS-Verfahren ergeben sich für die ECMWF basierten MM5-Vorhersagen für Regionsmittel über $200 \times 200 \text{ km}^2$ nur geringfügig schlechtere Resultate. Im Vergleich zu Bodenstationen ergeben sich jedoch Unterschiede von bis zu 25 % im Vergleich zum MOS-Verfahren. Damit ist die Verwendung von MM5 zur Vorhersage der globalen Einstrahlung nur unter Verwendung von ECMWF-Daten und für größere Regionsmittel sinnvoll. Insbesondere für die Bestimmung und Vorhersage der globalen Einstrahlung für bestimmte Standorte scheint sich MM5 aufgrund der hier durchgeführten Untersuchungen nicht zu eignen. Hierbei ist zwischen bewölkten und unbewölkten Situationen zu unterscheiden. Während wolkenfreie Situationen in der Regel gut modelliert werden, wird die Einstrahlung in bewölkten Fällen tendenziell überschätzt. Einfluss auf die Genauigkeit haben:

- die einzelnen Parametrisierungen in MM5 und deren Genauigkeit,
- die Zusammenstellung der einzelnen Parametrisierungen und damit der Einfluss der unterschiedlichen möglichen MM5-Konfigurationen,
- die frei wählbaren Größen der Domänen, die Anzahl der verwendeten Domänen sowie deren räumliche und zeitliche Auflösung,
- die Eingangs- und Antriebsdaten von MM5, die aufgrund unterschiedlicher Quellen zu deutlich verschiedenen Resultaten führen,
- die Modellierung und Lokalisation von Bewölkung durch MM5.

Dass MM5 dazu neigt, die Einstrahlung unter dem Einfluss von Bewölkung zu überschätzen wurde auch von [Zamora et al. (2003)] beschrieben. Da [Zamora et al. (2003)] dieses Ergebnis unter Verwendung anderer als die in dieser Arbeit genutzten Gesamtkonfigurationen feststellt, ist dieses ein Hinweis darauf, dass MM5 prinzipiell zur Überschätzung der solaren Einstrahlung neigt. Laut [Zamora et al. (2003)] ist dafür neben einer zu ungenauen Modellierung der Bewölkung die Strahlungsparametrisierung für den wolkenfreien Anteil nach [Lacis (1974)] verantwortlich. Diese Parametrisierung führt bei Aerosol Optischen Dicken (AOD) größer als 0.1 zu hohen Ungenauigkeiten über eine nicht berücksichtigte

Abschwächung der Strahlung durch die Aerosole.

Eine Alternative zu der Vorhersage über MM5 auf Basis numerischer Wettermodelle ergibt sich über die Verwendung einer Solarstrahlungsvorhersage, die vom ECMWF zur Verfügung gestellt wird. Die Strahlungsvorhersage des ECMWF und Ansätze zur Optimierung werden im folgenden Kapitel beschrieben.

5 Optimierung der ECMWF-Strahlungsvorhersage

Das ECMWF bietet derzeit eine Strahlungsvorhersage auf der Basis der eigenen Wettervorhersage in einer zeitlichen Auflösung von drei Stunden an. Eine einführende Beschreibung der Parametrisierung des Strahlungstransportes im ECMWF-Modell ist Kapitel 2.2.3 zu entnehmen und basiert auf Arbeiten von [Morcette (1991)], [Morcette (2000)]. Die Daten werden für die Gitterpunkte des Modells in einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ bestimmt. Diese räumliche und zeitliche Auflösung ist für Anwendungen im Bereich der Solarenergie in der Regel nicht ausreichend. Dort werden neben regionalen Mitteln standortaufgelöste Vorhersagen benötigt. Die zeitliche Auflösung sollte je nach Anwendung mindestens bei einer Stunde liegen. Da die Vorhersagen des ECMWF in deren Datenarchiv zur Verfügung stehen, sind die Rechenzeiten für die weitere Optimierung dieser Vorhersagen gering. Deshalb werden die Vorhersagen über einen Zeitraum von zwei Jahren betrachtet. Für die Jahre 2003 und 2004 werden Daten für die in der linken Darstellung von Abb. 3.1 gezeigten 18 Stationen untersucht.

In diesem Kapitel soll zunächst kurz auf die direkten Modellergebnisse eingegangen werden, bevor diese Vorhersage sowohl in der räumlichen als auch in der zeitlichen Dimension für die Anforderungen an derzeitige Solarenergieanwendungen optimiert wird.

5.1 Direkte Modellvorhersage der Globalstrahlung

Vor einer Optimierung der ECMWF-Vorhersagen ist es sinnvoll, zunächst die unveränderten 3h-Vorhersagen der Globalstrahlung des ECMWF auszuwerten. Der ECMWF gibt die hier verwendete Strahlungsvorhersage in $(W/m^2)s$ und akkumuliert seit Beginn des Vorhersagelaufes an. Es handelt sich dabei um den Parameter Nr. 169, SSRD (Surface Solar Radiation Downwards), zu finden im operationellen Archiv des ECMWF unter „atmospheric model, forecast“. Das erste dreistündige Vorhersagemittel wird dadurch gewonnen, dass die akkumulierte 3h-Vorhersage durch den Sekundenmittelwert von 10800 geteilt wird. Der darauf folgende dreistündige Mittelwert wird gewonnen über $(6hVorhersage/10800 - 3hVorhersage/10800)$ und die nachfolgenden Werte entsprechend.

Zum Vergleich der Strahlungsvorhersage mit den Messungen der 18 Bodenstationen über die Jahre 2003 und 2004 wurden die Daten eines Gitterpunktes gewählt, das von der Entfernung her am nächsten zum Standort der Bodenmessung gelegen ist. Dies ist der einfachste Ansatz, um von den Daten eines Gitternetzes auf einen bestimmten Standort zu schließen. Der Vorhersagehorizont beträgt bis zu 72 Stunden. Der relative *RMSE* ist in Abb. 5.1 für alle Stationen bezogen auf den gesamten Vorhersagehorizont dargestellt. Es wird deutlich, dass keine systematische Abhängigkeit der Vorhersagegenauigkeit von der Entfernung des Gitterpunktes zur Station gefunden werden kann. Entgegen der Erwartung können nah an einer Station gelegene Gitterpunkte die Einstrahlung nicht besser vorhersagen als weit entfernte Gitterpunkte. Dies ist eine wichtige Feststellung, die im wei-

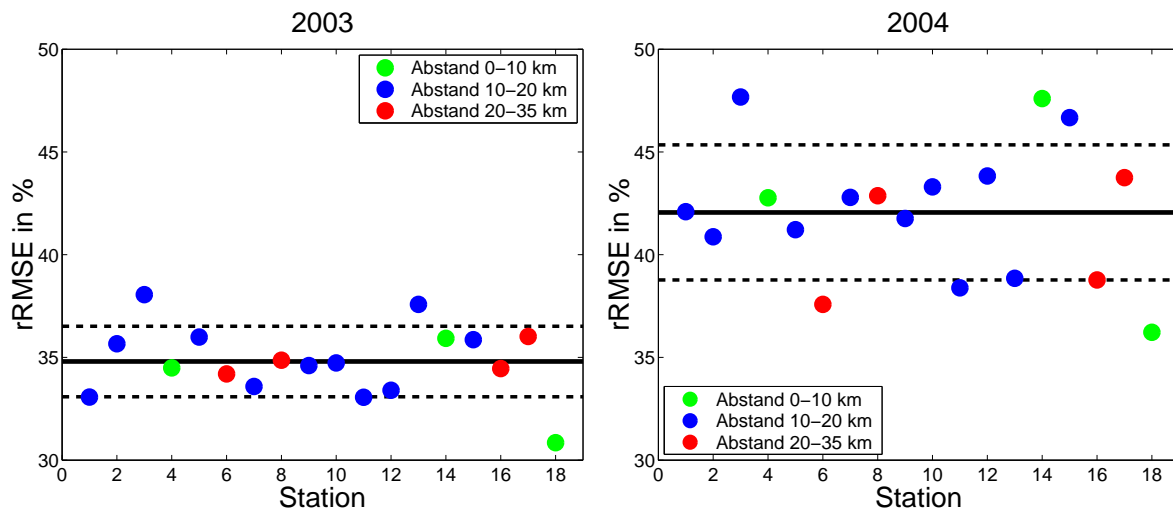


Abbildung 5.1: *Relativer RMSE für 18 Bodenstationen. Analysiert werden die direkten 3h aufgelösten ECMWF-Strahlungsvorhersagen für den Vorhersagehorizont von bis zu 72 h. Die durchgezogene Linie gibt den mittleren $rRMSE$ für alle Stationen an. Die gestrichelte Linie die zugehörige Standardabweichung. Links die Ergebnisse für 2003, rechts für 2004. Die farbigen Markierungen verdeutlichen den Abstand des jeweils verwendeten Gitterdatenpunktes zur Station.*

teren Verlauf der Arbeit bei der räumlichen Optimierung noch zum Tragen kommt. Der Vergleich der Ergebnisse für 2003 und 2004 zeigt zudem deutliche Unterschiede. So beträgt der mittlere $rRMSE$ über alle Stationen für 2003 34,8 % und ist damit deutlich geringer als für 2004 mit 42,1 %. Auch die Streuung und damit die zugehörige Standardabweichung des Fehlers ist für 2003 deutlich geringer als für 2004. Diese Differenzen lassen sich über die Anzahl der wolkenfreien Tage pro Jahr erklären. Hierzu ist es nötig zu bestimmen, wann ein Tag als wolkenfrei zu bezeichnen ist. Bei der Bestimmung der Kriterien ist man relativ frei. Die hier verwendeten Kriterien lehnen sich an ähnliche Definitionen von [Lorenz (2004)] und [Girodo (2003)] an. Zur Bestimmung eines wolkenfreien Tages wird der Clearsky-Index k^* und die Wolkenvariabilität var auf Basis des satellitengestützten Heliosat-Verfahrens genutzt. Der Clearsky-Index ist entsprechend Gl. (3.3) in Kapitel 3.3.1 definiert. Die Wolkenvariabilität ist wie in [Lorenz (2004)] beschrieben definiert. Die Basis dieser Definition bildet die Differenz zwischen Nachbarpixeln. Ein Tag wird hier als wolkenfrei bezeichnet, wenn für den betrachteten Tag der Vorhersage und mindestens für einen 3h-Mittelwert der Cloudindex $n > 0.9$ und die Wolkenvariabilität $var < 0.03$ ist.

Wie Tabelle 5.1 zu entnehmen ist, reduziert sich der mittlere $rRMSE$ bei ausschließlicher Betrachtung der wolkenfreien Fälle für alle Stationen und für beide Jahre auf ca. 14 bis 15 %. Der Anteil der wolkenfreien Tage an der Gesamtmenge ist für 2003 aber etwa doppelt so hoch wie der für 2004. Damit haben die deutlich besser modellierbaren Situationen für 2003 ein stärkeres Gewicht als für 2004. Dies erklärt die Unterschiede im

$rRMSE$ für die beiden hier untersuchten Jahre bei Betrachtung des gesamten Datensatzes. Darüber hinaus verdeutlicht das erneut die starke Abhängigkeit der Vorhersagegüte von der Bewölkungssituation. Dies wird in den folgenden Abschnitten und Kapiteln wieder aufgenommen werden.

In Abb. 5.1 werden die Standardabweichungen des Fehlers der Einzelstationen aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mit angegeben. In der Größenordnung entsprechen die Standardabweichungen des Fehlers der Einzelstationen etwa dem Betrag des jeweiligen $rRMSE$. Hierüber wird die große Streuung der Einzelresultate deutlich und es kann angenommen werden, dass ein erheblicher Teil des Gesamtfehlers auf der großen Streuung basiert.

Um entscheiden zu können, ob die Daten des ECMWF für eine räumliche und zeitliche Optimierung und Anpassung geeignet sind, ist es sinnvoll, die direkten Modellergebnisse mit Resultaten anderer Vorhersageverfahren zu vergleichen. Dazu wurde der mittlere $rRMSE$ der 3h-Werte für alle Bodenstationen in Abhängigkeit vom Vorhersagetag mit den Resultaten des MOS-Verfahrens sowie der Persistenz verglichen. Hierbei wurde wieder unterschieden zwischen allen Situationen, deren Ergebnisse in Abb. 5.2 dargestellt sind, und den wolkenfreien Zuständen, die in Abb. 5.3 berücksichtigt werden. Wie zu erwarten, nimmt der $rRMSE$ in allen Fällen in Abhängigkeit vom Vorhersagetag zu. Der $rRMSE$ der Persistenz ist im Vergleich mit den anderen drei Verfahren sehr groß. Die beiden Verfahren MOS-Satellit und MOS-Boden entsprechen sich in der Regel sowohl im Verlauf als auch in der Größenordnung. Das auf Bodenmessungen basierende MOS-Verfahren erzielt dabei die leicht besseren Resultate. Der $rRMSE$ der ECMWF-Vorhersage für alle Bewölkungssituationen ist mit dem der MOS-Vorhersage vergleichbar. Die Differenzen bzgl. des $rRMSE$ bewegen sich etwa zwischen 0 % für den ersten Vorhersagetag 2003 und maximal 7 % Abweichung für den dritten Vorhersagetag 2004. Der Verlauf des relativen MBE ist für die Persistenz und die ECMWF-Vorhersage über die drei Vorhersagetage näherungsweise konstant, während der Betrag des MBE für die MOS-Verfahren mit größer werdendem Vorhersagehorizont zunimmt, s. Abb. 5.2. Die ECMWF-Daten sind mit einer Differenz von etwas über 6 % am stärksten vom betrachteten Jahr abhängig. Betrachtet man nur die wolkenfreien Vorhersagetage, ist zu erkennen, dass der $rRMSE$ der ECMWF-Daten in allen Fällen klar unter dem der anderen Verfahren liegt. Die direkten Modellergebnisse des ECMWF erzielen im wolkenfreien Fall gegenüber dem operationellen MOS-Verfahren deutlich bessere Ergebnisse. Dies bestätigt sich auch bei der

	rRMSE all	rRMSE clearsky	Anteilmenge clearsky
2003	34.8 %	15.2 %	22.4 %
2004	42.1 %	13.8 %	11.4 %

Tabelle 5.1: Mittlerer $RMSE$ für alle 18 Stationen und zugehöriger Standardabweichung für die Jahre 2003 und 2004. Die Angaben sind einmal für den gesamten Datensatz sowie nur für den wolkenfreien Anteil gegeben. Der Vorhersagehorizont beträgt bis zu 72 h.

Betrachtung des MBE , der in fast allen Fällen für die ECMWF-Vorhersage den niedrigsten Wert annimmt, s. Abb. 5.3. Auffällig ist die für alle untersuchten Verfahren festzustellende Unterschätzung der Einstrahlung. Da hier über die Nutzung von Parametern des Heliosat-Verfahrens nur reale wolkenfreie Tage ausgewertet werden, bedeutet dies, dass die Auflösung oder das Weiterziehen von Bewölkung nicht vollständig erkannt und modelliert wird.

Insgesamt scheinen die ECMWF-Vorhersagen eine im Vergleich zum bestehenden MOS-Verfahren gute Vorhersagequalität zu besitzen. Auf dieser Basis ist es sinnvoll, eine Optimierung der ECMWF-Vorhersage bzgl. der räumlichen und zeitlichen Auflösung zu entwickeln und durchzuführen.

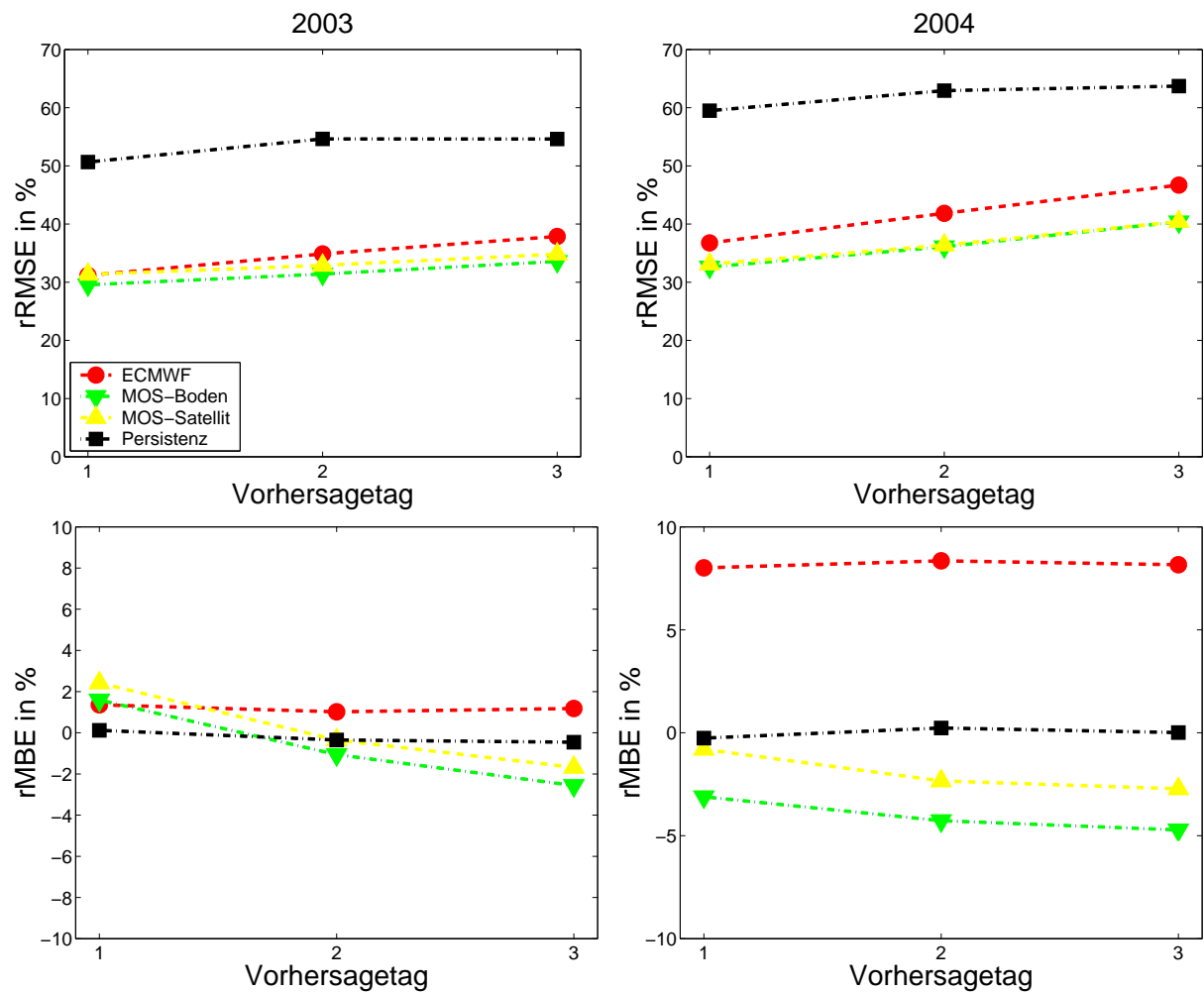


Abbildung 5.2: Die beiden oberen Darstellungen geben den relativen RMSE in Abhängigkeit vom Vorhersagetag für die Jahre 2003 (links) und 2004 (rechts) an. Die unteren Darstellungen geben den dazugehörigen relativen MBE an. Die Ergebnisse ergeben sich für 18 Bodenstationen und über den gesamten Datensatz. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

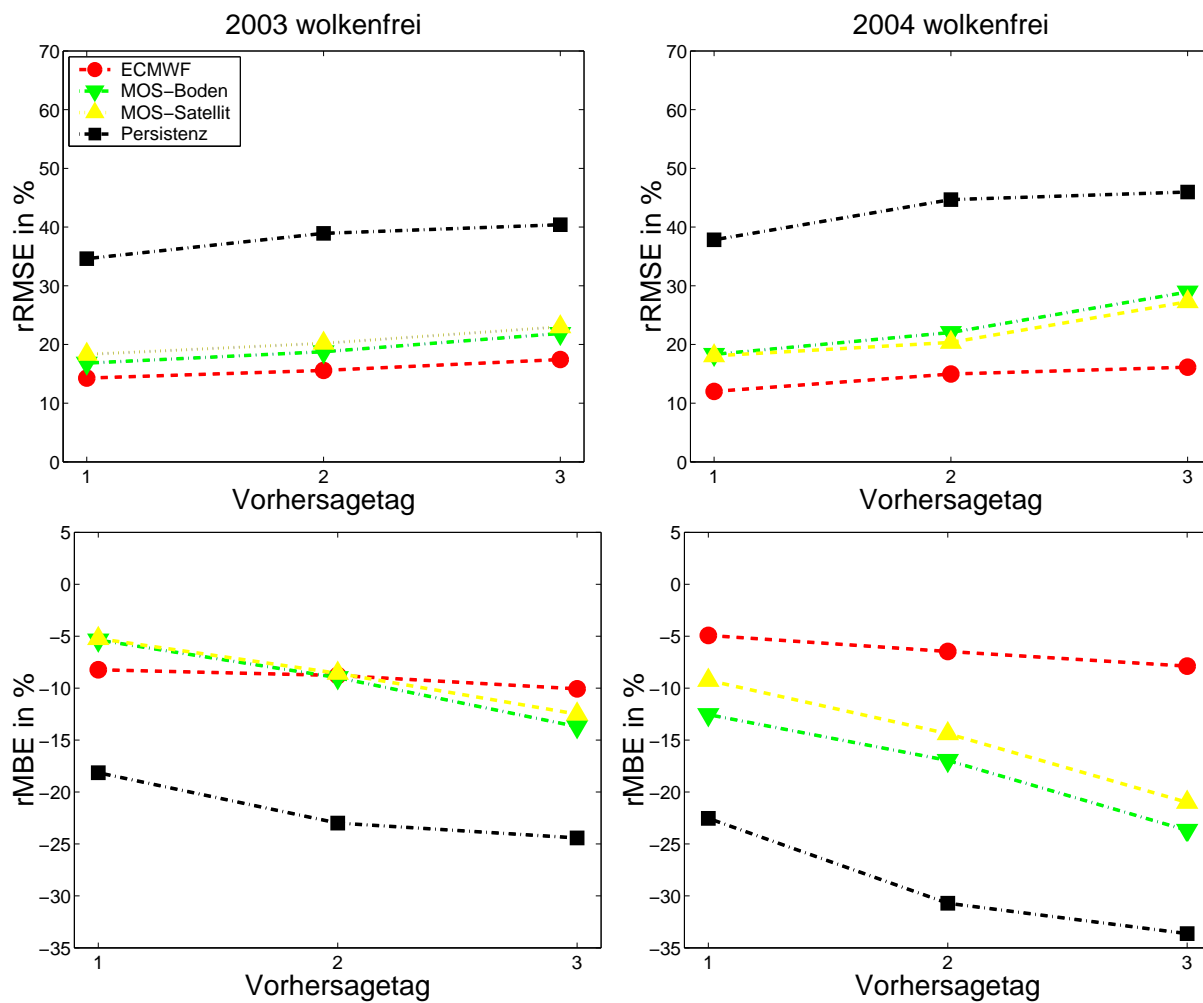


Abbildung 5.3: Die hier gezeigten Resultate ergeben sich nur für die wolkenfreien Situationen. Die beiden oberen Darstellungen geben den relativen RMSE in Abhängigkeit vom Vorhersagetag für die Jahre 2003 (links) und 2004 (rechts) an. Die unteren Darstellungen geben den dazugehörigen relativen MBE an. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

5.2 Weiterentwicklung für Einzelstandorte

Die erste Analyse der unveränderten Modellergebnisse der dreistündig aufgelösten ECMWF-Strahlungsvorhersage zeigt gute Resultate im Vergleich mit der Persistenz und den beiden MOS-Verfahren. Insbesondere für wolkenfreie Situationen scheint die physikalisch basierte Modellierung des Strahlungstransports des ECMWF dem rein statischen Verfahren überlegen. Daher ist es sinnvoll, die ECMWF-Vorhersage zur Verwendung für solarenergetische Anwendungen räumlich und zeitlich zu optimieren. In diesem Zusammenhang muss eine möglichst gute räumliche Optimierung zum Vergleich mit Einzelstandorten sowie eine zeitlich höhere Auflösung erreicht werden. Die dazu untersuchten und verwendeten Verfahren werden in den beiden nächsten Unterkapiteln vorgestellt.

5.2.1 Optimierung der räumlichen Auflösung

Die räumliche Verteilung der ECMWF-Strahlungsvorhersage ergibt sich über die entsprechende Auflösung des Gittermodells auf dem die Parameter berechnet werden. Wie bereits beschrieben, beträgt diese Auflösung für das Atmosphärenmodell des ECMWF $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. In der Regel stimmen die Koordinaten dieser Gitterpunkte nicht mit denen von lokalen Bodenmessstationen oder solaren Kraftwerken überein. Die vorhergesagte Einstrahlung muss also für einen Vergleich mit der Einstrahlung für einen Ort, der nicht mit den Gitterpunkten übereinstimmt, abgeleitet werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten von Daten eines Gitternetzwerkes auf die Information für einen bestimmten Ort zu schließen. Im Rahmen dieser Arbeit werden vier Verfahren getestet.

Die erste und einfachste Möglichkeit ist, dass man zunächst den Gitterpunkt bestimmt, der am nächsten zum gewünschten Ort liegt. Der Vorhersagewert für diesen Gitterpunkt wird dann für den gewünschten Ort übernommen. Dieses Verfahren wurde in den vorangegangenen Kapiteln bereits verwendet. Hier werden nun drei weitere Verfahren getestet, um die optimalste räumliche Anpassung zu bestimmen.

Eine einfache, aber sehr effektive Variante der räumlichen Optimierung ist die Bildung eines arithmetischen Mittels der nächstgelegenen, umliegenden vier Gitterpunkte. Dabei werden die um eine Bodenstation gelegenen nächsten vier Gitterpunktwerte G_i nach

$$G_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i, \quad N = 4 \quad (5.1)$$

gemittelt.

Die umliegenden Gitterpunkte haben unterschiedliche Abstände zur Bodenstation. Diese unterschiedlichen Entfernungen können über eine Gewichtung des Abstandes berücksichtigt werden. Als eine weitere Möglichkeit der Mittelung ergibt sich das so gewichtete 4-Punkte-Mittel über

$$G_B = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad N = 4. \quad (5.2)$$

Das Gewicht w_i wird bestimmt über den Abstand d_i :

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^N d_j - d_i}{\sum_{j=1}^N d_j} = 1 - \frac{d_i}{\sum_{j=1}^N d_j}. \quad (5.3)$$

Ein bekanntes und weit verbreitetes Verfahren zur entfernungsabhängigen Interpolation ist das sog. „inverse distance weighting“ (IDW) [Bonham (1994)]. Hier ergibt sich das Gewicht über

$$W_i = \frac{1}{d_i}. \quad (5.4)$$

Damit lässt sich die prognostizierte Strahlung entsprechend Gl. (5.2) für einen bestimmten Ort bestimmen über

$$G_C = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad N = 4. \quad (5.5)$$

Die Abb. 5.4 zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen räumlichen Interpolationsverfahren einmal für alle Bewölkungssituationen (obere Darstellungen) und nur für wolkenfreie Situationen (untere Darstellungen) im Vergleich. Es lässt sich feststellen, dass sich der $rRMSE$ für alle Bewölkungssituationen um ca. 0.75 % reduzieren lässt, wenn man eine Interpolationsroutine nutzt, anstatt nur auf den nächstgelegenen Gitterpunkt zurückzugreifen. Die Unterschiede zwischen den drei Verfahren, die die nächsten umliegenden vier Gitterpunkte nutzen, sind vernachlässigbar gering. Das IDW-Verfahren zeigt tendenziell jeweils die geringste Verbesserung, während das einfache arithmetische Mittel in der Regel die besten Resultate erzielt. Dies gilt auch für die wolkenfreien Situationen, für die sich eine Verbesserung von max. 0.5 % im Vergleich zum 1-Punkt-Verfahren ergibt.

Für die räumliche Optimierung der ECMWF-Vorhersage an bestimmte Orte lässt sich somit feststellen, dass ein einfaches arithmetisches Mittel über die nächstgelegenen vier Gitterpunkte hier die höchste Genauigkeit erzielt. Eine Ausdehnung der Interpolation über mehr als vier Punkte führt zu keiner weiteren Verbesserung. Der Fehler wird für alle drei Interpolationsverfahren in diesen Fällen deutlich größer. Dies ist aufgrund der zunehmend großen Entfernungen der Gitterpunkte zur Bodenstation nachvollziehbar.

Eigentlich würde man davon ausgehen, dass eine entfernungsabhängig gewichtete Mittelung zu besseren Ergebnissen führt als ein einfaches arithmetisches Mittel. Es gibt aber zwei Gründe, die das gute Resultat des arithmetischen Mittels in diesem Fall erklären. Bei einem angenommenen Gitterpunktabstand von 50 km, was in etwa einer Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ entspricht, liegt der Mittelpunkt 35 km von allen vier umliegenden Gitterpunkten entfernt. Wenn die hier untersuchten 18 Stationen mittig zwischen den umliegenden vier Gitterpunkten liegen, ist es nachvollziehbar, dass das arithmetische Mittel im Vergleich zu gewichteten Mitteln gute Ergebnisse erzielen kann. Wie auch in Abb. 5.1 zu erkennen, liegt der nächstgelegene Gitterpunkt von den 18 hier untersuchten Stationen nur bei 3 Stationen weniger als 10 km entfernt. Die mittige Verteilung der Stationen kann also teilweise erklären, warum die gewichteten Mittel nicht die besseren Ergebnisse erzielen.

Darüber hinaus zeigt eine Untersuchung der drei Stationen mit einer Entfernung von weniger als 10 km zum nächstgelegenen Gitterpunkt nur für eine Station ein leicht besseres Ergebnis bei Verwendung eines entfernungsabhängig gewichteten Mittels. Dies lässt sich über die eingeschränkte Genauigkeit der Vorhersagen begründen. Die Wettermodelle sind nicht in der Lage, den exakten Grad der Bewölkung räumlich und zeitlich korrekt zu modellieren und vorherzusagen. Es kann nur erwartet werden, dass die Bewölkung für einen Regionsausschnitt aufgrund des Glättungseffektes im Mittel richtig wiedergegeben wird. Eine entfernungsabhängig gewichtete Mittelung ist aber nur dann von Vorteil, wenn die modellierten Daten relativ genau sind. Die Genauigkeit der lokalen Bewölkungsmo- dellierung ist hier aber nicht ausreichend, was auch anhand der Darstellungen in Abb. 5.1 bereits zu erkennen ist. Dies führt dazu, dass ein gewichtetes Mittel keinen Vorteil gegenüber eines arithmetischen Mittels erzielen kann. Des Weiteren sei hier noch einmal deutlich darauf hingewiesen, dass sich zwar eine Systematik zu Gunsten des arithmeti- schen Mittels zeigt, die Unterschiede zu den gewichteten Mitteln aber im Bereich weniger Zehntel eines Prozentpunktes liegen.

Außer den hier untersuchten räumlichen Interpolationsverfahren gibt es noch eine Reihe anderer, die z.B. im Rahmen von Geoinformationssystemen (GIS) genutzt werden. Diese berücksichtigen oft eine ungleichmäßige Verteilung der Gitterpunkte. Da hier die Abstände der Gitterpunkte zueinander aber näherungsweise äquivalent sind, ist nicht anzunehmen, dass derartige Verfahren eine wesentliche zusätzliche Verbesserung erzielen können als die hier vorgestellten. Zudem ist der Qualitätsgewinn der vorhergesagten Daten über die Berücksichtigung von mehr Datenpunkten mit ca. 0.75 % gering.

Aufgrund der vorgestellten Untersuchungen werden die ECMWF-Strahlungsdaten für die folgenden Analysen über das arithmetische Mittel nach Gl. (5.1) an die Anforderungen für den Vergleich mit Bodenstationen optimiert.

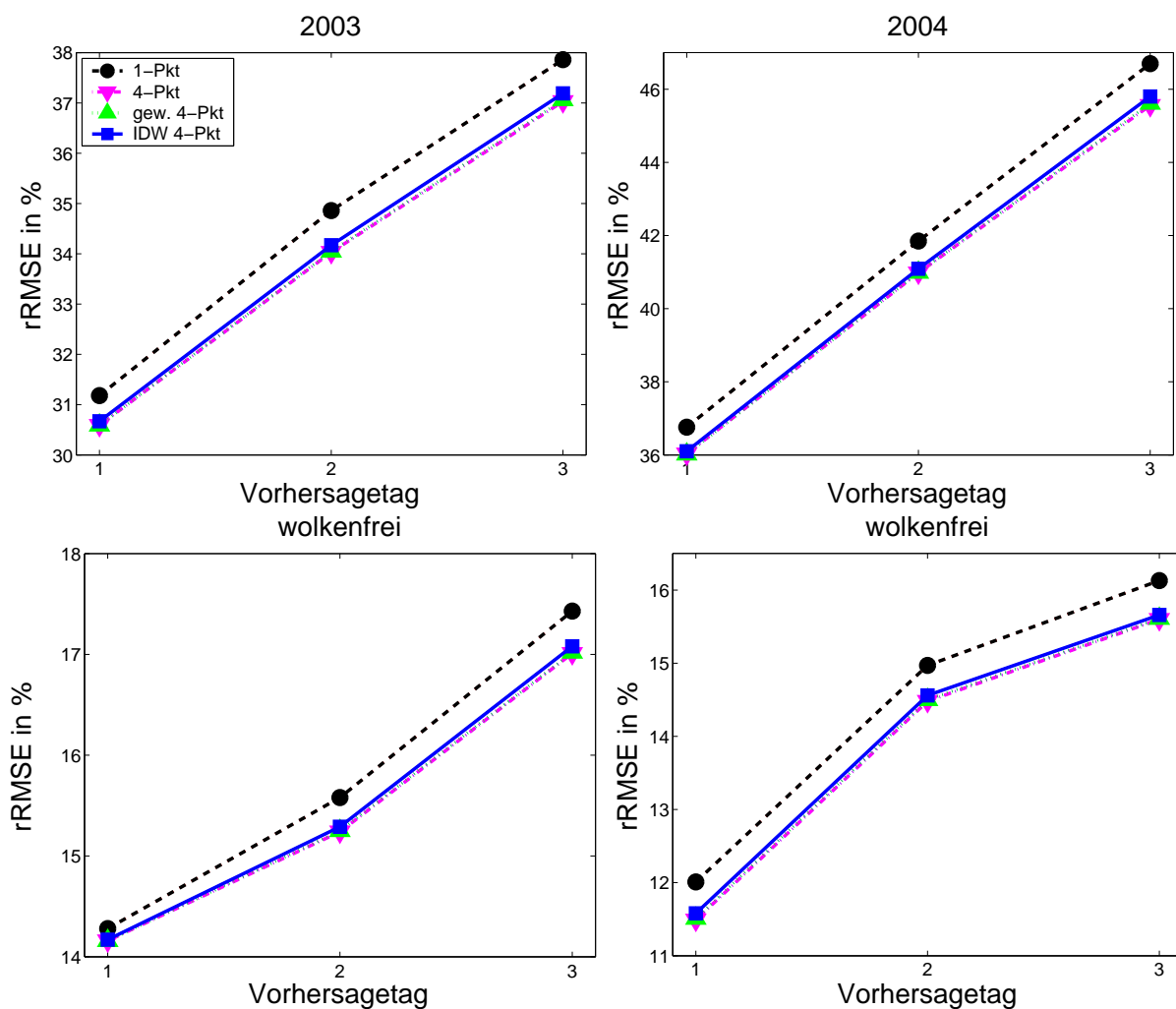


Abbildung 5.4: Vergleich dreier räumlicher Interpolationsverfahren gegenüber der Bestimmung der Strahlung über den nächstgelegenen Gitterpunkt. Während oben die Ergebnisse für alle Situationen dargestellt ist, zeigen die unteren Figuren die Resultate nur für die wolkenfreien Fälle, links jeweils für 2003 und rechts für 2004. Es ist auf die unterschiedlichen Skalen zu achten. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

5.2.2 Optimierung der zeitlichen Auflösung

Neben einer Optimierung der räumlich grob aufgelösten Vorhersagen des ECMWF, ist es nötig, die zeitliche Auflösung von drei Stunden zu erhöhen. Wie im Folgenden gezeigt wird, kann durch die Wahl geeigneter Verfahren die zeitliche Auflösung erhöht werden.

Die einfachste Möglichkeit, die Vorhersagen in der gewünschten einstündigen Auflösung zu erhalten, stellt die stückweise lineare Interpolation der dreistündig aufgelösten Globalstrahlung dar. Dieses einfache, aber effiziente Verfahren liefert Ergebnisse, die in der Genauigkeit mit denen des operationell betriebenen MOS-Verfahrens vergleichbar sind.

Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer Möglichkeiten Daten zu interpolieren oder zu fitten. In ersten Untersuchungen wurden auch einige andere reine Interpolationsverfahren auf ihre Verwendbarkeit für diesen Fall untersucht. Es zeigte sich aber, dass z.B. berechnete Fitfunktionen über Polynome unterschiedlichen Grades in der Regel zu zum Teil heftigen Überschwingern in beide Richtungen führen. Das bedeutet, dass zum einen in den Mittagsstunden eine zu hohe Einstrahlung interpoliert wird während es zum anderen dazu führt, dass in den Dämmerungs- und Nachtstunden negative Werte produziert werden. Aber auch wenn die Nachtstunden für die eigentliche Auswertung ausgeschlossen werden, liefert die stückweise lineare Interpolation die besten Resultate.

Eine Möglichkeit nicht nur die zeitliche Auflösung zu verbessern, sondern über Berücksichtigung eines Clearsky-Modells auch die Qualität der Vorhersage zu optimieren, liefert die Umrechnung der Globalstrahlung in den Clearsky-Index k^* . Dabei kann der bekannte Verlauf der Clearsky-Einstrahlung genutzt werden. Der Clearsky-Index ist nach Gl. (3.3) über die Globalstrahlung und die Clearsky-Einstrahlung definiert. Die Clearsky-Einstrahlung kann über das im Heliosat-Modell verwendete Clearsky-Modell bestimmt werden. Der auf diese Weise berechenbare dreistündig aufgelöste Clearsky-Index kann nun wiederum zeitlich interpoliert werden. Im Gegensatz zur Globalstrahlung ist der Clearsky-Index aber nicht vom Tagesgang abhängig. Daher kann man hier annehmen, dass eine stückweise lineare Interpolation ausreichend ist. Die dann höher aufgelösten Daten des Clearsky-Index werden dann über die Clearsky-Einstrahlung wieder in Globalstrahlung zurückgerechnet. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass bei den so hinzugekommenen Vorhersagewerten der Tagesgang über die Clearsky-Einstrahlung direkt mit berücksichtigt wird, was sich insbesondere in der Modellierung der Mittagsstunden niederschlägt. Dies führt dazu, dass der $rRMSE$ für die wolkenfreien Situationen mit bis zu 5 % Verbesserung deutlich unter den Ergebnissen für die über G direkt interpolierte Vorhersage liegt. Allerdings sind die Abweichungen über alle Situationen um max. 2 % schlechter als für die über G interpolierten Werte. Das ist ein Hinweis darauf, dass bei bewölkten Situationen eine lineare Interpolation der Globalstrahlung besser geeignet ist, als eine Interpolation über den Clearsky-Index. Dies ist auch nachvollziehbar, da über die Interpolation von k^* und die anschließende Umrechnung in G insbesondere der Clearsky-Tagesganges berücksichtigt wird. Dessen Einfluss ist aber in bewölkten Situationen eher zu vernachlässigen. Sowohl bei einer besonders stark bewölkten Situation als auch bei hoch variablen Situationen, wie durchbrochener Bewölkung, ist der reale Bewölkungsgrad über Interpolationsroutinen nicht exakt vor-

herzusagen. Dabei ist zu beachten, dass auch eine für das Auge homogen erscheinende Bewölkung, wie z.B. eine Stratocumulus-Situation, signifikante Effekte aufgrund von internen Heterogenitäten aufweist [Cahalan et al. (1994)]. Diese variablen Inhomogenitäten führen dazu, dass die Berücksichtigung eines wolkenfreien Tagesganges bei der Modellierung der Strahlung über die Interpolation von k^* in Fällen von Bewölkung zu keinem Vorteil führt.

Motiviert durch die erreichten Resultate, wurde eine Methode entwickelt, welche die Stärken der beiden vorgestellten Verfahren miteinander kombiniert. Die Umrechnung in den Clearsky-Index mit anschließender Interpolation und erneuter Umrechnung in die Globalstrahlung soll nur dann erfolgen, wenn ein näherungsweise wolkenfreier Tag angenommen werden kann. Für die dann restlichen bewölkten Tage wird die Interpolation direkt auf den Globalstrahlungsdaten durchgeführt. In diesem Zusammenhang stellt sich das Problem, wie man anhand der dreistündig aufgelösten Strahlungsvorhersage wolkenfreie Tage identifiziert.

Die wolkenfreien Tage werden über den Clearsky-Index identifiziert, der auf Basis der vorhergesagten Globalstrahlung berechnet werden kann. Eine Bedingung für die Annahme eines wolkenfreien Tages ist, dass für mindestens einen dreistündig aufgelösten Wert des Clearsky-Index pro Tag gilt $k^* > 0.9$. Darüber hinaus wird ausgenutzt, dass sich die Globalstrahlung bzw. der Clearsky-Index für einen bestimmten Standort nach Kapitel 5.2.1 über die nächsten vier umliegenden Gitterpunkte berechnet wird. Damit lässt sich die Standardabweichung des Clearsky-Index bestimmen. Diese Standardabweichung kann als Indikator für die Variabilität der Bewölkungssituation interpretiert werden [Girodo (2003)]. Je geringer die Variabilität, desto homogener ist die Bewölkungssituation. Kombiniert man nun eine geringe Variabilität mit einem hohen Wert des Clearsky-Index lassen sich wolkenfreie Situationen gut identifizieren. Die Schwellwerte für die Standardabweichung und den Clearsky-Index wurden hier nach einer Testreihe von unterschiedlichen Varianten so festgelegt, dass für einen wolkenfreien Tag gelten muss: $k^* > 0.9$ und $std(k^*) < 0.05$.

Über Nutzung dieser Kriterien ist eine Kombination der beiden vorgestellten Optimierungsverfahren bzgl. der zeitlichen Auflösung möglich. Die Abb. 5.5 zeigt die Abweichungen der unterschiedlichen zeitlichen Optimierungsverfahren als Mittel für 18 Bodenmessungen und in Abhängigkeit vom Vorhersagetag für die Jahre 2003 und 2004. In der Abbildung sind ebenfalls Darstellungen für nur wolkenfreie Situationen enthalten. Es wird deutlich, dass das Kombinationsverfahren über alle Bewölkungssituationen mit der direkten Interpolation über G bzgl. des $rRMSE$ vergleichbar bzw. maximal 1 % schlechter ist. Es ist aber immer besser als die reine k^* -Interpolation. Für die wolkenfreien Situationen ergibt sich, dass das Kombinationsverfahren maximal 1 % schlechter als die reine k^* -Interpolation, aber mit max. 4 % immer noch deutlich besser ist als die direkte Interpolation über G . Der hier nicht abgebildete Bias zeigt für alle dargestellten Verfahren einen zu den originalen 3h-Werte von Abb. 5.2 und 5.3 vergleichbaren Verlauf. Bei den drei Verfahren können für alle Bewölkungssituationen keine systematischen Unterschiede im Bias festgestellt werden. Für 2003 liegt er zwischen 0 und -2 % und für 2004 um 6 %. In den wolkenfreien Situationen nimmt der Bias mit zunehmendem Vorhersagehorizont

von -6 bis -14 % zu. Dabei ist der Bias der Interpolation über G um etwa 2 % größer als der Bias für die Interpolation über k^* und dem Kombinationsverfahren.

Das Kombinationsverfahren erreicht also insgesamt gute Ergebnisse für alle Bewölkungssituationen, die vergleichbar mit der direkten Interpolation von G unter Beibehaltung der guten Ergebnisse für den wolkenfreien Fall sind. Daher werden die Vorhersagen des Kombinationsverfahrens im Weiteren verwendet und im Verlaufe der Arbeit einer ausführlichen Genauigkeitsanalyse unterzogen.

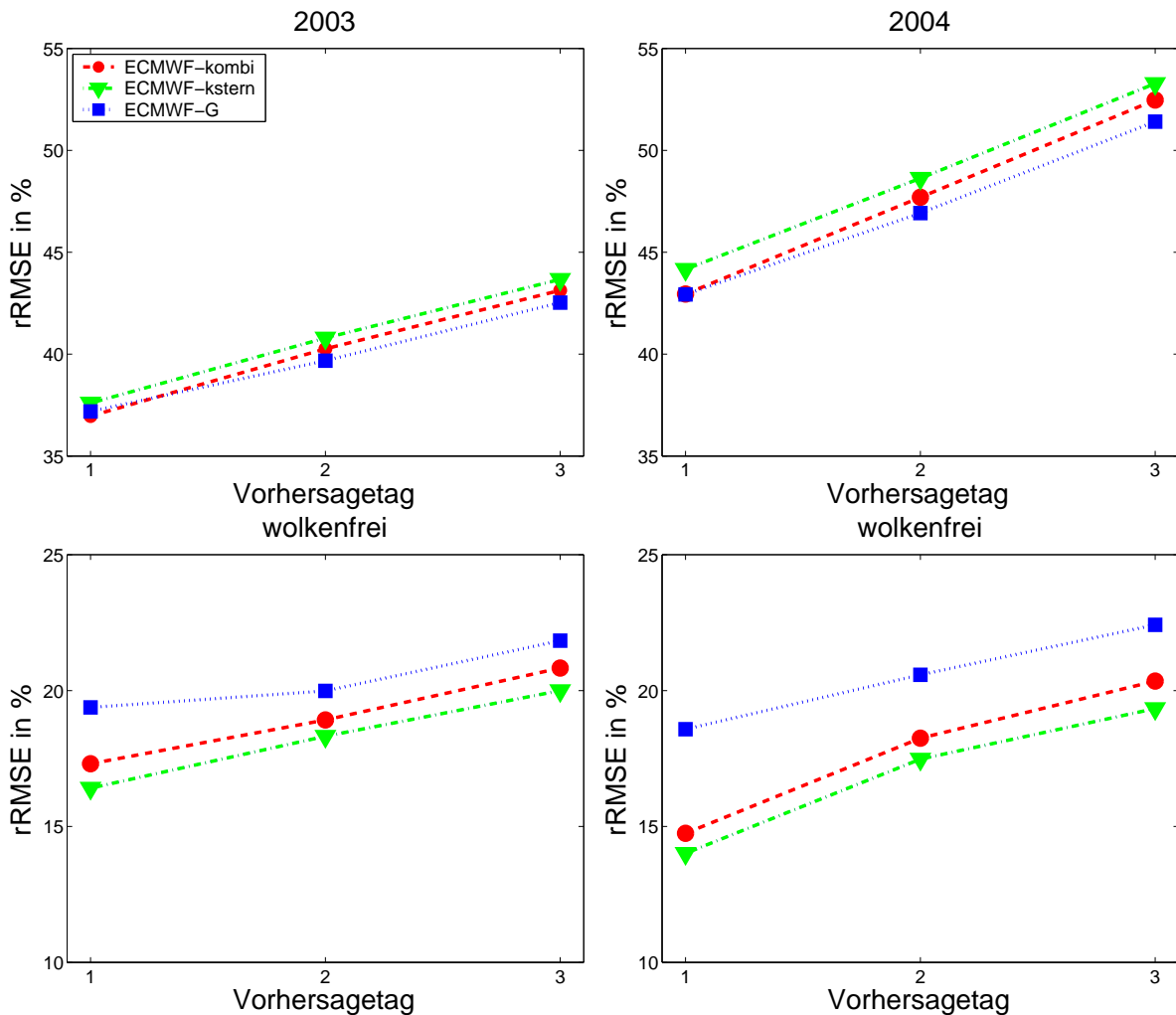


Abbildung 5.5: Darstellung des $rRMSE$ über dem jeweiligen Vorhersagetag für drei verschiedene zeitliche Optimierungsverfahren: stückweise lineare Interpolation der Globalstrahlung (ECMWF-G), Umrechnung von dreistündigem G in k^* und Interpolation mit anschließender Rückrechnung in G (ECMWF-kstern), Kombination der beiden ersten Verfahren (ECMWF-kombi). Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

Dass der $rRMSE$ des Kombinationsverfahrens in den wolkenfreien Situationen nicht vollständig den nur über k^* interpolierten Resultaten entspricht, liegt daran, dass die Bestimmung

der wolkenfreien Situationen natürlich mit einem Fehler verbunden ist, der direkt mit dem Fehler der eigentlichen Vorhersage zusammenhängt. Schließlich basieren die Kriterien zur Bestimmung der wolkenfreien Tage auf den vorhergesagten Werten. Es wird also immer so sein, dass einige Tage als wolkenfrei identifiziert werden, obwohl sie es eigentlich nicht sind und umgekehrt. Um dies genauer zu quantifizieren wurde eine Untersuchung durchgeführt, die klären soll, ob und wie gut Clearsky-Tage identifiziert werden. Hierzu ist es erneut notwendig zu definieren, wann ein Tag aufgrund von Messungen als wolkenfrei zu bezeichnen ist. Wie bereits zuvor wird zur Definition der Clearsky-Index k^* und die Wolkenvariabilität var auf Basis des satelliten-gestützten Heliosat-Verfahrens genutzt. Als „wahrer“ Clearsky-Tag wird definiert, wenn für einen Stundenwert pro Tag $k^* > 0.9$ und $var < 0.03$ gilt. Diese Definition entspricht im Wesentlichen der Identifizierung von Clearsky-Tagen wie sie über das Kombinationsverfahren durchgeführt wird. Allerdings werden mit der Standardabweichung des Clearsky-Indexes $std(k^*)$ und der Wolkenvariabilität var zwei unterschiedliche Variabilitätsmaße verwendet. Die Tabelle 5.2 gibt abhängig vom Vorhersagezeitraum (VZ) die Menge der vorhergesagten Clearsky Tage, die über die Definition bestimmte tatsächliche Menge an Clearsky-Tagen und die Menge der korrekt vorhergesagten Clearsky-Tage für das Jahr 2004 an. Eine entsprechende Tabelle für Daten des Jahres 2003 findet sich im Anhang, s. Tab. 9.1. Für den Anteil der korrekt vorhergesagten Clearsky-Tage wird der $rRMSE$ und $rMBE$ der Einstrahlungsvorhersage aufgeführt. Es werden deutlich mehr Clearsky-Tage vorhergesagt als tatsächlich vorhan-

	Anzahl vorh. Clearsky-Tage	Anzahl def. Clearsky-Tage	korrekt vorh. Clearsky-Tage	rRMSE	rMBE
VZ 1 - 24	2167	1714	1492 87.1 %	11.7 %	-4.2 %
VZ 25 - 48	2264	1714	1070 62.4 %	15.4 %	-7.7 %
VZ 49 - 72	2256	1714	922 53.8 %	16.8 %	-8.6 %

Tabelle 5.2: Die Tabelle gibt abhängig vom Vorhersagezeitraum (VZ) die Menge der vorhergesagten Clearsky-Tage, die tatsächlich bestimmte Clearsky-Tage Menge und die Menge der korrekt vorhergesagten Clearsky-Tage für das Jahr 2004 an. Für den Anteil der korrekt vorhergesagten Clearsky-Tage wird der $rRMSE$ und $rMBE$ der Einstrahlungsvorhersage aufgeführt.

den. Dies führt zu einer Überschätzung der Einstrahlung und kann den bereits in Abb. 5.2 festgestellten positiven Bias für 2004 erklären. Entsprechend findet sich für das Jahr 2003 ein eher ausgeglichenes Verhältnis bzgl. vorhergesagten und tatsächlichen Clearsky-Tagen, was den geringen Bias für 2003 erklären kann. Darüber hinaus kann aber auch das unterschiedliche Variabilitätsmaß für Unterschiede in den Tagesmengen mitverantwortlich sein. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass sich für richtig vorhergesagte Clearsky-Tage ein minimaler Fehler bzgl. des $rRMSE$ von ca. 11 % ergibt. Dieser liegt im Vergleich mit dem Kombinationsverfahren von Abb. 5.5 um 6 bis 10 % unter dem Fehler für Clearsky-Situationen im Allgemeinen. Die Betrachtung des Fehlers der korrekt vorhergesagten Clearsky-Tage ermöglicht hier eine gute Abschätzung des minimal möglichen Fehlers bzgl. des $rRMSE$ auf ca. 11 % verbunden mit einer Unterschätzung von -4

bis -9 %. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Erfolgsquote Clearsky-Tage korrekt zu bestimmen mit bis zu 87 % ausreichend hoch ist.

Beim Kombinationsverfahren werden im Durchschnitt über 2003 und 2004 35 % der Tage über k^* interpoliert und somit 65 % aller Tage über die direkte Interpolation von G verbessert. Die Abb. 5.9 macht deutlich, dass die Teilmengen der Kombination über die betrachteten Jahre und über die Vorhersagetage nur geringen Schwankungen unterworfen sind.

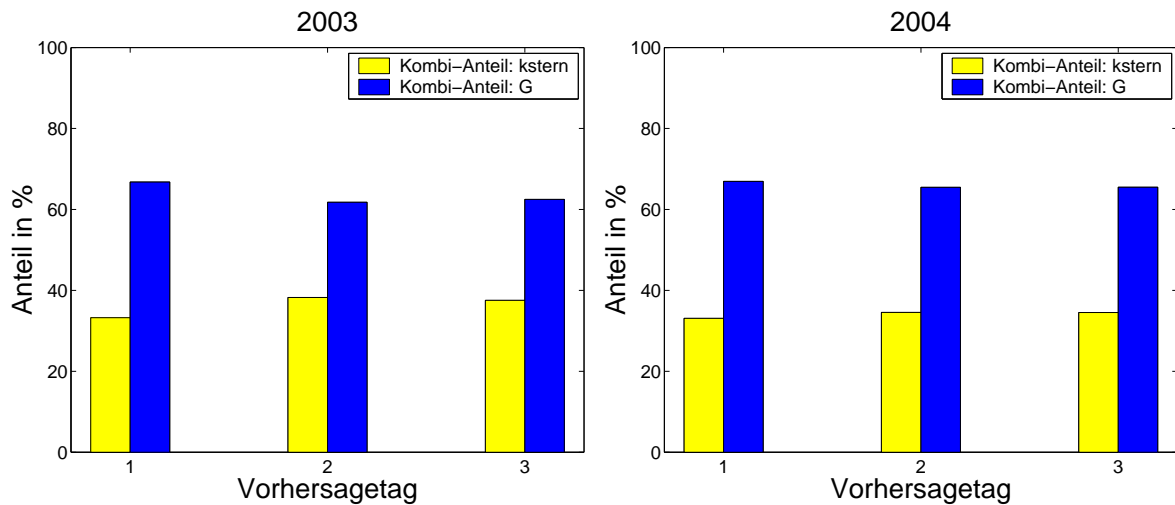


Abbildung 5.6: Prozentuale Angabe des Anteils der Tage, die im Kombinationsverfahren über die direkte Interpolation von G bzw. von k^* zeitlich optimiert wurden.

Die Abbildung 5.7 zeigt nun, dass das Kombinationsverfahren im Vergleich zur Persistenz und den MOS-Verfahren ebenfalls gute Ergebnisse erzielt. Die nach dem Kombinationsverfahren einstündig aufgelösten ECMWF-Strahlungsvorhersagen sind qualitativ mit den Ergebnissen des MOS-Verfahrens vergleichbar. Beim Vergleich des ECMWF-Kombinationsverfahren mit den Verfahren von MOS-Boden und MOS-Satellit ist die unterschiedliche Verfügbarkeit zu berücksichtigen. Das Verfahren MOS-Boden steht nur für bestimmte Stationen zur Verfügung und wurde speziell für diese trainiert. Dagegen sind die Vorhersagen des Kombinationsverfahrens für beliebige Standorte möglich. Dies gilt auch für die Vorhersagen über MOS-Satellit, welches zwar auch über die hier verwendeten Stationen trainiert wurde, prinzipiell aber auch für andere Standorte zur Verfügung steht. Der $rRMSE$ des Kombinationsverfahrens für sämtliche Bewölkungszustände liegt abhängig vom Vorhersagetag zwischen 37 und 52 %. Der hier nicht gezeigte Bias liegt bei etwa -1 % für 2003 und 6 % für 2004, was sich mit den bisherigen Beobachtungen des Bias der ECMWF-Vorhersagen deckt.

Für das Kombinationsverfahren gilt, je höher der Anteil von wolkenfreien Situationen, desto besser sind die Vorhersagen über das Kombinationsverfahren. Der $rRMSE$ liegt für wolkenfreie Situationen und abhängig vom Vorhersagetag zwischen 15 und 21 %. Die

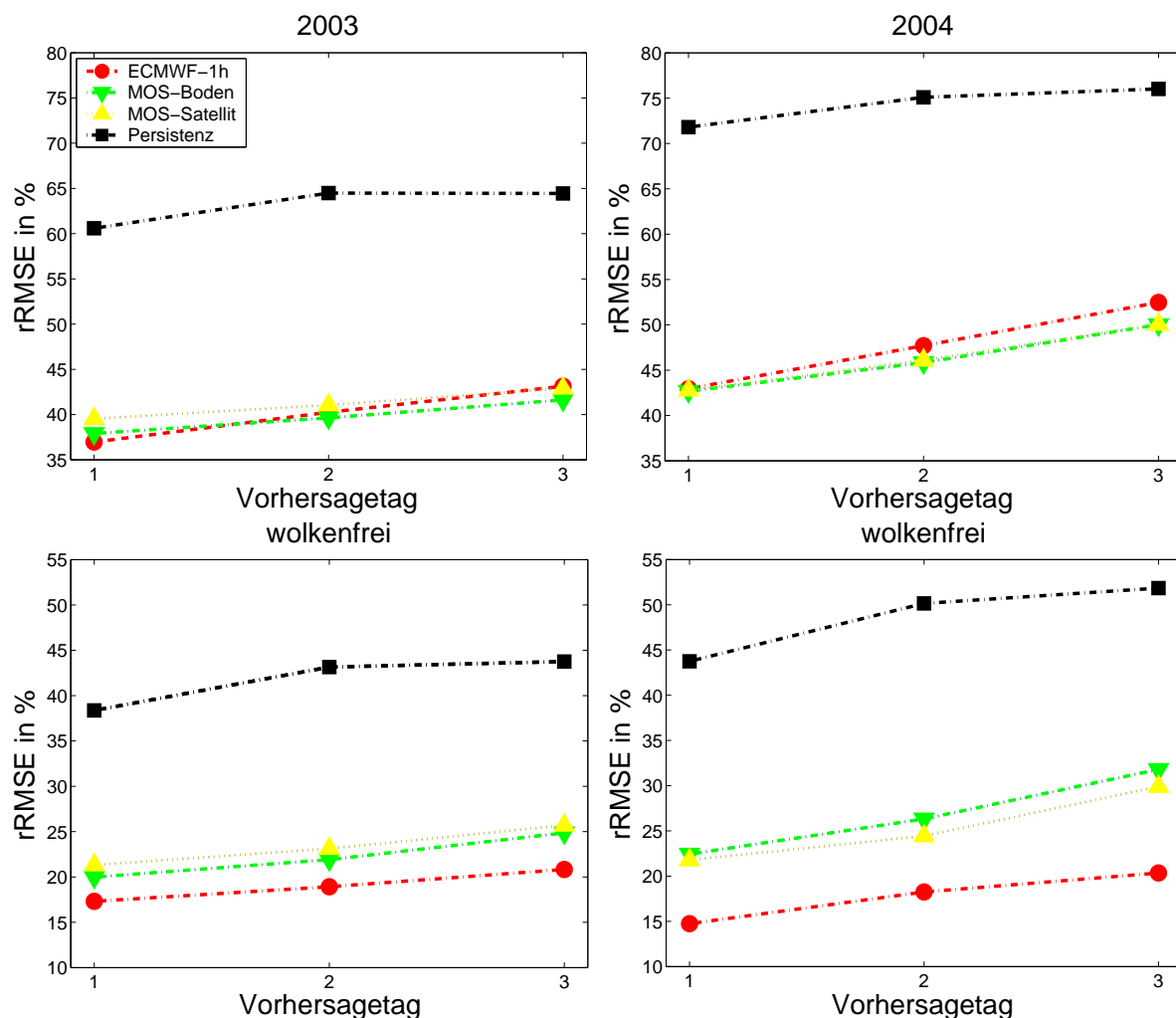


Abbildung 5.7: Vergleich des $rRMSE$ über dem Vorhersagetag für die einstündig aufgelösten Vorhersagen der Verfahren von Persistenz, MOS-Satellit, MOS-Boden und der über das Kombinationsverfahren optimierten ECMWF-Vorhersage. Es ist auf die unterschiedlichen Skalen zu achten. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

optimierten ECMWF-Vorhersagen sind damit für die wolkenfreien Situationen bis zu 9 % besser als das MOS-Ergebnis. Dies macht deutlich, dass das auf Statistik basierende MOS-Verfahren nicht in der Lage ist, den Tagesgang in wolkenfreien Situationen korrekt zu modellieren. Die physikalische Beschreibung und Parametrisierung der Vorgänge in der Atmosphäre innerhalb des ECMWF-Modells und der k^* basierten zeitlichen Optimierung kann hier einen deutlichen Vorteil erzielen. Der Bias für das Kombinationsverfahren liegt für 2003 zwischen -10 und -12 %. Für 2004 liegt der Bias zwischen -6 und -10 %.

In den folgenden Kapiteln wird mit den einstündig aufgelösten ECMWF-Vorhersagen gearbeitet, die über das Kombinationsverfahren berechnet wurden. Dieses Verfahren ist in der Lage, wolkenfreie Tage mit guter Genauigkeit zu erkennen. Daher kann in diesen

Fällen eine besonders gute zeitliche Optimierung unter Verwendung des Clearsky-Index k^* und der Clearsky-Einstrahlung, die den typischen wolkenfreien Tagesgang berücksichtigt, erreicht werden. In bewölkten Situationen kann dagegen über die stückweise lineare Interpolation der Globalstrahlung eine höhere zeitliche Auflösung erreicht werden. Zusammen mit der Optimierung der räumlichen Auflösung für standortaufgelöste Vorhersagen ist damit eine für solarenergetische Anwendungen ausreichende Auflösung der Strahlungsvorhersage erreicht worden.

5.2.3 Vergleich mit MM5

Die optimierte ECMWF-Vorhersage soll nun direkt mit den Ergebnissen der MM5-Vorhersagen verglichen werden, um eine vollständige Bewertung zu ermöglichen. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wird ein Untersuchungszeitraum von 40 Tagen im Sommer 2003 betrachtet und ein Vergleich der Vorhersagen mit 8 Bodenstationen entsprechend Abb. 3.1 durchgeführt. Der maximale Vorhersagehorizont beträgt 48 Stunden. In Abb. 5.8 werden 5 verschiedene Verfahren zur Vorhersage der Globalstrahlung bezüglich $rRMSE$ und $rMBE$ miteinander verglichen. Die dargestellten Ergebnisse für die MOS- und MM5-Vorhersagen entsprechen denen in Abb. 4.11 gezeigten. Zusätzlich sind hier die Resultate der optimierten ECMWF-Vorhersage eingetragen. In diesem Vergleich wird deutlich, dass sich die optimierte ECMWF-Vorhersage klar von den MM5-Vorhersagen unterscheidet. Die ECMWF-Vorhersage liefert einen bis zu 20 % geringeren $rRMSE$ als die MM5-Vorhersagen. Sie ist zudem vergleichbar mit den Bodendaten basierten MOS-Verfahren, das von den sämtlichen bisher untersuchten Verfahren für diesen Zeitraum am besten geeignet war. Dabei ist aufgrund der räumlichen Auflösung und Verfügbarkeit ein angemessener Vergleich nur mit den MOS-Satelliten Vorhersagen möglich. Im Vergleich damit erreichen die optimierten ECMWF-Vorhersagen einen um 2 % niedrigeren $rRMSE$, verbunden mit einem leicht positiven Bias um etwa 3 %. Dieses Ergebnis zeigt, dass die optimierte ECMWF-Vorhersage eine echte Alternative zur bestehenden MOS-Vorhersage ist. Insbesondere zusammen mit den Resultaten des vorangegangenen Abschnittes und der Verbesserung im wolkenfreien Fall um 5 bis 10 % bzgl. des $rRMSE$ ist sie sogar deutlich überlegen.

5.3 Regionale Strahlungsvorhersage

Neben der Vorhersage für bestimmte Standorte ist auch die regionale Strahlungsvorhersage eine wichtige Informationsquelle. Wie bereits erläutert, sind derartige Daten für die regionalen Stromenergieversorger z.B. zur Lastabschätzung von Bedeutung. Daher ist es sinnvoll, neben einer standortbasierten Analyse der optimierten ECMWF-Vorhersage auch eine Untersuchung der regionalen Vorhersagequalität durchzuführen. Wie in Kapitel 4.2.3 wurden dazu vier verschiedene Regionsgrößen gewählt, die ineinander geschachtelt sind. Die größte Region mit $200 \times 200 \text{ km}^2$ enthält drei weitere Regionen mit $150 \times 150 \text{ km}^2$, $100 \times 100 \text{ km}^2$ und $50 \times 50 \text{ km}^2$.

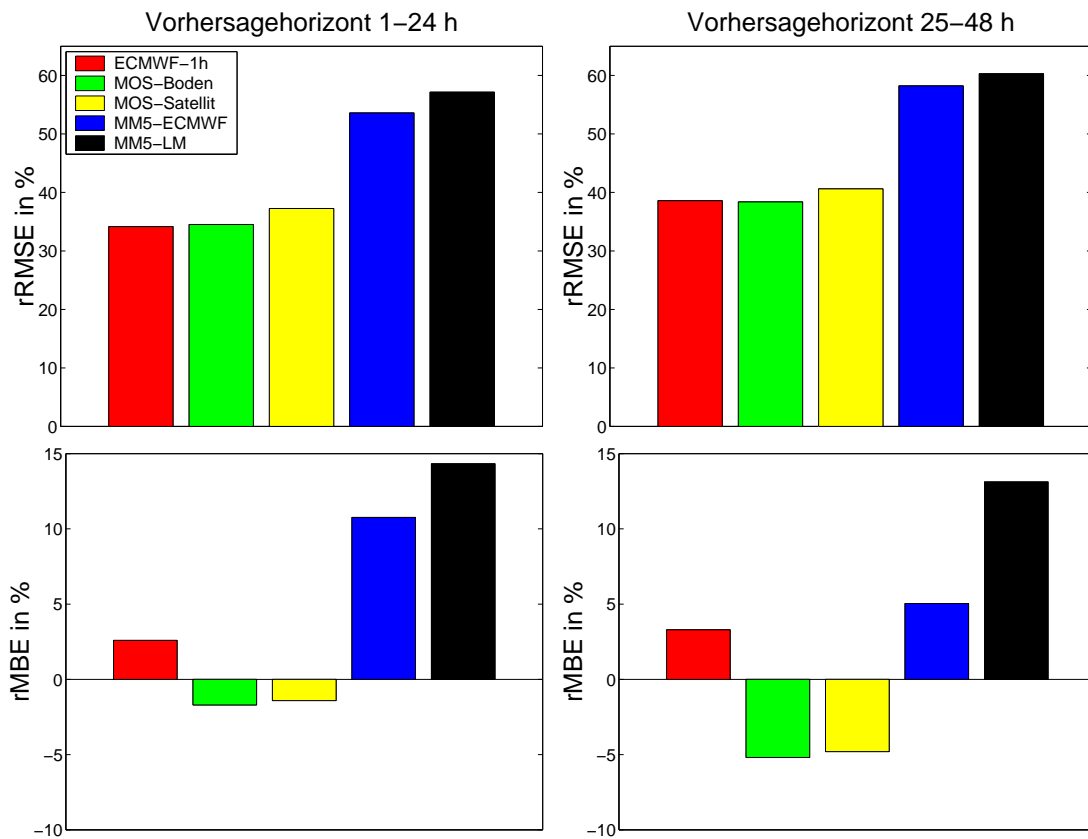


Abbildung 5.8: Vergleich von 5 Verfahren zur Globalstrahlungsvorhersage. Darstellung des $rRMSE$ (oben) und $rMBE$ (unten) für die ersten 24 Stunden der Vorhersage (links: Vorhersagehorizont 1-24 h) und die zweiten 24 Stunden der Vorhersage (rechts: Vorhersagehorizont 25-48 h). Die Ergebnisse ergeben sich im Vergleich mit Bodenmessungen für acht Standorte. Im Vergleich zu 4.11 sind hier zusätzlich die Ergebnisse der optimierten ECMWF-Vorhersage angegeben. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

Ausgangsbasis für die Bestimmung der regionalen Strahlungsvorhersage sind die dreistündig aufgelösten Originaldaten des ECMWF. Da nur räumliche Mittel betrachtet werden sollen, kann auf eine Anpassung der räumlichen Auflösung entsprechend Kapitel 5.2.1 verzichtet werden. Die in der jeweils betrachteten Region vorhandenen Gitterdatenpunkte können einfach zu einem räumlichen Mittel zusammengefasst werden. Anschließend müssen die dreistündig aufgelösten Regionsmittel zeitlich optimiert werden, um die hier erwünschte einstündige Auflösung zu erreichen. Dazu wird das in Kapitel 5.2.2 vorgestellte Kombinationsverfahren verwendet. Die dazu nötige Bestimmung von wolkenfreien Tagen erfolgt über die Betrachtung der Regionsmittel. Das Regionsmittel der Globalstrahlung wird zu einem Clearsky-Index umgerechnet und für jeden Tag muss für mindestens einen dreistündig aufgelösten Clearsky-Index $k^* > 0.9$ gelten. Über Bildung des Regionsmittels lässt sich zudem die nötige Standardabweichung des Clearsky-Index bestimmen, für die $std(k^*) < 0.05$ gelten muss.

Die Abb. 5.9 zeigt den $rRMSE$ der verschiedenen Regionsgrößen im Vergleich zueinander und für unterschiedliche Vorhersagezeiträume. Die Vorhersagezeiträume werden wieder in Form von Vorhersagetagen entsprechend der Zeiträume 1-24 h, 25-48 h und 49-72 h eingeteilt. Zusätzlich zu den Regionsmitteln ist der Fehler für Einzelstationen angegeben (indiziert mit Regionsbreite 0 km). Als Referenz für die Regionsmittel wurden die entsprechenden Werte verwendet, die sich über das Heliosat-Verfahren ergeben, s. Kapitel 3.3.1 und 3.3.2. Zusätzlich wurde unterschieden zwischen dem $rRMSE$ über alle Wettersituationen und dem für wolkenfreie Situationen. Die Definition für eine wolkenfreie Region erfolgt analog zu der bisherigen. Eine Situation wird als wolkenfrei bezeichnet, wenn für ein Regionsmittel $k^* > 0.9$ und $var < 0.03$ gilt.

Wie erwartet zeigt sich, dass der Fehler mit zunehmender Regionsgröße aufgrund des größeren räumlichen Mittels und des zunehmenden Glättungseffektes abnimmt. Der $rRMSE$ für alle Wettersituationen nimmt für beide betrachteten Jahre näherungsweise linear ab. Die Reduktion beträgt zwischen der Betrachtung von Einzelstationen und der $200 \times 200 \text{ km}^2$ Region ca. 10%. Das Fehlerniveau liegt für 2004 im Vergleich zu 2003 um ca. 5-10 % höher, was über den geringeren Clearsky-Anteil für 2004 begründet werden kann. Betrachtet man den $rRMSE$ nur für den wolkenfreien Anteil, ist ein etwa gleiches Fehlerniveau für die beiden Jahre 2003 und 2004 erkennbar. Insgesamt ist das Fehlerniveau für wolkenfreien Situationen im Vergleich zu allen Bewölkungsfällen etwa 20 % niedriger. Auffällig ist die stärkere Fehlerabnahme zwischen Einzelstationen und der $50 \times 50 \text{ km}^2$ Region. Dies kann über die Definition der wolkenfreien Tage innerhalb des Kombinationsverfahrens und dem Unterschied zwischen der Betrachtung von Einzelstationen und Regionsmitteln erklärt werden. Die Kriterien zur Bestimmung eines wolkenfreien Tages müssen für einen 3h-Mittelwert erfüllt sein. Das führt bei Einzelstationen zu größeren Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von wolkenfreien Tagen als bei Regionsmitteln. Damit das Regionsmittel die Kriterien erfüllt, muss die wolkenfreie Situation über ein entsprechend großes Gebiet stabil sein, was zu einer besseren Genauigkeit bei der Erkennung von wolkenfreien Tagen und damit zu einem deutlich geringeren Fehler als bei Einzelstationen führt. Der weitere Abfall für Regionsmittel unterschiedlicher Größe verläuft dagegen wieder näherungsweise linear. Die gesamte Reduktion für den Übergang von Einzelstationen zur $200 \times 200 \text{ km}^2$ Region beträgt ca. 10%. In allen Fällen ist deutlich die zunehmende Verschlechterung der Vorhersagegüte mit zunehmendem Vorhersagezeitraum zu erkennen.

Um die Qualität der regionalen Vorhersage besser einschätzen zu können, ist ein Vergleich mit anderen Vorhersagedaten sinnvoll. Im Gegensatz zur standortabhängigen Vorhersage, gibt es keine regionale Vorhersage, die derzeit operationell ist. Das MOS-Satelliten Verfahren ist zwar prinzipiell in der Auflösung des Heliosat-Verfahrens und damit abhängig vom verwendeten Satelliten verfügbar, wird aber derzeit nicht entsprechend ausgewertet. Darüber hinaus ist es natürlich möglich, regionale Vorhersagen über die Mittelung von Einzelstationen, die innerhalb der betrachteten Region liegen zu bestimmen. Wie bereits in Kapitel 3.3.2 gezeigt, sind Einzelstationen i.d.R. nicht in der Lage, eine Region zu repräsentieren. Die Stationen sind zumeist nicht gleichmäßig räumlich verteilt, so dass je nach Wahl des Ausschnitts Teilgebiete einer Region unterschiedlich gewichtet werden. Je

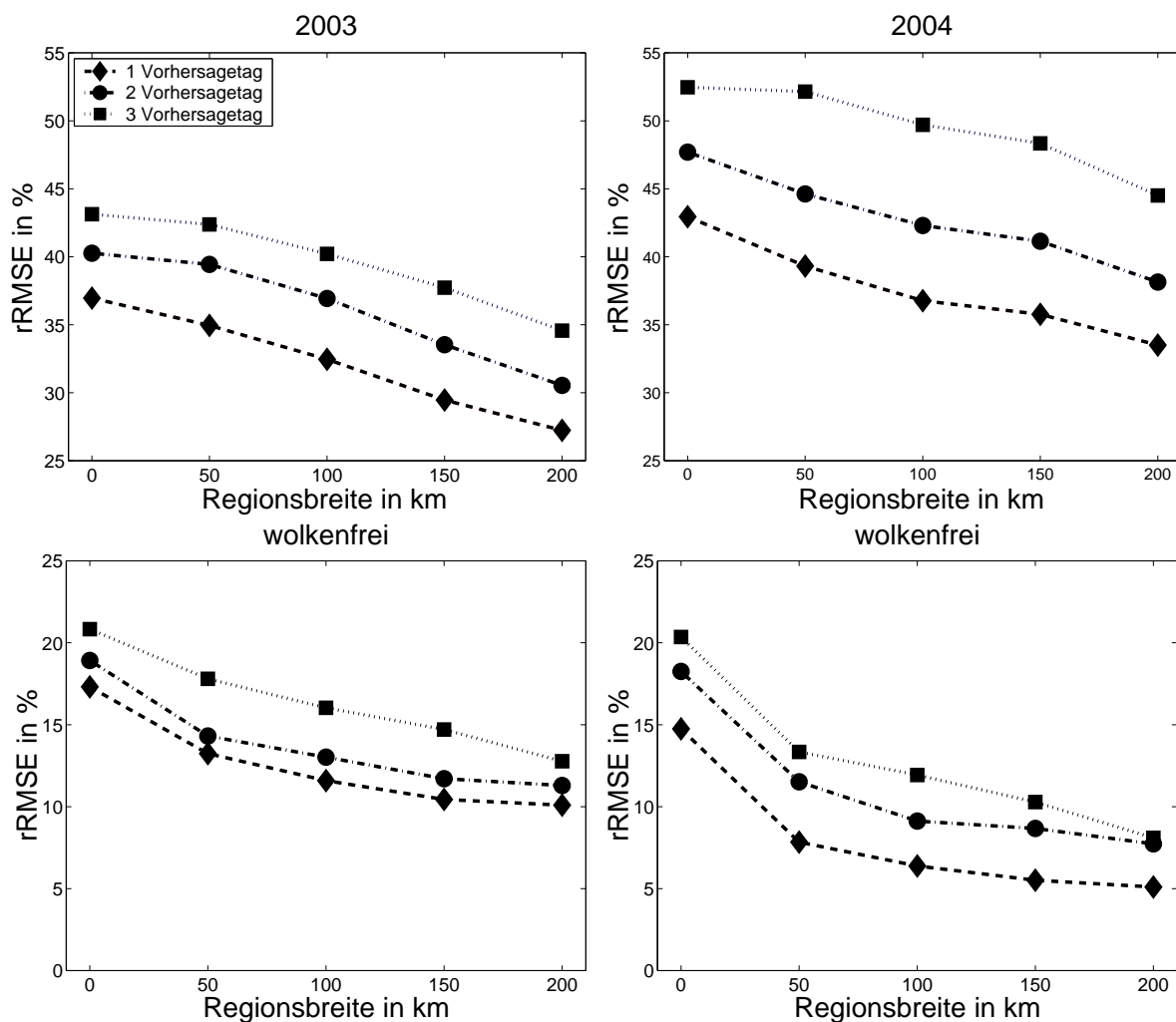


Abbildung 5.9: Vergleich des $rRMSE$ über verschiedene Regionsgrößen für die optimierte ECMWF-Vorhersage. Die Ergebnisse sind für den 1., 2. und 3. Vorhersagetag dargestellt. Links sind die Resultate für 2003 und rechts für 2004, oben sind die Ergebnisse über alle Situationen dargestellt und unten nur für die wolkenfreien Fälle. Es ist auf die unterschiedlichen Skalen zu achten. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

nach Lage der Region, kann die Anzahl der Stationen innerhalb dieser Region erheblich schwanken, wodurch die Vergleichbarkeit der Resultate erheblich leidet. Daher wird hier darauf verzichtet, die in den gewählten Regionen vorhandenen Stationen für ein vergleichendes Regionssmittel heranzuziehen.

Stattdessen wird nur die Persistenz als vergleichbare Größe hinzugezogen. Wie Abb. 5.9 zuvor für die ECMWF basierte Vorhersage, zeigt Abb. 5.10 die entsprechenden Ergebnisse für die Persistenz. Abgesehen von dem deutlich höherem Fehlerniveau lassen sich die zuvor gemachten Beobachtungen hier ebenfalls finden. Im Falle der Persistenz ist für alle Wettersituationen im Gegensatz zur optimierten ECMWF-Vorhersage kein wesentlicher

Unterschied des $rRMSE$ für den 2. und 3. Vorhersagetag zu erkennen. Im Vergleich zum 1. Vorhersagetag ist der $rRMSE$ ca. 6 % höher. Dieses Phänomen lässt sich prinzipiell auch für die wolkenfreie Fälle wiederfinden, allerdings ist hier zwischen 2. und 3. Vorhersagetag eine größere Streuung zu finden.

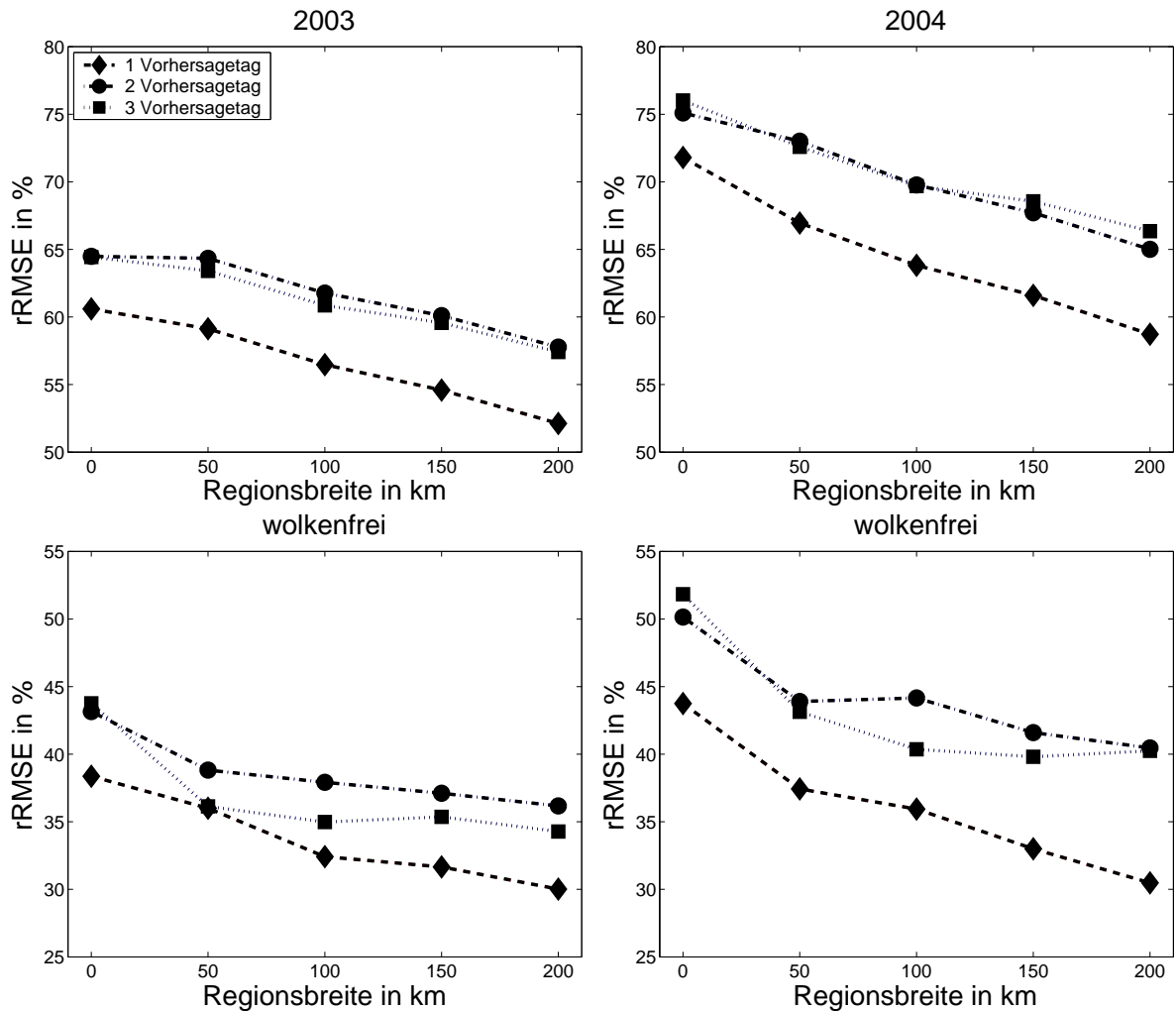


Abbildung 5.10: Vergleich des $rRMSE$ über verschiedene Regionsgrößen für die Persistenz. Die Ergebnisse sind für den 1., 2. und 3. Vorhersagetag dargestellt. Links sind die Resultate für 2003 und rechts für 2004, oben sind die Ergebnisse über alle Situationen dargestellt und unten nur für die wolkenfreien Fälle. Es ist auf die unterschiedlichen Skalen zu achten. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

Um die Ergebnisse zwischen optimierter ECMWF-Vorhersage und der Persistenz direkt miteinander vergleichen zu können, sind die Resultate des $rRMSE$ als Mittel über den gesamten Vorhersagezeitraum von Stunde 1-72 in Abb. 5.11 dargestellt. Der $rRMSE$ der Persistenz ist für alle Bewölkungssituationen um etwa ein Drittel größer als im Vergleich zur optimierten ECMWF-Vorhersage. Der hier nicht dargestellte Bias zeigt für

die Persistenz keine systematische Unter- oder Überschätzung. Die optimierte ECMWF-Vorhersage zeigt für 2003 eine geringe Überschätzung mit einem $rMBE$ von etwa 1 %, die sich für 2004 auf ca. 10 % erhöht. Der Bias zeigt keine systematische Abhängigkeit von der Regionsgröße.

In den wolkenfreien Fällen ist der $rRMSE$ der Persistenz mit über 20 % Differenz zwei- bis fünffach so groß wie der Fehler der optimierten ECMWF-Vorhersage. Der Bias der Persistenz liegt zwischen -20 und -30 %, da die Auflösung und das Weiterziehen der Bewölkung nicht berücksichtigt werden können. Der Bias der optimierten ECMWF-Vorhersage liegt für die Regionsmittel zwischen -5 und -10 %.

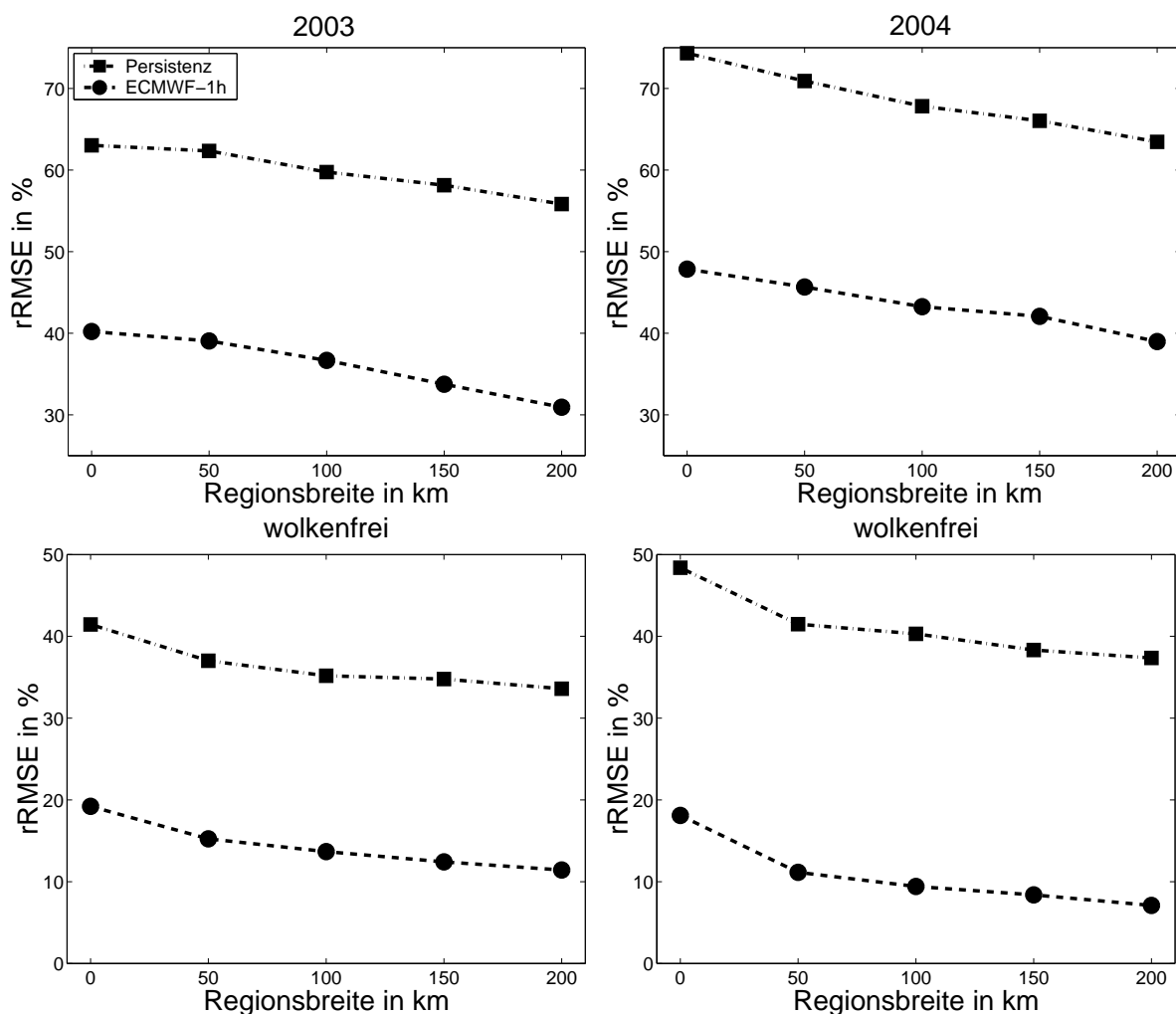


Abbildung 5.11: Vergleich des $rRMSE$ über verschiedene Regionsgrößen für die Persistenz und den einständigen ECMWF-Daten. Die Ergebnisse sind als Mittel über den gesamten Vorhersagezeitraum von 1-72 h dargestellt. Links sind die Resultate für 2003 und rechts für 2004, oben sind die Ergebnisse über alle Situationen dargestellt und unten nur für die wolkenfreien Fälle. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

5.3.1 Vergleich mit MM5

Abschließend soll ein direkter Vergleich mit den MM5 Vorhersagen für Regionsmittel entsprechend Abb. 4.16 durchgeführt werden. Dazu wird die optimierte ECMWF-Vorhersage auf den Zeitraum zwischen Tag 150 und Tag 190 des Jahres 2003 analog zu Kapitel 4.2.3 beschränkt. Die Abb. 5.12 zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit vom Vorhersagetag für die MM5- und ECMWF-Vorhersage. Im Vergleich mit Abb. 5.9 ist der $rRMSE$ der optimierten ECMWF-Vorhersage um bis zu 5 % geringer als die entsprechenden Resultate für das ganze Jahr. Das lässt sich dadurch erklären, dass der untersuchte 40 Tage Zeitraum mit einem hohen Anteil an wolkenfreien Situationen und mit hohen absoluten Einstrahlungen verknüpft ist. Das führt zu einer Reduktion des Fehlers im Vergleich zum Gesamtjahresresultat. Auch für Regionsmittel erzielt die optimierte ECMWF-Vorhersage gegenüber der MM5-Vorhersage Vorteile und reduziert den $rRMSE$ im Vergleich zu den MM5-Vorhersagen um bis zu 5 %, auch wenn die Reduktion weniger deutlich ausfällt als bei Einzelstationen.

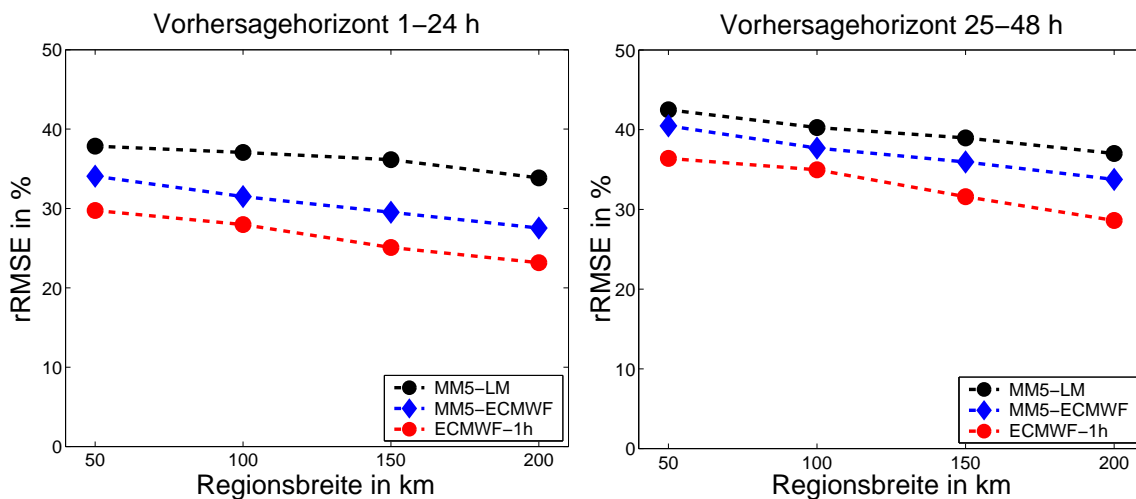


Abbildung 5.12: Darstellung des $rRMSE$ für unterschiedliche Regionsgrößen von $200 \times 200 \text{ km}^2$ über $150 \times 150 \text{ km}^2$ und $100 \times 100 \text{ km}^2$ bis $50 \times 50 \text{ km}^2$. Zum Vergleich mit den in Kapitel 4.2.3 vorgestellten MM5-Vorhersagen wurde der Untersuchungszeitraum auf 40 Tage im Sommer 2003 beschränkt.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass die akkumulierte Strahlungsvorhersage des ECMWF, die in einer groben räumlichen und zeitlichen Auflösung vorliegt, optimiert werden kann. Neben einer Optimierung der räumlichen Auflösung zum Vergleich mit lokalen Standorten von Bodenmessungen konnte die zeitliche Auflösung erfolgreich auf eine stündliche Darstellung erhöht werden. In diesem Zusammenhang konnte ein Kombinationsverfahren entwickelt werden, das zwischen unbewölkten und bewölkten Tagen unter-

scheidet. Abhängig von dieser Unterscheidung werden unterschiedliche Interpolationsroutinen durchgeführt. Durch die Berücksichtigung eines Clearsky-Modells im wolkenfreien Fall wird der hierfür typische Tagesgang berücksichtigt, wodurch der $rRMSE$ um bis zu 5 % geringer ist, als wenn man die Globalstrahlung direkt stückweise linear interpoliert. Für korrekt vorhergesagte Clearsky-Tage ergibt sich für Stundenwerte ein minimaler $rRMSE$ von 11 %.

Es wurde deutlich, dass die optimierte ECMWF-Vorhersage nicht nur eine echte Alternative zu den bestehenden operationellen MOS-Vorhersagen ist, sondern dass die weiterentwickelte ECMWF-Vorhersage insbesondere im wolkenfreien Fall mit hohen absoluten Einstrahlungen den MOS-Verfahren mit einem um 5 bis 10 % geringeren $rRMSE$ überlegen ist.

Im Vergleich zu den MM5-Vorhersagen des vorangegangenen Kapitels ist der $rRMSE$ der optimierten ECMWF-Vorhersage um bis zu 20 % geringer und bietet sich damit zur Verwendung in der Strahlungsvorhersage an. Um mehr über die Vorhersagegüte der optimierten ECMWF-Vorhersage aussagen zu können, folgt im nächsten Kapitel eine ausführliche Genauigkeitsanalyse.

6 Genauigkeitsanalyse

Bei den vorangegangenen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Genauigkeit der Strahlungsvorhersage davon abhängig ist, ob alle Bewölkungssituationen oder nur wolkenfreie Fälle betrachtet werden. Dies ist ein Hinweis darauf, dass eine weitergehende Analyse der Vorhersage in Abhängigkeit von der meteorologischen Situation sinnvoll ist. Daher werden in diesem Kapitel verschiedene Analysen zur Bestimmung der Vorhersagequalität durchgeführt.

Das Ziel der Genauigkeitsanalysen ist, die Ursachen für verschieden stark ausgeprägte Vorhersagefehler zu bestimmen und zu prüfen, ob diese bestimmten Situationen zugeordnet werden können. Darüber hinaus wird untersucht, ob neben der Strahlung zusätzliche vorhergesagte Größen genutzt werden können, über die der Strahlungsvorhersage eine Aussage über deren Qualität mitgegeben werden kann. Ein solches zusätzliches Qualitätsmerkmal stellt eine wichtige Information für potentielle Anwender dar. Da die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen Vorhersagefehlern und situationsbeschreibenden Parametern analysiert werden sollen, wird die Untersuchung auf die Vorhersagen für Einzelstationen des in Kapitel 5.2 entwickelten und optimierten einstündig aufgelösten ECMWF-Kombination Datensatzes beschränkt. Damit über dem gesamten Datensatz und wolkenfreien Situationen hinaus unterschieden werden kann, werden weitere Möglichkeiten zur Unterscheidung über die Verwendung der Wolkenvariabilität *var*, des Sonnenstandes *sunel* und des Clearsky-Index k^* genutzt.

Neben den bisher hauptsächlich betrachteten Fehlermaßen von *RMSE* und Bias, wird zusätzlich, unter Ausnutzung der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Fehlermaßen, der *stderror* betrachtet. Zudem wird im Rahmen einer eindimensionalen Fehleranalyse in Kapitel 6.1 nicht mehr der mittlere Stundenfehler für den jeweiligen Vorhersagetag betrachtet, sondern die Analyse erfolgt stundenaufgelöst und in Abhängigkeit einer situationsbeschreibenden Größe. Darauf aufbauend werden in Kapitel 6.2 zweidimensionale Fehleranalysen durchgeführt. Der Fehler wird hier in Abhängigkeit von je zwei Größen dargestellt.

Im Kapitel 6.3 wird eine k-means Cluster-Analyse der Stundenfehler durchgeführt. Es werden vorhergesagte und gemessene Werte sowie zugehörige situationsbeschreibende Größen zueinander in Beziehung gesetzt. Des Weiteren wird überprüft ob zum einen Heliosat-Parameter wie Cloudindex, Wolkenvariabilität und Sonnenstand und zum anderen die vorhergesagte k^* -Variabilität geeignet sind, den Vorhersagefehler in situationsabhängige Cluster zu separieren.

6.1 Eindimensionale Fehleranalyse

In diesem Kapitel wird die Abhängigkeit des Fehlers von der stundenaufgelösten Vorhersage analysiert. Zunächst werden die stundenaufgelösten Fehler in Abhängigkeit vom Sonnenstand und damit vom Tagesgang der absoluten Einstrahlung betrachtet. Es folgen

weitere Untersuchungen zu den Abhängigkeiten des stundenaufgelösten Fehlers von der Wolkenvariabilität und dem Clearsky-Index.

Es werden die über das in Kapitel 5.2 entwickelte Kombinationsverfahren gewonnenen einstündig aufgelösten Vorhersagen für Einzelstationen analysiert. Zudem werden die Datenmenge, der *RMSE*, der über 18 Stationen bestimmte mittlere Bias *MBE* und der *stderror* betrachtet.

Neben der bisher üblichen Angabe des *RMSE* als relativer Fehler, wird der *RMSE* auch als absoluter Fehler angegeben. Der Grund dafür ist, dass eine relative Darstellung eines stundenabhängigen Fehlers über den optischen Eindruck zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen kann. In den Morgen- und Abendstunden ist die Einstrahlung naturgemäß gering und liegt im Bereich von weniger als 100 W/m^2 . In diesem Zeitraum können sich in den Vorhersagen und Strahlungsmodellen schnell Fehler einstellen, die in derselben Größenordnung liegen, wie die tatsächlich gemessene Strahlung. Eine relative Darstellung dieses Fehlers wird zu deutlichen Ausreißern führen, die das Bild dominieren würden. Der optische Eindruck kann dann leicht die Bedeutung dieser Abweichungen im Verhältnis zur Gesamteinstrahlung über den Tag verfälschen. Daher wird der *RMSE* im Folgenden auch in absoluten Werten dargestellt.

Die Untersuchung der Daten wurde für die Jahre 2003 und 2004 jeweils getrennt durchgeführt, um jahresspezifische Unterschiede erkennen zu können. Hier werden zu Gunsten der Übersichtlichkeit aber nur die Ergebnisse für das Jahr 2003 gezeigt. Für die entsprechenden Darstellungen des Jahres 2004 wird jeweils auf den Anhang verwiesen.

6.1.1 Verschiedene Sonnenstände

Zur Untersuchung der Abhängigkeit des stundenaufgelösten Fehlers der Strahlungsvorhersage vom Sonnenstand werden vier verschiedene Sonnenstandsklassen definiert. Grundlage für die Einteilung der Strahlungswerte in die Klassen ist der zeitlich zugehörige Sonnenstandswinkel *sunel*. Der Sonnenstandswinkel kann Werte zwischen 0° und 90° annehmen. Befindet sich der Sonnenmittelpunkt auf Horizonthöhe gilt $sunel = 0^\circ$ und steht die Sonne im Zenit gilt $sunel = 90^\circ$. Die vier Klassen sind über folgende Definitionen gegeben:

$$\begin{aligned} sunel - \text{Klasse 1} : & \quad sunel < 10^\circ \\ sunel - \text{Klasse 2} : & \quad 10^\circ \leq sunel < 30^\circ \\ sunel - \text{Klasse 3} : & \quad 30^\circ \leq sunel < 50^\circ \\ sunel - \text{Klasse 4} : & \quad sunel \geq 50^\circ \end{aligned}$$

Zusätzlich wird der gesamte Datensatz über alle Sonnenstände betrachtet. Die Abb. 6.1 zeigt die Datenmenge in Abhängigkeit von der Vorhersagestunde für 2003. Die entsprechende Darstellung für 2004 befindet sich im Anhang unter Abb. 9.1. Für 2003 ergibt sich pro Stunde eine maximale Datenmenge von $365 \text{ Tagen} * 18 \text{ Stationen} = 6570$ und für 2004 aufgrund des Schaltjahres 6588 Datenpunkte. Für den gesamten Datensatz werden diese Maximalwerte in der Mittagszeit näherungsweise erreicht. Abweichungen vom Maximum

insbesondere für 2003 ergeben sich aus nicht vorhandenen Bodendaten. Darüber hinaus kann das Maximum in den Morgen-, Abend- und Nachtstunden nicht erreicht werden, da die Zeitpunkte für die Analyse ausgeschlossen wurden, bei denen die Bodenmessung keine Einstrahlung nachweisen kann. Diese Nachtwerte würden andernfalls das Ergebnis verfälschen. Zudem kommt hier zum Tragen, dass sich der Zeitpunkt von Sonnenauf- und Sonnenuntergang abhängig von der Jahreszeit verschiebt. Die Verlaufsformen der Kurven je Klasse wiederholen sich für die Vorhersagetage. In der Abb. 6.1 ist zu erkennen, wie der Sonnenstandswinkel mit der Tageszeit korreliert ist.

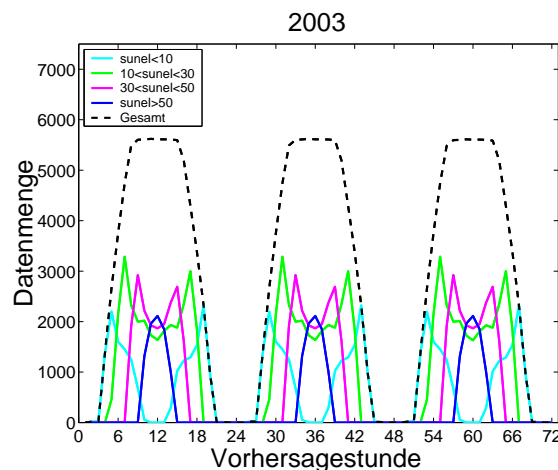


Abbildung 6.1: Dargestellt ist die Datenmenge in Abhängigkeit von der Vorhersagestunde für das Jahr 2003. Unterschieden wird zwischen dem gesamten Datensatz und vier Sonnenstandsklassen.

Die Abb. 6.2 für 2003 und Abb. 9.2 für 2004 im Anhang zeigen den absoluten und relativen $RMSE$, sowie den absoluten MBE und den absoluten $stderror$. Bei der Betrachtung des absoluten $RMSE$ ist die deutliche Abhängigkeit des Fehlers vom Sonnenstand und damit von der absoluten Einstrahlung auffällig. Entsprechend ist der absolute $RMSE$ z.B. zu den Mittagsstunden für Sonnenstände von $10^\circ < sunel < 50^\circ$ aufgrund der geringeren absoluten Einstrahlung kleiner als für hohe Sonnenstände mit $sunel > 50^\circ$. Es lassen sich also deutliche qualitative Unterschiede der Vorhersage in Abhängigkeit vom Sonnenstand feststellen. Der Verlauf des $stderror$ entspricht dem des absoluten $RMSE$. Dagegen zeigt der absolute MBE deutliche Unterschiede für verschiedene Sonnenstände. Für hohe Sonnenstände mit $sunel > 50^\circ$ ist ein deutlicher positiver Bias zu erkennen, während sich für die niedrigeren Winkel ein betragsmäßig deutlich niedriger Bias einstellt, der zudem teilweise ins Negative geht.

Bei der Bewertung des absoluten $RMSE$ ist es in diesem Fall besonders sinnvoll, den relativen $RMSE$ mit zu beachten. Der Sonnenstand ist direkt mit der Höhe der absoluten Einstrahlung und damit auch mit dem absoluten Fehler korreliert. Dies führt zu einer signifikant anderen Darstellung, wenn man zum Vergleich zum absoluten $RMSE$ den Verlauf des relativen $RMSE$ in der Darstellung oben rechts der Abb. 6.2 betrachtet.

Das Verhältnis der *sunel*-Klassen dreht sich für den *rRMSE* aufgrund der berücksichtigten Gesamteinstrahlung im Vergleich zum *RMSE* um. Das bedeutet, dass z.B. hohe Sonnenstände in der Mittagszeit zwar mit einem hohen absoluten *RMSE* verbunden sind, aufgrund der hohen absoluten Einstrahlung zu diesen Zeiten der relative Fehler aber klein ist. Wie im Folgenden noch gezeigt wird, kommt bei hohen Sonnenständen hinzu, dass diese einen höheren wolkenfreien Anteil haben als tiefe und mittlere Sonnenstände. Gerade diese Situationen sind aber, wie bereits gezeigt, mit einem niedrigen relativen *RMSE* verbunden. Für Sonnenstände $sunel < 10^\circ$ zeigt der absolute *RMSE* nur geringe Fehler. Da hier aber auch die absolute Einstrahlung sehr gering ist, führt dies hier zu relativen Fehlern von über 100 %.

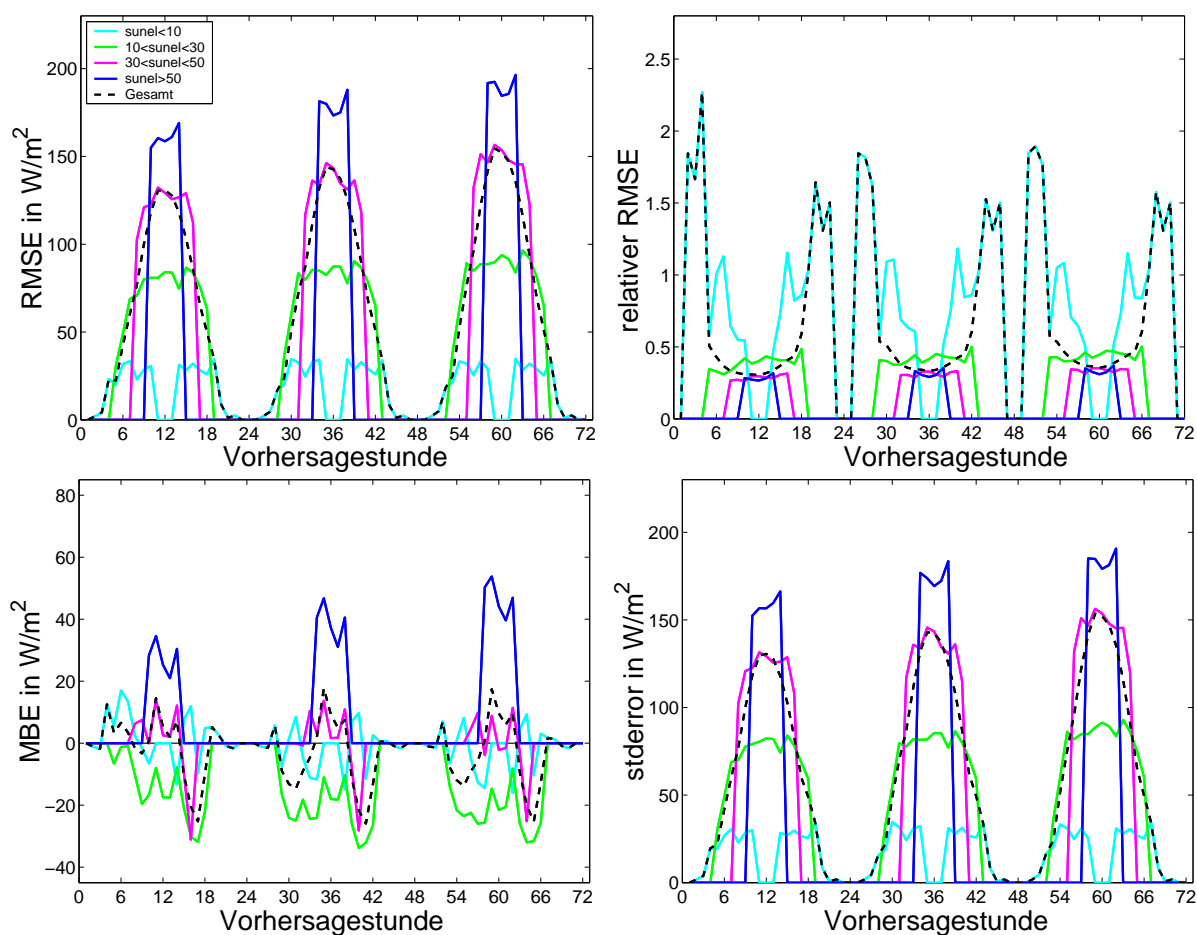


Abbildung 6.2: Darstellung des *RMSE*, des *rRMSE*, des *MBE* und des *stderror* über der Vorhersagestunde und für das Jahr 2003. Die Darstellungen unterscheiden zwischen dem gesamten Datensatz und vier Sonnenstandsklassen. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

6.1.2 Verschiedene Wolkenvariabilitäten

In diesem Abschnitt erfolgt eine Untersuchung des stundenaufgelösten Fehlers von der Wolkenvariabilität var . Neben der Untersuchung der zu definierenden Klassen anhand der Wolkenvariabilität und des gesamten Datensatzes werden ebenfalls die wolkenfreien Situationen untersucht. Eine Clearsky-Situation wird wieder über Satelliten-Daten des Heliosat-Verfahrens identifiziert. Für den Clearsky-Index muss $k^* > 0.9$ und für die Wolkenvariabilität $var < 0.03$ erfüllt sein. Vier weitere Klassen nur anhand der Wolkenvariabilität ergeben sich über folgende Kriterien:

$$\begin{aligned} var - \text{Klasse 1} : & \quad var < 0.03 \\ var - \text{Klasse 2} : & \quad 0.03 \leq var < 0.06 \\ var - \text{Klasse 3} : & \quad 0.06 \leq var < 0.09 \\ var - \text{Klasse 4} : & \quad var \geq 0.09 \end{aligned}$$

In Abb. 6.3 sind die Datenmengen der damit insgesamt sechs untersuchten Klassen für das Jahr 2003 dargestellt. Die entsprechende Darstellung für 2004 ist dem Anhang zu entnehmen, s. Abb. 9.3. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf der Datenmenge für die Klasse der wolkenfreien Situationen sehr ähnlich zu dem der var -Klasse 1 mit $var < 0.03$ ist. Das ist verständlich, da aufgrund der Definition der wolkenfreien Situationen die Clearsky-Klasse eine Untermenge der var -Klasse 1 ist.

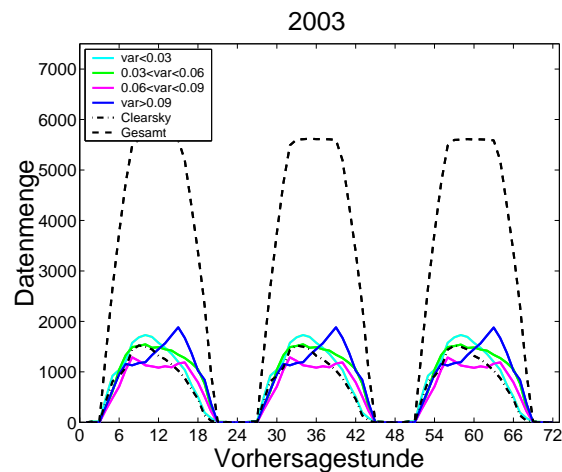


Abbildung 6.3: Dargestellt ist die Datenmenge des Jahres 2003 in Abhängigkeit von der Vorhersagestunde. Unterschieden wird zwischen dem gesamten Datensatz, Clearsky-Situationen und vier Wolkenvariabilitätsklassen.

Die Abb. 6.4 zeigt für die Daten von 2003 den absoluten und relativen $RMSE$ sowie den MBE und den $stderror$ in $[W/m^2]$. Die Abb. 9.4 für 2004 ist dem Anhang zu entnehmen. Bezüglich des absoluten $RMSE$ ist zu erkennen, dass die Spitzenwerte mit voranschreitendem Vorhersagehorizont für die drei Vorhersagetage zunehmen. Die Ursache dafür

liegt im *stderror*, der dieselben Tendenzen aufweist, während der *MBE* innerhalb von 24 Stunden zwar stark fluktuiert, aber für einen bestimmten Tageszeitpunkt über die drei Vorhersagetage nährungsweise konstant bleibt.

Der absolute *RMSE* und *stderror* weisen einen Tagesgang auf, der sich durch die absoluten Einstrahlungswerte ergibt. Wie die Untersuchung im vorangegangenen Kapitel 6.1.1 zeigte, ist der absolute *RMSE* vom Sonnenstand und damit von der absoluten Einstrahlung abhängig. Diese Abhängigkeit verursacht auch hier den Tagesgang des absoluten *RMSE* und *stderror*. Das Verhältnis der Klassen zueinander bleibt bei Betrachtung des relativen *RMSE* außer in den frühen Morgen- und späten Abendstunden erhalten. Hohe Wolkenvariabilitäten sind mit einem höheren Fehler behaftet als niedrigere Variabilitäten. Wobei sehr niedrige Variabilitäten neben homogenen Bewölkungen auch wolkenfreie Situationen enthalten, die wie bereits gezeigt, mit einem besonders niedrigen Fehler verbunden sind.

Die wolkenfreien Situationen zeigen trotz hoher absoluter Einstrahlung niedrige Fehler bzgl. des *RMSE* und *stderror*. Die Ähnlichkeiten der *var*-Klasse 1 für $var < 0.03$ zu den Clearsky-Verläufen sind deutlich und aufgrund der Definition von Clearsky-Situationen auch nachvollziehbar, da diese *var*-Klasse eine Teilmenge der wolkenfreien Fälle darstellt. Die zusätzlichen homogen bewölkten Situationen führen zu einem höheren *stderror*, der letztlich zu einem höheren *RMSE* führt als in den Clearsky Fällen.

Die Ergebnisse der *var*-Klassen mit Variabilitäten von $var > 0.03$ ähneln sich in Verlauf und Amplitude für alle betrachteten Fehlermaße. Eine erhöhte Differenzierung nach Wolkenvariabilitäten erscheint daher für $var > 0.03$ und somit für mittel bis stark inhomogene Bewölkungssituationen keinen besonderen zusätzlichen Informationsgewinn zu erbringen. Der absolute *RMSE* liegt bei diesen Situationen in den Mittagsstunden um bis zu ca. 20 W/m^2 über dem des Gesamtdatensatzes. Dies lässt sich beim absoluten *stderror* wiederfinden.

Der *MBE* schwankt für den Gesamtdatensatz und die *var*-Klassen 2,3 und 4 relativ gleichmäßig um die Nulllinie mit einem leichten positiven Überhang für 2003. Die verbleibende *var*-Klasse 1 und die Clearsky-Situationen zeigen dagegen einen deutlich negativen Bias mit zwei Spitzen in den Vormittags- und Nachmittagsstunden. Das bedeutet, dass vormittags und nachmittags in realen wolkenfreien Situationen zu viele Wolken vorhergesagt werden. Die dadurch verursachte Unterschätzung trägt daher in diesen Fällen am meisten zum Fehler bei. Aufgrund der hohen absoluten Einstrahlung ist der relative *RMSE* entgegen dem hohen Bias gering. Dagegen ist der Bias bei inhomogenen Situationen und im Vergleich zu der in wolkenfreien Situationen geringeren absoluten Einstrahlung größer. Zudem ist in den Fällen inhomogener Bewölkung der Bias kleiner und der *stderror* von größerer Bedeutung.

6.1.3 Verschiedene Clearsky-Indizes

Der Clearsky-Index k^* stellt eine weitere sinnvolle Möglichkeit da, die Daten in unterschiedliche Klassen zu unterteilen, um so eine situationsabhängige Fehlerklassifikation durchzuführen. Entsprechend den vorangegangenen Kapiteln wird wieder eine Einteilung

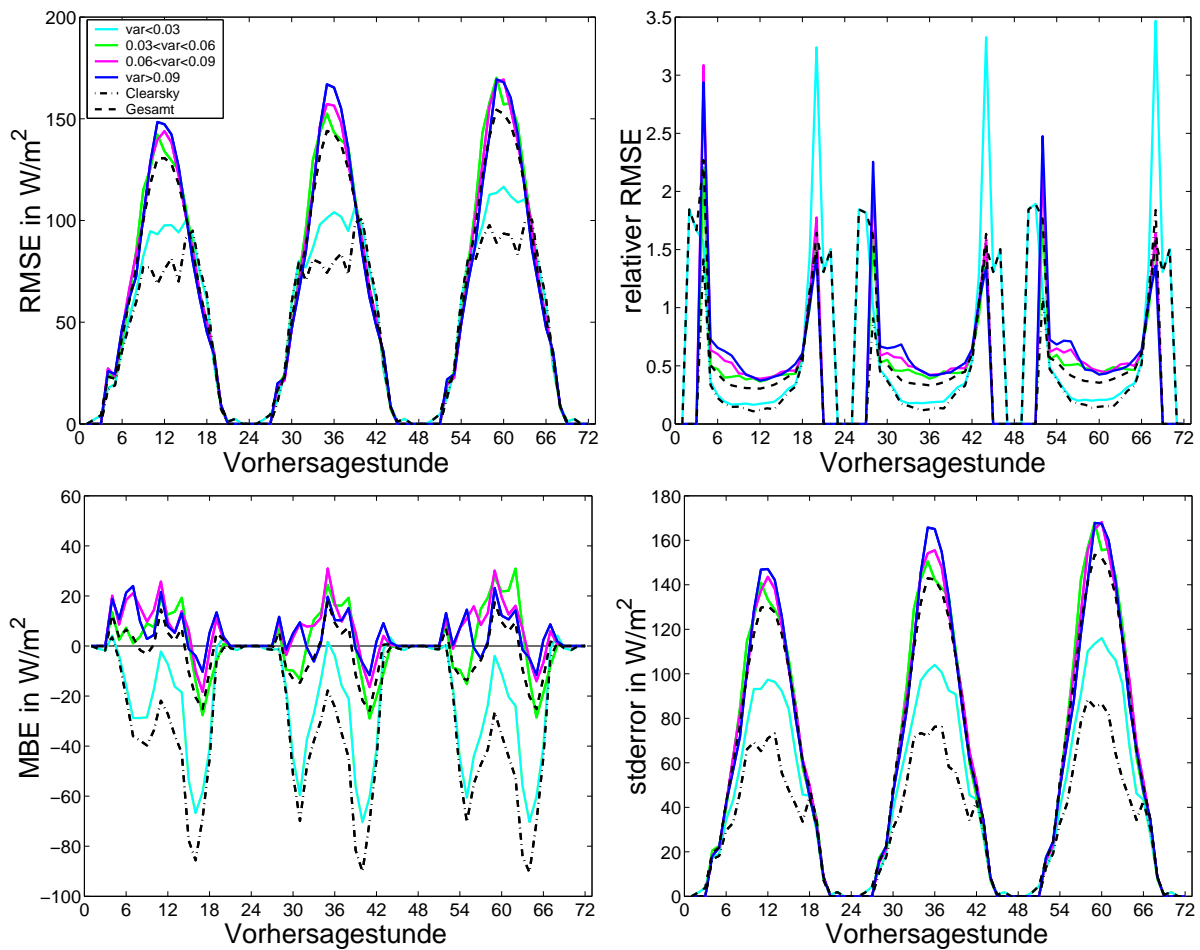


Abbildung 6.4: Darstellung des RMSE, des rRMSE, des MBE und des stderror über der Vorhersagestunde für 2003. Es wird unterschieden zwischen dem gesamten Datensatz, Clearsky-Situationen und vier Wolkenvariabilitätsklassen. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

in vier Klassen vorgenommen, für die jetzt gilt:

$$\begin{aligned}
 k^* - \text{Klasse 1} : & \quad k^* < 0.3 \\
 k^* - \text{Klasse 2} : & \quad 0.3 \leq k^* < 0.6 \\
 k^* - \text{Klasse 3} : & \quad 0.6 \leq k^* < 0.9 \\
 k^* - \text{Klasse 4} : & \quad k^* \geq 0.9
 \end{aligned}$$

Niedrige Werte von k^* bedeuten, es herrscht viel bis starke Bewölkung vor und hohe k^* Werte stehen für wenig bis keine Bewölkung. Die Abb. 6.5 zeigt die Datenmenge in Abhängigkeit vom Clearsky-Index und der Vorhersagestunde für 2003, s. Abb. 9.5 im Anhang für 2004. Auffällig ist hier der im Vergleich zur Unterscheidung über die Wol-

kenvariabilitäten recht große Unterschied in der Datenmenge zwischen den wolkenfreien Situationen und der k^* -Klasse 4 für $k^* > 0.9$. Die wolkenfreien Fälle sind aufgrund deren Definition eine Teilmenge der k^* -Klasse 4. Diese Klasse beinhaltet darüber hinaus aber auch inhomogene Situationen, wie z.B. bei leichter Cumulus-Bewölkung.

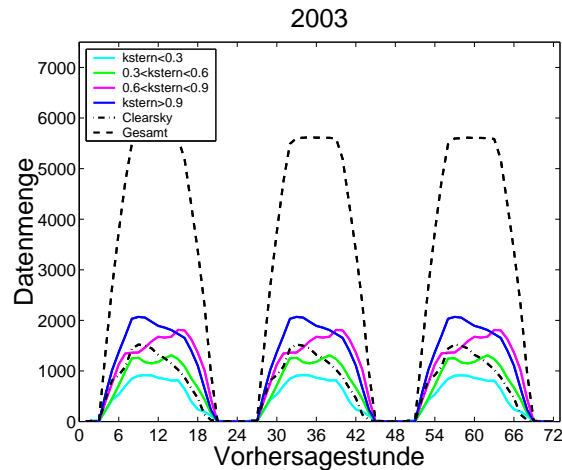


Abbildung 6.5: Dargestellt ist die Datenmenge in Abhängigkeit von der Vorhersagestunde für das Jahr 2003. Unterschieden wird zwischen dem gesamten und dem Clearsky-Datensatz sowie vier k^* -Klassen.

Die Abbildung 6.6 zeigt wieder die Fehlermaße von absoluten und relativen $RMSE$ sowie absoluter MBE und $stderror$ in den verschiedenen Abhängigkeiten für das Jahr 2003. Für 2004 finden sich die entsprechenden Darstellungen in Abb. 9.6 im Anhang. Anhand des $RMSE$ ist zu erkennen, dass der Fehler mit größer werdendem k^* und damit zunehmender Bewölkung und trotz einer sinkenden absoluten Einstrahlung anwächst. Der absolute $RMSE$ für $k^* > 0.9$ ist nur unwesentlich höher als für die Clearsky-Fälle, was wieder an der Definition der Clearsky-Situationen liegt. Diese werden ja neben der Bedingung $var < 0.03$ über $k^* > 0.9$ definiert. Die unterschiedlichen Klassen sind im Fall des $RMSE$ relativ deutlich voneinander getrennt, was auf eine hohe Abhängigkeit der Vorhersagequalität bezüglich des Clearsky-Index k^* schließen lässt. Dies gilt aber nicht in dieser Deutlichkeit für den absoluten $stderror$. Hier sind die Unterschiede in den drei niedrigen Klassen mit $k^* < 0.9$ vernachlässigbar. Lediglich die Klasse für $k^* > 0.9$ liegt im $stderror$ deutlich unter den anderen drei k^* -Klassen und ist wieder gut mit dem Ergebnis für die Clearsky-Situationen zu vergleichen. Der Tagesgang im Verlauf des absoluten $RMSE$ und dem $stderror$ ist wieder über die in Kapitel 6.1.1 gezeigte Abhängigkeit des Fehlers vom Sonnenstand und damit der absoluten Einstrahlung begründet.

Das nun alle Klassen im $RMSE$ deutlich zu unterscheiden sind, ist über die Betrachtung des MBE zu verstehen. Während für die verschiedenen Wolkenvariabilitäten und Sonnenstände nur wenige charakteristische Unterschiede im MBE festgestellt werden konnten, lassen sich für den Clearsky-Index gerade über den MBE sehr deutliche Unterschiede erkennen. Situationen mit hoher bis mittlerer Bewölkung, beschrieben über

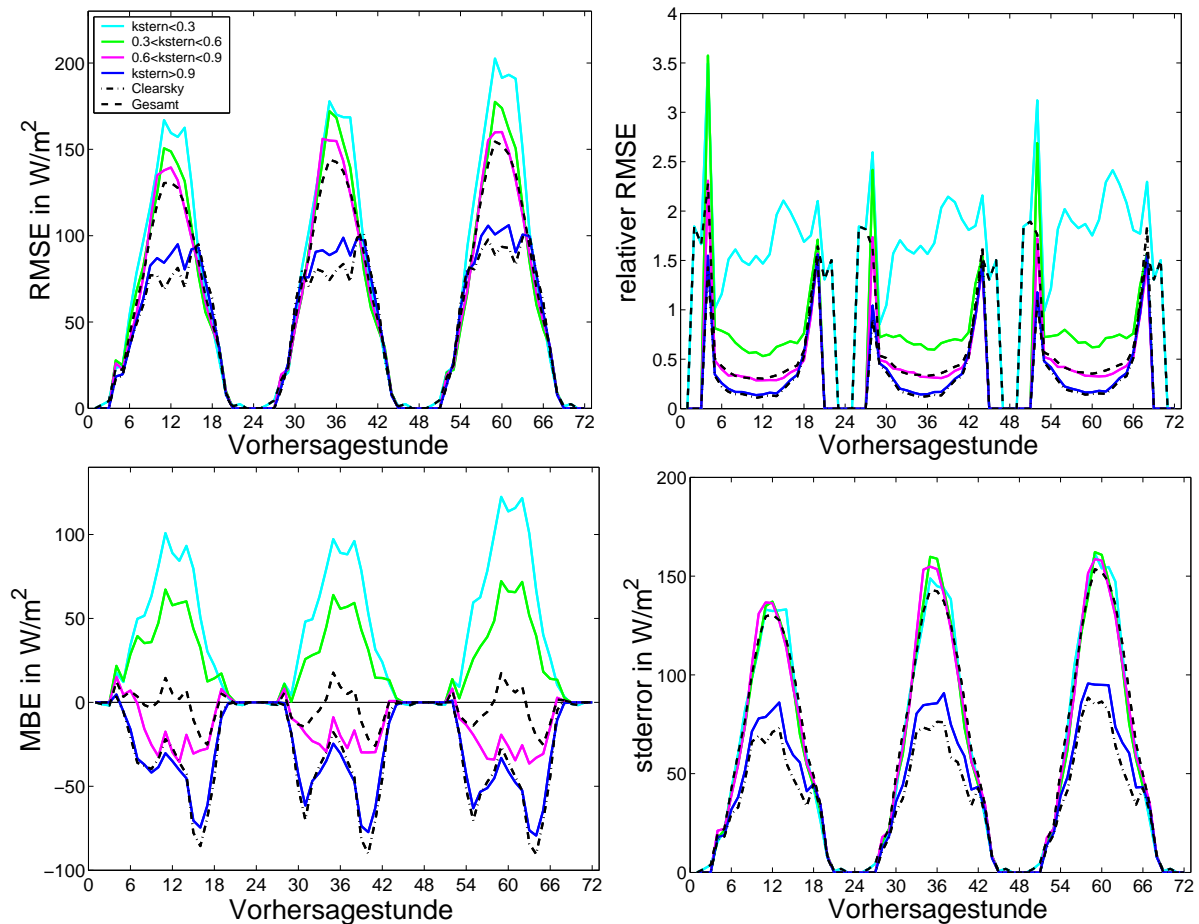


Abbildung 6.6: Darstellung des absoluten und relativen $RMSE$, des MBE und des $stderror$ in $[W/m^2]$ über der Vorhersagestunde und für das Jahr 2003. Die Darstellungen unterscheiden zwischen dem gesamten und dem Clearsky-Datensatz sowie vier k^* -Klassen. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

einen Clearsky-Index von $k^* < 0.6$ haben einen deutlichen positiven Bias. Dabei gilt je niedriger der Clearsky-Index bzw. je höher die Bewölkung, desto höher der Bias. Insbesondere für stark bewölkte Situationen mit $k^* < 0.3$ führt die starke Überschätzung der Einstrahlung bei geringer absoluter Einstrahlung zu einem hohen relativen $RMSE$. Für Situationen mit wenig bis keiner Bewölkung entsprechend eines Clearsky-Index von $k^* > 0.6$ dreht sich das Vorzeichen des Bias um und er geht deutlich ins Negative. Hierbei gilt: Je höher der Clearsky-Index bzw. je klarer die Atmosphäre, desto negativer der Bias. Anders ausgedrückt, die Einstrahlung wird im Falle starker Bewölkungsanteile klar überschätzt, während die Einstrahlung im Fall weniger bis keiner Bewölkung unterschätzt wird. Für den gesamten Datensatz mitteln sich diese Effekte näherungsweise heraus. Das bedeutet, dass im Vergleich zur realen Situation zu oft eine mittlere Bewölkung modelliert wird, während eindeutige Situationen mit keiner oder starker Bewölkung nicht ausreichend repräsentiert sind. Dies verdeutlicht auch die Abb. 6.7, die darstellt, wie sich

die Verteilung des vorhergesagten Clearsky-Index von dem tatsächlichen unterscheidet. Der Clearsky-Index des satelliten-gestützten Heliosat-Verfahrens wird mit dem Clearsky-Index verglichen, der über die vorhergesagte Einstrahlung nach Gl. (3.3) bestimmt wird. Die Verteilung von vorhergesagtem und über Messung bestimmten Clearsky-Index stimmen nicht überein.

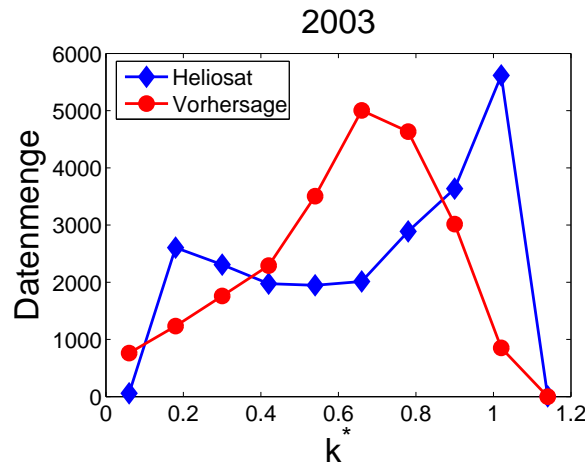


Abbildung 6.7: Darstellung der Datenmenge in Abhängigkeit vom Clearsky-Index k^* für die Vorhersage (rot) und des satelliten-gestützten Heliosat-Verfahrens (blau). Diese Auswertung ist gültig für das Jahr 2003 und für einen Sonnenstand $18^\circ < \text{sunel} < 24^\circ$. Der Clearsky-Index ist in 10 Bins mit einer Breite von je 0.12 zusammengefasst.

Des Weiteren fällt bei Betrachtung des MBE in Abb. 6.6 auf, dass die Maxima im Bias für die Klasse mit $k^* > 0.9$ in den Vormittags- und Nachmittagsstunden liegen, während die Maxima für die anderen Klassen eher in der Mittagszeit liegen. Dies deutet darauf hin, dass die Einstrahlung im bewölkungsfreien Fall zur Mittagszeit, also zum Zeitpunkt der höchsten Einstrahlung, relativ gut modelliert wird, während es in den Vormittags- und Nachmittagsstunden zu einer deutlicheren Unterschätzung der Einstrahlung kommen kann. Dies bestätigen entsprechende Feststellungen aus Kapitel 6.1.2.

Zusammenfassung

Aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die Vorhersagequalität vom Sonnenstand, der Wolkenvariabilität und dem Clearsky-Index abhängig ist. Über diese Abhängigkeiten lassen sich bereits unterschiedliche Situationen verschiedener Vorhersagegüte identifizieren.

Es konnte gezeigt werden, dass der absolute $RMSE$ und $stderror$ einen Tagesgang aufweist, der vom Sonnenstand und damit von der absoluten Einstrahlung abhängig ist. Für niedrige Sonnenstände und einer sehr geringen absoluten Einstrahlung ist der relative $RMSE$ sehr hoch. Dagegen ist der relative $RMSE$ für Sonnenstände $> 30^\circ$ und mit einer hohen absoluten Einstrahlung gering.

Die Genauigkeit der Vorhersage nimmt mit zunehmender Wolkenvariabilität ab. Wolkenfreie Situationen und Fälle geringer Variabilität zeigen vormittags und nachmittags eine deutliche Unterschätzung der Einstrahlung, da zu viele Wolken in diesen Fällen vorhergesagt werden.

Anhand des Clearsky-Index lassen sich ebenfalls deutliche Unterschiede in der Vorhersagequalität feststellen. Insbesondere mittels des *MBE* konnte gezeigt werden, dass die Einstrahlung in Situationen mit hoher bis mittlerer Bewölkung im Mittel um ca. 100 W/m^2 überschätzt wird, während sich dies für wenig bis nicht bewölkte Situationen gerade umkehrt. Die Einstrahlung wird in diesen Fällen im Mittel um ca. 80 W/m^2 unterschätzt. Als Ursache hierfür konnte festgestellt werden, dass das Modell zu oft eine mittelstarke Bewölkung modelliert und damit die modellierte Verteilung von k^* nicht mit der realen übereinstimmt.

Zudem konnte bestätigt werden, dass reine Clearsky-Situationen die besten Resultate erzielen. Diese Situationen werden nicht nur über eine Größe wie der Wolkenvariabilität und der Bedingung ($\text{var} < 0.03$) bestimmt, sondern über eine Kombination von zwei situationsbeschreibenden Variablen. Neben der Variabilität findet noch der Clearsky-Index k^* über die Bedingung ($k^* > 0.9$) Verwendung. Diese Feststellung und die gefundenen Abhängigkeiten von einzelnen Variablen lassen erwarten, dass sich unterschiedliche Vorhersagequalitäten über verschiedene Kombinationen von Variablen bestimmen lassen. Daher wird im folgenden Kapitel analysiert, welche Aufschlüsse über solche Variablenkombinationen möglich sind, und ob darüber zusätzliche Informationen der Vorhersage mitgegeben werden können, die die Qualität der Vorhersage beschreiben.

6.2 Zweidimensionale Fehleranalyse

Um einen besseren Einblick in die Abhängigkeit der Vorhersagegüte von der aktuellen meteorologischen Situation zu gewinnen, wird in diesem Kapitel eine 2d-Analyse durchgeführt. Dabei werden die unterschiedlichen Fehlermaße in Abhängigkeit von zwei Parametern dargestellt und untersucht anstatt, wie in Kapitel 6.1, nur jeweils von einer Größe. Neben der Untersuchung solcher Variablenkombinationen wird geprüft, ob der Vorhersage eine Qualitätsinformation mitgegeben werden kann.

Es werden mit Bias und *stdbias* sowohl die systematischen Anteile des Fehlers als auch über Dispersion und Korrelation die statistischen Anteile des Fehlers betrachtet. Die in Kapitel 2.4 vorgestellten Fehlermaße werden in Abhängigkeit von jeweils zwei verschiedenen Größen ähnlich einer Untersuchung von [Lorenz (2004)] analysiert. Zunächst werden die verschiedenen Anteile des Fehlers in Bezug auf Sonnenstand und Variabilität untersucht. Die Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen die Ergebnisse für 2004. Die Resultate für das Jahr 2003 sind ähnlich und der Abb. 9.7 sowie Abb. 9.8 im Anhang zu entnehmen.

Die beiden oberen Darstellungen in Abb. 6.8 zeigen den *rRMSE*. Die linke Darstellung zeigt den *rRMSE* in dem Bereich von 0 bis 1.7. Dabei wird deutlich, dass die extremen Fehler zwischen 0.6 und 1.7 nur in einem sehr schmalen Bereich für Sonnenstände kleiner 10° und Variabilitäten größer 0.02 entstehen. Dies bestätigt die in Kapitel 6.1.1 gefundenen sehr hohen relativen Fehler für niedrige Sonnenstände. Für Variabilitäten kleiner 0.02 und Sonnenstände größer 10° sinkt der *rRMSE* auf Werte um 0.1. Um im gesamten Bereich Unterschiede deutlicher erkennen zu können, wird der darzustellende Bereich über die Farbskala limitiert. Aufgrund der sehr hohen Fehler für niedrige Sonnenstände, werden die Farbskalen der anderen Fehlermaße ebenfalls beschränkt, um Differenzen für den restlichen Bereich noch erkennen zu können. Zur Vollständigkeit werden jeweils die Maximalwerte des betrachteten Fehlermaßes mit angegeben. Entsprechend zeigt die rechte obere Darstellung in Abb. 6.8 den *rRMSE* im Bereich zwischen 0 und 0.7. Dadurch wird ersichtlich, dass der *rRMSE* für relativ große Bereiche um ca. 0.4 liegt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass der relative Fehler für Sonnenstände *sunel* $< 20^\circ$ stark zunimmt. Bezüglich der Variabilität ist der relative Fehler sehr gleichmäßig, was die Beobachtung in Kapitel 6.1.2 bestätigt. Dort konnte festgestellt werden, dass eine erhöhte Differenzierung nach Wolkenvariabilitäten für *var* > 0.03 zu keinen signifikanten Unterschieden führt. Ebenso wie dort kann auch hier eine Abnahme des Fehlers für homogene Bewölkungssituationen mit kleinen Variabilitäten festgestellt werden.

Die linke untere Darstellung in Abb. 6.8 zeigt den *rMBE*. Auch hier treten die höchsten Fehler im Bereich niedriger Sonnenstände auf, der Maximalwert liegt bei ca. 1.0. Zudem wird deutlich, dass in diesem Bereich für Sonnenstände kleiner 10° und Variabilitäten größer 0.02 die vorhergesagte Einstrahlung massiv überschätzt wird. Dagegen wird die Einstrahlung etwa im Bereich $10^\circ < \textit{sunelev} < 20^\circ$ über alle Variabilitäten mit einem *rMBE* von bis zu -0.2 unterschätzt. Für Sonnenstände über ca. 20° ist wieder eine Überschätzung um etwa 0.1 zu erkennen. Insgesamt lässt sich für den Bias eine starke

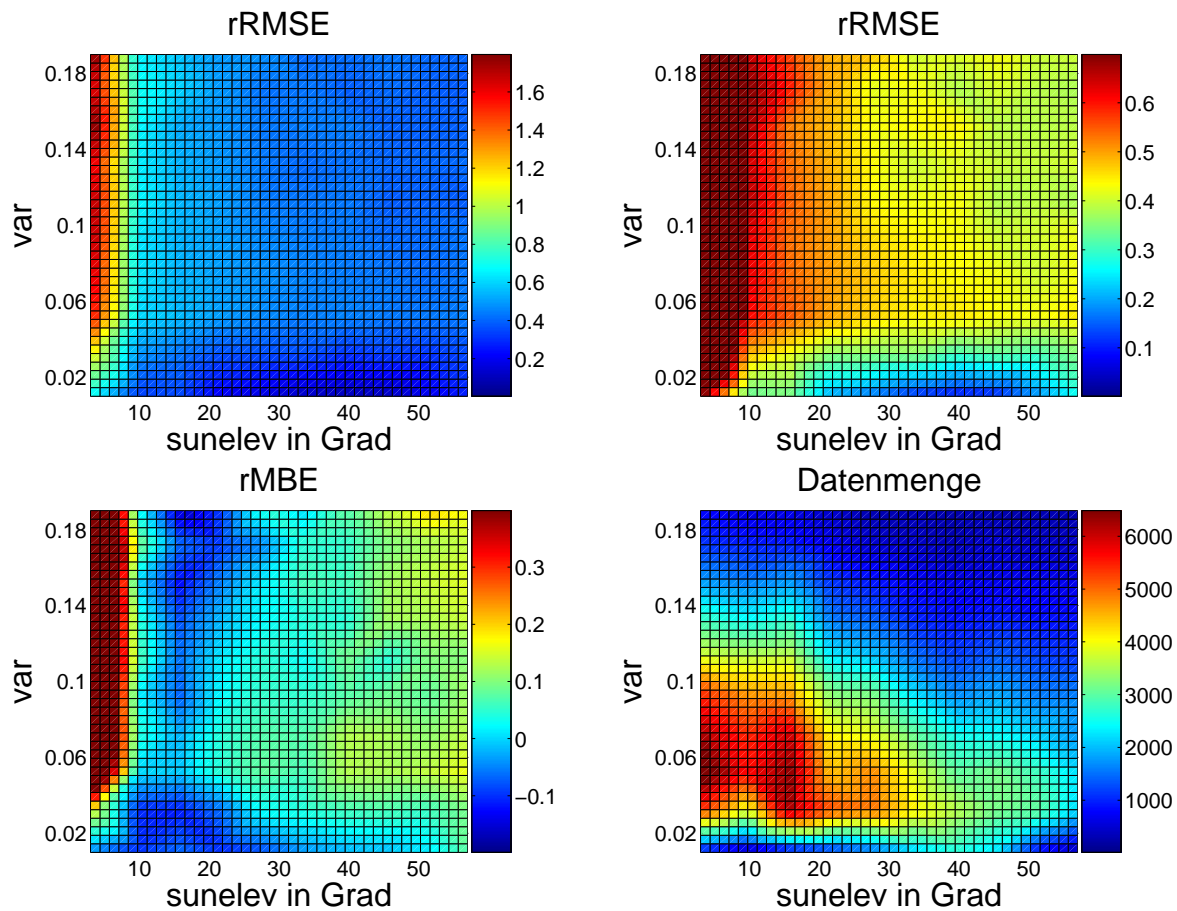


Abbildung 6.8: Darstellung von $rRMSE$, $rMBE$ und Datenmenge in Abhängigkeit von $sunelev$ und var für 2004. Die Farbskalen der Fehlermaße für den $rRMSE$ oben rechts und den $rMBE$ unten links wurden eingeschränkt. Die Maximalwerte liegen für den $rRMSE$ bei ca. 1.7 und den $rMBE$ bei 1.0. Es ist auf die unterschiedlichen Farbskalen zu achten.

Sonnenstandsabhängigkeit feststellen. Für homogene Situationen mit geringen Variabilitäten lässt sich eine deutliche Unterschätzung finden, welche die Ergebnisse für wolkenfreie Fälle in Kapitel 6.1, die mit geringen Variabilitäten verknüpft sind, bestätigt. Die rechte untere Darstellung in Abb. 6.8 gibt die Datenmenge in Abhängigkeit von $sunelev$ und var an. Die größte Datenmenge findet sich für Sonnenstände von 0° bis etwa 40° und für Variabilitäten von 0 bis ca. 0.13.

Die Darstellungen in Abb. 6.9 zeigen den relativen $stderror$, $stdbias$, die Dispersion und die Korrelation $korr$ in Abhängigkeit von $sunelev$ und var . Die Korrelation wird als Differenz zwischen eins und der Korrelation ($1 - korr$) aufgetragen. Diese Darstellung verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Korrelation und den Fehlermaßen. Es wird deutlich, dass der $stderror$ und die Dispersion im Wesentlichen mit dem Erscheinungsbild des $rRMSE$ aus Abb. 6.8 übereinstimmen. Der $rMBE$ trägt wesentlich stärker zum

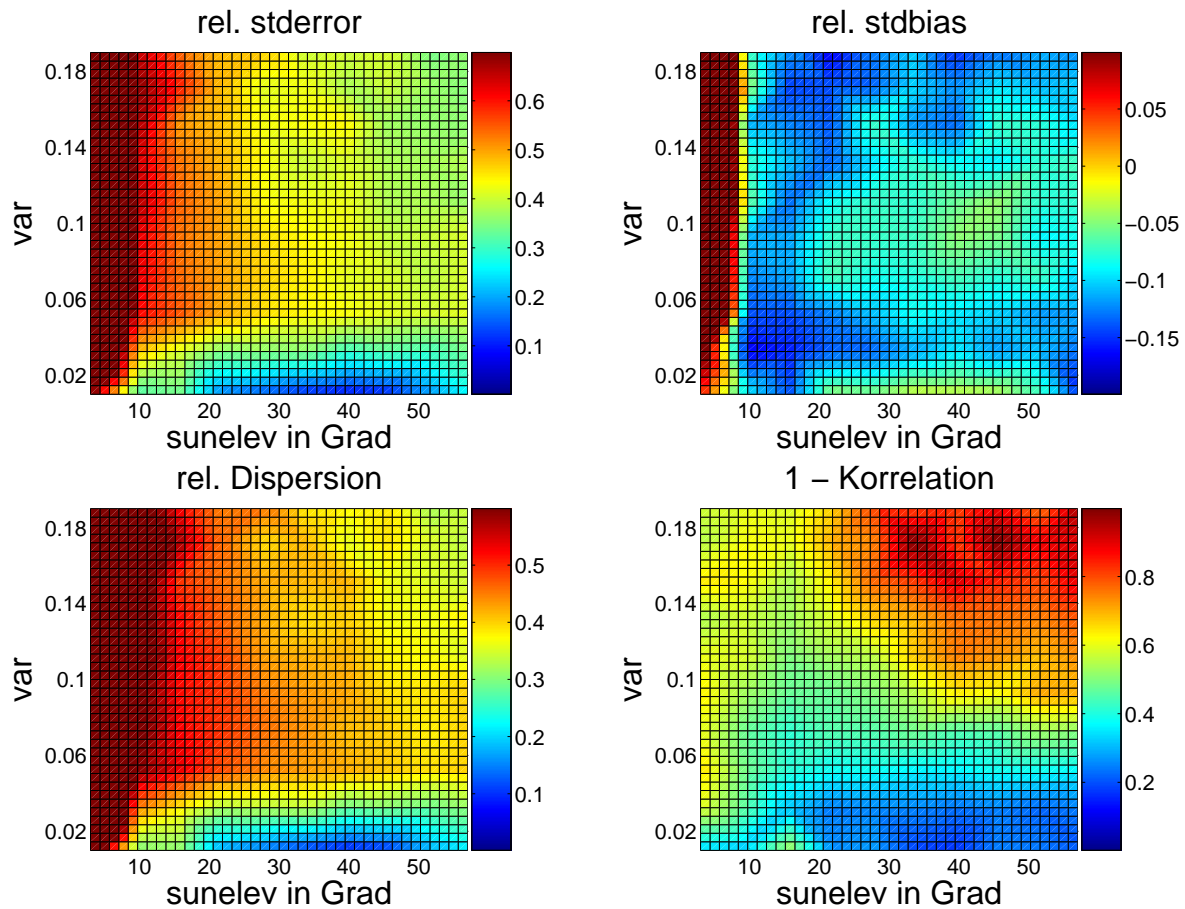


Abbildung 6.9: Darstellung von relativem *stderror*, *stdbias*, der *Dispersion* und von $1 - \text{korr}$ für 2004. Die Farbskalen wurden für die Fehlermaße außer für $1 - \text{korr}$ eingeschränkt. Die Maximalwerte liegen für den relativen *stderror* bei 1.4, den *stdbias* bei 0.6 und der *Dispersion* bei 1.4. Es ist auf die unterschiedlichen Farbskalen zu achten.

Fehler bei als der *stdbias*. Das Maximum der Mengenverteilung aus Abb. 6.8 stimmt mit einer Korrelation von etwa 0.4 bis 0.9 in Abb. 6.9 überein. Die *Dispersion* oder der Anteil durch Phasenfehler am Gesamtfehler ist wesentlich stärker ausgeprägt als der Amplitudenfehler, der über den *MBE* ausgedrückt wird.

Wie zuvor die Wolkenvariabilität var , kann auch der Clearsky-Index k^* in Abhängigkeit vom Sonnenstand dargestellt werden. Die Abb. 6.10 zeigt die entsprechenden Darstellungen des $rRMSE$ und des $rMBE$. Bezüglich der Variabilität ist für diese Fehlermaße hauptsächlich eine Variation in Abhängigkeit vom Sonnenstand zu beobachten. In Abb. 6.10 ist dagegen eine stark ausgeprägte Abhängigkeit in der Vertikalen, also in k^* , festzustellen, da hier eindeutiger Fälle verschiedener Qualität unterschieden werden können. Die an dieser Stelle zu beobachtende starke Abhängigkeit des relativen Fehlers von k^* bestätigt die Ergebnisse von Kapitel 6.1.3. Dort wurde zudem deutlich, dass auch der

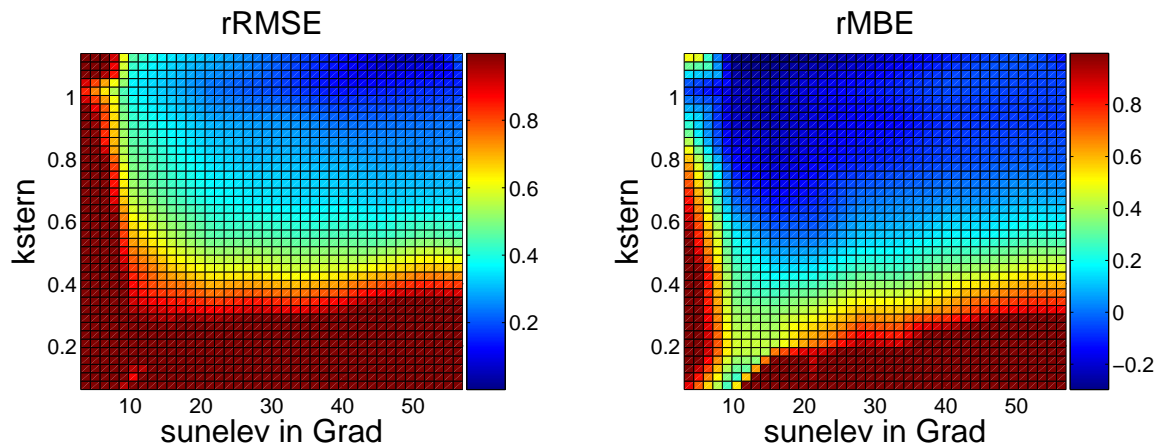


Abbildung 6.10: Darstellung von $rRMSE$ und $rMBE$ in Abhängigkeit von $sunelev$ und k^* für 2004. Die Farbskalen sind eingeschränkt. Die Maximalwerte liegen für den $rRMSE$ und dem $rMBE$ bei 6. Es ist auf die unterschiedlichen Farbskalen zu achten.

absolute Fehler mit steigendem Clearsky-Index sinkt.

Bias-Korrektur

Die Abhängigkeit des $rMBE$ von Sonnenstand und k^* lässt nun vermuten, dass sich zumindest der Bias über eine entsprechende Korrektur gut verringern lässt. Das hier zur Analyse hinzugezogene k^* basiert jedoch auf gemessenen Daten. Damit lassen sich also nur Vorhersagen im Nachhinein korrigieren. Zu einer Bias-Korrektur einer operationellen Vorhersage benötigt man aber Clearsky-Werte auf Basis der vorhergesagten Globalstrahlung. Eine Bias-Korrektur auf dieser Basis ist jedoch nicht möglich, da sich der Fehler der Globalstrahlungsvorhersage auf den vorhergesagten Clearsky-Index k_{pred}^* überträgt. Für die Jahre 2003 bzw. 2004 ergibt sich ein $rRMSE$ für k_{pred}^* in Bezug auf k^* bestimmt über gemessene Bodenwerte zu 0.48 bzw. 0.55. Diese Problematik zeigte sich bereits in den unterschiedlichen Verteilungsfunktionen von realen und vorhergesagten Clearsky-Index in Abb. 6.7 in Kapitel 6.1.3. Während mittlere Bewölkungssituationen über die Vorhersage überrepräsentiert sind, sind die eindeutigeren realen Fälle von sehr starker Bewölkung und wolkenfreien Situationen unterrepräsentiert.

Qualitätsinformation

Der vorhergesagte Parameter k_{pred}^* lässt sich dagegen sehr gut nutzen, um die Vorhersagegüte der vorhergesagten Globalstrahlung über einen situationsabhängigen $rRMSE$ zu beschreiben. Die Abb. 6.11 zeigt den $rRMSE$, den $rMBE$ und die Datenmenge in Abhängigkeit von k_{pred}^* und $sunel$. Der Betrag und die Verteilung des $rRMSE$ ist näherungsweise vom betrachteten Jahr unabhängig. Zudem ähnelt die Verteilung sehr stark der aus Abb. 6.10. Der $rMBE$ ist relativ gleichmäßig verteilt. Damit ist es möglich, die

Vorhersagequalität der Globalstrahlung situationsabhängig anhand von k_{pred}^* zu beschreiben. So sind die strahlungsintensivsten Fälle für mittlere und hohe Sonnenstände über 20° und wenig Bewölkung ($k^* > 0.8$) mit einem sehr geringen $rRMSE$ von ca. 0.1 verbunden. Die Situationen mit sehr hohen Fehlern beschränken sich dagegen auf Fälle mit jeweils sehr niedrigen absoluten Einstrahlungswerten. Dies sind zum einen Situationen mit niedrigen Sonnenständen unter 20° und zum anderen Fälle mit sehr starker Bewölkung mit Clearsky-Werten $k^* < 0.3$. Des Weiteren liegt der Datenschwerpunkt im Bereich geringer bis mittlerer Fehler. Über k_{pred}^* und dem deterministischen Sonnenstand lässt sich der vorhergesagten Einstrahlung die zu erwartende Genauigkeit zuordnen. Diese Angabe des Vorhersagefehlers stellt im operationellen Betrieb eine wichtige Information für die Anwender dar.

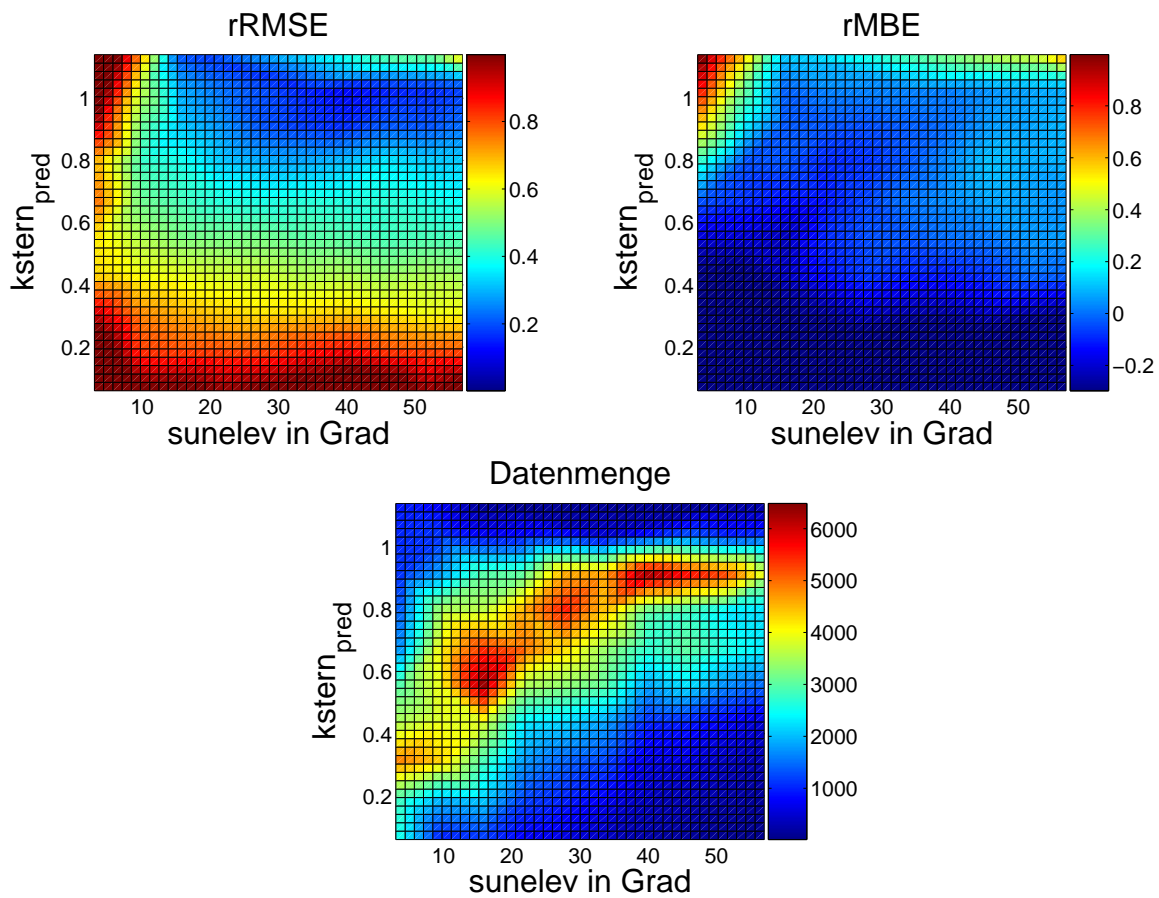


Abbildung 6.11: Darstellung des $rRMSE$, des $rMBE$ und der Datenmenge in Abhängigkeit von $sunelev$ und k_{pred}^* für 2003. Der Maximalwert liegt für den $rRMSE$ bei 1.2.

Die Art der 2d-Darstellung gibt auch die Möglichkeit, noch einmal zu verdeutlichen, in welchen Punkten sich die analysierten Daten bzgl. der Jahre 2003 und 2004 unterscheiden. Die Abb. 6.12 zeigt Darstellungen der Datenmenge für 2003 und 2004 in Abhängigkeit

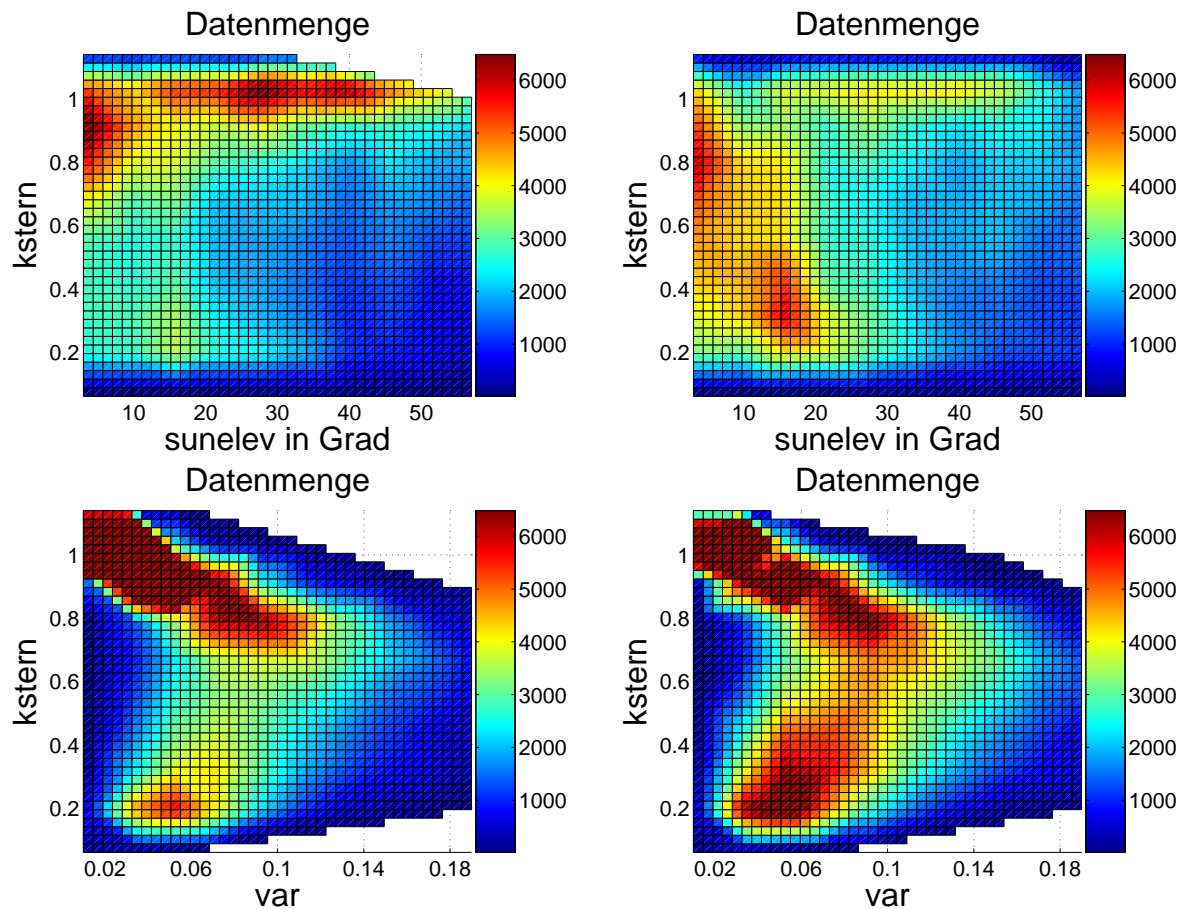


Abbildung 6.12: Darstellungen der Datenmengen für 2003 (links) und 2004 (rechts). Die oberen Darstellungen zeigen die Abhängigkeit von sunelev und k^* , die unteren in Bezug auf var und k^* .

vom Sonnenstand und k^* sowie von der Variabilität var und k^* . Die obere linke Darstellung zeigt, dass es 2003 mehr Situationen mit niedriger oder keiner Bewölkung gab. Der Schwerpunkt liegt in einem Bereich über alle Sonnenstände von $0.8 < k^* < 1.1$. Dagegen gibt es für 2004 auch für einen niedrigeren Bereich von k^* größere Datenmengen. Die untere linke Darstellung verdeutlicht die Abhängigkeit der Datenmenge zu k^* und var für 2003. Hier wird sichtbar, dass niedrige Variabilitäten hauptsächlich mit Fällen geringer Bewölkung verknüpft sind. Dies gilt so aber nicht für 2004. Dort zeigt sich ebenfalls ein Schwerpunkt für niedrige Variabilitäten und hohe Werte für k^* , also Situationen geringer Bewölkung. Ein ähnlich stark ausgeprägter weiterer Schwerpunkt befindet sich jedoch zusätzlich bei niedrigen k^* Werten und Fällen höherer Bewölkung und niedriger Variabilität. Dies macht noch einmal deutlich, dass es sinnvoll ist, die Datensätze der beiden Jahre 2003 und 2004 getrennt voneinander zu analysieren. Im Vergleich zwischen den Datenmengen von k^* und dem vorhergesagten k_{pred}^* wird abermals deutlich, dass über alle Sonnenstände mehr mittlere bewölkte Situationen vorhergesagt werden als real sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich über die Darstellung des Fehlers in Abhängigkeit von zwei Parametern Situationen unterschiedlicher Vorhersagegüte identifizieren lassen. Es konnte festgestellt werden, dass die vorhergesagte Einstrahlung für Sonnenstände kleiner 10° sehr stark überschätzt wird. Allerdings führen die sehr hohen relativen Fehler in diesen Fällen wegen der niedrigen Einstrahlung nur zu geringen absoluten Fehlern. Dies ist ein wesentlicher Vorteil für Anwendungen, bei denen Absolutwerte der Einstrahlung Verwendung finden. Für weite Bereiche liegt zudem nur eine moderate Überschätzung von ca. 10 % vor. Für niedrige Variabilitäten bis 0.04 und mittlere bis hohe Sonnenstände werden gute Ergebnisse mit einem $rRMSE$ unter 0.3 erreicht. Tendenziell steigt der Fehler mit zunehmender Bewölkung. Der statistische Anteil am Gesamtfehler ist stärker ausgeprägt als der systematische Anteil. Über die Bestimmung des vorhergesagten Clearsky-Indexes k_{pred}^* ist es möglich, der Einstrahlung eine zu erwartende situationsabhängige Genauigkeit zuzuordnen. Für die Fälle hoher absoluter Einstrahlung bei wenig Bewölkung ($k^* > 0.8$) und mittleren bis hohen Sonnenständen ($sunelev > 20^\circ$) liegt der $rRMSE$ um 0.1. Die Angabe des Vorhersagefehlers ist eine wichtige Information, die es möglichen Anwendern erlaubt, die Vorhersage optimal einzusetzen.

6.3 Cluster-Analyse

In diesem Kapitel soll die Möglichkeit untersucht werden, ob und inwiefern eine Cluster-Analyse dazu geeignet ist, verschiedene Fälle der Vorhersagequalität anhand gemessener Größen und die dazugehörigen meteorologischen Situationen zu unterscheiden. Die Cluster-Analyse ist eine Methode, um Objekte mit ähnlichen Eigenschaften zu partitionieren. Sie wird oft in klimatologischen Untersuchungen verwendet [Yarnal (1993)], [Kalkstein et al. (1987)], [Lange (2003)] und es gibt eine Reihe verschiedener Techniken [Everitt (1974)].

6.3.1 Verfahrensbeschreibung

In dieser Arbeit wurde eine sogenannte k-means Cluster-Analyse durchgeführt. Die k-means oder k-Mittelwert Cluster-Analyse kann als eine Methode verstanden werden, die eine gegebene Datenmenge partitioniert. Die Datenpunkte werden in k Cluster oder Gruppen separiert. Dabei entstehen keine Baumstrukturen wie bei den hierarchischen Cluster-Methoden, sondern nur eine Ebene von Clustern. Die Anzahl der Cluster k wird dabei von Anfang an festgelegt. Dies führt unter anderem dazu, dass die k-means Cluster-Analyse besonders gut für große Datenmengen verwendet werden kann. Die k-means Analyse behandelt jeden Datenpunkt bzw. Datenpaare als ein Objekt, das einem bestimmten Platz im Raum zugeordnet werden kann. Über das Verfahren wird eine Aufteilung der Objekte durchgeführt, so dass die Objekte innerhalb eines Clusters so dicht wie möglich zueinander liegen und so weit entfernt wie möglich von den Objekten in den anderen Clustern. Als Standard für das Abstandsmaß wird das euklidische Maß genutzt:

$$d(x, y) = |x - y| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6.1)$$

Jeder Cluster wird über die sich in ihm befindenden Objekte und über sein Zentrum definiert. Das Zentrum oder das Centroid ist für jeden Cluster der Punkt, an dem die Summe der Distanzen von allen Objekten in dem Cluster ein Minimum besitzt. Ein iterativer Algorithmus minimiert die Summen der Distanzen zwischen den Objekten und dem Centroid für jedes Cluster. Der Centroid wird dabei für jeden Iterationsprozess neu bestimmt. Der Algorithmus bewegt die Objekte zwischen den Clustern so lange bis der Betrag der Summe nicht mehr weiter verringert werden kann. Das Ergebnis ist ein Satz von Clustern, die kompakt und idealerweise eindeutig voneinander getrennt sind. Der zu analysierende Datensatz besteht aus Zeitreihen unterschiedlicher Größen und Parameter. In dieser Studie werden neben den Zeitreihen von vorhergesagter Globalstrahlung und den Bodenmessungen noch Zeitreihen unterschiedlicher Parameter dem zu analysierenden Gesamtdatensatz hinzugefügt. Dabei handelt es sich um Parameter, die geeignet sein können, unterschiedliche meteorologische Situationen zu charakterisieren. Entsprechend

finden verschiedene Kombinationen von den bereits bekannten Größen var , $sunelev$ und k^* Verwendung.

Um bewerten zu können, wie gut die bestimmten Cluster voneinander getrennt sind, kann der sogenannte Silhouette-Wert $silh$ genutzt werden. Dieser Wert ist ein Maß dafür, wie dicht jedes Objekt in einem Cluster zu den Objekten in einem benachbarten Cluster liegt. Der Silhouette-Wert ist wie folgt definiert:

$$silh(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max[a(i), b(i)]} \quad (6.2)$$

Dabei ist $a(i)$ die mittlere Distanz zwischen dem i -ten Objekt und allen anderen Objekten in einem der k Cluster und $b(i)$ ist die minimale mittlere Distanz zwischen dem i -ten Objekt und allen anderen Objekten in einem der anderen Cluster [Kaufmann (1990)]. Entsprechend der Definition reicht der Wertebereich von $+1$ bis -1 . Ein Wert $silh = +1$ bedeutet, dass das betrachtete Objekt sehr weit von benachbarten Clustern entfernt ist, $silh = 0$ beschreibt Objekte, die nicht eindeutig dem einen oder anderen Clustern zugeordnet werden können und für Objekte mit $silh = -1$ gilt, dass diese wahrscheinlich einem falschen Cluster zugeordnet wurden. Jedem Objekt kann also ein Silhouette-Wert zugeordnet werden, was entsprechend grafisch dargestellt werden kann. Um nun unterschiedliche Lösungen miteinander zu vergleichen, können die einzelnen Silhouette-Werte zu einem Mittelwert zusammengefasst werden. Die Lösung mit dem höheren mittleren Silhouette-Wert ist dann zu bevorzugen.

Die k -means Cluster-Analyse ist eine schnelle und einfache Methode und wird daher im Rahmen dieser Arbeit als eine zusätzliche Methode zur Fehleranalyse verwendet und getestet. Es müssen aber einige mögliche Nachteile dieses Verfahrens erwähnt werden. Zum einen ist die Anzahl der Partitionen oder Cluster im Voraus festzulegen. Dies ist besonders dann ungünstig, wenn über die Daten wenig bekannt ist. Andererseits kann dies auch ein Vorteil sein, da die Komplexität der Antwort beschränkt werden kann. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass bei der Iteration nur ein lokales Minimum gefunden wird. Die Güte dieser lokalen Minima ist abhängig vom Startpunkt, der wiederum zufällig gewählt wird. Um nun nicht ein schlechtes lokales Minimum zu finden, wird der Algorithmus häufig mehrmals ausgeführt und nur das beste Clustering ausgewählt. Zur Vermeidung eines ungünstigen lokalen Minimums wurden im Rahmen dieser Untersuchung jeweils fünf bis zehn Durchläufe berechnet.

6.3.2 Anwendung für Strahlungsvorhersage

Der über die Cluster-Analyse zu partitionierende Datensatz kann unterschiedliche Größen und Parameter beliebiger Anzahl beinhalten. Ein erster Schritt muss also sein, festzustellen, welche Kombination von Parametern für die weitere Verwendung am besten geeignet ist. Dazu muss die Anzahl der Cluster festgelegt werden. Hier wurde zunächst eine Clusteranzahl von $k = 3$ gewählt. Motivation dafür ist, dass oft drei Bewölkungssituationen von wolkenfrei über durchbrochen bewölkt bis stark bewölkt unterschieden werden. Der mittlere Silhouette-Wert wurde insgesamt für 8 verschiedene Kombinationen von Parametern bestimmt. Die Kombinationen beinhalten immer die Daten der vorhergesagten

Globalstrahlung sowie der Bodenmessung, da die Vorhersagequalität über die Differenz dieser Datenpunkte bestimmt ist. Zusätzlich gehen in unterschiedlicher Kombination Informationen über die Wolkenvariabilität, den Sonnenstand und die Wolkenbedeckung ein. Die Tab. 6.1 gibt einen Überblick der verwendeten Kombinationen.

Kombination 1	Vorhersage, Boden, var
Kombination 2	Vorhersage, Boden, var , Vorhersageschritt h
Kombination 3	Vorhersage, Boden, $sunelev$
Kombination 4	Vorhersage, Boden, k^*
Kombination 5	Vorhersage, Boden, var , $sunelev$
Kombination 6	Vorhersage, Boden, var , k^*
Kombination 7	Vorhersage, Boden, $sunelev$, k^*
Kombination 8	Vorhersage, Boden, var , $sunelev$, k^*

Tabelle 6.1: Angabe der Kombinationen von Parametern, für die jeweils die k -means Cluster-Analyse durchgeführt wurde.

In diesem Kapitel werden nur die Resultate für das Jahr 2004 gezeigt, für die entsprechenden Darstellungen des Jahres 2003 wird jeweils auf den Anhang verwiesen. Zur Bewertung der unterschiedlichen Kombinationen wird der mittlere Silhouette-Wert in Abb. 6.13 in Abhängigkeit von der Parameter-Kombination gezeigt. Wie die Ergebnisse des mittleren Silhouette-Wertes für Daten des Jahres 2004 deutlich machen, sind die Unterschiede von $silh$ bzgl. der verschiedenen Kombinationen sehr gering. Die Kombination 2 erzielt das schlechteste Resultat und ist die einzige Variante, die den Vorhersageschritt in Stunden berücksichtigt. Offensichtlich kann in diesem Fall diese zusätzliche Information nicht für eine bessere Partitionierung genutzt werden. Die Kombinationen 1,4 und 6 führen mit $silh = 0.7181$ zum besten Ergebnis. In diesen Fällen sind die situationsbeschreibenden Größen var und k^* involviert. Dagegen sind die Kombinationen 3,5,7 und 8, die den Sonnenstand als Information beinhalten etwas schlechter. Wie in Kapitel 6.1.1 gezeigt, ist der absolute Fehler abhängig vom Sonnenstand und damit von der absoluten Einstrahlung. Des Weiteren liefert der Sonnenstand aber keine relevante Zusatzinformation. Für die weitere Auswertung wird daher die Kombination 6 ausgewählt. Diese erreicht den höchsten Silhouette-Wert und bietet neben den Vorhersage- und Bodendaten die beiden Parameter var und k^* , die geeignet sind, verschiedene Situationen zu unterscheiden.

Ähnlich wie bei der Bestimmung einer geeigneten Kombination von Parametern kann der Silhouette-Wert aufgrund seiner Definition nach Gl. (6.2) auch zur Bestimmung der optimalen Clusteranzahl verwendet werden. Je höher der gemittelte Silhouette-Wert ist, desto stärker sind die Unterschiede zwischen den Clustern ausgebildet. Ein Kriterium könnte also sein, dass die Clusteranzahl gewählt wird, für die der Silhouette-Wert im Vergleich zu den anderen Clusterzahlen ein Maximum annimmt. Der Silhouette-Wert nimmt nun aber, wie Abb. 6.14 zu entnehmen ist, prinzipiell von kleinen zu höheren Clusterzahlen ab [Everitt (1974)]. Damit ist dieses Kriterium allein nicht ausreichend. Stattdessen betrachtet man den Verlauf des Silhouette-Wertes von hohen zu niedrigen Clusterzahlen. Steigt der Silhouette-Wert sprunghaft an, wenn die Clusteranzahl unter einen bestimmten

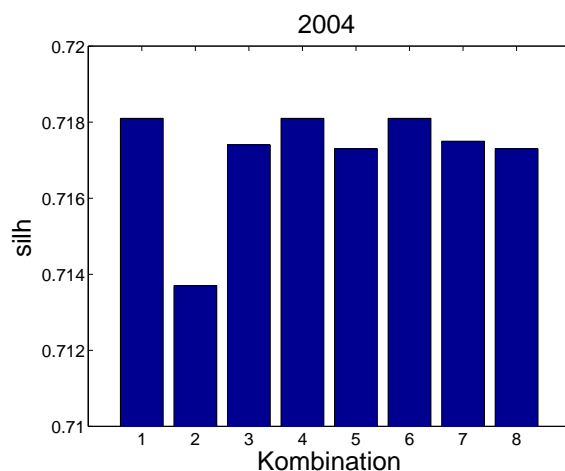


Abbildung 6.13: *Mittlere Silhouette-Werte für das Jahr 2004 und verschiedene Kombinationen von Parametern, die bei der k-means Cluster-Analyse berücksichtigt werden. Tabelle 6.1 gibt die je Kombination verwendeten Parameter an.*

Wert sinkt, so wird man als Anzahl der Cluster diesen Schwellwert wählen. Man sollte bei diesem Vorgehen aber sicher sein, dass man zu einer vorgegebenen Clusteranzahl auch tatsächlich das globale und nicht nur ein lokales Minimum ermittelt hat.

Allgemein lässt sich feststellen, dass das Verhalten des Silhouette-Wertes in Abhängigkeit von der Clusteranzahl einen Bereich von möglichen Clustermengen zur weiteren Analyse identifiziert, anstatt nur einer einzelnen Clusteranzahl. Welche Anzahl von Clustern gewählt wird, hängt vom Ziel der Untersuchung ab. In diesem Fall kann eine zu hohe Wahl der Clusteranzahl dazu führen, dass die Ergebnisse weniger signifikant sind. Zu geringe Datenmengen sind dann in den einzelnen Clustern vorhanden und die Cluster besitzen weniger eindeutige und charakteristische Eigenschaften, die sich im Vorhersagefehler widerspiegeln können. Eine zu gering gewählte Clusteranzahl birgt die Gefahr, dass weniger eindeutig zu differenzierende Situationen unterschieden werden als möglich.

Wie in Abb. 6.14 zu erkennen, ergibt sich beim Übergang von 7 zu 6 Clustern ein Sprung. Dieser Sprung ist an dieser Stelle sowohl für die hier verwendeten Daten von 2004 als auch für 2003 zu erkennen, s. dazu Abb. 9.10 im Anhang. Dieser Sprung definiert nun die Anzahl von 6 Clustern, die für die weiteren Analysen Verwendung findet.

Die Abb. 6.15 zeigt die Silhouette-Werte für jedes Objekt in Abhängigkeit vom Cluster für 2004. Es ist zu erkennen, dass ein großer Anteil der Objekte einen Wert von $silh > 0.8$ zugeordnet werden können. Nur wenige Objekte werden mit $silh < 0$ und damit einem wahrscheinlich falschen Cluster zugeordnet. Es muss nun aber geklärt werden, ob die Aufteilung der Daten in die 6 Cluster insofern sinnvoll ist, als dass auch wirklich meteorologisch unterschiedliche Situationen separiert werden und diese mit einem unterschiedlichen Fehler behaftet sind.

Die Darstellungen in Abb. 6.16 geben für das Jahr 2004 darüber Auskunft, wie gut Situationen verschiedener Vorhersagequalität unterschieden werden können. Abhängig vom

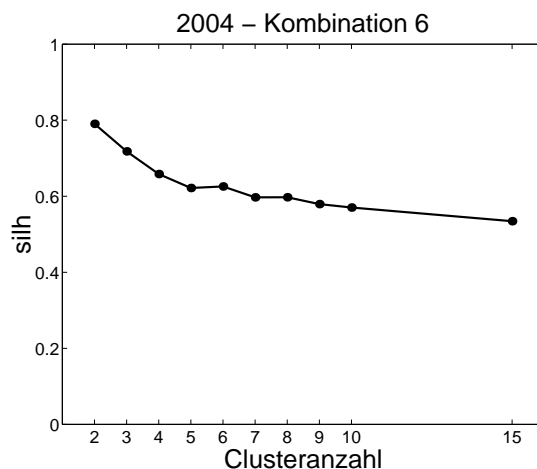


Abbildung 6.14: Der gemittelte Silhouette-Wert in Abhängigkeit von der Clusteranzahl für das Jahr 2004. Es ist ein Sprung beim Übergang von 7 zu 6 Clustern zu erkennen. Dieser Sprung definiert die Anzahl von Clustern, die für die weiteren Analysen Verwendung finden.

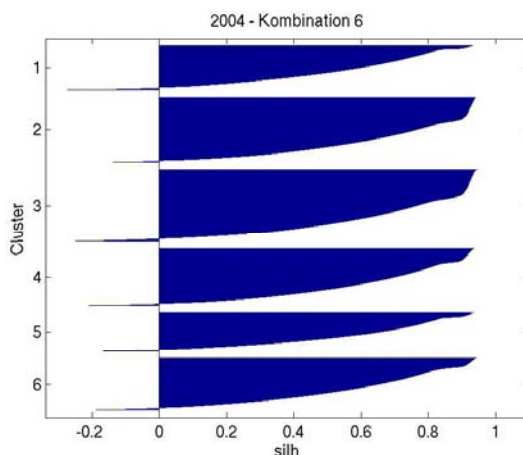


Abbildung 6.15: Darstellung der Silhouette-Werte für die Kombination 6 und 6 Cluster für das Jahr 2004. Jedem Objekt ist in Abhängigkeit vom Cluster ein Silhouette-Wert zugeordnet.

betrachteten Cluster ergeben sich zum Teil deutliche Unterschiede im $rRMSE$. So ist Cluster 3 mit einem $rRMSE$ von ca. 0.78 verbunden, während das Cluster 5 nur einen $rRMSE$ von ca. 0.38 besitzt und der Fehler damit um 40 % niedriger ist. Vier der sechs Cluster liegen aber in einem ähnlichen $rRMSE$ Fehlerbereich von etwa 0.4. Neben der Darstellung des $rRMSE$ geben die anderen Darstellungen in Abb. 6.16 die Teilmenge am Gesamtdatensatz für das jeweilige Cluster und in Abhängigkeit von den Parametern var , $sunelev$, k^* , der Vorhersagestunde und dem Monat an. Dadurch ist zu erkennen, welche Fälle mit hohen und niedrigen Fehlern verknüpft sind und ob bzw. wie Situationen ähn-

licher Vorhersagegüte trotzdem unterschieden werden können. Es ist festzustellen, dass die Variabilität innerhalb der sechs Cluster relativ gleichmäßig verteilt ist. Die Cluster 2 und 6 haben einen etwas geringeren Anteil an Situationen mit $var < 0.05$, dagegen haben die Cluster 1 und 5 in diesem Fall einen eher etwas höheren Anteil. Deutlicher werden die Unterschiede bzgl. des Sonnenstandes. Cluster 3 mit dem höchsten $rRMSE$ beinhaltet hauptsächlich Fälle mit niedrigen Sonnenständen, welches auch in der Verteilung über der Vorhersagestunde zu erkennen ist. Darüber hinaus beschreibt Cluster 3 Fälle in den Wintermonaten, die wiederum durch tiefe Sonnenstände geprägt sind. Die Verteilung über k^* verdeutlicht, dass Cluster 3 zudem hauptsächlich Situationen mit relativ viel Bewölkung berücksichtigt. Es lässt sich also feststellen, dass Situationen mit niedrigen Sonnenständen, hohem Bewölkungsanteil und die Wintermonate eher mit hohen relativen Fehlern behaftet sind. Dies bestätigt auch Cluster 2 mit seinem relativ hohem $rRMSE$ und den zu Cluster 3 ähnlichen Verläufen. Lediglich bzgl. der k^* -Verteilung ist ein wesentlicher Unterschied festzustellen. Neben einem relativ hohen Anteil von niedrigen k^* -Werten wird in Cluster 2 ein sehr hoher Anteil an nicht bewölkten Situationen berücksichtigt. Dies trägt wesentlich zum im Vergleich zu Cluster 3 reduzierten $rRMSE$ bei. Das Cluster 5 beschreibt die Fälle, die mit einem besonders geringem $rRMSE$ verbunden sind. Dies sind im Gegensatz zu den Cluster 2 und 3 hauptsächlich Situationen mit hohen Sonnenständen, eher wenig bis unbewölkte Fälle und liegen im Zeitraum von Früh- bis Spätsommer. Die Cluster 1, 4 und 6 sind im Vergleich zu den anderen drei Clustern eher weniger eindeutig bestimmten Situationen zuzuschreiben. Cluster 1 beschreibt tendenziell ähnliche, aber weniger ausgeprägte Situationen wie Cluster 5. Die Cluster 4 und 6 sind in allen Darstellungen relativ neutral und bis auf Details ähnlich. Die in Abb. 6.16 gezeigten Darstellungen sind für das Jahr 2003 in der im Anhang zu findenden Abb. 9.12 sehr ähnlich.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die k-means Cluster-Analyse nur beschränkt Situationen unterschiedlicher Vorhersagegüte voneinander separieren kann. Die Differenz des $rRMSE$ zwischen den Clustern beträgt bis zu 40 % und die Cluster lassen sich insbesondere unter Berücksichtigung des Sonnenstandes voneinander trennen. Auffällig ist allerdings, dass wolkenfreie Situationen nicht gefunden und einem einzelnen Cluster zugeordnet werden. Wie die Untersuchungen in den vorangegangenen Kapiteln zeigte, sind aber gerade diese Fälle deutlich von den bewölkten Situationen bzgl. der Genauigkeit zu unterscheiden. Die festgestellten vorhandenen Unterschiede in der Genauigkeit über den $rRMSE$ lassen sich alle über die jeweils berücksichtigten Sonnenstände und der damit verbundenen absoluten Einstrahlung erklären. Wie in Kapitel 6.1.1 gezeigt, sind hohe Sonnenstände mit hoher absoluter Einstrahlung mit geringen relativen Fehlern verbunden und niedrige Sonnenstände mit hohen relativen Fehlern bei geringer absoluter Einstrahlung. Im Wesentlichen führt diese Korrelation zu den unterschiedlichen Ergebnissen im $rRMSE$ bezogen auf die verschiedenen Cluster.

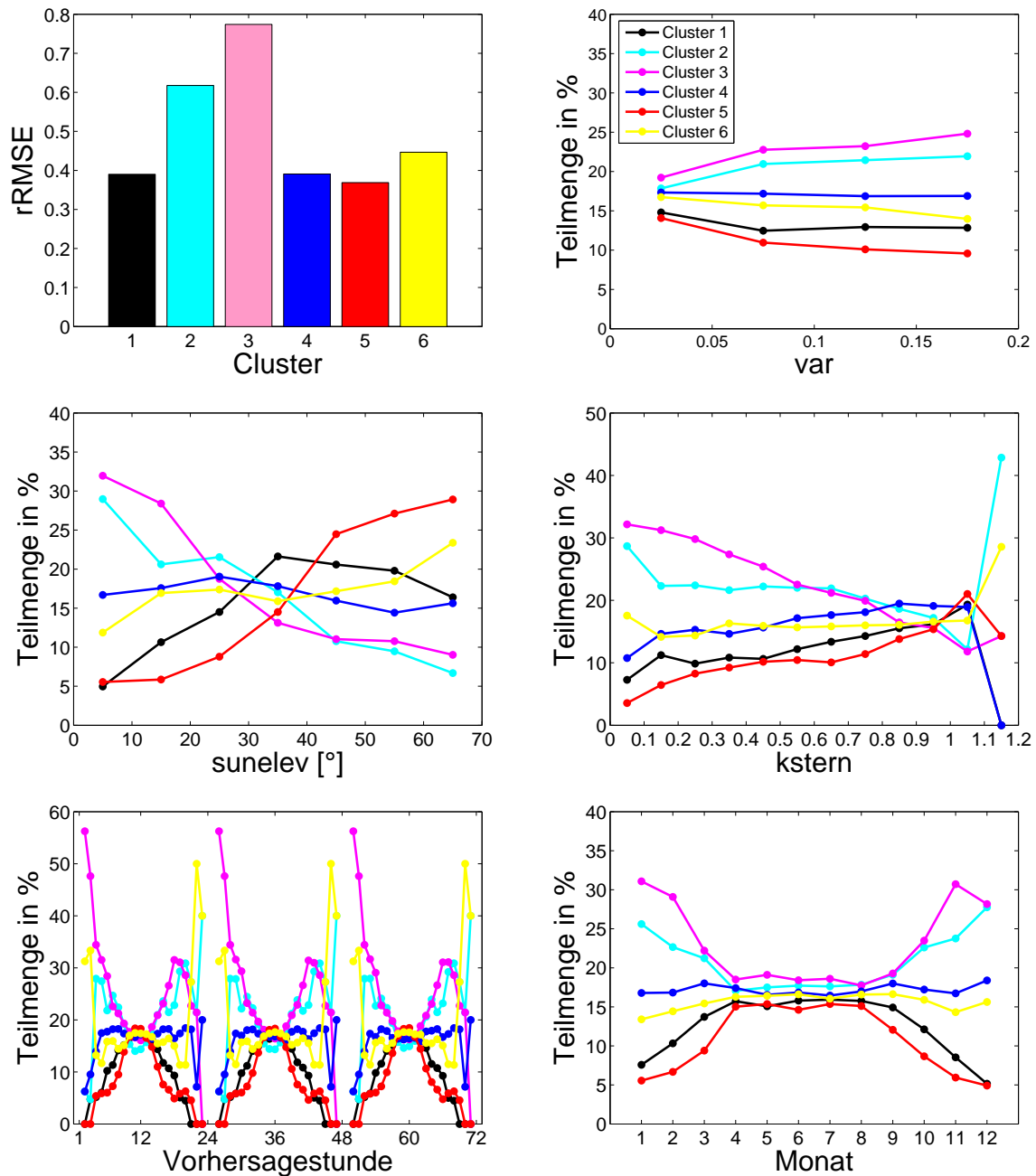


Abbildung 6.16: Darstellung des $rRMSE$ und der Teilmenen am Gesamtdatensatz für das jeweilige Cluster in Abhängigkeit von den Parametern var , $sunelev$, k^* , der Vorhersagestunde und dem Monat für das Jahr 2004 und die Kombination 6. Die Legende oben rechts gilt für alle Darstellungen.

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden drei unterschiedliche Arten der Fehlerdarstellung bzw. -analyse angewandt, um die optimierte, einstündig aufgelöste Globalstrahlung der ECMWF-Vorhersage für Einzelstandorte zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass alle drei Verfahren prinzipiell geeignet sind, Situationen unterschiedlicher Vorhersagegüte zu unterscheiden. Zum Teil können die Ergebnisse einer Analyse über die Resultate einer anderen bestätigt werden. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die 1d- und 2d-Fehleranalyse einen guten Eindruck zum Verständnis der Vorhersagequalität ermöglichen und gegenüber der hier verwendeten Cluster-Analyse zu bevorzugen ist.

Die einstündig und eindimensional aufgelöste Analyse des Fehlers vom Vorhersagezeitpunkt liefert einen detaillierten Einblick in Verlauf und Entwicklung der untersuchten Fehlermaße. Die zusätzlich durchgeführten Klassifizierungen nach verschiedenen Sonnenständen, Variabilitäten und Clearsky-Indizes machen deutlich, dass sich dadurch Fälle unterschiedlicher Vorhersagegüte differenzieren lassen. Insbesondere die Größen *sunel* und k^* sind gut geeignet, unterschiedliche Situationen und damit Fälle unterschiedlicher Vorhersagequalität zu separieren.

Die Ergebnisse der 1d-Analyse konnten im Rahmen der 2d-Analyse bestätigt werden. Zusätzlich konnte hier gezeigt werden, dass die Fälle niedriger Sonnenstände mit einer deutlichen Überschätzung einhergehen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der absolute Fehler aufgrund der geringen Einstrahlung zu diesen Zeitpunkten klein ist. Die meisten Datenpunkte befinden sich in einem moderaten Fehlerbereich mit einem $rRMSE$ um etwa 0.4 und einem $rMBE$ zwischen ca. -0.1 und 0.1. Für wolkenfreie Fälle mit einer geringen Variabilität ($var < 0.02$) und Sonnenständen größer 10° liegt der $rRMSE$ dagegen bei einem sehr niedrigen Wert von 0.1. In Übereinstimmung mit den Resultaten der 1d-Analyse in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitpunkt konnte die 2d-Analyse zeigen, dass der Bias sowohl positive wie negative Werte annimmt. Im Rahmen der 1d- und 2d-Analyse konnte festgestellt werden, dass Fälle mit niedriger Bewölkung bzw. hohen Werten für k^* einen negativen Bias annehmen und Fälle hoher Bewölkung bzw. niedrigen k^* Werten einen positiven Bias. Die detaillierte Aufteilung des Fehlers in der 2d-Analyse verdeutlicht, dass der statistische Anteil am Gesamtfehler gegenüber dem systematischen Anteil überwiegt. Über die Bestimmung des vorhergesagten Clearsky-Index k_{pred}^* ist es möglich, der vorhergesagten Einstrahlung die zu erwartende situationsabhängige Genauigkeit zuzuordnen und damit eine Information zur Qualität der Vorhersage mitzugeben. Für die Fälle hoher absoluter Einstrahlung bei wenig Bewölkung ($k^* > 0.8$) und mittleren bis hohen Sonnenständen ($sunelev > 20^\circ$) liegt der $rRMSE$ um 0.1. Die Angabe des Vorhersagefehlers ist eine qualitativ wichtige Information, die es möglichen Anwendern erlaubt, die Vorhersage optimal einzusetzen.

Die Untersuchung über eine automatisierte k-means Cluster-Analyse zeigt, dass dieses Verfahren prinzipiell zur Separierung der Daten genutzt werden kann. Es entstehen Cluster, die sich um bis zu 40 % in ihrem $rRMSE$ unterscheiden. Die Unterschiede in den

Clustern ergeben sich insbesondere über die Korrelation zwischen Sonnenstand und absoluter Einstrahlung und dem davon abhängigen Fehler. Es konnte bestätigt werden, dass Fälle mit niedrigen Sonnenständen mit einem erheblich höheren Fehler behaftet sind, als Situationen mit hohen Sonnenständen. Die hier durchgeführte Cluster-Analyse ist aber nicht in der Lage, die mit einem sehr geringen Fehler behafteten wolkenfreien Situationen eindeutig einem Cluster zuzuordnen.

7 Diffus- und Direktstrahlungsvorhersage

Neben der bisher betrachteten Globalstrahlung sind auch deren Bestandteile, die Diffus- und Direktstrahlung von Interesse. Die Vorhersage der Direktstrahlung für die Anwendung in Zusammenhang mit solarthermischen Kraftwerken stellt dabei den Schwerpunkt der Untersuchung dar. Daneben ist die Vorhersage der Diffusstrahlung, z.B. für Berechnungen der Strahlung auf geneigte Flächen, von besonderer Bedeutung.

Zur Berechnung der Direktstrahlung wird in diesem Kapitel ein Diffusstrahlungsmodell genutzt, um auf den diffusen und damit auf den bzgl. der Globalstrahlung komplementären Anteil der direkten Strahlung zu schließen. Nach einer einführenden Beschreibung des verwendeten Modells folgt eine Auswertung der Ergebnisse, nachdem das Modell auf die vorhergesagten und optimierten einstündigen Globalstrahlungsdaten des ECMWF angewendet wurde. Die Untersuchungen werden für einen Teildatensatz von drei Bodenstationen durchgeführt.

7.1 Modellbeschreibung

Das hier verwendete Diffusstrahlungsmodell basiert auf den Arbeiten von [Skartveit (1987)]. In vergleichenden Studien zur Ableitung der Diffusstrahlung aus Bodenmesswerten der Globalstrahlung konnte gezeigt werden, dass das Modell von Skartveit und Olseth anderen Diffusstrahlungsmodellen überlegen ist [Hammer (2000)]. Bei dem ursprünglichen Modell handelt es sich um ein Zweiparameter-Modell, das vom Sonnenstand $sunelev$ und dem Clearness-Index k_t abhängig ist. Ähnlich wie der bereits eingeführte Clearsky-Index k^* , ist auch der Clearness-Index ein Transmissionsmaß. Der Clearness-Index bezieht die für den Boden bestimmte Globalstrahlung I_g auf die extraterrestrische Strahlung I_{ext} . Damit erhält man ein Maß für die Schwächung der Solarstrahlung durch Absorption und Streuung in der Atmosphäre. Der Clearness-Index ist definiert als

$$k_t = \frac{I_g}{I_{ext}}. \quad (7.1)$$

Die extraterrestrische Strahlung ergibt sich über die Solarkonstante $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ und dem Sonnenzenitwinkel θ_z :

$$I_{ext} = I_0 * \epsilon * \cos\theta_z \quad (7.2)$$

Der Exzentrizitätsfaktor ϵ berücksichtigt die Änderung des Abstandes von Sonne und Erde aufgrund der ellipsenförmigen Erdbahn. Im Gegensatz zum Clearsky-Index ist der Clearness-Index nicht vollständig trendfrei. Der Clearness-Index nimmt morgens geringere Werte an als mittags, da der Weg durch die Atmosphäre morgens länger ist und damit die Schwächung der Strahlung bei gleichem Zustand der Atmosphäre größer ist. Dies wird beim Clearsky-Index k^* reduziert, da dort die Globalstrahlung auf die Einstrahlung bei klarem Himmel bezogen ist, s. Gl. (3.3). Ein Vorteil des Clearness-Index ist, dass zu

dessen Bestimmung kein Clearsky-Modell zur Berechnung der wolkenfreien Einstrahlung wie beim Clearsky-Index nötig ist. Der Clearness-Index lässt sich direkt aus Boden- bzw. Vorhersagedaten berechnen.

Das Diffusstrahlungsmodell bestimmt den Diffusanteil $d = I_{diff}/I_g$ in Abhängigkeit vom Clearness-Index k_t und dem Sonnenstand $sunelev$. Die Parametrisierung ist stückweise definiert und lautet:

$$\begin{aligned} k_t \leq k_0 : & \quad d = 1 \\ k_0 < k_t \leq a_1 k_c : & \quad d = F(k_t) := 1 - (1 - d_c)(a_2 \sqrt{K} + (1 - a_2)K^2) \\ k_t > a_1 k_c : & \quad d = 1 - a_1 k_c (1 - F(a_1 k_c))/k_t, \end{aligned} \tag{7.3}$$

mit $k_0 = 0.20$, $a_1 = 1.09$, $a_2 = 0.27$ und

$$K = 0.5 * (1 + \sin(\pi \frac{k_t - k_0}{k_c - k_0} - 0.5)).$$

Die Parameter k_c und d_c sind bestimmt worden zu

$$\begin{aligned} k_c &= 0.87 - 0.56 \exp(-0.06 * sunelev) \\ d_c &= 0.15 + 0.43 \exp(-0.06 * sunelev). \end{aligned} \tag{7.4}$$

Die Abbildung 7.1 macht die Abhängigkeit des Diffusanteils d von k_t und $sunelev$ deutlich. Es wird sichtbar, dass für Werte von $k_t < k_0$ angenommen wird, dass keine Direktstrahlungsanteile vorhanden sind. Damit gilt also für kleine Werte von k_t , dass die Globalstrahlung I_g der Diffusstrahlung I_{diff} entspricht [Reindl et al. (1990)], [Erbs et al. (1982)]. Für wolkenfreien Himmel mit $k_t = k_c$ überwiegt der Direktstrahlungsanteil und der Diffusanteil nimmt einen minimalen Wert an.

Das vorgestellte Zweiparameter-Modell wurde von [Skartveit et al. (1998)] um einen dritten Parameter ergänzt und verbessert. Als dritter Parameter wird ein Variabilitätsmaß σ_i eingeführt. Über dieses Variabilitätsmaß wird der Einfluss der inhomogenen Bewölkung auf den Diffusanteil berücksichtigt. Das Variabilitätsmaß ergibt sich über die Abweichung des Clearsky-Index k^* der Stunde i von der vorangegangenen und der nachfolgenden Stunde:

$$\sigma_i = \sqrt{[(k_i^* - k_{i-1}^*)^2 + (k_i^* - k_{i+1}^*)^2]} * \frac{1}{2}. \tag{7.5}$$

Dabei ist zu beachten, dass der Clearsky-Index k^* hier definiert ist über $k^* = k_t/k_c$. Für $\sigma_i > 0$ wird der Diffusanteil über einen Term $\delta(k_t, \sigma_i, sunelev)$ korrigiert. Eine Beschreibung des im Folgenden verwendeten Dreiparameter-Modells nach [Skartveit et al. (1998)] findet sich im Anhang, s. S. 148.

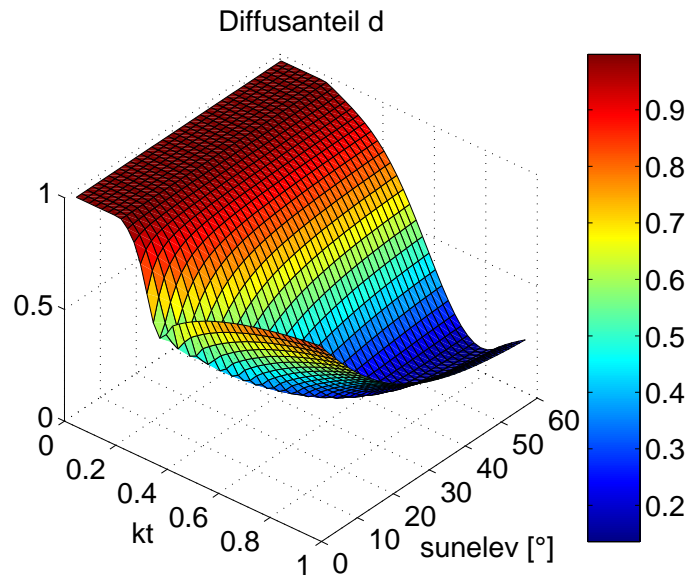


Abbildung 7.1: Abhängigkeit des Diffusanteils d vom Clearness-Index k_t und dem Sonnenstand sunelev .

Auswertung mit gemessenen Bodenwerten der Globalstrahlung

Zunächst soll anhand von Bodenmessungen der Globalstrahlung überprüft werden, welche Genauigkeit über das Diffusstrahlungsmodell erreicht werden kann. Für die Bodenstationen Arkona, Potsdam und Lindenberg wird der Diffusanteil d sowie die Diffus- und Direktstrahlung bestimmt und mit der gemessenen Diffusstrahlung bzw. der darüber bestimmbaren Direktstrahlung und dem Diffusanteil verglichen. Die Darstellungen in Abb. 7.2 zeigen den $rRMSE$ und $rMBE$ für Daten des Jahres 2004. Der $rRMSE$ von 16.1 % für Arkona und 16.7 % für Lindenberg stimmt gut mit Literaturangaben überein. Nach [Hammer (2000)] und [Skartveit et al. (1998)] soll der $rRMSE$ von d bei etwa 15 % liegen. Nur der $rRMSE$ von Potsdam liegt mit 20.1 % etwas deutlicher über dem Literaturwert. Der Bias liegt mit einem $rMBE$ zwischen 0.5 % und 5 % ebenfalls im Erwartungsbereich. Betrachtet man nun aber die Größen, die hier von eigentlichem Interesse sind, zeigt sich eine Verschlechterung der Resultate. Der $rRMSE$ der Diffusstrahlung liegt zwischen 25 % und 29 % und der $rRMSE$ der Direktstrahlung zwischen 26 % und 31 %. Die Direktstrahlung ist mit einem negativen Bias von -0.5 % bis -6.5 % belegt, während die Diffusstrahlung einen positiven Bias von 0.5 % bis 5.8 % aufweist.

Nachdem nun das Modell und dessen erreichbare Genauigkeit anhand von Bodenmessungen vorgestellt wurde, soll das Dreiparameter-Modell nun zur Bestimmung der vorhergesagten Diffus- und Direktstrahlung verwendet werden.

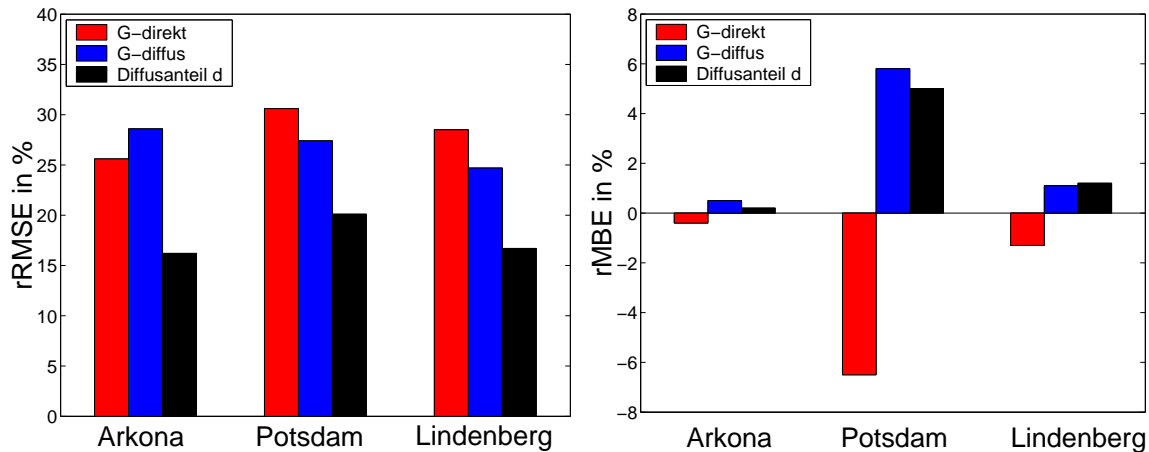


Abbildung 7.2: Darstellung des $rRMSE$ (links) und $rMBE$ (rechts) der Diffus- (blau) und Direktstrahlung (rot) für die drei Bodenstationen Arkona, Potsdam und Lindenberg. Zur Bestimmung der Diffus- bzw. Direktstrahlung über das Diffusstrahlungsmodell von [Skartveit et al. (1998)] wurden Bodenmessungen der Globalstrahlung des Jahres 2004 verwendet.

7.2 Vorhergesagte Diffus- und Direktstrahlung

Das Dreiparameter-Modell von [Skartveit et al. (1998)] wird verwendet, um auf Basis der einstündig aufgelösten und vorhergesagten Globalstrahlung die zu prognostizierende Diffus- und Direktstrahlung zu bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass die dazu nötige Variabilität σ_i letztlich auf den 3h-Mittelwerten von k^* beruht. Zwar wird über die zeitliche Interpolation eine stündliche Auflösung erreicht, aber die Variationsbreite kann für die zusätzlich gewonnenen Zeitpunkte nicht bestimmt werden. Die Abb. 7.3 zeigt Darstellungen des $rRMSE$ und $rMBE$ für die Station Lindenberg und das Jahr 2004 für die Global-, Diffus- und Direktstrahlung. Die vorhergesagten Daten werden mit den entsprechenden Bodenmessungen verglichen. Vergleichbare Resultate ergeben sich auch für die anderen untersuchten Stationen sowie für das Jahr 2003. Die Ergebnisse für die Globalstrahlung liegen im Rahmen der Resultate der vorangegangenen Kapitel und dienen hier der Orientierung und dem Vergleich zur Diffus-, und Direktstrahlung. In allen Fällen ist zu erkennen, dass der Fehler mit zunehmenden Vorhersagehorizont zunimmt. Mit ca. 6 % Zunahme über den gesamten Vorhersagehorizont nimmt die globale Clearsky-Einstrahlung am wenigsten und mit ca. 23 % die Direktstrahlung am stärksten zu. Die Direktstrahlung ist auch insgesamt durch die höchste Ungenauigkeit geprägt. Der $rRMSE$ verringert sich für die Direktstrahlung im wolkenfreien Fall um mehr als die Hälfte, ist aber auch in diesem Fall etwa doppelt so hoch wie die globale Einstrahlung im wolkenfreien Fall. Die Reduktion des Fehlers für die wolkenfreie Direktstrahlung ist zu erwarten, da laut Modellbeschreibung der Diffusanteil im wolkenfreien Fall ein Minimum annimmt und damit die Direktstrahlung den größten Anteil hat. Der absolute Direktanteil ist in diesem Fall hoch, was zu kleineren relativen Fehlern führt. Dies dreht sich für die Diffusstrahlung

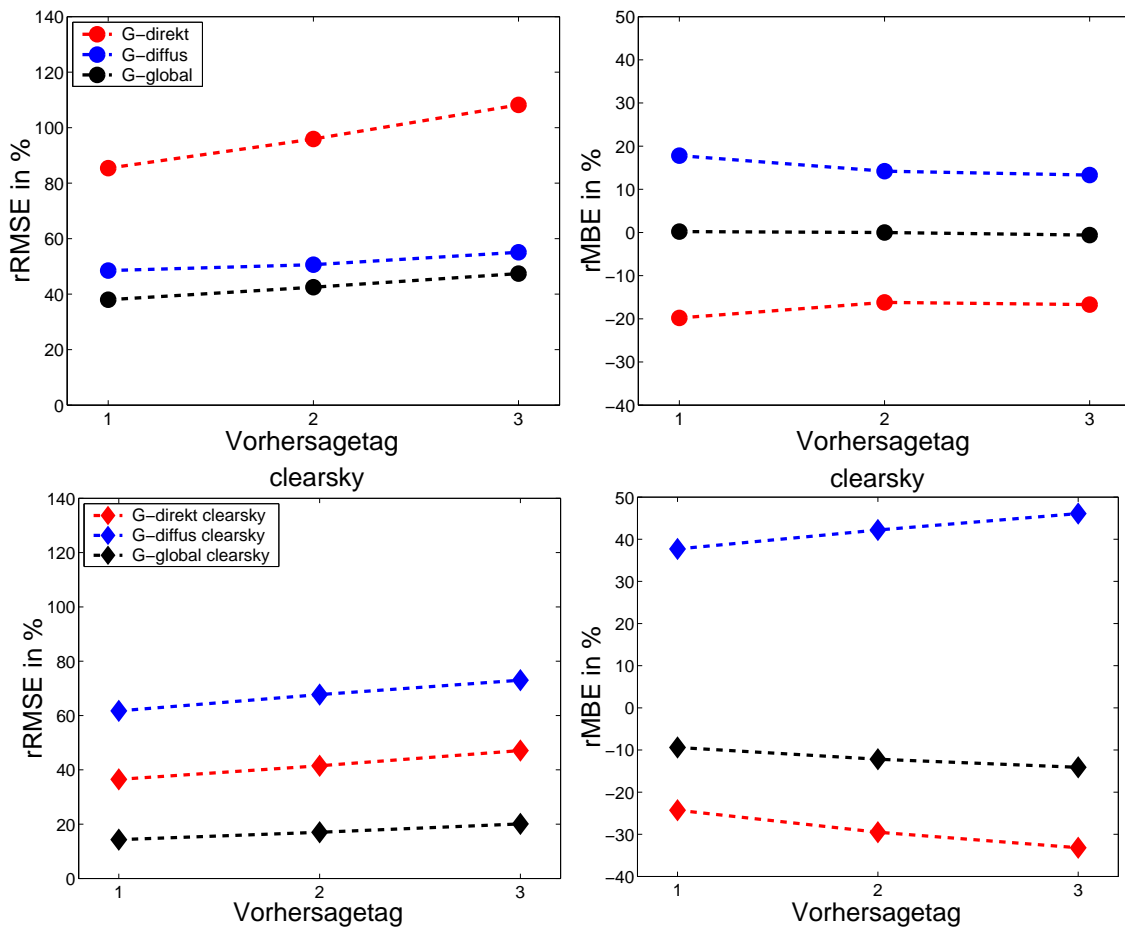


Abbildung 7.3: Darstellung des $rRMSE$ (links) und $rMBE$ (rechts) für die einstündig vorhergesagte Global-, Diffus- und Direktstrahlung. Zusätzlich wird jeweils zwischen dem gesamten Datensatz (oben) und den wolkenfreien Fällen (unten) unterschieden. Diese Ergebnisse ergeben sich für die Station Lindenberg und das Jahr 2004.

im wolkenfreien Fall gerade um. Die absolute Diffusstrahlung ist gering und der relative Fehler wird größer. Das führt auch dazu, dass der $rRMSE$ der diffusen Clearsky-Strahlung über dem der gesamten Diffusstrahlung liegt. Insgesamt ist festzustellen, dass sich der $rRMSE$ für die Direktstrahlung über alle Bewölkungssituationen mehr als verdoppelt. Auch in wolkenfreien Situationen ist der $rRMSE$ für die Direktstrahlung etwa doppelt so hoch wie für die Globalstrahlung. Bezüglich des Bias fällt auf, dass dieser für die Direktstrahlung durchweg negativ ist, während er für die Diffusstrahlung im Positiven liegt.

Für solarenergetische Anwendungen ist die hier erreichbare Genauigkeit der Direktstrahlung im Allgemeinen nicht ausreichend. Idealerweise sollte die vorhergesagte Diffus- und Direktstrahlung eine Genauigkeit vergleichbar mit der der Globalstrahlung erreichen. Dazu wäre jedoch zum einen ein praktisch fehlerfreies Diffusstrahlungsmodell nötig und zum anderen dürfte es bei der Umrechnung der Globalstrahlung auf dessen Bestand-

teile zu keiner Verstärkung des Fehlers kommen. Dies würde dazu führen, dass sich eine Verbesserung der Vorhersage der Globalstrahlung in gleichem Maße auf die Diffus- und Direktstrahlung übertragen würde. Wie bereits gezeigt, verursacht das verwendete Modell selbst bereits einen nicht unerheblichen Fehler. Andererseits stellt sich die Frage, welche Genauigkeit die vorhergesagte globale Einstrahlung erfüllen muss, damit eine bestimmte Genauigkeit bzgl. der Diffus- und Direktstrahlung erreicht werden kann.

Im Folgenden wird gezeigt, wie sich der Fehler der vorhergesagten globalen Einstrahlung auf den Fehler der Diffus- und Direktstrahlung auswirkt. Damit kann näherungsweise dargelegt werden, welche Genauigkeit der vorhergesagten Globalstrahlung nötig ist, um bei Verwendung des hier genutzten Diffusstrahlungsmodells eine bestimmte Genauigkeit bzgl. der Diffus- und Direktstrahlung zu erreichen.

Die Abb. 7.4 zeigt die Abhängigkeit des $rRMSE$ der Diffus- und Direktstrahlung vom $rRMSE$ der vorhergesagten Globalstrahlung. Um diesen Zusammenhang zeigen zu können, wurde die vorhergesagte Strahlung zunächst in zehn Bins abhängig vom absoluten Fehler aufgeteilt. Die Bin-Breite bezogen auf den absoluten Fehler beträgt 50 W/m^2 . Anschließend kann für jedes Bin der $rRMSE$ der Globalstrahlung und der zugehörige $rRMSE$ der Diffus- und Direktstrahlung bestimmt werden. Zur Auswertung wurden die Daten des gesamten Vorhersagehorizonts von 72 h herangezogen. Zusätzlich ist auf der Ordi-

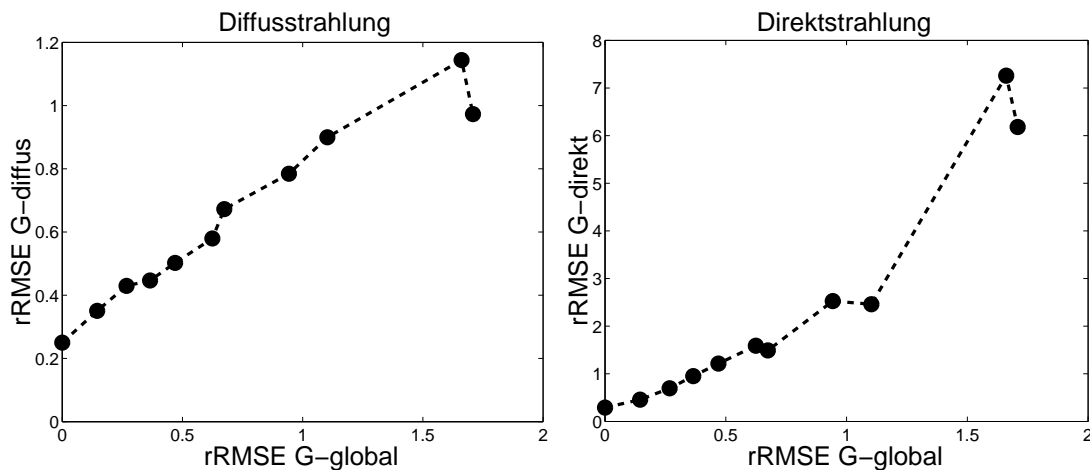


Abbildung 7.4: Darstellung der Abhängigkeit des $rRMSE$ der Diffus- und Direktstrahlung vom $rRMSE$ der vorhergesagten Globalstrahlung. Datengrundlage ist die Vorhersage für den Standort Lindenberg für das Jahr 2004. Die linke Darstellung zeigt die Abhängigkeit für die Diffus-, die rechte für die Direktstrahlung. Es ist auf die unterschiedlichen Skalen zu achten. Auf der Ordinate liegend ist der Fehler dargestellt, der dem Fehler für die globale Einstrahlung laut Bodenmessung entspricht, s. Abb. 7.2.

nate liegend der $rRMSE$ angegeben, der sich für Bodenmessungen der Globalstrahlung für die hier betrachtete Station Lindenberg laut Abb. 7.2 ergibt. Dieses stellt damit das bestmögliche Resultat dar, welches mit dem verwendeten Diffusstrahlungsmodell möglich ist. Es ist zu erkennen, dass der $rRMSE$ der Diffusstrahlung mit ansteigendem Fehler der

Globalstrahlung zunächst stärker ansteigt, um sich letztlich auf hohem Niveau zu stabilisieren. Die vorhergesagte Globalstrahlung ist laut Abb. 7.3 mit einem $rRMSE$ von ca. 0.4 behaftet und die Diffusstrahlung mit einem $rRMSE$ von ca. 0.5. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 7.4 wiederzuerkennen.

Ein im Vergleich zur Diffusstrahlung etwas anderes Bild ergibt sich für die Direktstrahlung. Auffällig ist der erheblich größere Wertebereich des $rRMSE$ der Direktstrahlung. Bei der Bewertung ist aber zu beachten, dass die sehr hohen Fehler mit sehr wenigen Datenpunkten verbunden sind.

Die Abb. 7.5 zeigt in der linken Darstellung die Verteilung der Datenmenge über dem $rRMSE$ der Globalstrahlung für die hier gezeigte Station Lindenberg. Es wird deutlich, dass über 90 % der Datenpunkte mit einem $rRMSE$ bzgl. der Globalstrahlung von weniger als 0.5 belegt sind. Dies bestätigt entsprechende Beobachtungen in Abb. 6.11 im Rahmen der 2d-Analyse von Kapitel 6.2. Die rechte Darstellung in Abb. 7.5 zeigt den mittleren Wert von k_t in Abhängigkeit vom $rRMSE$ der Globalstrahlung. Aufgrund der geringen Unterschiede von k_t ist gewährleistet, dass die verschiedenen Bewölkungssituationen in allen betrachteten Bins relativ gleichmäßig verteilt sind und die zuvor betrachteten Ergebnisse in Abb. 7.4 nicht durch Häufungen bestimmter Situationen in einem Bin überlagert sind.

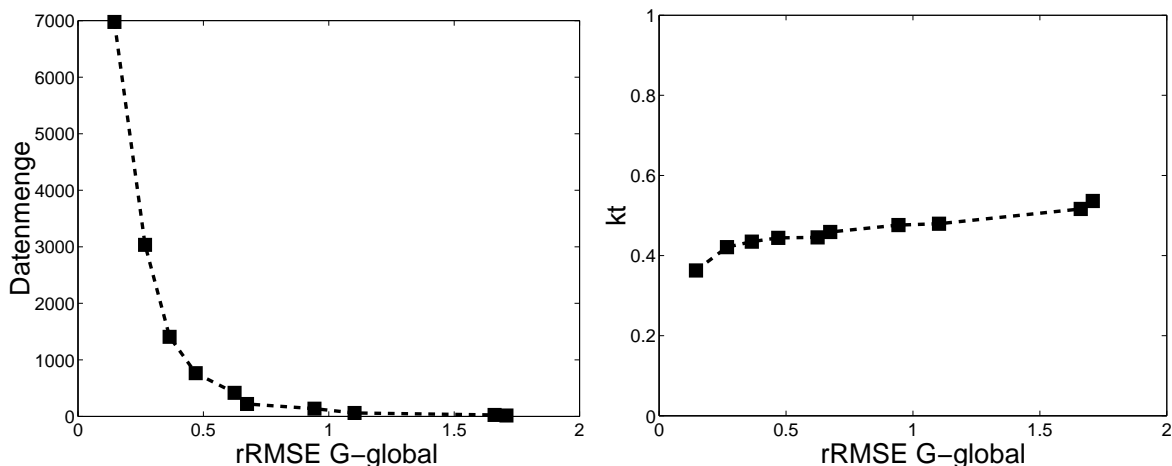


Abbildung 7.5: Darstellung der Datenmenge und dem vorhergesagten k_t über dem $rRMSE$ der vorhergesagten Globalstrahlung für den Standort Lindenberg und das Jahr 2004.

Die Darstellungen in Abb. 7.6 verdeutlichen noch einmal die Abweichungen des vorhergesagten Diffusanteils d sowie der vorhergesagten Diffus- und Direktstrahlung von der Messung. Es sind sowohl die Absolutwerte als auch der $rRMSE$ in Abhängigkeit von k_t dargestellt. Das hier verwendete k_t zur Separierung der Daten in Bins mit einer Breite von 0.1 ergibt sich über die Bodenmessung der Globalstrahlung und der Definition von k_t unter Verwendung von Gl. (7.1) und Gl. (7.2). Die bereits zuvor festgestellte Überschätzung des Diffusanteils d ist im Vergleich mit den absoluten Messwerten gut wiederzuerkennen. Es fällt allerdings auf, dass sich für niedrige k_t zunächst eine leichte Unterschätzung ein-

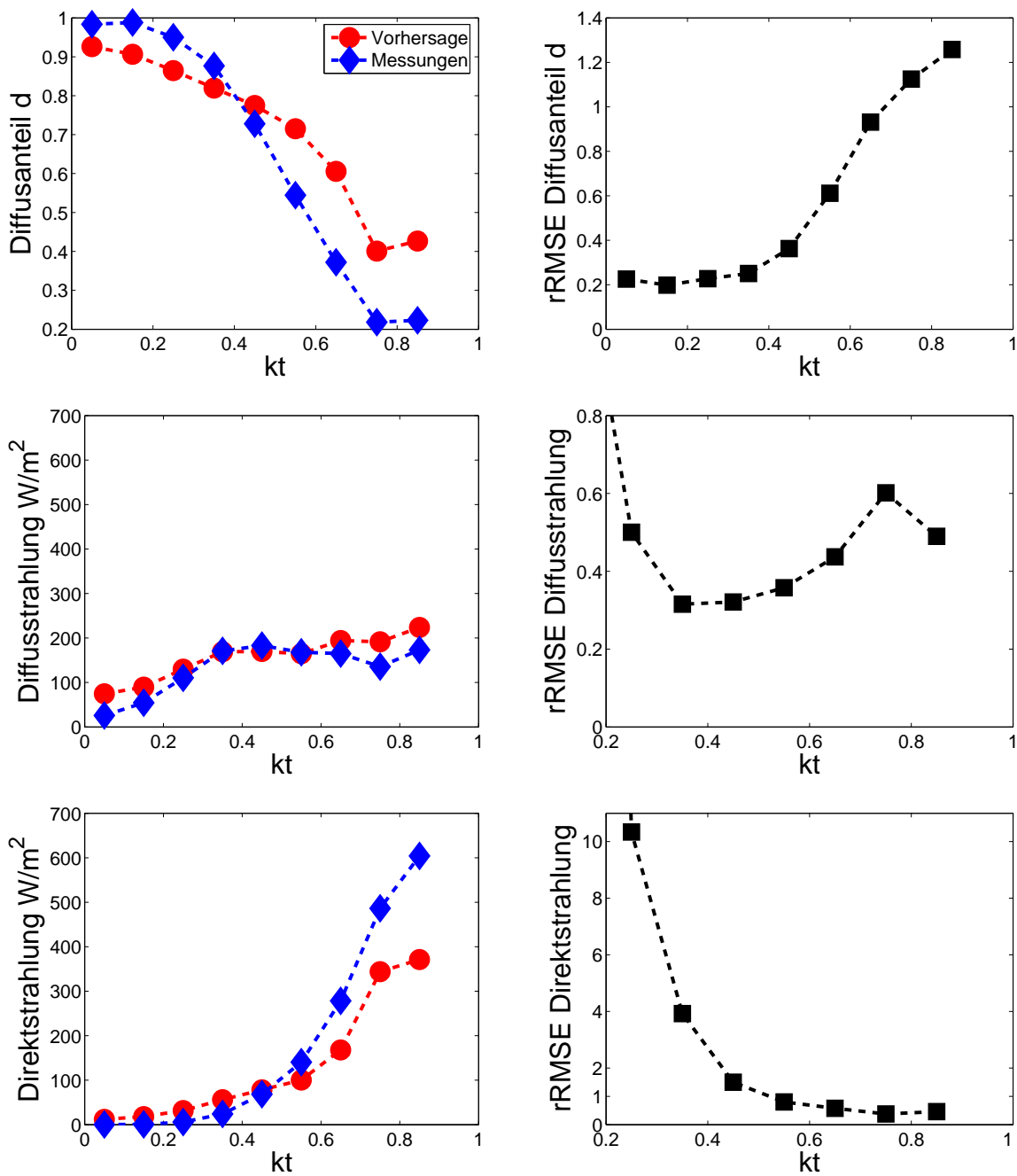


Abbildung 7.6: Für den Diffusanteil d sowie der Diffus- und Direktstrahlung sind in Abhängigkeit vom gemessenen k_t jeweils links die mittleren Absolutwerte und rechts der rRMSE dargestellt. Bei den Absolutwerten sind neben den vorhergesagten Resultaten in rot auch die Messergebnisse in blau dargestellt. Die Ergebnisse basieren auf Daten für den Standort Lindenberg und das Jahr 2004. Es ist auf die unterschiedlichen Skalen zu achten.

stellt, die sich dann mit wachsendem k_t in eine deutliche Überschätzung bei geringeren Absolutwerten umwandelt. Dies findet sich im $rRMSE$ von d wieder, der mit ansteigendem k_t anwächst. Die Diffusstrahlung zeigt in diesen Fällen ebenfalls ein Maximum im $rRMSE$, der durch den Fehler im Diffusanteil begründet ist. Der Anteil der Diffusstrahlung ist für einen hohen Clearness-Index im Vergleich zur Direktstrahlung gering, während für mittlere und kleine Werte von k_t die Diffusstrahlung gegenüber der Direktstrahlung überwiegt. Die größten Fehler in der Diffus- und Direktstrahlung sind mit sehr geringen absoluten Einstrahlungen verbunden. So wird für $k_t < 0.2$ keine Direktstrahlung gemessen, da aber in diesem Bereich eine geringe Direktstrahlung modelliert wird, ergibt sich daraus ein sehr hoher relativer Fehler. Dass Situationen mit sehr starker Bewölkung mit sehr hohen Fehlern behaftet sind, zeigte sich bereits im Rahmen der 2d-Analyse, s. Abb. 6.11. Die extremen Fehler wurden zur besseren Ansicht des für die absolute Einstrahlung relevanteren Bereiches bei der Darstellung des relativen Fehlers der Direkt- und Diffusstrahlung ausgeblendet. Die Überschätzung der Diffusstrahlung und die Unterschätzung der Direktstrahlung lässt sich im Vergleich mit den Messergebnissen wiederfinden. Bei der Direktstrahlung sind die größten Abweichungen bei höheren Werten von k_t zu beobachten. Dies sind aber gerade Situationen, die mit einem großen Anteil an Direktstrahlung verbunden sind und somit zu einem ungünstig hohen Fehler führen.

Um besser zu verstehen, wie sich ein relativ geringer Fehler der vorhergesagten Globalstrahlung durch Anwendung des Diffusstrahlungsmodells mehr als verdoppeln kann, muss die Fehlerübertragung von $G - global$ auf den zu berechnenden Diffusanteil d betrachtet werden. Die Darstellung oben links in Abb. 7.7 zeigt, wie sich der relative Fehler von $G - global$ bei der Berechnung von k_t auf diesen Wert überträgt. Wie aufgrund der Definition von k_t zu erwarten, überträgt sich hier der Fehler im Verhältnis 1:1, s. Gl. (7.1). Die weiteren drei Darstellungen in Abb. 7.7 zeigen, wie sich der positive relative Fehler von k_t in Abhängigkeit von k_t auf den Diffusanteil d überträgt. Die dargestellten relativen Fehler von d für die Sonnenstände von 10° , 30° und 50° ergeben sich direkt aus der Abhängigkeit von k_t und d , wie sie in Abb. 7.1 zu erkennen ist. Es wird deutlich, dass der relative Fehler von d leicht das doppelte bis vielfache des Fehlers von k_t annehmen kann. Dies betrifft insbesondere den Bereich für k_t zwischen etwa 0.4 und 0.8 und gilt für relative Fehler von k_t etwa größer 0.2. Laut Abb. 7.8, in der die Datenmenge der Vorhersage und der Bodenmessung in Abhängigkeit von k_t dargestellt ist, liegen damit etwa 50 % der vorhergesagten Daten des vorher untersuchten Standortes Lindenberg in diesem Bereich, in dem sich bei der Bestimmung des Diffusanteils der Fehler verdoppelt oder vervielfacht. Zudem ist anhand dieser Abbildung zu erkennen, dass die vorhergesagte und über das Diffusmodell berechnete Häufigkeitsverteilung von k_t nicht mit der Verteilung von Messwerten übereinstimmt. Gerade der fehleranfällige mittlere Bereich von k_t wird durch das Modell deutlich in der Häufigkeit überschätzt, während extreme Situationen mit niedrigem oder hohem Clearness-Index eher unterschätzt werden.

Wie bereits gezeigt, verstärkt sich der festgestellte Fehler durch das Diffusmodell noch einmal, wenn man statt des Diffusanteils die für Solarenergieanwendungen besonders relevante Direktstrahlung betrachtet.

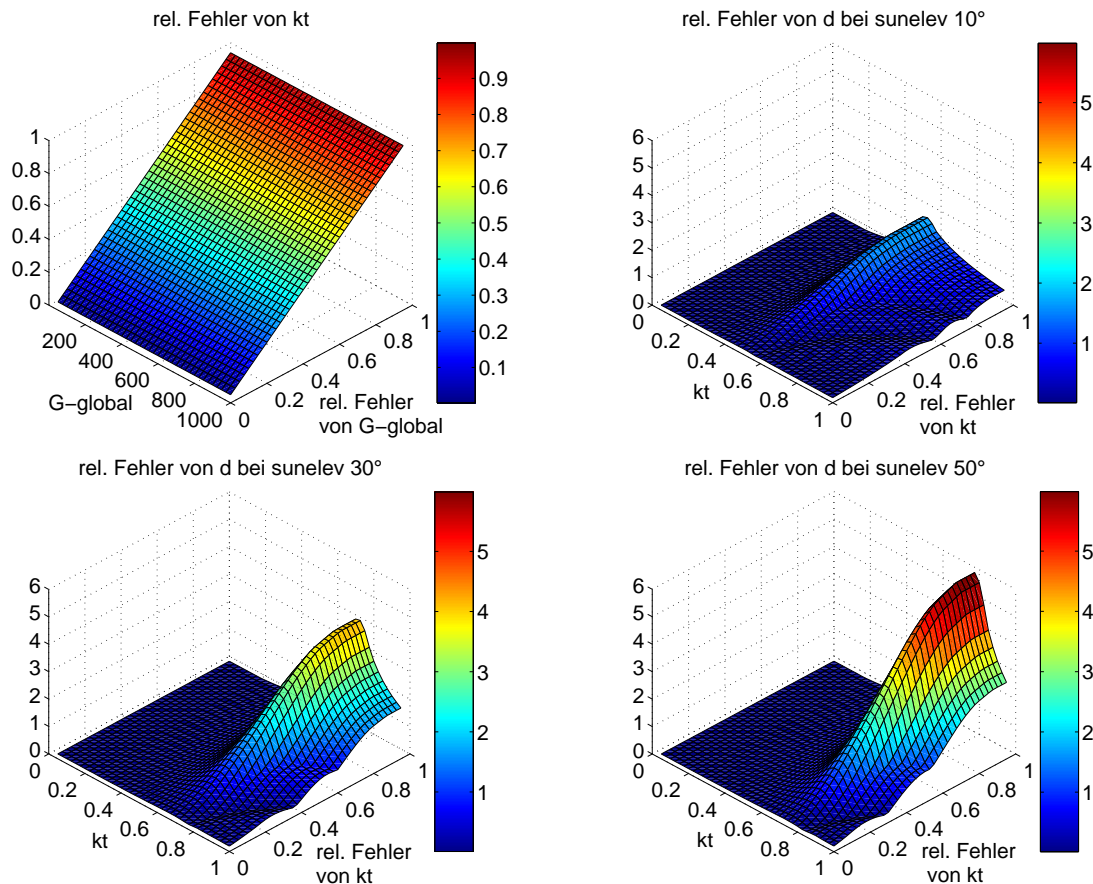


Abbildung 7.7: Die Darstellungen verdeutlichen, wie sich der Fehler der Globalstrahlung bei Anwendung des Diffusstrahlungsmodells auf den Diffusanteil d überträgt. Oben links: Der relative Fehler von G_{global} überträgt sich im Verhältnis 1:1 auf den Clearness-Index k_t . Es folgen drei Darstellungen, die zeigen wie sich der positive relative Fehler von k_t in Abhängigkeit von k_t auf den Diffusanteil d für die Sonnenstände bei 10° , 30° und 50° überträgt.

7.3 Zusammenfassung

Im vorangegangenen Kapitel konnte gezeigt werden, wie von der vorhergesagten Globalstrahlung auf deren diffuse und direkte Bestandteile geschlossen werden kann. Das dazu nötige und vorgestellte Diffusstrahlungsmodell stammt von [Skartveit et al. (1998)]. Auf der Basis der Globalstrahlung am Boden bestimmt dieses Modell den Diffusanteil d . Die Genauigkeit des Modells zur Bestimmung des Diffusanteils liegt bei den hier untersuchten Standorten bei einem $rRMSE$ zwischen etwa 0.16 und 0.20. Der Fehler der darüber bestimmbaren Diffus- und Direktstrahlung liegt zwischen ca. 25-30 %. Diese Fehler ergeben sich bei Verwendung von Messwerten der Globalstrahlung und charakterisieren die Genauigkeit des Modells.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass neben dem Fehler des Diffusmodells ein zusätz-

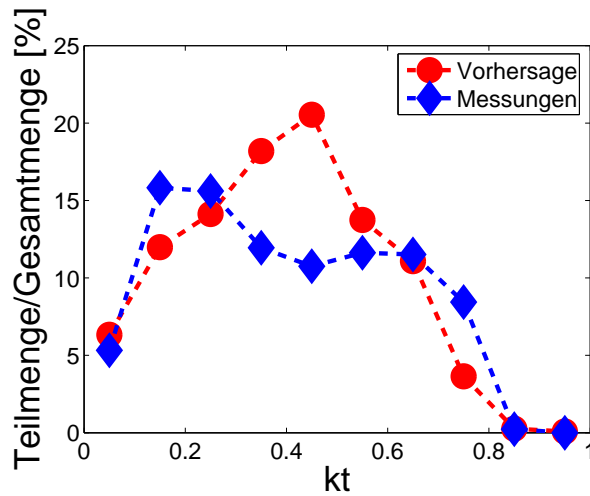


Abbildung 7.8: Darstellung der Datenmenge [%] über k_t für die vorhergesagten Modellergebnisse (rot) und Bodenmessungen (blau) am Standort Lindenberg und das Jahr 2004.

licher verstärkender Fehler besonders beim Übergang vom Diffusanteil auf die Direktstrahlung hinzukommt. Der Fehler von d ist nicht eins zu eins auf die Diffus- und Direktstrahlung übertragbar. Aus der Betrachtung der Absolutwerte ergibt sich, dass hohe Diffusanteile mit niedrigen relativen Fehlern verbunden sind. Dagegen ist die absolute Diffusstrahlung selbst bei hohen Diffusanteilen klein und bleibt es auch über den gesamten Bereich von k_t , was zu höheren relativen Fehlern der Diffusstrahlung im Vergleich zum Diffusanteil führt. Insgesamt sind die Fehler für die Diffusstrahlung nicht so hoch, wie für die Direktstrahlung. Bei der Direktstrahlung ergibt sich gerade für hohe Werte des Clearness-Index der größte Bias. Betrachtet man aber nur wolkenfreie Fälle, ergibt sich für die Direktstrahlung dagegen ein zur Diffusstrahlung vergleichsweise geringer Fehler. Da nun auch die vorhergesagte Globalstrahlung selbst mit einer Ungenauigkeit versehen ist, überträgt sich auch diese auf den Clearness-Index k_t . In Abhängigkeit vom Fehler von k_t kann sich der relative Fehler von d besonders für die Direktstrahlung leicht vervielfachen. Die vorhergesagte Verteilung von k_t ist im Vergleich zu Messungen fehlerhaft, was sich in einer Überschätzung mittlerer k_t bzw. mittlerer Bewölkungszustände zeigt. Dies führt zu einer Überschätzung der Diffusstrahlung, während die Unterschätzung klarer Atmosphärenzustände für die Direktstrahlung zu einem negativen Bias führt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Fehler von Diffus- und Direktstrahlung sowohl vom Fehler des Diffusmodells, dem Fehler durch den Übergang vom Diffusanteil auf die Direkt- und Diffusstrahlung als auch vom Fehler der vorhergesagten Globalstrahlung abhängt.

8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten erste systematische Untersuchungen zur Optimierung und Weiterentwicklung von Strahlungsvorhersagen auf der Basis numerischer Wettermodelle durchgeführt werden. Die Vorhersagequalität verschiedener Vorhersage-Modelle wurde untersucht und in Abhängigkeit von unterschiedlichen meteorologischen Situationen analysiert und differenziert. Damit ist die Grundlage für eine hoch aufgelöste Strahlungsvorhersage geschaffen, die für verschiedene solarenergetische Anwendungen genutzt werden kann.

Es konnte gezeigt werden, dass das mesoskalige Modell MM5 zur Strahlungsvorhersage verwendet werden kann. In diesem Zusammenhang wurden erstmals verschiedene Konfigurationen von MM5 zur Strahlungsberechnung für drei verschiedene Bewölkungssituationen untersucht und miteinander verglichen. Dabei wurden teilweise erhebliche Unterschiede bei der Bestimmung der Solarstrahlung festgestellt. Über diesen Konfigurationstest wurde eine geeignete Gesamtkonfiguration festgelegt, die dann für die weiteren Untersuchungen verwendet wurde. Da MM5 zum Antrieb des Modells auf Eingangsdaten eines übergeordneten globalen Wettermodells angewiesen ist, wurde der Einfluss unterschiedlicher Datenquellen auf das Vorhersageergebnis analysiert. Hierbei zeigte sich, dass neben der MM5 eigenen Parametrisierung und Konfiguration die Eingangsdaten ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Vorhersage haben. In allen hier untersuchten Fällen zeigten die MM5-Vorhersagen mit Antriebsdaten vom ECMWF deutlich bessere Ergebnisse als die MM5-Vorhersagen auf Basis des DWD-Lokalmodells.

Neben den lokalen Vorhersagen für einzelne Standorte, wurden in dieser Arbeit zusätzlich regionale Vorhersagen für Gebiete unterschiedlicher Größe durchgeführt. Der Hintergrund dafür ist, dass neben Vorhersagen für z.B. einzelne solare Kraftwerksanlagen auch Vorhersagen für die Versorgungsgebiete der Stromnetzbetreiber für die gesamte Kraftwerkeinsatzplanung und Lastabschätzung nutzbar sind.

Für Regionsmittel mit einer Größe bis zu $200 \times 200 \text{ km}^2$ stellt die ECMWF basierte MM5-Strahlungsvorhersage eine mögliche Alternative zu einem ebenfalls analysierten statistischen MOS-Verfahren dar, ohne dabei gegenüber dem operationell betriebenen MOS einen echten qualitativen Vorteil zu erzielen. Für standortbezogene Vorhersagen liefert MM5 nach den hier durchgeführten Untersuchungen deutlich schlechtere Resultate als das MOS-Verfahren und ist daher für solarenergetische Anwendungen nicht geeignet. Für wolkenfreie Situationen können zwar gute Ergebnisse modelliert werden, aber bei Auftreten von Bewölkung kommt es zu einer deutlichen Überschätzung der Einstrahlung am Boden.

Als echte Alternative zu MOS und MM5 konnte die Strahlungsvorhersage des ECMWF optimiert werden. Die räumlich und zeitlich grob aufgelösten Vorhersagen wurden erfolgreich für den Vergleich mit Einzelstandorten angepasst und zeitlich auf eine einstündige

Auflösung erweitert. Damit konnten die Vorhersagen an die Anforderungen solar-energetischer Anwendungen angepasst werden. Für Einzelstandorte liefert die optimierte ECMWF-Vorhersage eine vergleichbare Genauigkeit wie das MOS-Verfahren. Für wolkenfreie Situationen, die mit einer hohen absoluten Einstrahlung verbunden sind, können sogar um bis zu 10 % bessere Ergebnisse bzgl. des $rRMSE$ erzielt werden. Damit stellt die optimierte ECMWF-Vorhersage als physikalisch basiertes Modell nicht nur eine Alternative zum statistischen MOS-Verfahren dar, sondern ist diesem insgesamt auch überlegen.

Über eine ausführliche und detaillierte Genauigkeitsanalyse konnten Situationen unterschiedlicher Vorhersagequalität unterschieden werden. Neben eher klassischen eindimensionalen Fehleranalysen über Betrachtung der Abhängigkeit vom Vorhersagezeitpunkt und einzelnen situationsbeschreibenden Größen konnte über eine 2d-Fehleranalyse gezeigt werden, dass Situationen unterschiedlicher Vorhersagegüte zu unterscheiden sind. So kann für wolkenfreie Situationen ein minimaler Vorhersagefehler von ca. 10 % erreicht werden.

Für bewölkte Situationen kann der Fehler auf ca. 40 % ansteigen. Die Situationen mit höheren Ungenauigkeiten sind Fälle mit extrem starker Bewölkung und einem Clearsky-Index $k^* < 0.4$ oder sehr niedrigen Sonnenständen mit $sunelev < 10^\circ$. Diese Situationen sind nur mit geringen absoluten Einstrahlungen verbunden und daher deutlich weniger kritisch als Fälle hoher absoluter Einstrahlung.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, wie auf der Basis der Strahlungsvorhersage die zu erwartende Genauigkeit bestimmt werden kann. Damit kann neben der Strahlungsvorhersage eine vom Bewölkungsgrad (k_{pred}^*) und dem Sonnenstand situationsabhängige Vorhersagegenauigkeit mit angegeben werden. Dies stellt für potentielle Anwender eine sehr wichtige zusätzliche Information dar, die einen effektiven Einsatz der Vorhersage erst ermöglicht.

Im Rahmen einer k-means Clusteranalyse konnte gezeigt werden, dass es auch über eine automatisierte Analyse möglich ist, die Vorhersage in unterschiedliche Cluster zu separieren. Die Cluster unterscheiden sich in ihrem $rRMSE$ um bis zu 40 %, wobei sich die Unterschiede hauptsächlich über die Korrelation von Sonnenstand und absoluter Einstrahlung ergeben. Die mit einem sehr geringen Fehler behafteten wolkenfreien Situationen konnten über die Cluster-Analyse nicht identifiziert werden.

Neben der Globalstrahlung stellt die Vorhersage der Direktstrahlung für den Bereich des Gebäudemanagements und der solarthermischen Anwendungen eine wichtige Information dar. Über die Verwendung des Diffusstrahlungsmodells von [Skartveit et al. (1998)] konnte aus der vorhergesagten Globalstrahlung die Direktstrahlung gewonnen werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich der Vorhersagefehler der Globalstrahlung bei Verwendung des hier genutzten Diffusstrahlungsmodells verdoppeln bis vervielfachen kann. Besonders die falsch modellierte Häufigkeitsverteilung des Clearness-Index trägt zum Fehler bei, wodurch zu viele mittlere Bewölkungssituationen modelliert werden, was zu einer Überschätzung der Diffusstrahlung führt. Sehr klare Zustände der Atmosphäre sind dagegen unterrepräsentiert, was zu einer Unterschätzung der Direktstrahlung führt.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich feststellen, dass physikalisch basierte Vorhersagemodelle im bewölkten Fall ähnliche Genauigkeiten erreichen wie statistische Modelle. Da die Weiterentwicklung numerischer Wettermodelle sehr zeitaufwendig ist und in der Regel große personelle Ressourcen benötigt, ist neben einer Weiterentwicklung und Anpassung an solarenergetische Anforderungen der numerischen Modelle ein Mittelweg zwischen physikalischer Parametrisierung und statistischer Modellierung anzustreben.

Zunächst ist es sinnvoll, die Ergebnisse numerischer Wettermodelle statistisch nachzubearbeiten, um so die systematischen Abweichungen für bestimmte Situationen zu reduzieren. In diesem Zusammenhang ist es möglich, zusätzliche Informationen der Wettermodelle, wie z.B. Druck und Temperatur, zu nutzen.

Die Modelle bieten zudem Parameter an, die den Bewölkungsgrad charakterisieren. Dies gibt die zusätzliche Möglichkeit, zunächst eine Wolkenvorhersage zu betreiben, um daran anschließend über Verwendung eines Strahlungsmodells auf die vorherzusagende Strahlung zu schließen.

Des Weiteren können Vorhersagen verschiedener Modelle statistisch so gekoppelt und gewichtet werden, dass sich die Vorteile der unterschiedlichen Modelle insgesamt verstärken und Schwächen ausgeglichen werden. Über ein solches Verfahren kann eine letztlich bessere Vorhersage gewonnen werden als über die Betrachtung der einzelnen Modelle.

Darüber hinaus können sog. „ensemble prediction systems“ verwendet werden. Hierbei wird ein numerisches Modell mehrfach mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestartet. Über die unterschiedlichen Vorhersagen kann ein Mittelwert gebildet werden und unter Berücksichtigung der Streuung kann diesem ein Vorhersagefehler mitgegeben werden.

9 Anhang

Der Anhang beinhaltet Tabellen und Abbildungen, auf die im laufenden Haupttext verwiesen wird. Wesentliche Teile der Arbeit wurden für Daten der Jahre 2003 und 2004 durchgeführt. Die Untersuchungen und die Analysen der Ergebnisse erfolgen dabei jeweils für ein Jahr. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit und zur Vermeidung teilweise redundanter Darstellungen werden im Haupttext dieser Arbeit zum Teil nur die Ergebnisse für ein Jahr gezeigt. Die zugehörigen Resultate des jeweils anderen Jahres sind den folgenden Seiten zu entnehmen.

Zu Kapitel 5.2.2

	Anzahl vorh. Clearsky-Tage	Anzahl def. Clearsky-Tage	korrekt vorh. Clearsky-Tage	rRMSE	rMBE
VZ 1 - 24	2172	2473	1800 72.8 %	13.9 %	-7.3 %
VZ 25 - 48	2498	2473	1548 62.6 %	17.5 %	-9.8 %
VZ 49 - 72	2445	2473	1346 54.4 %	19.8 %	-11.5 %

Tabelle 9.1: Die Tabelle gibt abhängig vom Vorhersagezeitraum (VZ) die Menge der vorhergesagten Clearsky-Tage, die tatsächlich bestimmte Clearsky-Tage Menge und die Menge der korrekt vorhergesagten Clearsky-Tage für das Jahr 2004 an. Für den Anteil der korrekt vorhergesagten Clearsky-Tage wird der rRMSE und rMBE der Einstrahlungsvorhersage aufgeführt.

Zu Kapitel 6.1.1

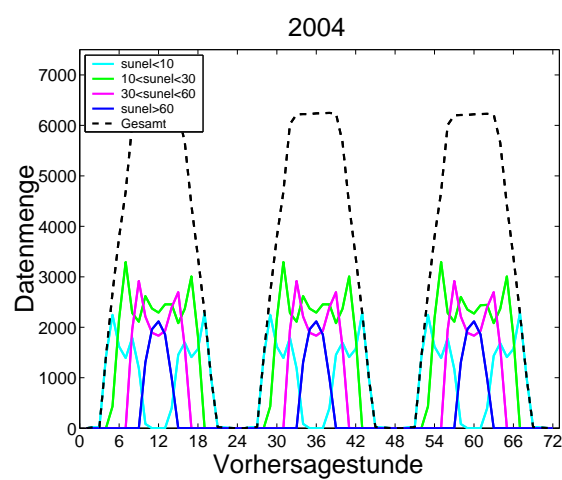


Abbildung 9.1: Dargestellt ist die Datenmenge in Abhängigkeit von der Vorhersagestunde für das Jahr 2004. Unterschieden wird zwischen dem gesamten Datensatz und vier Sonnenstandsklassen.

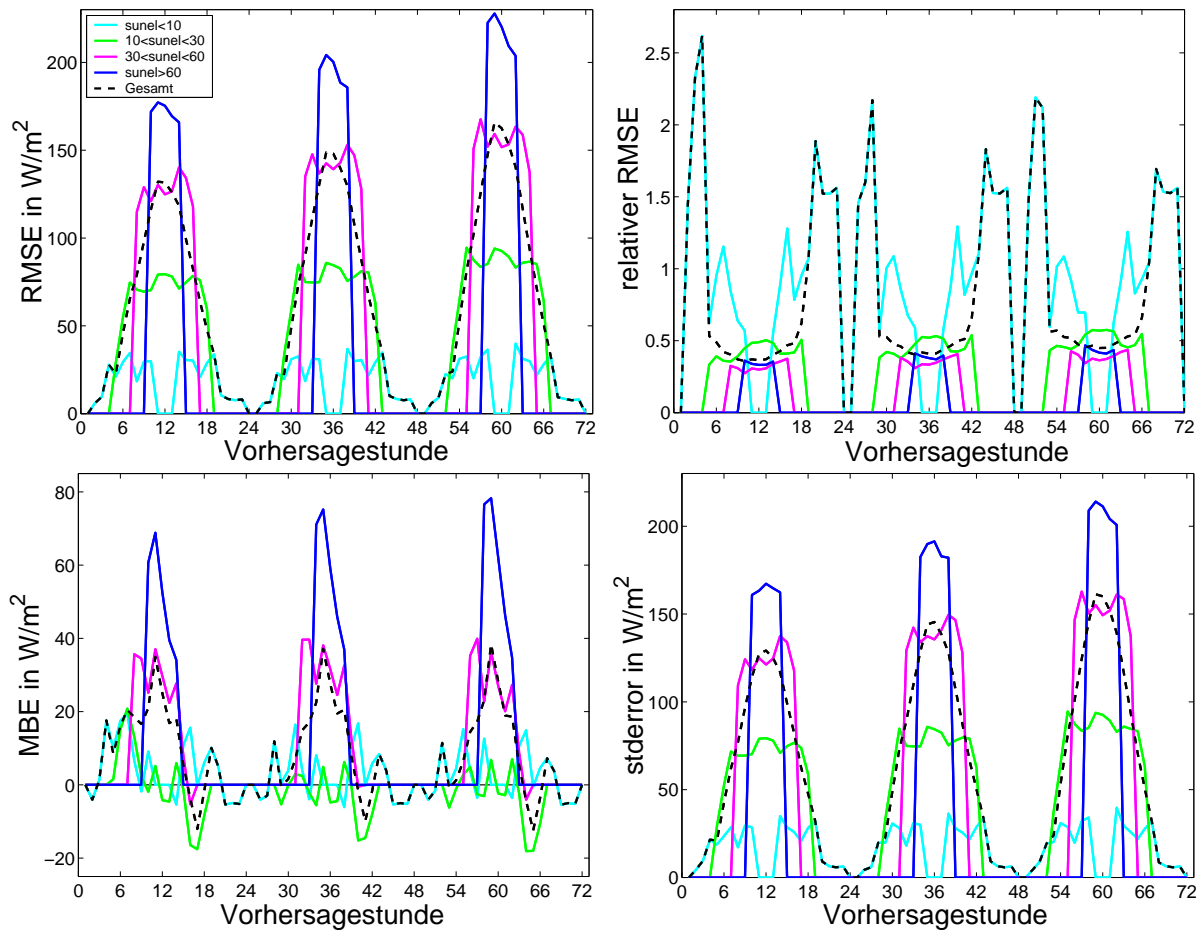


Abbildung 9.2: Darstellung des RMSE, des $rRMSE$, des MBE und des $stderror$ über der Vorhersagestunde und das Jahr 2004. Die Darstellungen unterscheiden zwischen dem gesamten Datensatz und vier Sonnenstandsklassen. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

Zu Kapitel 6.1.2

Zwischen 21 und 2 Uhr ist für alle drei Vorhersagetege des Jahres 2004 ein im Vergleich

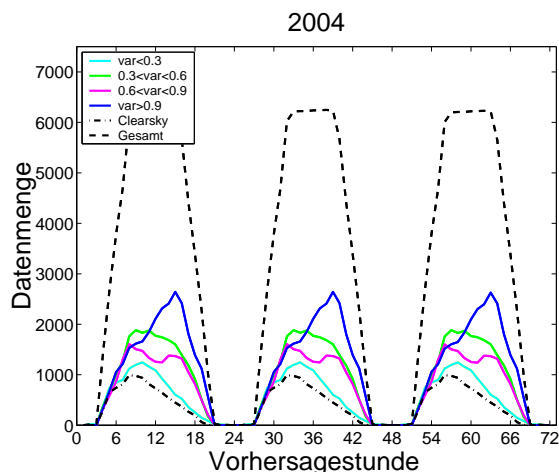


Abbildung 9.3: Dargestellt ist die Datenmenge des Jahres 2004 in Abhängigkeit von der Vorhersagestunde. Unterschieden wird zwischen dem gesamten Datensatz, Clearsky-Situationen und vier Wolkenvariabilitätsklassen.

zu 2003 deutlich höherer Fehler zu erkennen. Die Datenmenge tendiert für beide Jahre für diesen Zeitraum gegen Null, s. Abb. 6.3 und 9.3. Bei genauerer Betrachtung der Daten für diese Zeiträume zeigt sich, dass einige wenige Bodenmessungen Werte von wenigen W/m^2 nachweisen. Es wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um Fehler in den Bodenmessungen handelt, die über die verwendeten Filterfunktionen bei der Erstellung des Bodendatensatzes nicht gefunden werden konnten. Das Modell hat für diese Zeitpunkte völlig korrekt keine Einstrahlung modelliert, was zu entsprechenden Fehlern führt. Da es sich aber nur um wenige Datenpunkte (< 20) mit sehr geringer Einstrahlung ($< 10W/m^2$) handelt, sind diese Abweichungen für die mittleren Tagesfehler sowie für die Betrachtung der stundenaufgelösten Fehler vernachlässigbar.

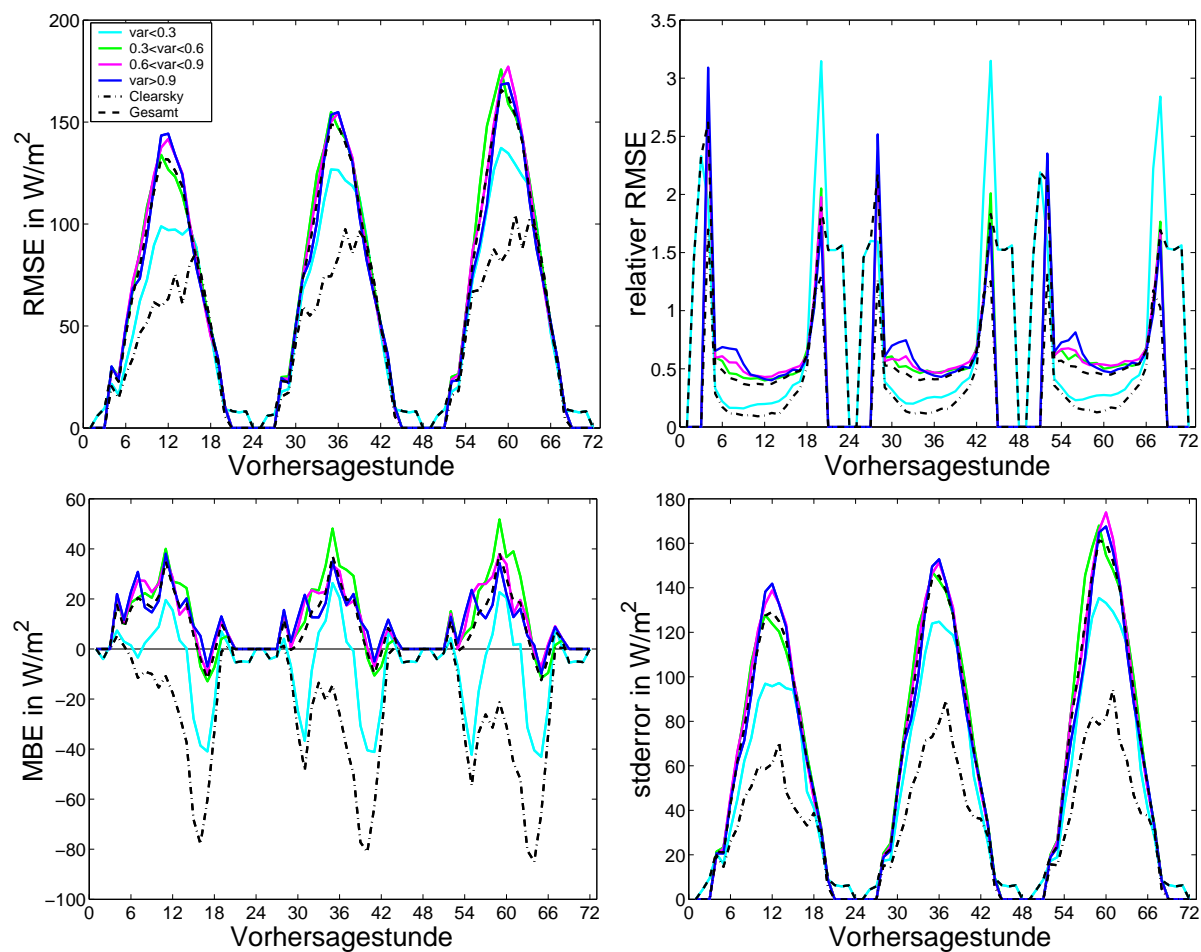


Abbildung 9.4: Darstellung des RMSE, des $rRMSE$, des MBE und des stderror über der Vorhersagestunde für 2004. Es wird unterschieden zwischen dem gesamten Datensatz, Clearsky-Situationen und vier Wolkenvariabilitätsklassen. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

Zu Kapitel 6.1.3

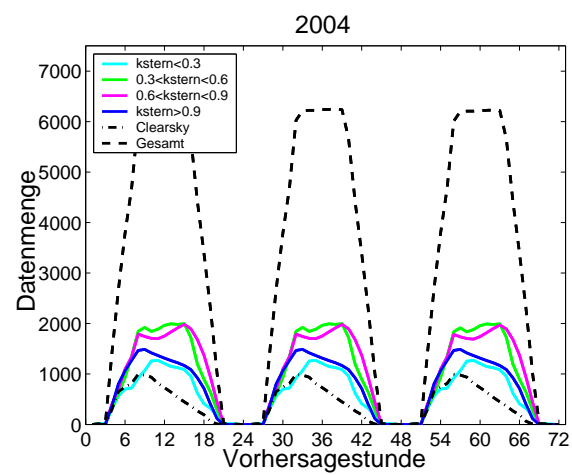


Abbildung 9.5: Dargestellt ist die Datenmenge in Abhängigkeit von der Vorhersagestunde für das Jahr 2004. Unterschieden wird zwischen dem gesamten und dem Clearsky-Datensatz sowie vier k^* -Klassen.

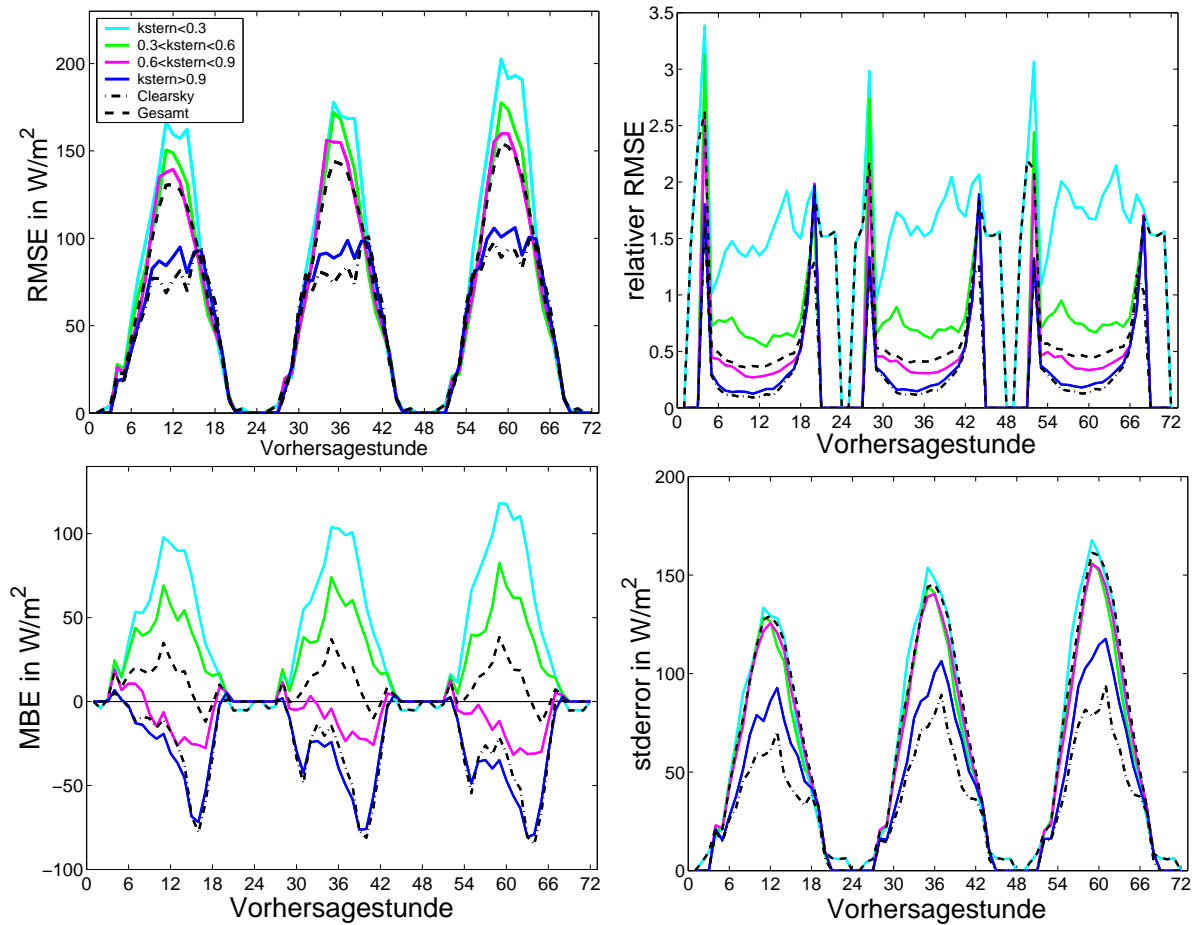


Abbildung 9.6: Darstellung des RMSE, des $rRMSE$, des MBE und des $stderror$ über der Vorhersagestunde und für das Jahr 2004. Die Darstellungen unterscheiden zwischen dem gesamten und dem Clearsky-Datensatz sowie vier k^* -Klassen. Die Legende oben links gilt für alle Darstellungen.

Zu Kapitel 6.2

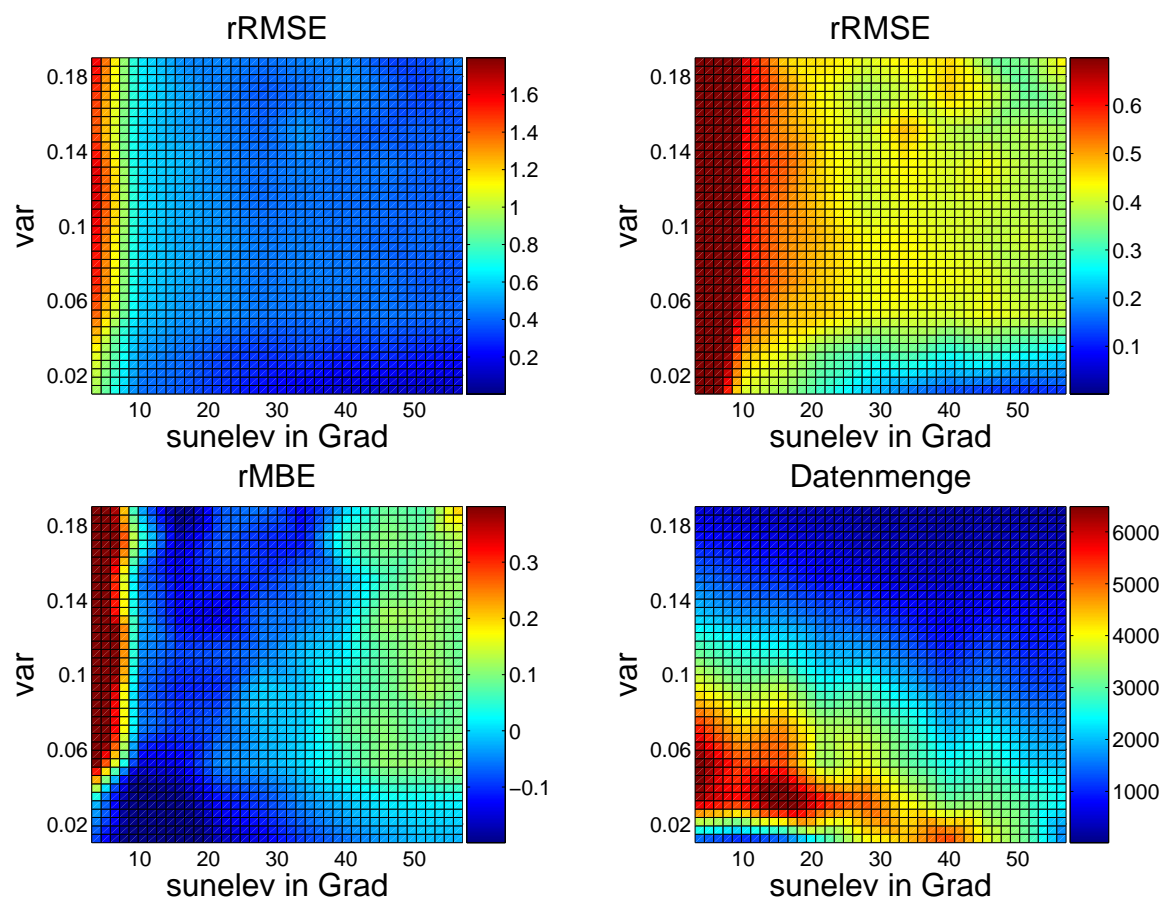


Abbildung 9.7: Darstellung von $rRMSE$, $rMBE$ und Datenmenge in Abhängigkeit von $sunelev$ und var für 2003. Die Farbskalen der Fehlermaße für den $rRMSE$ oben rechts und den $rMBE$ unten links wurden eingeschränkt. Die Maximalwerte liegen für den $rRMSE$ bei ca. 1.6 und den MBE bei 0.8. Es ist auf die unterschiedlichen Farbskalen zu achten.

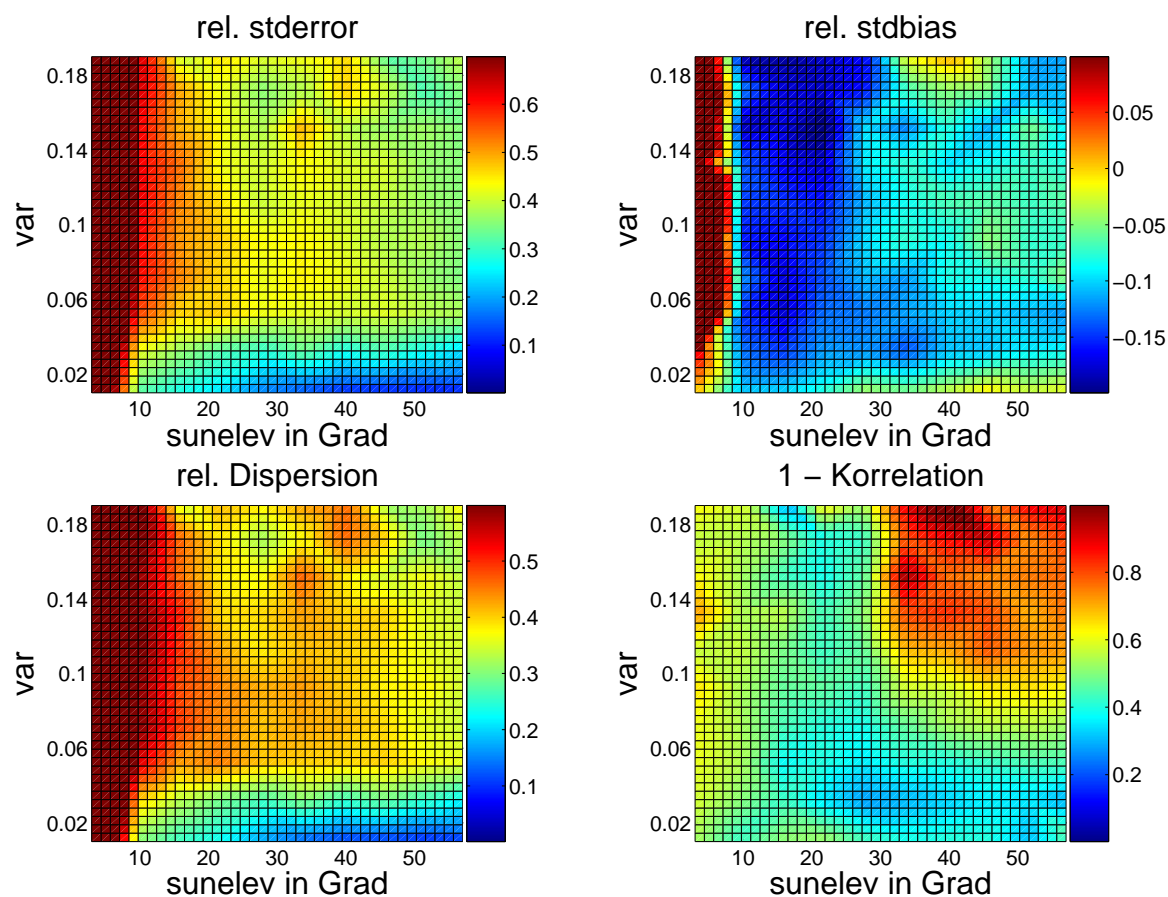


Abbildung 9.8: Darstellung von relativem stderror, stdbias, der Dispersion und von 1 – korr für 2003. Die Farbskalen wurden für die Fehlermaße außer für 1–korr eingeschränkt. Die Maximalwerte liegen für den relativen stderror bei 1.4, den stdbias bei 0.5 und der Dispersion bei 1.4. Es ist auf die unterschiedlichen Farbskalen zu achten.

Zu Kapitel 6.3

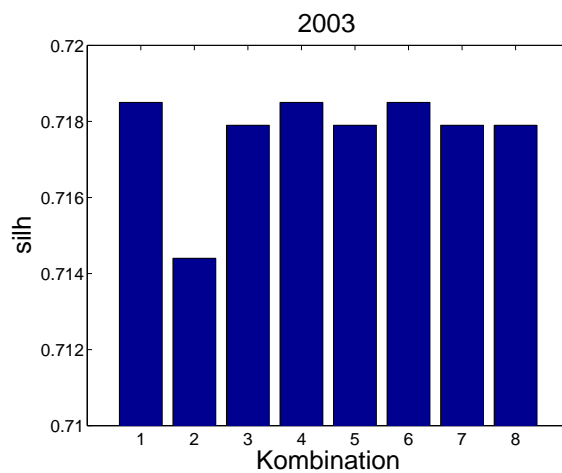


Abbildung 9.9: Mittlere Silhouette-Werte für das Jahr 2003 und verschiedene Kombinationen von Parametern, die bei der *k*-means Cluster-Analyse berücksichtigt werden. Tabelle 6.1 gibt die je Kombination verwendeten Parameter an.

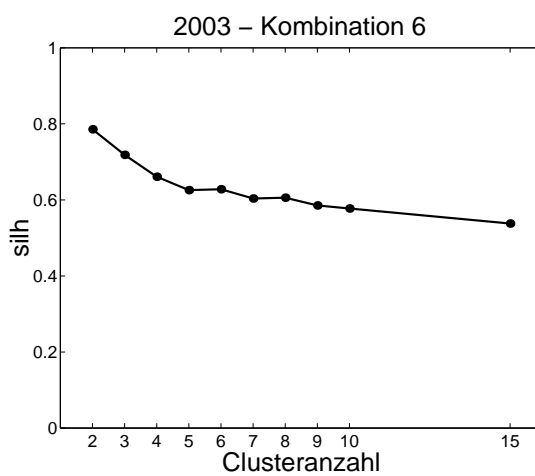


Abbildung 9.10: Der gemittelte Silhouette-Wert in Abhängigkeit von der Clusteranzahl für das Jahr 2003. In allen Darstellungen ist ein Sprung beim Übergang von 7 zu 6 Clustern zu erkennen. Dieser Sprung definiert die Anzahl von Clustern, die für die weiteren Analysen Verwendung finden.

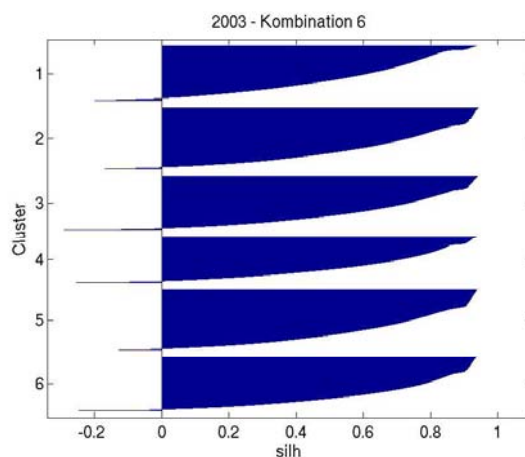


Abbildung 9.11: Darstellung der Silhouette-Werte für die Kombinationen 6 und 6 Cluster für das Jahr 2003.

In Abb. 9.12 ist oben links der $rRMSE$ in Abhängigkeit vom Cluster für das Jahr 2003 dargestellt. Im Vergleich zu der entsprechenden Darstellung in Abb. 6.16 für 2004 ist zu erkennen, dass zwar ähnliche Fehler zu erkennen sind, diese aber hier anderen Clusternummern zugeordnet wurden. Dies ist durch die Eigenschaften der k-means Cluster-Analyse begründet, nach denen der Startpunkt zur Bestimmung der lokalen Minima zufällig gewählt wird. Das bedeutet, dass auch beim gleichen Datensatz bei mehrfacher Durchführung der Cluster-Analyse zwar idealerweise die gleichen Cluster entstehen, diese aber jeweils anderen Clusternummern zugeordnet werden können. Dies ist bei der Auswertung und Betrachtung verschiedener Cluster-Ergebnisse zu berücksichtigen.

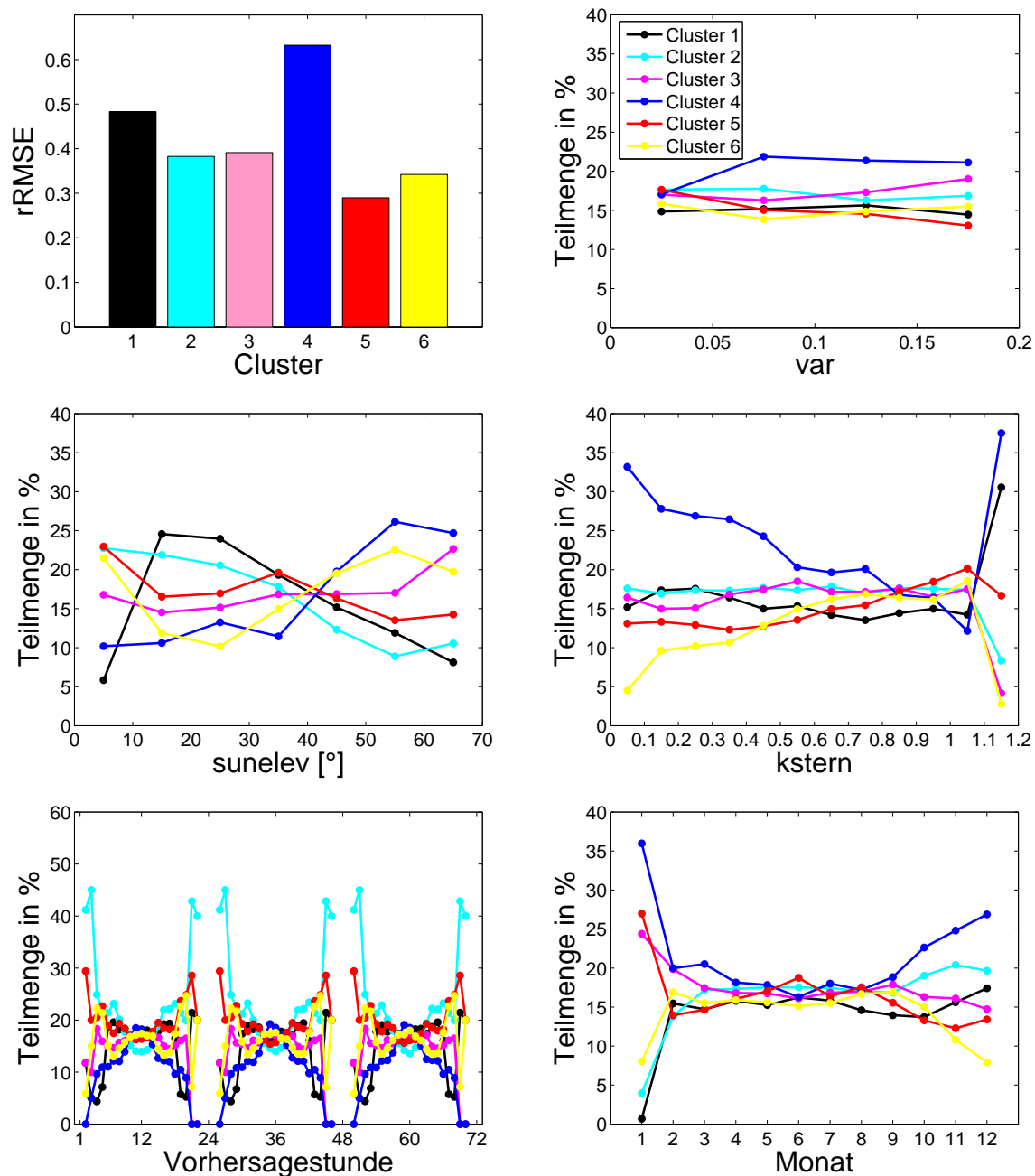


Abbildung 9.12: Darstellung des $rRMSE$ und der Teilmengen am Gesamtdatensatz für das jeweilige Cluster in Abhängigkeit von den Parametern var , $sunelev$, k^* , der Vorhersagestunde und dem Monat für das Jahr 2003 und die Kombination 6. Die Legende oben rechts gilt für alle Darstellungen.

Zu Kapitel 7.1

Beschreibung des Diffusstrahlungsmodells über drei Parameter nach [Skartveit et al. (1998)].

Für $\sigma_i > 0$ nach Gl. 7.5 wird der Diffusanteil d über den Term $\delta(k_t, \sigma_i, sunelev)$ korrigiert. Hierfür ergibt sich $\delta(k_t, \sigma_i, sunelev)$ zu:

$$\begin{aligned} 0.14 \leq k_t \leq k_x : \quad \delta(k_t, \sigma_i, sunelev) &= -3k_L^2(1 - k_L) * \sigma_i^{1.3} \\ k_x \leq k_t \leq (k_x + 0.71) : \quad \delta(k_t, \sigma_i, sunelev) &= 3k_R(1 - k_R)^2 * \sigma_i^{0.6} \\ k_t \leq 0.14 \wedge k_t \geq (k_x + 0.71) : \quad \delta(k_t, \sigma_i, sunelev) &= 0 \end{aligned} \tag{9.1}$$

mit

$$\begin{aligned} k_x &= 0.56 - 0.32 * \exp(-0.06 * sunelev) \\ k_L &= (k_t - 0.14)/(k_x - 0 - 14) \\ k_R &= (k_t - k_x)/0.71. \end{aligned} \tag{9.2}$$

Der Diffusanteil d wird bestimmt über:

$$\begin{aligned} k_t \leq k_0 : \quad d &= 1 \\ k_0 \leq k_t \leq a_1 k_c : \quad d &= F(k_t) := 1 - (1 - d_c)(0.11\sqrt{K} + 0.15K + 0.74K^2) \\ a_1 k_c \leq k_t \leq k_{max} : \quad d &= F(a_1 k_c)(1/k_t - 1)/(1/a_1 k_c - 1) \\ k_t \geq k_{max} : \quad d &= 1 - k_{max}(1 - d_{max})/k_t \end{aligned} \tag{9.3}$$

mit $k_0 = 0.22$, $a_1 = 0.95$ und

$$K = 0.5 * (1 + \sin\pi(\frac{k_t - k_0}{k_c - k_0} - 0.5)).$$

Für k_c und d_c gilt

$$\begin{aligned} k_c &= 0.83 - 0.56\exp(-0.06 * sunelev) \\ d_c &= 0.07 + 0.046(90 - sunelev)/(sunelev + 3) \end{aligned} \tag{9.4}$$

und für k_{max}

$$k_{max} = [k_{bmax} + F(a_1 k_c)/(1/a_1 k_c - 1)]/[1 + a_1 k_c/(1/a_1 k_c - 1)]$$

mit $k_{bmax} = 0.81^\alpha$ und $\alpha = (1/\sin sunelev)^{0.6}$.

Literatur

- ADRIAN, G. ; FRÜHWALD, D. ; MAJEWSKI, D. ; RITTER, B. ; DOMS, G. ; STEPPELER, J. ; HEISE, E. ; WERGEN, W. ; BUCHHOLD, M. ; SCHRAFF, C. ; HESS, R.: *Die neue Modellkette des DWD*. promet, meteorologische Fortbildung, Jahrgang 27 Heft 3/4, 2002
- ANTHES, T.T.: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. In: *Mon. Wea. Rev.* 106 (1978), S. 1045–1078
- ARMSTRONG, M.A.: *Comparison of MM5 Forecast Shortwave Radiation with Data obtained from the Atmospheric Radiation Measurement Program*, University of Maryland, Master of Science Scholarly Paper, 2000
- BEYER, H. ; COSTANZO, C. ; HEINEMANN, D.: Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. In: *Solar Energy* 56 (1996), S. 207–212
- BENJAMIN, S.G.: *Some effects of surface heating and topography on the regional severe Storm environment*, Pennsylvania State University, Dissertation, 1983
- BONNEL, B. ; FOUQUART, Y. ; VANHOUTTE, J.-C. ; FRAVALO, C. ; ROSSET, R.: Radiative properties of some African and mid-latitude stratocumulus clouds. In: *Beitr. Phys. Atmosph.* 56 (1983), S. 409–428
- BOFINGER, S. ; HEILSCHER, G. ; HOYER, C.: *Solar Forecast Based on ECMWF and Model Output Statistic (MOS)*, meteocontrol GmbH, Envisolar proposal, AO/1-4364/03/I-IW,EOEP-EOMD, 2004
- BONHAM, F.: *Geographic Information Systems for Geoscientists. Modeling with GIS*. Geological Survey of Canada. Pergamon, Elsevier Science Ltd., Kidlington, New York, Tokyo, 1994
- BRIGHT, S.L.: The sensitivity of the numerical simulation of the Southwest monsoon boundary layer to the choice of PBL turbulence parameterization in MM5. In: *Wea. Forecasting* 17 (2002), S. 99–114
- CANO, D. ; MONGET, J. ; ALBUSSION, M. ; GUILLARD, H. ; REGAS, N. ; WALD, L.: A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. In: *Solar Energy* 37 (1986), S. 31–39
- COAKLEY, P.: The two stream approximation in radiative transfer: Including the angle of the incident radiation. In: *J. Atmos. Sci.* 32 (1975), S. 409–418

- COMET®: *Cooperative Program for Operational Meteorology, Education, and Training (COMET®) Web site at <http://meted.ucar.edu/> of the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), funded by the National Weather Service.* University Corporation for Atmospheric Research, 2002
- CAHALAN, R. ; RIDGEWAY, W. ; WISCOMBE, W ; BELL, T ; SNIDER, J.: The albedo of fractal stratocumulus clouds. In: *J. Geophys* 51 (1994), S. 2434–2455
- DUDHIA, J. ; GILL, D. ; MANNING, K. ; WANG, W. ; BRUYERE, C.: *PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3.* Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 2003
- DUMORTIER, D.: Modelling global and diffuse horizontal irradiances under cloudless skies with different turbidities. In: *Daylight II, JOU2-CT92-0144, Final Report Vol.2* (1995)
- EBERT, J.A.: A parametrization of ice cloud optical properties for climate models. In: *J. Geophys. Res.* 97 (1992), S. 3831–3836
- ERBS, D.G. ; KLEIN, S.A. ; DUFFIE, J.A.: Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. In: *Solar Energy* 28 (1982), S. 293–302
- EVERITT, B.: *Cluster Analysis.* Heinemann Educational Books, London, 1974
- FOUQUART, B.: Computations of solar heating of the earth's atmosphere: A new parameterization. In: *Beitr. Phys. Atmos.* 53 (1980), S. 35–62
- FOUQUART, Y.: Radiative transfer in climate modeling. In: *NATO Advanced Study Institute on Physically-Based Modeling and Simulation of Climate and Climate Changes, Erice, Sicily, M.E. Schlesinger* (1986), S. 223–283
- FRÜH, B.: *Entwicklung und Modellierung einer Modellhierarchie zur Simulation der aktinischen Strahlung in aerosolbelasteter und bewölkter Atmosphäre,* Johannes Gutenberg Universität Mainz, Dissertation, 2000
- GRELL, G.A. ; DUDHIA, J. ; STAUFFER, D.R.: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). In: *NCAR Technical Note, TN-398+STR, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research* (1995)
- GRELL, G.A. ; EMEIS, S. ; STOCKWELL, W.R. ; SCHOENEMEYER, T. ; FORKEL, R. ; MICHALAKES, J. ; KNOCHE, R. ; SEIDL, W.: Application of a Multiscale, Coupled MM5/Chemistry Model to the Complex Terrain of the VOTALP Valley Campaign. In: *Atmos. Environ.* 34 (2000), S. 1435–1453

- GIRODO, M.: *Untersuchung von 3D-Wolkeneffekten auf die satelliten-gestützte Berechnung der solaren Einstrahlung*, Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, Diplomarbeit, 2003
- GLAHN, D.A.: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. In: *J. Appl. Meteor.* (1972), S. 1203–1211
- HAMMER, A.: *Anwendungsspezifische Solarstrahlungsinformationen aus Meteosat-Daten*, Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, Dissertation, 2000
- HAMMER, A. ; HEINEMANN, D. ; HOYER, C. ; KUHLEMANN, R. ; LORENZ, E. ; MÜLLER, R.W. ; BEYER, H.G.: Solar energy assessment using remote sensing technologies. In: *Remote Sensing of Environment* 86 (2003), S. 423–432
- HASS, H. ; MEMMESHEIMER, M. ; GEISS, H. ; JAKOBS, H.J. ; LAUBE, M. ; EBEL, A.: Simulation of the Chernobyl radioactive cloud over Europe using the EURAD model. In: *Atmos. Environ.* 24 (1990), S. 673–692
- HOLTON, J.R.: *An Introduction to dynamic meteorology*. Academic Press, 1992
- HULS, H.C. van d.: *Light Scattering by Small Particles*. Dover Publications, Inc. New York, 1981
- KAUFMANN, P.: *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley and Sons, New York, 1990
- KALKSTEIN, L.S. ; TAN, G. ; SKINDLOV, J.A.: An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification. In: *J. Climate Appl.Meteor.* 26 (1987), S. 717–730
- LACIS, J.E.: A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. In: *American Met. Soc.* 31 (1974), S. 118–133
- LANGE, M.: *Analysis of the Uncertainty of Wind Power Predictions*, Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, Dissertation, 2003
- LENOBLE, J.: *Atmospheric Radiative Transfer*. A. DEEPAK Publishing, 1993
- LIU, K.N.: *Radiation and cloud processes in the atmosphere*. New York: Oxford University Press, 1992
- LORENZ, E.: *Methoden zur Beschreibung der Wolkenentwicklung in Satellitenbildern und ihre Anwendung zur Solarstrahlungsvorhersage*, Universität Oldenburg, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, Dissertation, 2004
- MORCETTE, J.-J.: Radiation and cloud radiative properties in the ECMWF operational weather forecast model. In: *J. Geophys. Res.* 96 (1991), S. 9121–9132

- MORCETTE, J.-J.: Radiation Transfer, Meteorological Training Course Lecture Series. In: *Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF, Reading UK* (2000)
- PAGE, J.: Algorithms for the satellite programme. In: *Technical Report* (1996)
- PERSON, A.: User Guide to ECMWF forecast products. In: *Meteorological Bulletin M3.2* (2003)
- RAGWITZ, C.: *Feed-In Systems in Germany and Spain and a comparison*, Fraunhofer Institut für Systemtechni und Innovationsforschung, Diss., 2005
- REINDL, D.T. ; BECKMAN, W.A. ; DUFFIE, J.A.: Diffuse fraction correlations. In: *Solar Energy* 45 (1990), S. 1–7
- REUTER, H.: *Die Wettervorhersage, Einführung in die Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, 1976
- SKARTVEIT, J.A.: A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. In: *Solar Energy* 38 (1987), S. 271–274
- SCHRODIN, R. ; LINK, A. ; REITER, Y.: *Quarterly Report of the German NWP-System, Part2: Description of the German NWP System*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2002
- SKARTVEIT, A. ; OLSETH, J.A. ; TUFT, M.E.: An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. In: *Solar Energy* 63 (1998), S. 173–183
- STAMNES, G.E.: *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*. Cambridge University Press, 1999
- STEPHENS, G.L.: Radiation Profiles in Extended Water Clouds. Part I:Theory - Part II: Parameterization Schemes. In: *American Met. Soc.* 35 (1978), S. 2111–2132
- STORCH, F.W.: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, 1999
- WHITE, P.W.: Part III: Dynamics and Numerical Procedures (CY25R1). In: *IFS Documentation Cycle CY25R1, ECMWF Research Department, Reading UK* (2002)
- YARNAL, B.: *Synoptic climatology in environmental analysis - A primer*. Belhaven Press, London and Florida, 1993
- ZAMORA, R.J. ; SOLOMON, S. ; DUTTON, E.G. ; BAO, J.W. ; TRAINER, M. ; PORTMANN, R.W. ; WHITE, A.B. ; NELSON, D.W. ; MCNIDER, R.T.: Comparing MM5 radiative fluxes with observations gathered during the 1995 and 1999 Nashville southern oxidants studies. In: *J. of Geophysical Res.* 108 (2003), S. 1–13

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für Anregungen, Korrekturvorschläge und die fachliche Unterstützung bedanke ich mich bei meiner Betreuerin Dr. Elke Lorenz.

Ich danke Dr. Detlev Heinemann und Prof. Dr. Jürgen Parisi, die mir die Möglichkeit zu dieser Arbeit gaben und mir bei der Gestaltung der Arbeit mit Rat zur Seite standen.

Des Weiteren gilt mein Dank Dr. Richard W. Müller, der mich bereits im Rahmen meiner Studien- und Diplomarbeit in das Gebiet der Energiemeteorologie mit dem Schwerpunkt Solarenergie eingeführt hat. Auch wenn er die Arbeitsgruppe früher verlassen hat als erwartet, danke ich ihm für seine Unterstützung.

Ich danke der gesamten Arbeitsgruppe Energiemeteorologie für das angenehme Arbeitsklima und die vielen kleinen Hilfen, die ich in Anspruch nehmen durfte. In diesem Zusammenhang gilt der Dank besonders den „Sonnengöttern“ auf meinem Flur, zu denen unter anderem gehören: Anja Drews, die mich bei Fragen zur Erstellung von Karten und der Verwendung von IDRISI zur Seite stand; Jethro Betcke, der mich tapfer als seinen Zimmerkollegen ertragen hat; Stephan Block und als Ehemaliger Andreas Braukmann, die in ihrer Funktion als Systemadministratoren für einen funktionierenden Arbeitsplatz sorgten; Rolf Kuhleemann, der es trotz seiner Künste im Kaffeekochen nicht schaffte auch mich zu verführen; Annette Hammer, der ich als Reiseführer dienen durfte.

Für hilfreiche Antworten bei Fragen zur Modellierung mit MM5 bedanke ich mich bei Dr. Arnold Tafferner vom DLR. Die unterschiedlichen Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD), dem European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), dem National Centre for Environmental Prediction (NCEP) und der meteocontrol GmbH freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern und meinen Bruder Dennis, die mich ermutigten weiterzumachen, wenn ich selbst zweifelte. Der größte Dank gilt aber meiner Frau Sylvia, die mich ununterbrochen unterstützte und die nötige Kraft gab diese Arbeit zu Ende zu führen.

Vielen Dank

Lebenslauf

Marco Girodo
geboren am 16.09.1975 in Soltau
verheiratet

Schulbildung

1982-1986: Grundschule Bremer Heerstraße, Oldenburg
1986-1988: Orientierungsstufe Osterburg, Oldenburg
1988-1995: Herbartgymnasium, Oldenburg
Abitur

Wehrpflicht

1995-1996: Ableistung des Wehrdienstes, Budel (NL) und Jever-Schortens (D)

Berufsausbildung

1996-1998: Ausbildung zum Metallbauer der Fachrichtung Konstruktionstechnik,
Oldenburg
Gesellenbrief

Studium

1998-2003: Studienfach Physik mit Nebenfach Informatik an der Carl-von-Ossietzky
Universität Oldenburg
Diplom Physik, Abschlussnote: sehr gut

Promotion

seit 2003: Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand an der Fakultät
Mathematik und Naturwissenschaften der Carl-von-Ossietzky
Universität Oldenburg

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Oldenburg den 06.03.2006

Marco Girodo