

## 2.1 Einleitung

Die erneuerbaren Energien waren in Deutschland in den vergangenen Jahren so erfolgreich, dass Solarzellen auf den Dächern von Häusern und Scheunen in ganz Deutschland zum normalen Erscheinungsbild gehören. Anders als Windkraftanlagen, bei denen es ein klares Nord-Süd-Gefälle gibt, sind Solaranlagen relativ homogen verbreitet und liefern einen großen Beitrag zum jährlichen Elektrizitätsbedarf der Gesellschaft, der alle Prognosen der Vergangenheit übertrifft. Ja, es ist sogar so, dass die *installierte Leistung* der photovoltaischen Anlagen die aller anderen Energieträger seit 2013 übertrifft.

Ende 2012 waren in Deutschland 1,3 Millionen Solaranlagen mit einer Nennleistung von 32,4 Gigawatt (GW) installiert (Wirth 2013, S. 5). Das bedeutet, dass an einem sonnenreichen Tag im Sommer der größte Teil der benötigten elektrischen Energie in Deutschland von Solaranlagen produziert werden kann. Eine solche Situation wurde in der Vergangenheit auch von Optimisten nicht für möglich gehalten. Eher schon stimmten viele Experten solchen Aussagen zu, wie der von Hans-Peter Villis, dem ehemaligen Vorstandsvorsitzenden der EnBW: „Für eine effiziente, großtechnische Nutzung der Solarenergie scheint in Deutschland zu selten die Sonne. Der Solaranteil an der Energieerzeugung wird auch 2020 noch bei gerade mal einem Prozent liegen.“ (Janzing 2011, S. 162).

Dieser Wert wurde schon im Jahre 2013 um mehr als das Vierfache übertroffen. Kann man im Fall von Villis unterstellen, dass er in der Nutzung der Solarenergie eher eine Bedrohung seines Geschäftsmodells sah und seine Aussagen daher weniger von Sachkenntnis geleitet waren denn vom Wunsch eine unliebsame Konkurrenz niederzuhalten, hätte man im Fall der Prognos AG, einem der ältesten Wirtschaftsforschungs- und Beratungsunterneh-

men, mehr erwarten können. Eine Prognos-Studie von 1998 schätzte allerdings die Stromerzeugung aus Solaranlagen mit einem Wert von 0,44 Terawattstunde (TWh) für 2020 ein. Dieser Wert wurde schon 2008 um das zehnfache übertroffen (Pieprzyk und Rojas Hilje 2009, S. 8). Wie konnte dieser enorme Wandel der Energieerzeugung in so kurzer Zeit vonstattengehen, dass davon auch die meisten Fachleute überrascht wurden?

## 2.2 Grundlage der Einspeisung von elektrischem Strom in das Netz

Ein Teil der Antwort liefert die Betrachtung der gesetzlichen Grundlagen. Damit man überhaupt Strom von einer privaten Solaranlage in das Netz einspeisen kann, braucht es eine gesetzliche Grundlage. Diese wurde durch das Stromeinspeisungsgesetz von 1991 erstmals geschaffen. In diesem Gesetz wurde die Einspeisung und Vergütung von elektrischem Strom in das öffentliche Netz verbindlich geregelt (siehe Wikipedia: Erneuerbare-Energien-Gesetz). Vor allem kleine Unternehmen konnten sich auf dieser Grundlage gegen die etablierten Stromkonzerne behaupten, die ihnen den Zugang zum Netz verweigerten oder erschwerten.

Die eigentliche Zielgruppe des Gesetzes waren zwar die süddeutschen Wasserkraftwerke, aber die zugesicherte Vergütung für eingespeisten Strom löste in Norddeutschland einen Windkraftboom aus, obwohl für die Windkraft nur 90% des Durchschnittserlöses der Energieversorger gezahlt werden musste (Janzing 2011, S. 95). Mit dem 1.000-Dächer-Programm der Bundesregierung von 1990 wurden private Solaranlagen mit maximal 5 Kilowatt (kW) Standardleistung mit bis zu 70% der Anlagen- und Investitionskosten gefördert. Im Jahre 2000 wurde durch die rot-grüne Regierung das Stromeinspeisungsgesetz durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) abgelöst.

Außerdem wollte man den erreichten Stand von 50 Megawatt (MW)<sup>1</sup> bei der Photovoltaik auf 300 MW ausdehnen und legte dazu das 100.000-Dächer-Programm auf. In diesem Programm wurde der Aufbau von Photovoltaikanlagen durch zinsgünstige Kredite der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) gefördert. Das Ziel dieses Programms wurde bereits 2003 erreicht, aber die weitere Förderung der Photovoltaik wurde durch eine Novellierung des EEG sichergestellt, die 2004 erfolgte. Die Erfolge beim Ausbau der Photovoltaik machten immer wieder Anpassungen des EEG notwendig, zuletzt die sogenannte Photovoltaiknovelle vom Juni 2012.

<sup>1</sup> Die Leistungsangaben bei Solarzellen beziehen sich immer auf die sogenannte Peakleistung, also die elektrische Leistung, die die Solarzelle bei maximaler Sonneneinstrahlung abgibt.

## 2.3 Liberalisierung des Strommarkts

Die gesetzliche Garantie eines fixen Preises für Strom aus erneuerbaren Energiequellen ist aber nur eine Neuerung des Strommarkts. Die andere als „Liberalisierung des Strommarkts“ bezeichnete Neuerung besteht in der Einführung eines Strommarktes oder sogenannten Strombörsen ab 2000. Heute wird Strom an der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig gehandelt. Das Nebeneinander von garantierten Strompreisen für den Strom aus Solaranlagen und dem Strommarkt an der Strombörse in Leipzig verursacht ein finanzielles Problem, das in seiner Zuspitzung durch den Umweltminister Altmeier 2013 eine breite Debatte und ein vielfältiges Presseecho auslöste.

Vielfach wird berichtet, dass die erneuerbaren Energien Opfer ihres Erfolgs werden. Gemeint ist damit eine Situation, in der die Strommengen, die auf der Grundlage des EEG zu festen Preisen aufgekauft werden müssen, immer stärker ansteigen, der Strompreis an der Börse in Leipzig aber stark schwankt. Insbesondere zur Mittagszeit – früher ein Zeitpunkt erhöhter Stromnachfrage, die nach den Gesetzen der Strombörse eigentlich zu hohen Strompreisen führen sollte – liefern die Photovoltaikanlagen die größte Menge an Elektrizität, soviel, dass an der Strombörse gelegentlich negative Preise erzielt werden. Es kann dann zu der paradoxen Situation kommen, dass dem Abnehmer von Elektrizität auch noch Geld gezahlt wird, anstatt einen Preis von ihm zu verlangen.

Die eigentlich komfortable Situation eines Überflusses an Energie zur Mittagszeit wird durch den Mechanismus des EEG zu einer problematischen Situation, die dazu führt, dass obwohl der Strom aus der Photovoltaik immer billiger wird, der Strom für die Konsumenten immer teurer wird. Angesichts dieser paradoxen Situation, zeitweiliger Überschuss an Strom aus erneuerbaren Energiequellen einerseits, aber Verfall der Strompreise an der Börse und Anstieg der Konsumentenpreise für Strom andererseits, wird ein weiterer Blick auf die Geschichte spannend. Auslöser des Problems ist die Verabschiedung des EEG 2000, denn anders als im Stromeinspeisungsgesetz von 1991 wird im EEG keine Deckelung vorgenommen und damit wurde die Grundlage für das, was uns heute als Problem präsentiert wird, gelegt.

Damals war es der Traum von Grünen und Sozialdemokraten, dass es gelingen möge, nach den Unfällen in Harrisburg und Tschernobyl aus der Kernenergie auszusteigen und auch aus den konventionellen Formen der Energieproduktion. Vielen war klar, dass Kohle und Öl begrenzte Rohstoffe sind, deren Verbrennung nicht unbedingt die sinnvollste Weise ihrer Verwendung darstellt. Auch ohne die Erkenntnis, dass die Verbrennung Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) freisetzt und damit Ursache der Erderwärmung ist, fanden sich seit der Ölkrise 1973 viele gute Gründe aus der Verbrennung von Kohle und Öl auszusteigen. Das Waldster-

ben in den achtziger Jahren war eines der damals bedeutendsten Umweltthemen und die 1980 gegründeten und 1983 in den Bundestag eingezogenen Grünen überreichten dem neu gewählten Kanzler Kohl einen Tannenzweig statt Glückwünschen, um das Waldsterben symbolisch im Bundestag zu thematisieren. Die Träumer von damals hätten sich allerdings nie träumen lassen, dass dreißig Jahre später ausgerechnet ein zeitweiliger Überschuss an regenerativer Energie zu aufgeregten Diskussionen führen würde. Die technische Entwicklung im Bereich der Photovoltaik wurde durch die Einspeisevergütung so vorangetrieben, dass die freigesetzten Potenziale sogar von den Fachleuten nicht erkannt wurden.

Grundsätzlich war man sich über den Energiegehalt der Sonnenstrahlung schon im 19. Jahrhundert im Klaren. In unseren Breiten erhält man Spitzenwerte der solaren Leistung von ca. 1 kW pro Quadratmeter. Über das Jahr aufsummiert liefert die Sonne beispielsweise in Mannheim eine Energie von 1.200 kWh pro Quadratmeter. Mit einem Quadratmeter Solarzelle (aktueller Wirkungsgrad hochwertiger Solarzellen: 22%) lassen sich daraus rechnerisch 264 kWh Strom erzielen. Der Strombedarf eines Privathaushalts mit einer Person (im Mittel 2.050 kWh)<sup>2</sup> könnte sich demnach mit weniger als 10 m<sup>2</sup> Solarfläche realisieren lassen.

Die Fachleute haben sich auch nicht wirklich über dieses Potential der Sonnenenergie getäuscht, sondern über die Geschwindigkeit der technischen Realisierung einer ökonomischen sinnvollen Nutzung dieses Energieangebots durch die Photovoltaik. Für den unerwartet heftigen Anstieg des Ausbaus der Photovoltaik ist neben der Förderung der erstaunliche Verfall der Preise für photovoltaische Solarmodule als Ursache zu nennen. Allein zwischen Mai 2009 und Mai 2013 ist der Preis in Euro pro Watt peak von 2,61 (Europa) bzw. 2,17 (China) auf 0,78 (Europa), bzw. 0,54 (China)<sup>3</sup> gefallen. Das ist ein Rückgang von zwei Drittel bei den europäischen und ca. drei Viertel bei den chinesischen Produkten.

Da ein Ende noch nicht abzusehen ist und neue Techniken wie z.B. die flexiblen Dünnschicht-Solarmodule permanent weiterentwickelt werden, z.B. gibt es neuerdings flexible Solarmodule auf Emailleblech mit Wirkungsgraden von 18,6%<sup>4</sup>, wird es immer mehr Anwendungspotentiale für eine kostengünstige Stromproduktion aus Sonnenlicht geben. Ein weiterer Grund für den massenhaften Ausbau von Photovoltaikanlagen liegt in der Finanzkrise und dem Mangel an sicheren Geldanlagemöglichkeiten mit einer akzeptablen Verzinsung. Gerade die aktuell zu verzeichnenden Insolvenzen von Firmen wie Solarmillennium und

<sup>2</sup> [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_20100927\\_Energieverbrauch\\_im\\_Haushalt/\\$file/Energie-Info%20Energieverbrauch%20in%20Haushalten%202009.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_20100927_Energieverbrauch_im_Haushalt/$file/Energie-Info%20Energieverbrauch%20in%20Haushalten%202009.pdf)

<sup>3</sup> <http://www.solarserver.de/service-tools/photovoltaik-preisindex.html>

<sup>4</sup> <http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/2013/kw36/duennschicht-photovoltaik-zsw-entwickelt-flexible-solarzelle-auf-emailleblech-mit-186-prozent-wirkungsgrad.html>

Prokon zeigen, dass der Markt für regenerative Energie nicht nur durch Umweltschutzgesichtspunkte angetrieben wurde.

## 2.4 Die Anfänge der photovoltaischen Stromerzeugung

Auch dies konnte sich am Beginn sicherlich keiner der damaligen Solarpioniere vorstellen. Als 1979 das erste Mal eine Photovoltaikanlage im Schweizer Kanton Aargau ausgerechnet durch das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung Strom in das Schweizer Netz einspeiste, waren die Module „noch teurer, als wenn sie aus purem Gold gefertigt wären“ wie der Initiator Markus Real berechnet hat (Janzing 2011, S. 54). Die Technik für die Herstellung von Solarmodulen hat sich in den siebziger Jahren zunächst nur langsam entwickelt. Vor allem der große Teil von zeitaufwendiger Handarbeit im Montageprozess der Solarmodule führte zu hohen Preisen.

Aber Investitionen in eine industrielle Produktion ließen bei den damaligen Marktaussichten auf sich warten. Es war die Zeit der Idealisten, die vom Solarstrom träumten, aber weit davon entfernt waren, ihn zu konkurrenzfähigen Preisen zu produzieren. In Deutschland wurden Solarzellen schon in den sechziger Jahren z.B. von Telefunken in Heilbronn produziert. Sie waren für die Energieversorgung der Satelliten des deutschen Raumfahrtprogramms gedacht, das 1969 mit dem Start des Satelliten Azur begann. Auch Siemens und AEG begannen mit der Fertigung von Solarzellen.

Die hohen Preise spielten in der Weltraumfahrt keine entscheidende Rolle, weil die Kosten für Solarzellen immer noch niedriger waren als die der alternativen Energielieferanten, z.B. Radioisotopgeneratoren. Eine ernsthafte Suche nach Alternativen zu Kohle und Öl setzte in Deutschland erst nach der Ölkrise 1973 ein. AEG, BBC, Dornier, Phillips und RWE gründeten 1975 in Essen die Arbeitsgemeinschaft Solarenergie, die ab 1978 als Bundesverband Solarenergie firmierte (Janzing 2011, S. 23). Auch in den Reihen der Wissenschaft entstanden Institute, die sich der Erforschung der Solarenergie widmeten, so z.B. die Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, die von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in München 1975 gegründet wurde.

Diese Gesellschaft bezweckte neben der Forschung vor allem auch Lobbyarbeit. 1981 wurde das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) gegründet. Sah man in dieser Zeit auch in den Reihen der Fraunhofer-Wissenschaftler die Befassung mit Photovoltaik noch als verqueres Hobby an, so wuchs das ISE doch zum inzwischen zweitgrößten Institut in der Fraunhofer-Gesellschaft mit mehr als 1.000 Mitarbeitern heran (Janzing 2011, S.

35). Einer der wichtigen Schritte auf dem Weg zur Industrialisierung der Modulproduktion ist das Projekt „Cyrus“ von 1995 mit dem Greenpeace 4.400 Kaufinteressierte für eine Solaranlage mit einem Preis von damals 13.500 Mark pro Kilowatt (6,75€ pro Watt peak) gewann und die Adressen an zwei sich neu konstituierende Solarfertigungsbetriebe vermittelte: Solon in Berlin und die Solar-Fabrik in Freiburg (Janzing 2011, S. 127). In einer Zeit, in der die Großen der Branche Deutschland als Fertigungsstandort als zu teuer ansahen, etablierte sich ein Mittelstand der Solarindustrie.

Salvamoser, dem Gründer der Solarfabrik in Freiburg, gelang es, seine Firma 2002 als Aktiengesellschaft erfolgreich an den Markt zu bringen. Ein weiterer wichtiger Erfolg ist die Gründung der S.A.G. Solarstrom AG durch Salvamoser und Ritter 1998. Dieses Unternehmen fing an Solarkraftwerke im großen Stil zu finanzieren, zu bauen und zu vermarkten. Ein Beispiel für die neue Größenordnung von Photovoltaikanlagen ist das von S.A.G. betriebene Solarfeld Erlasee, welches bis 2007/08 die größte Photovoltaikanlage der Welt war. Mit einer Nennleistung von 11,4 MW speiste diese Anlage nun in das 20-Kilovolt-Netz ein und man kann zu Recht von einem Solarkraftwerk reden.

Heute werden Anlagen mit 266 MW (Mount Signal Project in Kalifornien) projektiert und sind in Bau, während die Antelope Valley Solar Ranch One (Kalifornien) mit 100 MW in Betrieb genommener Leistung das derzeit (2013) größte Photovoltaikkraftwerk der Welt ist<sup>5</sup>. Vor allem das Aufkommen von starken Konkurrenten aus Asien, insbesondere China, hat die Situation auf dem Solarmodulmarkt extrem verschärft. So extrem, dass viele Hersteller aus Deutschland Insolvenz angemeldet haben und viele Hoffnungen auf einen Aufschwung der heimischen Solarbranche vor allem in den neuen Bundesländern begraben werden mussten.

## 2.5 Die Technik der Photovoltaikanlagen

Die Technik zur Herstellung von Photovoltaikanlagen war schon in den siebziger Jahren nicht wirklich neu. Sie basiert auf Verfahren, die in der Halbleiterindustrie bereits länger etabliert waren. Doch der technische Fortschritt in der Halbleitertechnik führte zu einem rapiden Verfall der Preise und einem scharfen Wettbewerb, der immer wieder dazu führte, dass Unternehmen aus der Konkurrenz ausschieden. Unter den umsatzstärksten Halbleiterherstellern der Welt, die von Intel, Samsung und Texas Instruments angeführt werden, findet sich nur noch ein deutsches Unternehmen (Infineon) auf Platz 12. Die Liste der Solarzellen-Hersteller wurde 2011 von der chinesischen Firma Suntech Power angeführt, die allerdings im

<sup>5</sup> <http://solarmedia.blogspot.de/p/grosste-pv-anlagen-der-welt.html>

März 2013 Insolvenz angemeldet hat. Das ehemals deutsche Unternehmen Q-Cells belegte 2011 noch Platz 13, meldete aber 2012 Insolvenz an und wurde an die südkoreanische Firma Hanwha verkauft. Die Bonner Firma Solarworld kam 2011 noch auf Platz 20, ist inzwischen aber auch in erheblichen Schwierigkeiten und schlingert nach einem Schuldenschnitt in eine ungewisse Zukunft. Die Herstellung von Solarzellen ist zwar eng verwandt mit der Herstellung von integrierten Schaltkreisen, aber weniger komplex. Für die Erzeugung des elektrischen Stroms ist nur die Herstellung einer Sperrschicht vonnöten (bei den neueren Entwicklungen auch zwei oder drei), aber keiner komplexen Struktur wie in einem Mikroprozessor.

Die Anforderungen an die Qualität des Rohstoffs Silizium liegen unter denen in der Halbleiterindustrie. Auf dem Markt für Silizium ist es in den letzten Jahren zu einem drastischen Preisverfall gekommen, was Firmen wie z.B. Wacker Chemie in Bayern schwer zu schaffen macht. Die besonderen Herausforderungen in der Solarindustrie liegen in der Produktion vergleichsweise großer Flächen des Halbleitermaterials und der Fertigung zu Solarmodulen und deren Montage zu Solaranlagen. Der industrielle Fertigungsprozess wird heute unter Einsatz von Robotern durchgeführt. Sowohl beim Fertigungsprozess als auch im Wirkungsgrad sind große Fortschritte erreicht worden.

Die ersten Solarzellen in der Weltraumfahrt begnügten sich mit einem Wirkungsgrad im einstelligen Prozentbereich. Heute erreicht man mit kristallinen Siliziumsolarmodulen ca. 25% Wirkungsgrad, mit polykristallinen Solarzellen sind es ca. 20%. Im Labor erreichte man im September 2013 mit neuen Materialien, die es erlauben das Sonnenlicht mit drei Sperrschichten statt nur einer einzufangen und einer optischen Konzentration der Sonnenstrahlen auf die Solarzelle um den Faktor 297, einen Wirkungsgrad von 44,7%<sup>6</sup>. In den nächsten Jahren ist damit zu rechnen, dass die Solarzellen billiger und effektiver werden, außerdem werden sie immer mehr Anwendungsfelder erobern.

## 2.6 Die erste Solarzelle der Welt

Von den heutigen Wirkungsgraden konnten Daryl Chapin, Calvin Fuller und Gerald Pearson von den Bell-Laboratorien 1953 nur träumen als sie die erste Solarzelle der Öffentlichkeit vorstellten. Wenige Jahre nach der Entwicklung des ersten Transistors (1945) erkannten sie, dass die Halbleitertechnik nicht nur in der Elektronik – also bei der Steuerung und Kontrolle von eher schwachen Strömen – eine Umwälzung der technischen Produkte verursachen wird, sondern auch in der Stromerzeugung ein Potenzial hat. Allerdings waren die Leistungen, die in den ersten

<sup>6</sup> <http://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/presseinformationen-2013/weltrekord-solarzelle-mit-44-7-prozent-wirkungsgrad>





Abb. 4 Vanguard 1, Stromversorgung durch Solarzellen.

Jahren von Solarmodulen produziert wurden, so bescheiden, dass man nicht ernsthaft daran denken konnte, hierin eine Konkurrenz zu Kohle, Öl und Uran zu sehen. Man konnte zwar schon flächige Solarmodule herstellen, aber ihre Preise waren extrem hoch. Die Weltraumfahrt war der Einsatzbereich, in dem sich Solarzellen schnell durchsetzen konnten und wo ihre hohen Kosten akzeptiert wurden, weil es keine ernsthaften Alternativen gab. 1958 wurde der erste Satellit (Vanguard 1, Abb. 4) ins All geschossen, der eine Stromversorgung mit Solarzellen an Bord hatte. Die Photovoltaik ersetzte die Stromproduktion von Zellen, die auf der Basis des radioaktiven Zerfalls arbeiteten. Der Strom aus Solarzellen stand zuverlässiger zur Verfügung und bald auch preisgünstiger (Perlin 2002, S. 32).

Vorläufer der ersten Silizium-Solarzelle reichen bis in das Jahr 1883 zurück, als der New Yorker Charles Fritts ein erstes Solarmodul aus Selen präsentierte. Werner Siemens war einer der Experten, die nach einer Prüfung die Echtheit der technischen Funktion bestätigten und ein ungeheures Potential für diese Technik voraussah (Perlin 2002, S. 18). Fritts nutzte einen Effekt, der 1875 schon von William Grylls Adams entdeckt worden war. Die prinzipielle Machbarkeit der Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität war also schon im 19. Jahrhundert belegt, aber der Wirkungsgrad der Selenzelle war sehr bescheiden.

Für die Weiterentwicklung der Technik erwies sich der Mangel an Verständnis für die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse als absolute Barriere. Man verstand nicht, was in dem Material vor sich ging, wenn das Sonnenlicht in elektrischen Strom umgewandelt wurde. Die Zufallsentdeckung konnte daher nicht in eine systematische Weiterentwicklung überführt werden: Man wusste schlicht nicht, was man an den Materialien verändern sollte, um den Wirkungsgrad zu steigern. Erst die mit den Untersuchungen von Ferdinand Braun (1850-1918) zum Gleichrichtereffekt an Halbleitern eingeleitete Forschung

an den elektrischen Eigenschaften von Halbleitern und die quantenmechanische Ausarbeitung der Elektronentheorie der Metalle und der Halbleiter z.B. durch Felix Bloch (1905-1983), Rudolf Peierls (1907-1995) und Walter Schottky (1886-1976), schaffte die dafür notwendigen theoretischen Grundlagen. Das Interesse der Öffentlichkeit für Arbeiten, die versprachen aus Sonnenlicht elektrischen Strom zu gewinnen, war sehr groß. Im 19. Jahrhundert hatte z.B. Jules Verne mit seinen Romanen diese Idee in die Köpfe seiner Leserschaft gepflanzt. Sollte sich durch real existierende Technik tatsächlich realisieren lassen, was der Science Fiction Autor in seinen Romanen beschrieben hatte, so war das für die Presse mehr als nur eine Meldung wert.

Für einen ersten kleinen Pressehype sorgte z.B. Bruno Lange vom Kaiser Wilhelm Institut für Silikatforschung, als er am 31.12.1929 eine Photozelle vorstellte, die einen kleinen Elektromotor antreiben konnte, wenn Sonnenlicht auf sie fiel (Mener 2001, S. 96f). Die Entwicklung der Halbleiterforschung erreichte 1947 einen Höhepunkt durch die Realisation des Transistors durch John Bardeen (1908-1991), Walter Brattain (1902-1987) und William Shockley (1910-1989), den man als Beginn der Mikroelektronik sehen kann. Nun verstand man die Vorgänge im Halbleiter nicht nur theoretisch, sondern war auch praktisch in der Lage, Halbleiter gezielt zu verändern, z.B. durch das Dotieren, um die Eigenschaften gezielt zu verändern.

Die auf diesen Grundlagen möglich gewordene Solarzelle fand neben dem Einsatz im Weltraum nach und nach auch auf der Erde vielfältige Einsatzmöglichkeiten (vgl. Perlin 2002) aber zunächst in Nischen: Beispielsweise wurden viele Solarzellen auf Bohrinseln, Bojen und anderen Einrichtungen verwendet, die weit weg von den Stromversorgungsnetzen waren und Geräte beherbergten, die kontinuierlich mit Energie versorgt werden mussten, auch ohne Personal vor Ort, welches z.B. Generatoren in Betrieb halten konnte. Die Unkompliziertheit der Solarzellen und ihre hohe Zuverlässigkeit erwiesen hier schon früh nützliche Dienste. In abgelegenen Gebieten Amerikas und Australiens wurden Photovoltaikzellen eingesetzt, um sogenannte Repeater im Telefonnetz zu betreiben. Das sind technische Einrichtungen, die das Telefonsignal auf langen Strecken verstärken müssen, damit es nicht zu sehr verwascht und untauglich wird.

## 2.7 Der Beginn der Stromproduktion aus Sonnenlicht

Ein erster Einsatz der Photovoltaik für die Zwecke der Einspeisung von elektrischem Strom in das Netz erfolgte allerdings noch lange nicht. Dennoch wurde in Kalifornien auf der Grundlage des ersten Energieeinspeisungsgesetzes der Welt schon 1978 elektrischer Strom aus Sonnen-

licht in das Elektrizitätsnetz eingespeist. Erzeugt wurde dieser aber nicht durch Photovoltaik, sondern mit einer Technik, die sehr viel älter ist und die auch heute noch weltweit ca. die Hälfte des Stromertrags aus Sonnenenergie produziert. Die Rede ist von der photothermischen Stromproduktion. Der zugrundeliegende physikalische Effekt, die Erwärmung von Substanzen, die von der Sonne bestrahlt werden, wird von der Menschheit seit den Anfängen der Sesshaftigkeit technisch genutzt. Schon die ersten Bautechniker wussten durch die Ausrichtung der Gebäude den Effekt der Erwärmung zu nutzen (vgl. Butti und Perlin 1981). Allerdings war dies eine rein thermische Art der Nutzung der Sonnenenergie.

Die Nutzung für Zwecke der Energietechnik kam erst im 19. Jahrhundert auf. Es musste sich ja überhaupt erst einmal eine Energietechnik moderner Art etabliert haben: die Dampftechnik, die Grundlage für Dampfmaschine und -turbine. Technisch gesehen sind Dampfmaschinen Wärmekraftmaschinen, also Maschinen, die Wärme in mechanische Energie umwandeln. Mit der Dampfmaschine gelang es dem Menschen, sich von der Muskelkraft, seiner eigenen oder der von Tieren, endgültig zu emanzipieren. Vor der Dampfmaschine gab es schon Maschinen, die die Wasserkraft und den Wind nutzten, aber die Dampfmaschine stellte eine viel höhere Energiedichte ortsunabhängig und unabhängig von den zufälligen Schwankungen der Naturkräfte zur Verfügung.

Damals war die Nutzung der Muskelkraft so selbstverständlich, dass James Watt die Leistung eines Pferds zum Standard erhob, an dem die Leistung der neuen Maschine und vor allem ihre Überlegenheit gemessen wurde. Die Pferdestärke (PS) hat sich im Kraftfahrzeug-Bereich bis heute gehalten und vermutlich macht sich kaum noch einer von denen, die diese Einheit bis in die heutigen Tage verwenden, Gedanken darüber, was es bedeutet, wenn man z.B. 100 PS unter der Haube hat. Heute misst man die Leistung generell nicht mehr in PS, sondern in Watt. Diese Einheit, die vormals nur für die elektrische Leistung verwendet wurde, wird heute allgemein verwendet und macht bewusst, dass der z.B. Wärmebedarf eines Hauses ein Energiebedarf ist, den man daher in der selben Einheit misst, wie den Bedarf nach Elektrizität, den der Elektromotor eines Autos benötigt.

## 2.8 Sonnenkraftwerke mit konventioneller Stromerzeugungstechnik

Die neun Parabolrinnenkraftwerke<sup>7</sup>, die in Kalifornien auf der Grundlage des Energieeinspeisungsgesetzes zwischen 1984 und 1991 in Betrieb genommen wurden, be-

legten, dass man die Energie der Sonne tatsächlich für den Zweck der Produktion von Elektrizität nutzen konnte. Ihr Betrieb lieferte allerdings nicht nur den Nachweis, dass dies überhaupt möglich war, denn dieser war lange vorher erbracht worden, sondern diese neuen Anlagen mit Leistungen von 13,8 MW bis 80 MW pro Einheit, zeigten schon die Zuverlässigkeit einer Stromproduktion aus Sonnenenergie über viele Jahre hinweg. Grob vereinfacht dargestellt wird in diesen Kraftwerken mit Hilfe der Sonnenenergie Wasser in Dampf umgewandelt (weiterführende Erläuterungen im Kapitel 3: Solarthermische Kraftwerke).

Der Dampf treibt eine Turbine an und dabei verwandelt sich Wärmeenergie in mechanische Energie. Der allergrößte Teil der weltweiten Stromproduktion basiert auf dieser Dampftechnik. Der Umwandlungsschritt von Wärme in mechanische Energie in Form der Rotation einer Welle auf der auch der Generator für die Erzeugung der Elektrizität angebracht ist, weist allerdings ganz grundsätzliche Grenzen der Effizienz auf, weil die Gesetze der Thermodynamik greifen und der maximale Wirkungsgrad durch den sogenannten Carnot-Wirkungsgrad festgelegt wird.

Zwar ist mehr als genug Sonnenenergie vorhanden, um auch bei einem schlechten Wirkungsgrad den Strombedarf der Menschheit zu befriedigen. Aber der physikalische Wirkungsgrad der Anlage beeinflusst direkt den ökonomischen Wirkungsgrad: Je schlechter er ist, desto teurer wird die Anlage. Auch wenn der Brennstoff, die Sonnenenergie, kostenlos zur Verfügung steht, muss die Anlage, die diesen Brennstoff in Strom verwandelt, bezahlt werden. Je schlechter der Wirkungsgrad, desto höher sind die Kosten, die für die Anlage vorgeschossen werden müssen und desto länger dauert es, bis der Amortisationspunkt erreicht wird. Aus diesem Grund ist der Nachweis der Langlebigkeit der Komponenten und der Zuverlässigkeit des jährlichen Stromertrags aus einer solchen Anlage von eminenter Wichtigkeit. Die Anlage in Kalifornien hat diesen Nachweis spätestens Ende der neunziger Jahre erreicht. Doch was passierte? Es passierte nichts. Keine weiteren Anlagen wurden gebaut.

Erst 17 Jahre nach Inbetriebnahme der letzten Anlage in Kalifornien wurde 2007 eine weitere mit dieser Technik errichtet. Diese steht in Nevada und trägt den etwas großspurigen Namen „Nevada Solar One“. Großspurig ist dies nicht nur, weil schon die Solar Energy Generating Systems (SEGS) Anfang der achtziger Jahre errichtet wurde, oder weil es Pilotanlagen schon in den siebziger Jahren gegeben hat, sondern weil man einer Technik den Namen „Solar One“ gab 97 Jahre, nachdem diese Technik das erste Mal in einer Pilotanlage erprobt wurde (1912) und 119 Jahre nachdem das erste Mal eine Wärmekraftmaschine mit der konzentrierten Energie der Sonne auf der Pariser Weltausstellung 1878 demonstriert wurde. Es ist Augustin Mouchot (Abb. 5), der für seine Maschine den Titel „Solar One“ zu Recht reklamieren könnte (Mouchot et al. 1987, ursprünglich 1879). Mouchot war der erste Solarpionier

<sup>7</sup> Siehe den entsprechenden Abschnitt unter dem Stichwort „Sonnenwärmekraftwerk“ in Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenwärmekraftwerk>.

und hat in einer Zeit, in der die Kohlevorkommen von verschiedenen Autoren für unendlich gehalten wurden, aufgrund der damals neuen Erkenntnis des Energieerhaltungssatzes den Schluss gezogen, dass die Energieproduktion aus Kohle niemals unendlich lange andauern kann. Ihm schien die Nutzung der Sonnenenergie viel naheliegender zu sein, und er machte ab 1860 seine ersten Experimente dazu.



Abb. 5 Fotografie von Augustin Mouchot, 1825-1912.

Zwei Beobachtungen führten ihn dazu, dass man die Energie der Sonne für Dampfmaschinen nutzen kann. Die physikalischen Grundlagen der Thermodynamik machen es erforderlich, dass zwei Temperaturen betrachtet werden müssen: Eine hohe Temperatur, die das Medium (z.B. Dampf), dem die Energie entzogen werden soll, am Anfang dieses Prozesses besitzt und eine niedrige Temperatur, die das Medium am Ende des Energiewandlungsprozesses erreicht. Je größer die Differenz zwischen diesen beiden Temperaturen, desto größer der Wirkungsgrad. Damit die Energie der Sonne optimal genutzt werden kann, muss man also erst einmal hohe Temperaturen des technischen Mediums erreichen.

Dazu wurden zwei physikalische Prozesse angewendet. Das Entzünden brennfähigen Materials durch das Fokussieren von Sonnenstrahlen faszinierte bereits Archimedes, wenn auch die kriegstechnische Anwendung, Holzschiffe in Brand zu setzen, eine Legende ist (Schneider 1969). Wie auch immer, die Leistung der Technik muss also darin bestehen, eine zweckmäßige Apparatur zur Konzentration der Sonnenstrahlen zu konstruieren und zu realisieren. In einem Parabolrinnenkraftwerk wird dies mit parabelförmigen Spiegeln erreicht. Der zweite Effekt betrifft die Begrenzung der Verluste. Hat man nämlich erst einmal ein Medium auf hohe Temperaturen gebracht, treten unausweichlich weitere physikalische Prozesse ein: Wärmestrahlung und Wärmeleitung.

Damit diese Prozesse die Temperaturerhöhung durch die Konzentration der Sonnenstrahlen nicht zum Teil wieder zunichtemachen, braucht man technische Vorrichtungen, die das heiße Medium davor bewahren, dass es seine Energie abgibt, bevor die Umwandlung in mechanische Energie vollzogen ist. Mouchot gelang es schon, diese physikalischen Prozesse technisch weitgehend in den Griff zu bekommen. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen seine Maschine, die genug Dampf erzeugte, dass man damit eine Dampfmaschine betreiben konnte. Diese Maschine stellte er auf der Weltausstellung 1878 vor und erhielt mit dieser Pionierleistung eine Goldmedaille. Heute baut man solare

Wärmekraftmaschinen mit Leistungen von mehreren 100 MW (wie z.B. die SEGS in Kalifornien mit 354 MW oder die Solana Generating Station in Arizona mit 280 MW)<sup>8</sup>. Da man gerade erst damit angefangen hat, diese Kraftwerke im großen Maßstab zu bauen, ist davon auszugehen, dass noch größere Kraftwerke realisiert werden. Man arbeitet auch daran, den Wirkungsgrad weiter zu steigern, z.B. indem man geschmolzenes Salz oder direkt Wasser statt Thermoöl im Wärmekreislauf verwendet<sup>9</sup>. Auch wenn die Photovoltaik weiter Fortschritte macht: Die Solarthermie braucht man, um Sonnenkraftwerke auch nach Sonnenuntergang betreiben zu können, wenn die Photovoltaik keine Energie mehr liefert, aber die gespeicherte Wärme den Stromerzeugungsprozess weiter ermöglicht.

In Kombination mit klassischer Heiztechnik wird ein solarthermisches Kraftwerk grundlastfähig, d.h. es reagiert zuverlässig auf die Anforderungen des Stromversorgers. Es lässt sich heute bereits erahnen, zu welchen Leistungen die Technik der konzentrierenden Solarthermie noch fähig sein wird, da intensiv daran geforscht wird, die Konzentration der Sonnenstrahlen weiter zu steigern. Ein Beispiel ist das Solarturmkraftwerk, bei dem man eine Temperatur von 1.000° Celsius (C) erreichen kann, um den Carnot-Wirkungsgrad weiter zu steigern<sup>10</sup>.

Allerdings erkaufte man sich die Steigerung der Konzentration mit einem gesteigerten Aufwand bei der Steuerung der Spiegel, die das Sonnenlicht konzentrieren. Die hohen Temperaturen, die im Brennpunkt entstehen, führen zu ganz erheblichen Materialbelastungen: Ein Problem aber, an dem inzwischen auch erfolgreich geforscht wurde. Denn große Turmkraftwerke sind schon in Bau wie z.B. die Ivanpah Solar Power Facility in Kalifornien mit 392 MW, dessen erste Unit im September 2013 ans Netz gegangen ist und das Anfang 2014 als weltgrößtes Solarkraftwerk gilt. Insgesamt sind z.Z. 2.828 MW an Kraftwerksleistung der konzentrierenden Solarthermie installiert und liefern Strom ins jeweilige Netz, knapp 2.500 MW sind im Bau.

Knapp 4.000 MW sind allein in den USA projektiert, 930 MW in Spanien und über 4.000 MW in anderen Ländern wie z.B. China, Marokko, Israel, Iran und Chile (Angaben nach Wikipedia, siehe Fußnote 8). Das größte „Problem“ für die solarthermische Elektrizitätserzeugung ist wohl der Erfolg der Photovoltaik und der Preisverfall bei den Modulen. Photovoltaische Kraftwerke werden in der gleichen Größe wie die bereits genannten Solarkraftwerke gebaut. Das z.Z. größte Photovoltaikkraftwerk Agua Caliente Solar Project in Arizona liefert z.Z. 251,3 MW und ist für 397 MW projektiert<sup>11</sup>. Die weltweit installierte Leistung solcher

8 [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_thermal\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations)

9 <http://www.theguardian.com/environment/2010/jul/22/first-molten-salt-solar-power>

10 [http://www.dlr.de/sf/Stichwort/Konzentrierende\\_Solarsysteme\\_für\\_Wärme-,Strom-und\\_Brennstoffherzeugung](http://www.dlr.de/sf/Stichwort/Konzentrierende_Solarsysteme_für_Wärme-,Strom-und_Brennstoffherzeugung). Ein Besuch der Seite zum Solarthermischen Versuchskraftwerk in Jülich ist ebenfalls empfehlenswert: [solarturm-juelich.de](http://solarturm-juelich.de)

11 [http://en.wikipedia.org/wiki/Agua\\_Caliente\\_Solar\\_Project](http://en.wikipedia.org/wiki/Agua_Caliente_Solar_Project)

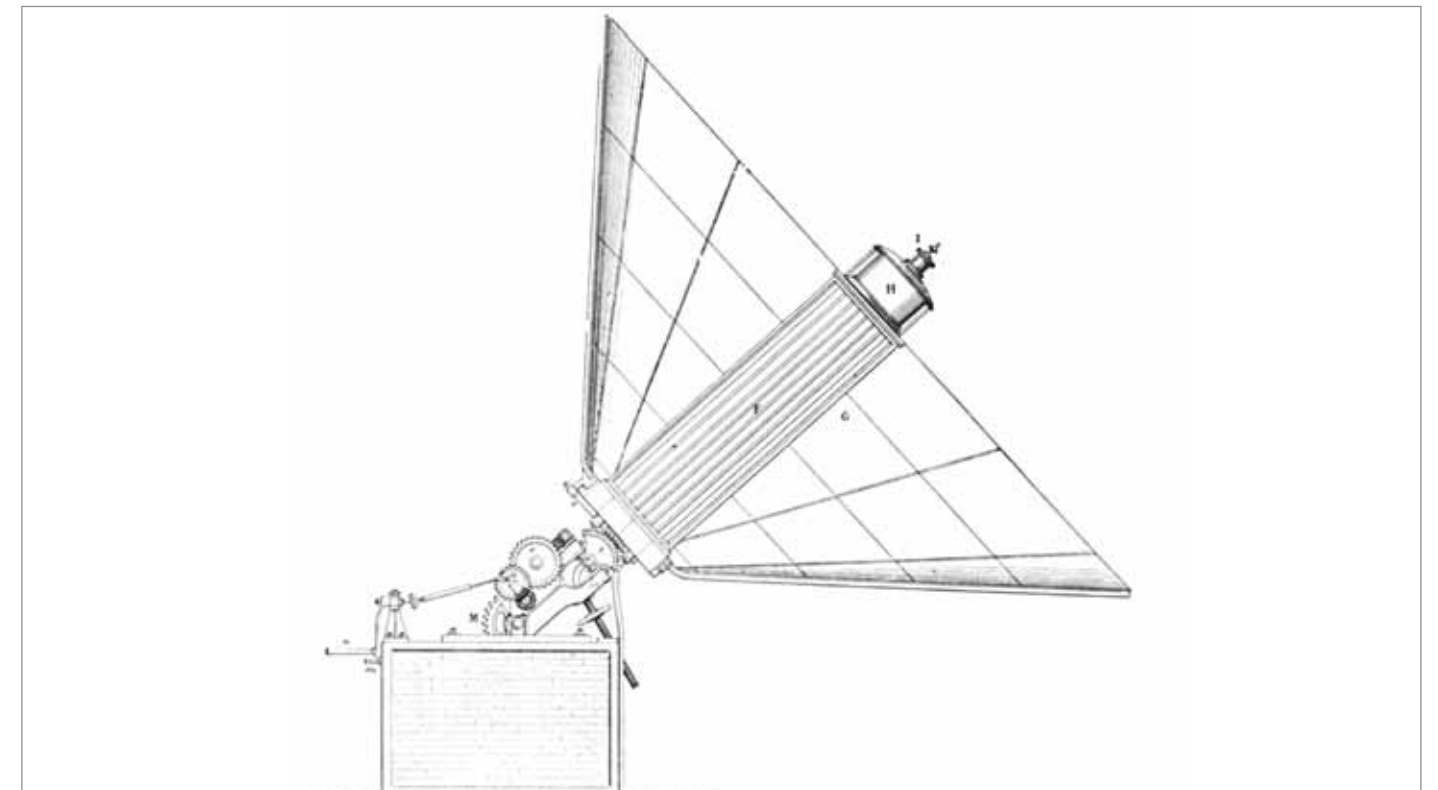


Abb. 6

Schematische Darstellung der Solar-Dampfmaschine von Augustin Mouchot.

Photovoltaikanlagen beträgt in 2013 ca. 5.400 MW<sup>12</sup>, wenn man nur die Anlagen mit mehr als 50 MW berücksichtigt. Wenn man die Planungen zusammenzählt, dann wird das Ausmaß der Photovoltaikkonkurrenz deutlich: über 31.000 MW Photovoltaik-Kraftwerksleistung ist in Planung oder im Bau<sup>13</sup>. Solange es aber keine preisgünstige Speicherung der erzeugten Elektrizität gibt, werden die solarthermischen Kraftwerke eine wichtige Rolle spielen, da die

gespeicherte Wärme solche Kraftwerke grundlastfähig macht und ihnen daher eine wichtige Rolle im Elektrizitätsnetz verschafft. Mouchot hat den ersten Prototypen eines solchen Sonnenkraftwerks gebaut (Abb. 6 und 7). Die Zeitgenossen waren sehr beeindruckt davon, dass man mit der kostenlosen Energie der Sonne eine Dampfmaschine antreiben kann. Zur damaligen Zeit war Kohle in Frankreich noch sehr teuer, weil man die heimischen Vorkommen noch nicht erschlossen hatte und Kohle importieren musste. Vor diesem Hintergrund erschien ein kostenloser Treibstoff als geradezu konkurrenzlos günstig. Allerdings hatte die Maschine von Mouchot einen entscheidenden Mangel, der sich in Paris sehr gut erkennen ließ. Die Konzentration der Sonnenstrahlung gelingt in ausreichendem Maße nämlich nur dann, wenn der Himmel möglichst wolkenlos ist.

Heute redet man hierbei von der sogenannten Normaldirektstrahlung. Jeder hat die Erfahrung sicherlich schon einmal gemacht, dass es nur bei unverdeckter Sonne gelingt mit dem Brennglas etwas zu entflammen. Wenn Wolken die Sonne verdecken, kann man ihre Strahlen nicht mehr mit dem Brennglas oder dem Parabolspiegel konzentrieren. In unseren Breiten würde daher der Prozess der Wärmegewinnung in einem Solarkraftwerk nur selten ausreichend lang funktionieren, um damit sinnvoll Strom zu produzieren. Dennoch gibt es ein solches Kraftwerk wenngleich nur zu Forschungszwecken in Deutschland (in Jülich)<sup>14</sup>. Aber was unsere Breiten zu wenig haben, haben andere zu viel. In den Wüsten der Welt ist Platz ohne Ende und die Sonne scheint häufig und ausdauernd. Die

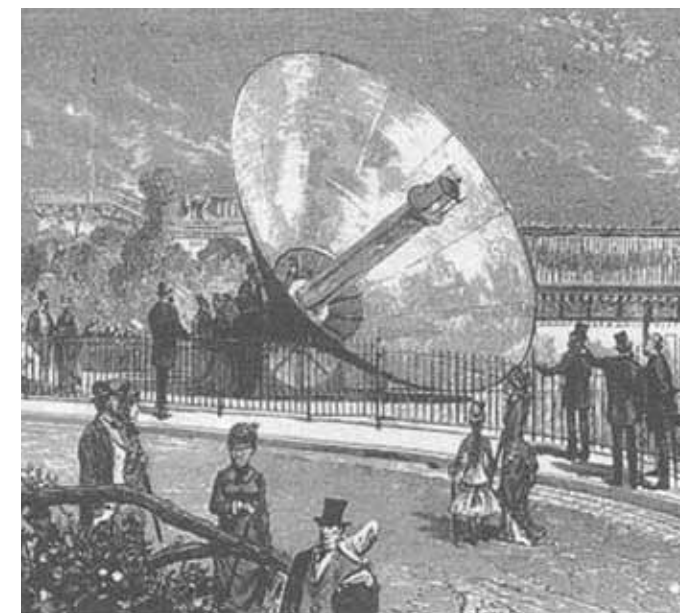


Abb. 7 Auf der Weltausstellung 1878 in Paris wurde die solarbetriebene Dampfmaschine nicht nur von den Besuchern bestaunt, sondern auch von einer Fachkommission mit einer Goldmedaille gewürdigt.

12 [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_photovoltaic\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations)

13 [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_photovoltaic\\_power\\_stations](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations) Dies darf man nicht verwechseln mit der installierten Leistung von Photovoltaik insgesamt, denn die betrug Ende 2013 ca. 140GW.

14 [http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-8560/15527\\_read-38159/](http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-8560/15527_read-38159/)



amerikanischen SEGS von denen bereits die Rede war, sind in der Mojave-Wüste errichtet worden. Die Daten für die Ausbeute sprechen für sich. Heute werden in Ländern wie Algerien, Ägypten, den Vereinigten Arabischen Emiraten, Chile, Indien, China, Marokko und im Süden Spaniens solche Anlagen erfolgreich betrieben. Die Solarthermie ist eines der Zugpferde der weltweiten Sonnenenergienutzung.



Abb. 8 Frank Shuman, 1862-1918.

sich<sup>15</sup>. Frank Shuman (Abb. 8) war es, der das Projekt der Energiegewinnung aus Sonnenenergie auf eine neue Stufe brachte und 1913 das erste großtechnische Solarkraftwerk der Welt in Ägypten errichtete (vgl. Dittmann 2012). Die von Shuman 1907 gegründeten Solar Power Company baute den Vorläufer der modernen solarthermischen Kraftwerke in der auch heute noch gebräuchlichen Form mit der Parabolrinne, in deren Brennnlinie ein Receiver die Energie der Sonne aufnimmt und einer Dampfmaschine zuführt. Denn um die Leistungsfähigkeit des Solarkraftwerks zu steigern, braucht man rinnenförmige Parabolspiegel auf einer großen Fläche. Mit kreisrunden Receivern wie Mouchot, Ericsson und auch Eneas sie genutzt hatten, kommt man nur sehr umständlich auf hinreichend große Leistungen für den Kraftwerksbetrieb.

Kreisrunde Receiver lassen sich aber besser der Sonne nachführen, was ja Mouchot schon realisiert hatte: seine Nachführmechanik erlaubte nicht nur die Verfolgung der Sonne während eines Tages, sondern sie ließ sich auf verschiedene Jahreszeiten ebenso einstellen wie auf verschiedene Breitengrade. Mouchot war davon überzeugt, dass seine Maschine im Sonnengürtel der Erde sinnvoll eingesetzt werden könnte und hat sie gleich so konstruiert, dass sie in verschiedenen Ländern einsetzbar ist. In den heutigen Turmkraftwerken werden die Heliostaten (bewegliche Spiegel des Solarfeldes) ähnlich der Sonne nachgeführt, wie es Mouchot bereits vorgemacht hatte. Shuman hatte eine Anlage gebaut (Abb. 9 und 10), die die Leistungsfähigkeit der Parabolrinnentechnik beleg-

<sup>15</sup> <http://renewablebook.com/2010/08/03/chapter-excerpt-aubrey-eneas-and-the-birth-of-solar-steam-power/>



Abb. 9 Die Anlage von Shuman in Ägypten. Man sieht das Solarfeld mit fünf Segmenten und die Dampfleitung im Vordergrund, die zum Maschinenhaus mit der Dampfmaschine führt.



Abb. 10 Die Anlage von Shuman am Morgen oder Abend, wenn die Sonne tiefsteht.

te. Shuman erzeugte so hohe Temperaturen in seinem Solarfeld, dass die von ihm verwendeten Metalle sogar zu heiß wurden und die Dampfdichtigkeit der Apparatur litt. Dabei handelte es sich um typische Probleme in der Entwicklungsphase einer neuen Technik. Dennoch sahen Inspektoren der britischen Regierung die Probleme der Anlage als so gravierend an, dass sie die Mittel für die Weiterentwicklung einstellten. Mit dem Ausbruch des Ersten Weltkriegs 1914 war an eine Weiterentwicklung des Solarkraftwerks nicht mehr zu denken. Nach dem Ende des Kriegs begann der Siegeszug des billigen Erdöls. Die Solartechnik hatte ohne Förderung keine Chance gegen diese Konkurrenz zu bestehen. Hermann Scheer sprach von einem Jahrhundertversäumnis, weil die Chancen der Solartechnik ignoriert wurden (Scheer 1995).

Mouchot, dem anerkannten Solarpionier, und auch Shuman zollten Politiker und Behördenvertreter allerdings keine weitere Anerkennung – von weiterer Förderung ganz zu schweigen. Mit dem Ende des Projekts von Shuman landete die Solartechnik für viele Jahrzehnte in einer Sackgasse und wurde weitgehend vergessen. Heute setzt die Weiterentwicklung dieser Technik voraus, dass sie zu konkurrenzfähigen Gestehungskosten Energie produzieren kann. Konkurrenz entsteht dieser alten Technik inzwischen wie schon erwähnt aus der Photovoltaik. Aber das Rennen zwischen diesen beiden Techniken ist längst nicht entschieden, die nächsten Etappen bleiben spannend.

## 2.9 Schlussfolgerungen

Die Produktion von Elektrizität aus Sonnenlicht hat das Potenzial, einen erheblichen Beitrag zur Stromversorgung zu leisten. Dies ist heutzutage keine Vermutung mehr oder der Wunsch von Idealisten, sondern die Geschäfts-

grundlage von vielen Firmen, die in Solarkraftwerke investieren. Die Sonnenenergie stellt ein Energiereservoir dar, dass alle anderen Energierohstoffe gewissermaßen in den Schatten stellt. Die Weiterentwicklung der beiden hauptsächlichlichen Techniken zur Erzeugung von Elektrizität aus Sonnenenergie wird von vielen Faktoren bestimmt, aber zwei seien hier hervorgehoben. Die Photovoltaik ist technisch sowohl für eine zentrale als auch eine dezentrale Stromerzeugung geeignet. Die Netzparität ist bereits erreicht, d.h. durch Photovoltaik produzierter Strom ist in Deutschland billiger als der Strompreis für private Kunden. Viele Bauherren nutzen die Photovoltaik, um sich autonom mit Energie zu versorgen und eine längst abgeschriebene Anwendung – das Heizen mit Strom – wird unter den neuen Bedingungen wieder interessant.

Dezentrale Erzeugung und Verbrauch des Stroms entlastet die Netze und wird daher von der Bundesregierung gefördert. Die massenhafte dezentrale Anwendung der Photovoltaik kann dazu führen, dass den großen Stromerzeugern weitere Teile ihres bisherigen Geschäfts wegbrechen. In Diskussionen wird schon gefordert, den Selbstversorgern eine Extragebühr für den Anschluss an das Stromnetz abzuverlangen, wenn sie sich nicht vollständig vom Netz abnabeln, sondern im Fall ausbleibender Sonneneinstrahlung doch Strom beziehen wollen. Da sie aber auch dann nur vergleichsweise wenig Strom beziehen, zahlen sie auch nur wenig für das Netz, da das sogenannte Netznutzungsentgelt über den Verbrauch abgerechnet wird.

Die Solarthermie lässt sich zur Stromerzeugung ökonomisch nicht sinnvoll dezentral betreiben. Große Unternehmen hatten daher die Vision, dass in den Wüsten Nordafrikas Elektrizität für Europa produziert werden sollte. Das Projekt Desertec setzt auf Strom aus Wind und Sonne aus einem europäischen Grid, in das auch Nordafrika eingebunden ist. Doch das Konsortium bröckelt. 2013 ist Siemens aus dem Konsortium ausgeschieden. Die Zukunftsaussichten des Desertec-Projekts haben sich verschlechtert, aber die Aussichten für die Stromerzeugung mit Parabolrinnenkraftwerken und Photovoltaik nicht.

Die Länder aus dem sonnenreichen Gürtel der Erde fangen an, aus eigenem Interesse eine umweltfreundliche Form der Stromerzeugung aufzubauen. So wird das weltgrößte Solarkraftwerk der Welt mit 500 MW zurzeit in Quarzazate, Marokko, gebaut. Marokko verfolgt den ehrgeizigsten Solarplan der Welt: 42% der Energie soll aus Solar-, Wind-, und Wasserkraftwerken kommen und zwar schon 2020! Nachdem sich die Fachleute in der Vergangenheit über die Weiterentwicklung dieser Techniken so getäuscht hatten, bleibt eines ganz gewiss: Die Zukunft ist offen. Welche Technik sich durchsetzen wird, hängt von den Entscheidungen der Gegenwart ab. Die Energiewende ist keine Frage der technischen Möglichkeiten, sondern eine Frage der Entscheidungsgründe. Wäre man den Visionen von Frank Shuman gefolgt, der 1907 eine Streitschrift zur umfassenden Nutzung der Sonnenenergie





Abb. 11

Aktie der The Sun Power Company unterzeichnet von Frank Shuman und seiner Frau Constantine.

verfasst und in Umlauf gebracht hat, wäre die Stromerzeugung aus Sonnenenergie längst Alltag. Aber auch Shuman war Unternehmer, er ging davon aus, dass die Kohlevorräte bald erschöpft sein würden und warb um Investoren für seine Sun Power Company (Abb. 11). Überlässt man die Auswahl der Stromproduktionstechnik also den Marktmechanismen, werden sich die Umweltprobleme weiter verschärfen, denn auch heute gibt es noch genug Braun- und Steinkohle. Aber warum soll man diese Rohstoffe verbrennen, die Luft verschmutzen, den Klimawandel verschärfen? Von den Entscheidungen der Gegenwart hängt ab, wie die Stromproduktion der Zukunft aussehen wird. Entscheidet man sich heute für ein neues Kohlekraftwerk,

ist damit für 40 Jahre eine Weichenstellung getroffen worden. Solange dauert es, bis sich die Investition amortisiert hat und die finanziellen Interessen der Kraftwerksbetreiber befriedigt worden sind. Es ist Zeit, die Lehren aus der mehr als 130 Jahre währenden Geschichte der solarthermischen Energietechnik zu ziehen.

## Solarthermische Kraftwerke

# KRAFTWERKE

Das Parabolrinnenkraftwerk ist ein Beispiel für ein solarthermisches Kraftwerk und wird im Folgenden etwas genauer erläutert. Neben dieser Bauart, die zur Zeit wohl noch als Arbeitspferd der Solarthermie angesehen werden kann, werden z.Z. weitere Bauarten entwickelt, von denen der Solarturm (Abb. 12) hervorgehoben werden muss, weil er ein besonders großes Potential für die Weiterentwicklung dieser Kraftwerke hat. Anfang 2014 ist der erste Bauabschnitt des größten Solarturmkraftwerks der Welt mit 392 MW Nennleistung in den USA in Betrieb genommen worden. Das Ivanpah Solar Electric Generating System<sup>16</sup> ist keine Versuchsanlage, sondern wird von den Betreibern, zu denen übrigens Google gehört, als kommerzielle Anlage betrieben. Unterstützt wurde der Bau der Anlage durch einen Kredit von 1,6 Mrd. Dollar vom US-Energieministerium.



Abb. 12 Solarturm-Versuchsanlage CESA I auf der Plataforma Solar in Almería/ Spanien. Bild mit freundlicher Genehmigung FVEE/PSA/DLR.

<sup>16</sup> Ein eindrucksvoller virtueller Rundgang durch die Anlage ist neben vielen Fotos und Videos unter [ivanpahsolar.com/](http://ivanpahsolar.com/) zu finden.



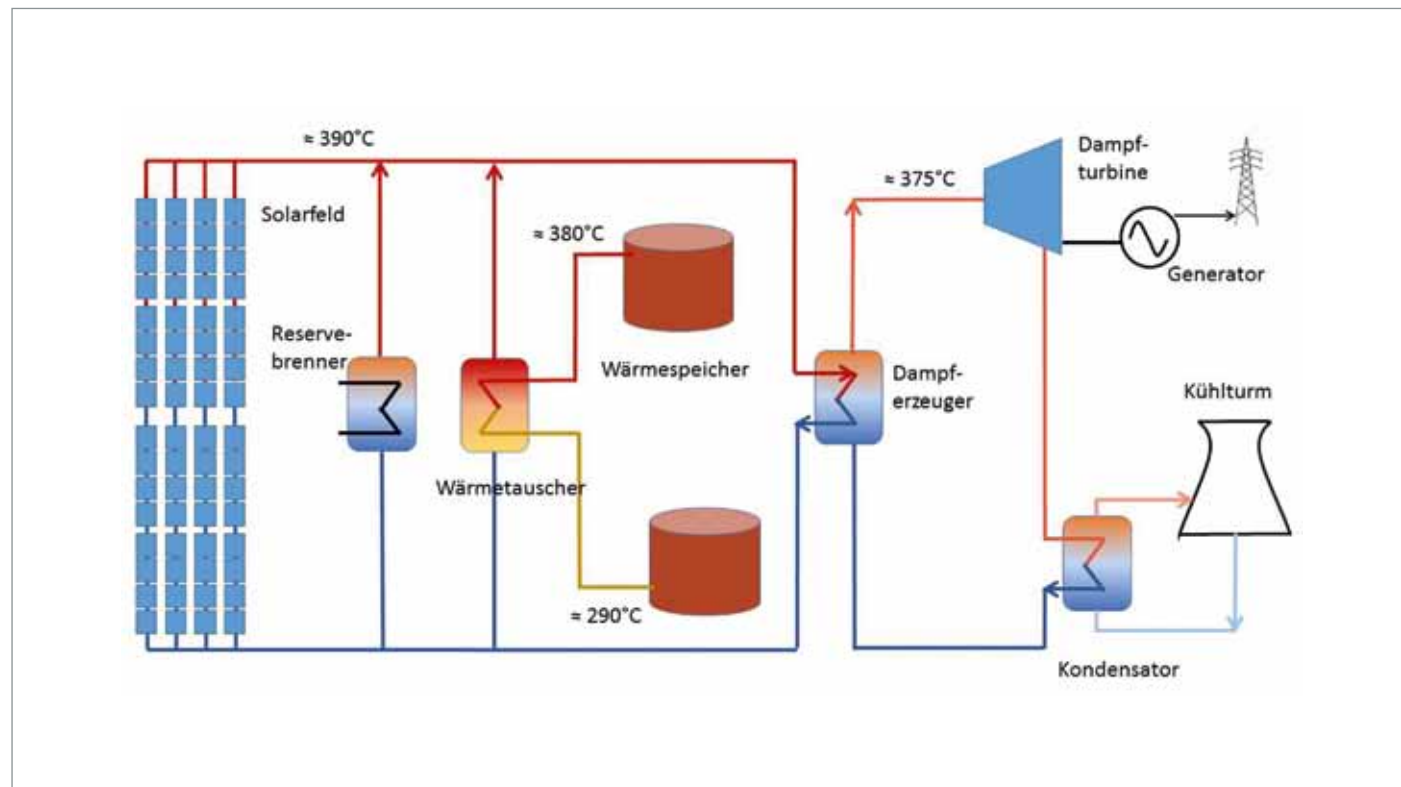


Abb. 13 Schematischer Aufbau eines Parabolinnenkraftwerks: Links befindet sich das Solarfeld mit dem die Energie der Sonne eingefangen wird. Am oberen Ende strömt durch die als roter Strich dargestellte Röhre ein sogenanntes Thermoöl. Dieses gelangt zum Dampferzeuger und gibt dort seine Wärmeenergie an einen Wasser-, bzw. Dampfkreislauf ab. Der Reservebrenner erhitzt das Thermoöl, wenn nicht genügend Sonnenenergie vorhanden ist. Der Wärmespeicher (flüssiges Salz) wird tagsüber durch die Wärme aus dem Solarfeld aufgeheizt und gibt seine Energie nach Sonnenuntergang wieder ab. Der Kreislauf rechts mit Dampfturbine und Kondensator ist der klassische Teil des Kraftwerks und dem eines konventionellen Kraftwerks (Kohle-, Öl- oder auch Kernkraftwerk) sehr ähnlich.

Der schematische Aufbau eines Parabolinnenkraftwerks ist in der Abbildung 13 zu sehen. Die Sonnenenergie wird im Solarfeld eingefangen. In den Rohren des Receivers fließt ein Thermoöl, das durch die Sonnenstrahlung aufgeheizt wird (siehe Abb. 13). Das Solarfeld ist so groß dimensioniert, dass zumindest bei hoch stehender Sonne so viel Wärme aus dem Solarfeld kommt, dass sowohl der Wärmespeicher als auch die Dampfturbine versorgt werden können. Im Dampfkreislauf befindet sich die Turbine, die durch den durch sie hindurch strömenden Dampf auf hohe Drehzahlen gebracht wird und den Generator antreibt, der sich auf derselben Welle befindet. Hier erst wird die Elektrizität produziert, die der Zweck der ganzen Anlage ist.

Die in den Wärmespeichern gespeicherte Wärme wird dann verwendet, wenn die Sonne untergegangen ist oder Wolken dazu führen, dass aus dem Solarfeld nicht mehr ausreichend Wärme an den solaren Dampferzeuger abgegeben werden kann. Für den Fall, dass für eine längere Zeit zu wenig Wärme für den Prozess aus Solarfeld und Wärmespeicher geliefert werden kann, existiert ein Reservebrenner, der durch das Beheizen mit Gas sicherstellt, dass die Anlage Elektrizität liefern kann. Das Solarkraftwerk ist dadurch grundlastfähig, d.h. dem Elektrizitätsversorgungsunternehmen als Abnehmer des Stromes kann garantiert werden, dass das Kraftwerk Strom liefert, wenn es notwendig ist. Ein Parabolinnenkraftwerk braucht für gewöhnlich auch einen Kondensator, der typischerweise

mit Wasser gekühlt wird. Es geht – unter Inkaufnahme eines geringeren Wirkungsgrads – allerdings auch ohne Wasserkühlung. Im Kondensator wird der Dampf kondensiert und der Druckabfall sorgt dafür, dass der Dampf mit hoher Geschwindigkeit durch die Turbine strömt. Dieser klassische Teil des Solarkraftwerks ist dem von Kohle-, Öl- und Kernkraftwerken sehr ähnlich. Es handelt sich dabei um eine Wärmekraftmaschine: Die aus der Sonneneinstrahlung gewonnene Wärmeenergie des Solarfelds wird für die Dampferzeugung genutzt. Die Energie des Dampfes wird über die Turbine zunächst in kinetische Energie verwandelt. Diese Energie steckt in der rotierenden Welle, auf der sowohl die Turbine als auch der Generator angebracht sind. Im Generator wird die Drehbewegung in Wechselstrom umgewandelt.

Im Folgenden wollen wir uns den Energiewandlungen im Solarfeld zuwenden. Sie sind das Neue an dieser Art von Kraftwerk. Da die Turbine Teil einer Wärmekraftmaschine ist, hängt ihr Wirkungsgrad von der Differenz der Temperaturen am Anfang und Ende des Umwandlungsprozesses ab. Weil die Endtemperatur der Temperatur des Kühlwassers entspricht, also in etwa so hoch ist wie die Umgebungstemperatur, kann der Wirkungsgrad nur gesteigert werden, wenn die Eingangstemperatur gesteigert wird. Hohe Temperaturen erreicht man im Solarfeld durch einen großen Konzentrationsfaktor. Dieser ist das Verhältnis zwischen der Öffnung, der sogenannten Apertur des Spiegels (D) und dem Querschnitt des Absorberrohrs

(d), dem schwarzen Rohr, welches man in der Brennpunktlinie des Parabolspiegels in Abbildung 14 deutlich sehen kann. Damit der Gewinn an Temperaturerhöhung nicht durch Wärmeleitung wieder reduziert wird, steckt die Absorberrohre in einer evakuierten Glasröhre. Beides zusammen bezeichnet man als Receiver. Wenn die Sonne an einem wolkenlosen Himmel steht, wird das Sonnenlicht durch den Spiegel um den Faktor 35 bis 40 konzentriert. Dieser Faktor heißt Konzentrationsverhältnis und wird durch das Verhältnis zwischen der Öffnung des Spiegels und dem Durchmesser der Absorberrohre gebildet. Durch diese Konzentration lassen sich Temperaturen von knapp 400°C am Ausgang des Solarfelds erzielen.

Im Solarturm kann diese Konzentration der Solarstrahlung auf Werte bis 1.000 gesteigert werden. Das liegt daran, dass die Spiegel seines Solarfelds (die sogenannten Heliostaten) alle auf eine kleine Fläche im Turm ausgerichtet sind. Durch die damit erreichbare höhere Temperatur (bis zu 1.000°C) können Solarturmkraftwerke höhere Wirkungsgrade als Parabolinnenkraftwerke realisieren. Die technische Realisierung einer Parabolrinne setzt voraus, dass man den Spiegeltrog so fertigt, dass er das Sonnenlicht auf der ganzen Länge des Absorberrohrs fokussiert. Dies soll natürlich auch bei Wind und in allen Positionen des Spiegels der Fall sein, so dass dadurch hohe Ansprüche an das Gestell resultieren. In einem europäischen Projekt wurde daher der sogenannten Euro Trough ent-



Abb. 14 Ein Segment des Solarfelds eines Parabolinnenkraftwerks: Im Brennpunkt des Spiegels verläuft die schwarze Receiveröhre, die in einer evakuierten Glashülle vor Wärmeverlusten geschützt ist.

wickelt, der diese Ansprüche in hohem Maße einlöst und außerdem noch zeitsparend aufgebaut werden kann. Ein wichtiger Punkt, wenn man die Größe der Solarfelder berücksichtigt. Das größte europäische Solarkraftwerk dieser Bauart – Andasol in Spanien (Abb. 15) – hat z.B. eine Solarfeldgröße von ca. einer Million Quadratmetern, auf denen über 400.000 Spiegel verbaut sind. Die Sonnenenergie wird durch die Spiegel auf über 44.000 Absorberrohre konzentriert. Die praktische Realisierung der theoretischen Gestalt eines Troges mit seinem parabelförmigen Profil bestimmt entscheidend den Wirkungsgrad des ers-



Abb. 15

Eines der drei Andasol Parabolinnenkraftwerke in der spanischen Provinz Granada. In der Mitte sieht man das eigentliche Kraftwerk, um das herum das Solarfeld steht.





Abb. 16 Bild eines Teststrangs für das Solarfeld eines Parabolrinnenkraftwerk: In der Forschung versucht man die sogenannte solare Direktverdampfung zu realisieren, d.h. auf das Thermoöl zu verzichten und das Wasser schon im Receiver zu verdampfen. Bild mit freundlicher Genehmigung des FVEE und des DLR.

ten Schritts der Energieübertragung beim Parabolspiegel, nämlich der Reflektion des Sonnenlichts auf den Receiver. Schaut man sich die stark übertriebenen Verformungen in der Abbildung 17 an, dann wird klar, dass solche Verformungen dazu führen, dass das Sonnenlicht nicht exakt auf das Receiverrohr gebündelt wird und es daher zur Verringerung des Wirkungsgrads kommt. Auf dem Weg vom Spiegel in das Thermoöl drohen weitere Verluste. Ein Spiegel reflektiert z.B. nicht 100% der einfallenden Strahlung und von dem reflektierten Strahl wird ein Teil gestreut und geht verloren.

Da in einem Wärmetauscher (Abb. 13) die Wärmeenergie vom Thermoöl auf Wasser bzw. Dampf, übertragen wird und hierbei auch Verluste auftreten, forscht man an der solaren Direktverdampfung (Abb. 16). Am Glasrohr, das das Absorberrohr umhüllt, gibt es Reflektionen und das Absorberrohr selbst absorbiert nicht alles, was an Strahlung ankommt. In der Abbildung 18 sind alle diese Prozesse mit ihren jeweiligen Wirkungsgraden dargestellt. Für das Kraftwerk Andasol (Abb. 15) wird ein Spitzenwirkungs-

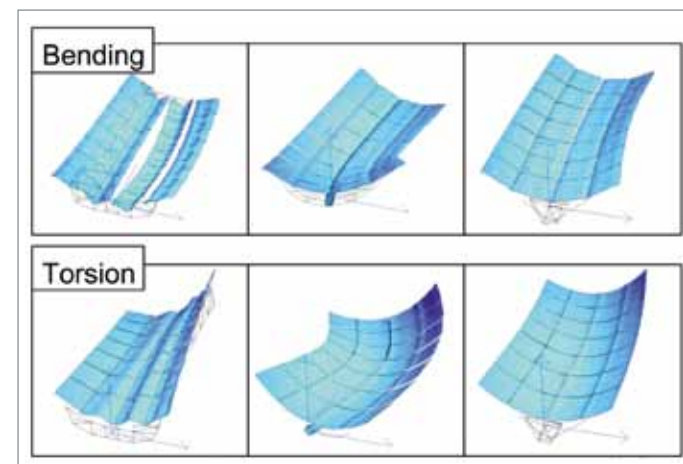


Abb. 17 Die möglichen Verformungen (Bending: Krümmung, Torsion: Verdrehung) eines Spiegelsegments durch äußere Kräfte, wie z.B. Wind. In dem Projekt Euro Trough wurde eine Konstruktion entwickelt, die besonders widerstandsfähig ist und trotzdem schnell aufgebaut werden kann.

grad von 70% angegeben, d.h. 70% der Sonnenenergie, die auf die Fläche des Solarfelds auftreffen, werden als Wärme für den Prozess gewonnen. Im Jahresmittel sind es 50%. Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerke sind zwei Beispiele für solarthermische Kraftwerke. Beide stehen in Konkurrenz zu photovolatischen Kraftwerken, vor allem durch den Fall der Preise für Solarzellen. Solarthermische Kraftwerke haben aber den Vorteil, dass sich Wärme besser speichern lässt als Elektrizität. Außerdem lässt sich mit einem konventionellen Gasbrenner das Kraftwerk auch dann betreiben, wenn die Sonne über längere Zeit nicht so intensiv scheint, wie gewünscht. Das macht diese Solarkraftwerke grundlastfähig und ermöglicht einen Beitrag zur Versorgungssicherheit.

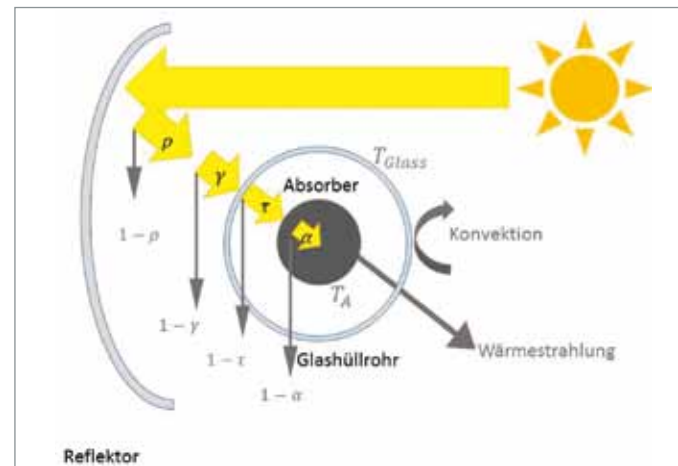


Abb. 18 Darstellung des Energiewegs von der Sonne in das Thermoöl, das durch das Absorberrohr strömt.

# HANDLUNGSGIDEEN

Im Folgenden werden verschiedene Ideen zur Einbindung des Themas Solarenergie in den Unterricht vorgestellt. Neben einem Spiel zu den geschichtlichen Hintergründen lassen sich Anleitungen zu einfachen Experimenten mit Solarzellen und dem Umgang mit Solarzellbruch finden. Außerdem werden Anleitungen für den Bau von Solar-Krabblern und Solarautos gegeben sowie in Arbeitsblätter eingeführt, mit denen das Thema Solarenergie im TECHNOSEUM bearbeitet werden kann. Zum Abschluss stehen Einsatzmöglichkeiten von Tablet-PCs im Unterricht.

Handlungsideen  
zur Solarenergie  
für die Schule