



Blick auf die drei CSP-Kraftwerke nahe Sevilla

Solarthermie

Physik und Technik der Solarthermie in Afrika

Von Daniel Schäfer

Energie, die wichtigste aller Ressourcen, bildet die Grundlage jeder menschlichen Unternehmung. Die massenhafte und großflächige Verfügbarkeit billiger Energie ist die Grundlage für den Wohlstand der technisch entwickelten Welt. Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Energiequellen sind drei Facetten eines komplexen Problems, dem sich die Weltgemeinschaft zu Beginn des 21. Jahrhundert gegenüber sieht: der Energiefrage. Die Gestalt der Welt von morgen wird entscheidend davon abhängen, wie unsere Antwort auf diese Frage lautet. Paradoerweise ist die Energiequelle mit dem größten nachhaltigen Nutzungspotential auch eine der am wenigsten tatsächlich genutzten: unsere Sonne. Auf dem Prinzip der Solarthermie basierende Kraftwerke mögen daher eine mögliche regenerative und umweltverträgliche Energiequelle von morgen sein. Deren physikalische, technische und apparative Grundlagen werden hier erörtert.

Dieser Artikel soll Möglichkeiten aufzeigen, wie die Solarthermie auf großen Skalen und unter wirtschaftlich rentablen Bedingungen durch ihren massiven Einsatz – etwa in Nordafrika – dazu beitragen kann, einen Großteil der von Westeuropa benötigten Elektrizität zu erzeugen. Hinzu kommt die Möglichkeit, die Solarenergie für Afrika selbst nutzbar zu machen, entweder in Form von Elektrizität oder als energetische Basis für die Frischwasserversorgung durch den Einsatz energieintensiver Meerwasserentsalzungsanlagen. Speziell dieser letzte Aspekt könnte auch in anderen Wüstenregionen Schule machen und einen Beitrag zur Deckung des steigenden Süßwasserbedarfs bei sinkenden Ressourcen leisten.

Das solare Potential

Sonnenlicht ist eine leicht verfügbare, nachhaltige Energiequelle, denn die 'Betriebsdauer' der Sonne bemisst sich nach Hunderten von Millionen Jahren und wird der Menschheit auf praktisch unabsehbare Zeit zur Verfügung stehen; zudem ist sie noch umweltverträglich. Die von der Sonnenstrahlung pro Jahr zur Erde transportierte Energiemenge von 1,6 Milliarden Terawattstunden (TWh) entspricht etwa dem Zehntausendfachen des jährlichen Energiebedarfs der Menschheit oder anders formuliert: Der Weltjahresbedarf an Energie würde bereits durch die an einem einzigen Tag zur Erde gelangende Sonnenstrahlung gedeckt, könnte man diese vollständig nutzbar machen. Damit hält die Solarenergie von allen regenerativen Energiequellen, wie Wind- und Wasserkraft, Energiegewinnung aus Biomasse und Geothermie u.a., mit Abstand das größte Nutzungspotential bereit – dies erscheint mit Blick auf einen zukünftigen Anstieg des weltweiten Energiebedarfs umso bedeutender.

Einsatzmöglichkeiten und ihre Grenzen

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt existieren zwei grundlegende Prinzipien, mit

denen nutzbare Energie aus Sonnenstrahlung gewonnen werden kann: die Photovoltaik und die Solarthermie. An den Anblick von Dächern, die mit blauschimmernden Paneelen bedeckt sind, haben wir uns inzwischen gewöhnt. Diese photovoltaischen Anlagen wandeln Sonnenstrahlung direkt in elektrische Energie um. Davon zu unterscheiden ist die Solarthermie, bei der Sonnenstrahlung genutzt wird, um Wärme zu erzeugen. Mit dieser Wärme wird wiederum eine Wärmekraftmaschine – meist ein Dampfkreislauf – betrieben und zuletzt über einen Generator Elektrizität erzeugt.

Die oben genannte jährliche Energiemenge durch Sonneneinstrahlung von 1,6 Milliarden Terawattstunden verteilt sich jedoch nicht gleichmäßig über die Erdoberfläche. Durch die Neigung der Erdachse ist die verfügbare Sonneneinstrahlung in hohen Breitengraden nicht nur geringer, sondern unterliegt auch noch jahreszeitlichen Schwankungen. Auch spielen klimatische Faktoren eine Rolle, da etwa Gebiete mit hoher Wolkenbildung geringerer Sonnenstrahlung ausgesetzt sind. Alle diese Faktoren lassen die massenhafte Erzeugung von Energie aus Sonnenstrahlung in einigen Gebieten der Erde sinnvoller als in anderen erscheinen.

Während Photovoltaik-Anlagen auch in sehr weit nördlich gelegenen Ländern wie Deutschland betrieben werden können, gilt dies nicht für solarthermische Kraftwerke, die auf den so genannten „Sonnengürtel“ zwischen dem 35. nördlichen und dem 35. südlichen Breitengrad beschränkt sind, um wirtschaftlich zu arbeiten. Die verfügbare Landfläche in diesem Gürtel ist indes riesig: Allein die Sahara besitzt eine Fläche von rund 9 Millionen km², von denen etwa 18.000 km² benötigt würden, um den gesamten europäischen Bedarf an Elektrizität zu decken bzw. 65.000 km² für den Bedarf der ganzen Welt.

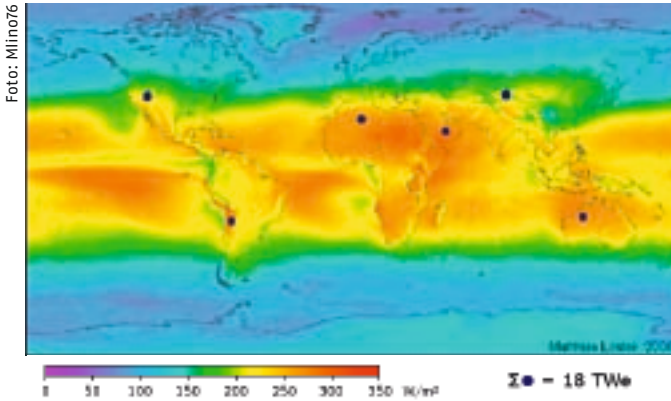
Ein entscheidender Faktor, den es bei der Nutzbarmachung der Solarenergie zu berücksichtigen gilt, ist freilich noch nicht angesprochen worden: Sonnenstrahlung steht nur für eine begrenzte

Zeit des Tages zur Verfügung. Gleichzeitig, ob photovoltaische oder solarthermische Anlagen zur Energiegewinnung aus Sonnenlicht herangezogen werden, muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass nachts schlichtweg kein Sonnenlicht zur Energieproduktion zur Verfügung steht. Jede technisch entwickelte Volkswirtschaft ist jedoch auf eine kontinuierliche Energieversorgung angewiesen, die keine tages- und jahreszeitlichen Engpässe aufweist. Der Begriff hierfür ist die *Grundlastfähigkeit* einer Kraftwerkstechnik.

Solarthermie: Kraftwerkstechnik im Detail

Solarthermische Kraftwerke wandeln Sonnenenergie in Wärme um, mit der etwa Dampf zum Antrieb einer Turbine mit angeschlossenem Stromgenerator erzeugt werden kann. Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden unterschiedliche Konzepte solarthermischer Kraftwerke vorgeschlagen und zum Teil auch in Versuchsanlagen realisiert. Zwei Bauprinzipien scheinen hierbei besonders viel versprechend zu sein, um kommerzielle Kraftwerke in großem Maßstab zu bauen: Rinnen- und Turmkraftwerke.

Bei den Rinnenkraftwerken (siehe *Abbildung Seite 28*) konzentrieren Parabolspiegel, die zu langen, trogförmigen Rinnen angeordnet werden, das Sonnenlicht auf ein in der Brennnlinie laufendes Rohr, durch das ein Wärmeträger – etwa Thermo-Öl – zirkuliert. Solche Solarrinnen können viele Hundert Meter lang sein, sind in Nord-Süd-Richtung angeordnet und werden auf einer Achse dem Sonnenstand nachgeführt. Viele parallel angeordnete Stränge solcher Rinnen können zu Kraftwerksblöcken mit (theoretisch) mehreren Hundert Megawatt zusammengefasst werden. (Zum Vergleich: Das leistungsstärkste deutsche Braunkohlekraftwerk, das Kraftwerk Niederaußem, weist eine Bruttoleistung von 3.864 Megawatt auf; das leistungsstärkste Kernkraftwerk – Brockdorf – eine Bruttoleistung von 1.480 Megawatt.)



Weltweit verfügbare Sonnenenergie



Die „PS10“-Pilotanlage in Sevilla (Südspanien) mit einer elektrischen Leistung von 11 Megawatt demonstriert den Betrieb solarthermischer Turmkraftwerke.

Die spezifische Form der Parabolspiegel begrenzt die Konzentration des einfallenden Sonnenlichts; der Arbeitsbereich der so erzeugten Temperaturen liegt zwischen 300 und 500°C. Spiegelfehler lassen sich bei einer wirtschaftlich rentablen Massenproduktion nicht gänzlich vermeiden, was das Konzentrationsvermögen der Solarrinne weiter herabsetzt. Und nicht zuletzt begrenzen die aufwendigen Rohrnetze, durch die der Wärmeträger abgeführt werden soll, die Effizienz einer Rinnenanlage. Der Wirkungsgrad dieser Kraftwerksbauart erreicht insgesamt knapp 20 Prozent, d.h. etwa ein Fünftel der eingestrahnten Sonnenenergie kann in elektrische Energie umgewandelt werden.

Turmkraftwerke bestehen aus dem Sonnenstand hochpräzise nachgeführten Konzentratorspiegeln, so genannten Heliostaten, die das Sonnenlicht auf die Spitze eines Turms fokussieren, wo die Wärme „eingesammelt“ und in ein Wärmeträger-Medium, wie z.B. Luft oder Wasser, eingekoppelt wird. Das Konzentrationsvermögen von Turmkraftwerken ist sehr viel höher als das von Rinnenkraftwerken, so dass Betriebstemperaturen von etwa 600 bis 1.000°C erreicht werden können. Dies entspricht den Betriebstemperaturen konventioneller Kraftwerke, wie Kohle-, Erdgas- und Kernkraftwerke, mit Dampfkreislauf. Solch hohe Temperaturen ermöglichen es sogar, Wasser direkt in der Turmspitze zu verdampfen und damit eine Turbine anzutreiben, statt die Wärme erst über ein Medium abzuführen und in einem weiteren Kreislauf zur Dampferzeugung zu nutzen.

Das hohe Konzentrationsvermögen bedingt die sehr effiziente Umwandlung von solarer Energie in Wärme mit einem Wirkungsgrad von 70 Prozent und mehr. Insgesamt liegt der Wirkungsgrad von Turmkraftwerken daher gegenwärtigen Schätzungen zufolge bei 25 bis 40 Prozent. Große Kraftwerke, bestehend aus vielen Tausend Heliostaten mit Flächen von jeweils einigen Dutzend Quadratmetern und einem Turm von 100 bis 200 m Höhe, könnten prinzipiell viele Hundert Megawatt elektrischer Energie aus Sonnenstrahlen erzeugen.

Gegenwärtig gibt es weltweit erst einige wenige Pilotanlagen dieses Bautyps, von denen die größte Anlage, die „PS10“ in Südspanien nahe Sevilla, aus 624 Heliostaten mit einer Fläche von jeweils 120 m² und einem Turm von 115 m Höhe besteht und eine Gesamtleistung von 11 Megawatt aufweist (siehe oben). Bis 2013 sollen mehrere solarthermische Demonstrationskraftwerke in dieser Region mit einer Gesamtleistung von rund 300 Megawatt entstehen.

In der kalifornischen Mojave-Wüste sind schon jetzt unterschiedliche Kraftwerkstypen in kleineren Pilotanlagen realisiert, die zusammengenommen allerdings bereits über 350 Megawatt elektrischer Leistung in das Stromnetz einspeisen.

„Hybridkraftwerke“ und Speicherung von Energie

Solarenergie ist auf Millionen Jahre hinaus eine massenhaft verfügbare Energiequelle, die zudem Grundlage für

die Erzeugung emissionsarmen Stroms ist. Sie hat jedoch einen entscheidenden Nachteil gegenüber konventionellen Energieträgern: Sie ist nur tagsüber verfügbar. Grundlastfähige Kraftwerke müssen in der Lage sein, 24 Stunden am Tag ausreichende Mengen an elektrischer Energie in die Netze einzuspeisen. Tagsüber sind es vor allem Privathaushalte und Bürogebäude, die den Strombedarf ausmachen. Großtechnische und industrielle Anlagen werden vorwiegend nachts betrieben, wenn der Strombedarf privater Haushalte gering und Elektrizität entsprechend günstiger ist. Des Weiteren ist nachts die Beleuchtung von Straßen und Städten notwendig, was ebenfalls Elektrizität erfordert.

Während es für kleine photovoltaische Anlagen, wie sie auf den Dächern von Eigenheimen zum Einsatz kommen, wirtschaftlich rentabel sein mag, elektrischen Strom in Akkus für den (geringeren) Nachtverbrauch oder für bewölkte Tage zu speichern, kommt dieses Prinzip für die großflächige Versorgung eines Landes mit Solarstrom nicht in Frage, da gegenwärtig – und auch in absehbarer Zukunft – keine Speichertechnologie existiert, die leistungsfähig genug wäre. Jedoch lassen sich zwei prinzipielle Wege aufzeigen, mit denen Strom aus solarthermischen Kraftwerken auch nachts verfügbar gemacht werden kann: Wärmespeicherung und fossile Zufeuerung.

Solarthermische Kraftwerke erzeugen, wie gesagt, Wärme um einen Dampfkreislauf mit Turbine und Generator anzutreiben. Nichts hindert



Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs(HGÜ)-Leitung in Schweden

daher einen Kraftwerksbetreiber daran, in den Stunden ohne Sonnenlicht Wärme aus herkömmlichen Energieträgern zu erzeugen, wie etwa Erdgas. Kommerzielle Erdgaskraftwerke weisen einen hohen Wirkungsgrad bei moderaten CO₂-Emissionen auf, so dass elektrische Energie zu wirtschaftlichen Preisen auch nachts bereitgestellt werden kann. Das Prinzip der „Arbeitsteilung“ durch solare und konventionelle Techniken hat natürlich den entscheidenden Nachteil, dass es auf der Abhängigkeit von einem endlichen Energieträger wie Erdgas beruht. Dennoch mag diesem Prinzip vor allem in der Übergangszeit zu einer nachhaltigen, umweltverträglichen Energiewirtschaft einige Bedeutung zukommen. So genannte „Hybridkraftwerke“ sind also konventionelle Kraftwerke, denen solarthermische Kraftwerkskomponenten hinzugefügt werden, um fossile Energieträger einzusparen. Der große Vorteil dieser Kraftwerkstypen ist neben der Einsparung fossiler Brennstoffe die – verglichen mit herkömmlichen Kraftwerken – höhere Energieausbeute.

Wärmespeicher hingegen sind eine effiziente Methode, um während des Tages erzeugte Wärme für die Nachtstunden aufzubewahren, so dass rund um die Uhr Strom aus Solarenergie erzeugt werden kann. Als Wärmespeicher kommen etwa Salzschnmelzen in Frage, die sehr gute thermische Eigen-

schaften besitzen und zudem billig und in großen Mengen verfügbar sind. Um Missverständnissen vorzubeugen: Wärme lässt sich mit derzeit verfügbaren Technologien sehr viel besser „speichern“ als Elektrizität. Bleiakkumulatoren speichern Strom zu Kosten von ca. 130 Euro pro kWh und mehr. Im Vergleich dazu betragen die Speicherkosten für Wärmespeicher 10 bis 30 Euro pro kWh und sind so signifikant niedriger. Außerdem speichern Bleiakkus nur ca. 25 bis 30 Wh pro kg, so dass gigantische Anlagen benötigt würden, wollte man Strommengen speichern, die typischerweise von einem Kraftwerk in mehrstündigem Betrieb erzeugt werden.

In Südsanien (37° nördlicher Breite) stehen im Sommer zehn Stunden und im Winter sechs Stunden Sonnenlicht für 24 Stunden Stromerzeugung zur Verfügung. Um während des Tagesbetriebs nicht nur Wärme zur Erzeugung von Elektrizität bereitzustellen, sondern um außerdem noch die Wärmespeicher für den Nachtbetrieb „aufzuladen“, muss das Kollektorfeld solarthermischer Kraftwerke natürlich vergrößert werden – typischerweise um einen Faktor 2 bis 4 verglichen mit Anlagen, die nur während des Tages Energie erzeugen sollen. Man beachte allerdings, dass grundsätzliche Überlegungen und experimentelle Befunde mit Pilotanlagen nahe legen, dass die Effizienz solarthermischer Kraftwerksanlagen mit zusätz-

lichem Wärmespeicher tatsächlich um 20 bis 30 Prozent steigt. Auf diese Weise ist es prinzipiell möglich, Solarthermiekraftwerke grundlastfähig zu machen.

Standort Nordafrika

Das diesem Artikel zugrunde liegende Konzept einer zukünftigen nachhaltigen Energiewirtschaft sieht die Errichtung einer hinreichenden Menge grundlastfähiger solarthermischer Kraftwerke in Südeuropa und Nordafrika vor, wobei die dort erzeugte elektrische Energie durch die Technik der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) einen entscheidenden Anteil an der Versorgung Europas mit Elektrizität haben soll. Speziell die nordafrikanischen Wüstengebiete in Algerien, Libyen und Ägypten stellen riesige Flächen mit hoher Sonneneinstrahlung dar, wie sie idealerweise für den Betrieb solarthermischer Kraftwerke benötigt werden. Diese ansonsten brachliegenden Landschaften könnten unter Umständen durch den Bau von Kraftwerken in großem Maßstab einer sinnvollen Nutzung zugeführt werden. Natürlich ist nicht jeder Quadratkilometer Wüste sofort für den Bau von Kraftwerken nutzbar, insbesondere müssen Anforderungen an die Stabilität des Untergrunds gestellt werden, oder es müssen Umweltbedingungen wie Sandstürme berücksichtigt werden usw. Trotzdem ist das Angebot

an nutzbarer Fläche in dieser Weltregion mehr als ausreichend.

Die wesentlichen Baumaterialien für Solarthermie-Anlagen sind Stahl, Beton und Glas für die Kraftwerksstruktur sowie Wärme transportierende Medien (Luft, Thermo-Öle etc.), Kühlflüssigkeit (Wasser) zur Verdampfung und Wärme speichernde Medien (Salzschmelzen). Für die entsprechenden Länder in der nordafrikanischen Wüstenregion ergeben sich natürlich interessante Möglichkeiten – die Investitionskosten für Kraftwerke, die einen Großteil der benötigten elektrischen Energie Europas produzieren sollen, liegen im Bereich von Milliarden von Dollar. Auch ist der Technologietransfer an die sich entwickelnden Länder nicht zu unterschätzen – ebenso wenig wie die Schaffung von Arbeitsplätzen in der Region.

Von großem Interesse unter dem technischen Blickwinkel der Solarthermie in Nordafrika ist sicher eine zentrale Frage: Wie schafft man den in Afrika erzeugten Strom nach Europa zu den Endabnehmern? Als Möglichkeit bietet sich die so genannte Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) an.

Aus technischen Gründen ist eine Übertragung von elektrischem Wechselstrom über große Entfernungen im Bereich von einigen Hundert bis wenigen Tausend Kilometern mit wesentlich größeren Verlusten verbunden als die Übertragung von Gleichstrom. Grund dafür sind elektromagnetische Abstrahlung („Elektrosmog“) und dielektrische Umladungen des Isolatormaterials. Wechselstrom ist jedoch be-

quem durch Transformatoren und Umspannwerke zu handhaben, während eine Transformation von Gleichstrom technisch aufwendige Gleich- und Wechselrichter erfordert.

Bei großen Entfernungen jedoch lohnt es sich, den Wechselstrom in Gleichstrom mit hoher Spannung (typischerweise 100.000 - 1 Million Volt) umzuwandeln und diesen zu transportieren. Typische elektrische Verluste solcher projektierte HGÜ-Leitungen liegen dann bei etwa 3 Prozent pro 1.000 Kilometer Länge, während ein Wechselstromkabel dieser Länge bei 50 Hz Übertragungsfrequenz keine sinnvolle Stromübertragung mehr zulässt.

Das Prinzip der HGÜ findet bereits mit Erfolg kommerzielle Anwendungen bei der Anbindung der skandinavischen Wasserkraftwerke an das europäische Stromnetz und an das Baltikum. Ein weiteres Beispiel ist das HGÜ-Kabel, das durch den Ärmelkanal verläuft und Großbritanniens Stromnetz mit dem des Festlandes verbindet. In China wird voraussichtlich 2010 ein fast 2.100 Kilometer langes HGÜ-Kabel mit einer Übertragungsleistung von 6.400 Megawatt in Betrieb gehen, das die Industriezentren an der chinesischen Ostküste (Shanghai) mit den Wasserkraftwerken im Landesinneren verbinden soll. Indien, Südafrika und Brasilien haben ähnliche Projekte realisiert, so dass weltweit insgesamt fast 300 Gigawatt an elektrischer Leistung über große Entfernungen durch HGÜ-Leitungen in die Verbrauchernetze eingekoppelt werden. Dies alles zeigt, dass die Technologie

zur Übertragung großer Energiemengen über weite Entfernungen möglich und kommerziell rentabel ist.

Die Verbindung von den nordafrikanischen Solarthermie-Kraftwerken nach Europa könnte über drei mögliche Routen erfolgen: über die Straße von Gibraltar, über Sizilien oder über Sardinien. Ein Energieszenario („Europe 20XX“) sieht die Verlegung von insgesamt 140 Kabelpaaren mit einer Übertragungsleistung von jeweils 5 Gigawatt und einer Länge von etwa 3.000 Kilometern vor. Auf diese Weise ließen sich rund 700 Gigawatt in der nordafrikanischen Wüste erzeugter Solarstrom in das europäische Verbundnetzwerk einspeisen.

Zusammenfassung

Die auf endlichen Energieträgern aufgebaute globale Energiewirtschaft wird mittel- und langfristig durch eine nachhaltige Wirtschaft ersetzt werden müssen. Energie aus Sonnenstrahlung verspricht ein umweltfreundliches und unerschöpfliches Nutzungspotential, das zu erschließen bedeutende technische, wirtschaftliche und politische Kraftanstrengungen voraussetzt. Eines der vielversprechendsten Konzepte sieht den Bau solarthermischer Kraftwerke im Sonnengürtel Südeuropas und Nordafrikas vor, um über die Technik der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung Europa mit Elektrizität zu versorgen. •

LITERATUR

- E. Rebhan, *Energiehandbuch – Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*, Springer Berlin-Heidelberg, 2002
- K. Heinloth, *Die Energiefrage – Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten*, Vieweg Braunschweig/Wiesbaden, 1997
- Pitz-Paal, Vortrag auf dem Energy Forum „10.000 Solar Gigawatts“, 23.-24. April 2008, Hannover Messe.



Daniel Schäfer

II. Physikalisches Institut
Heinrich-Buff-Ring 16
35392 Gießen
Telefon: 0641 99-33220
E-Mail: Michael.Dueren@exp2.physik.uni-giessen.de

Daniel Schäfer, Jahrgang 1982, studiert seit 2004 Physik und Mathematik an der Justus-Liebig-Universität Gießen. Er schreibt gegenwärtig an seiner Diplomarbeit.