



Abb. 1: Große Solarkraftwerke in den Wüstengebieten der Erde (hier in Kalifornien/USA) sind in der Lage den Energieverbrauch der Menschheit langfristig zu sichern. Ein Solarrinnenkraftwerk bündelt das Sonnenlicht mit zylindrischen Spiegeln auf ein Absorberrohr. Die dort erzeugte Hitze wird in ein Dampfkraftwerk geleitet und generiert dort elektrischen Strom.

Die Zukunft der Energieversorgung

Ein Überblick aus physikalischer Sicht

Von Michael Düren

Wer möchte schon abends im Dunkeln sitzen, im Winter frieren und bei Reisen auf moderne Transportmittel verzichten? Licht, Heizung, Kühlung, Maschinen und Transport sind nur einige der zentralen Errungenschaften unserer technisierten Zivilisation, die allesamt auf die allzeitige Verfügbarkeit von etwas bauen, das wir *Energie* nennen. In diesem Artikel wird der Versuch unternommen, das Thema der Energieversorgung unserer Gesellschaft aus physikalischer Sicht klar und einfach zu strukturieren. Er führt Sie an eine bisher noch wenig bekannte und nur scheinbar abstruse Idee heran: Strom aus der Wüste Afrikas nach Europa zu importieren.

Der allergrößte Anteil des heutigen Weltenergiebedarfs wird durch fossile Brennstoffe, also Öl, Kohle und Gas, gedeckt. Diese fossilen Brennstoffe wurden in der Urzeit unserer Erde mit Hilfe des Sonnenlichtes aus Pflanzen gebildet. Alle fossilen Energieträger haben – neben ihrer Endlichkeit – die Eigenschaft, bei ihrer Verbrennung CO_2 freizusetzen. Der daraus folgende Anstieg der CO_2 -Konzentration in unserer Atmosphäre und die daraus resultierende Veränderung des Klimas sind der Kernpunkt des Energieproblems. Dieser so genannte *anthropogene Treibhauseffekt* wird seit etwa 20 Jahren intensiv studiert [1], war lange Zeit umstritten und wurde aufgrund der weit reichenden Konsequenzen für unsere Gesellschaft lange verleugnet. Seine Existenz ist aber heute von der wissenschaftlichen Gemeinschaft eindeutig anerkannt [2].

Aufgrund der Komplexität des globalen Klimas ist es sehr schwierig genaue quantitative Vorhersagen zu machen. Die Größenordnung und das Potential der möglichen zukünftigen katastrophalen Veränderungen durch CO_2 -Emission lassen sich jedoch leicht herleiten. Ob es dann letztlich schlimmer

oder weniger schlimm wird sollte jetzt nicht unser Problem sein, sondern wir müssen global sicherstellen, dass nicht mehr CO_2 emittiert wird, als unsere Atmosphäre verkraften kann. *Derzeit verbrennen wir an jedem Tag so viel Erdöl, wie erdgeschichtlich in etwa tausend Jahren aufgebaut wurde.* Es ist uns heute klar, dass das nicht mehr lange gut gehen kann. Es gibt zwar neue Ideen zur CO_2 -Abscheidung und Speicherung des CO_2 nach der Verbrennung, eine sichere großtechnische Lösung dafür ist jedoch zur Zeit noch nicht in Sicht und würde das Problem der Endlichkeit der fossilen Ressourcen sogar noch verschärfen.

Kernenergie

Nach der berühmten Gleichung $E=mc^2$ von Albert Einstein entspricht eine kleine Masse m einer großen Energiemenge E . Diese Äquivalenz erlaubt es, aus kleinen Mengen nuklearen Brennstoffs große Mengen an elektrischer Energie zu produzieren und das im Prinzip auf zwei Arten: durch die Spaltung großer Atomkerne, beispielsweise Uran, Thorium oder Plutonium, und durch die Verschmelzung kleiner Kerne, insbe-

sondere durch Fusion von Deuterium und Tritium zu Helium. Die technische Nutzung der zivilen Kernfusion ist derzeit Gegenstand der Grundlagenforschung und wird nach Angaben der beteiligten Forscher noch mindestens 50 Jahre bis zu einer großtechnischen, kommerziellen Anwendung brauchen. Kernfusion ist also für unser momentanes Energieproblem keine Lösung.

Die Kernspaltung hingegen wird seit den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts kommerziell betrieben und erzeugt derzeit etwa 25% des deutschen Stromes und stillt etwa 7% des gesamten globalen Energiebedarfs. In Deutschland wird derzeit der Ausstieg aus der Kernenergie, der „Ausstieg aus dem Ausstieg“ und der Bau neuer Kraftwerke diskutiert. Die Diskussion der Chancen und Risiken der Kernenergie spaltet die Gesellschaft in überzeugte Befürworter und Gegner dieser Technik. Die Deutsche Physikalische Gesellschaft hat sich kürzlich gegen ein Abschalten vorhandener Kernreaktoren in Deutschland ausgesprochen, damit das Ziel einer CO_2 -Reduktion schneller umgesetzt werden kann [3]. Hier wird also die Gefahr durch den Klimawandel als gravierender eingestuft als das Risiko durch Kernenergie.

Abb. 2: Kernkraftwerke erzeugen aus geringen Mengen nuklearen Brennstoffs große Mengen elektrischer Energie. (Hier das Kraftwerk Biblis in Hessen). Es wären weltweit etwa 13.000 Reaktoren notwendig, um den momentanen Verbrauch fossiler Brennstoffe durch Kernenergie zu ersetzen.



Global gesehen ist klar, dass Kerne-
nergie alleine keine Lösung des Klima-
problems darstellt, da *etwa 13.000
Kernreaktoren nötig wären, um den
derzeitigen Verbrauch an fossilen
Brennstoffen zu ersetzen*. Da jeder
Kernreaktor mit geringen Modifikati-
onen zum Herstellen von Plutonium
für Kernwaffen verwendet werden
kann und da jeder Reaktor potenti-
elles Ziel eines verheerenden terrori-
stischen Anschlags werden kann, ist in
der gegenwärtigen politischen Situati-
on der Welt der globale Ausbau der
Kernenergie aus sicherheitspolitischen
Erwägungen keine gute Option, wie
die Diskussionen um Nordkorea und
den Iran gezeigt haben.

Foto: Florian Baumann



Abb. 3: Windmühle von 1822 aus Borsfleth in Schleswig-Holstein, die heute im Freilicht-museum „Hessenpark“ in Neu-Anspach steht.

Energiesparen und Energiemanagement

Die Einsparung von Energie und die Effizienzsteigerung bei Energieverbrau-
chern ist eine der wichtigsten kurzfri-
stigen Optionen, um CO₂ einzusparen.
Einige populäre Beispiele hierzu sind
die Wärmeisolation von Häusern, das
Passivhaus, Energiesparlampen, Kraft-
Wärme-Kopplung und das Drei-Liter
Auto. Eine nicht so bekannte, aber
wichtige Option ist das so genannte
Lastmanagement. Durch zeitweises Ab-
schalten von Verbrauchern erhält der
Stromerzeuger hier die Möglichkeit
Spitzenlasten zu vermeiden und somit

seine Kraftwerke und auch fluktuieren-
de Quellen wie beispielsweise Windan-
lagen effizienter zu nutzen. Technisch
lässt sich so etwas über moderne
Stromzähler lösen, die zeitlich variable
Tarife verarbeiten können und be-
stimmte Verbraucher zu Zeiten von
Spitzentarifen abschalten können. Der-
art gestaffelte Tarifsysteme kennen wir

Foto: Hans Hillewaert



Abb. 4: Da auf offener See wesentlich stär-
kere Winde herrschen als im Binnenland
lohnern sich „off-shore“-Windanlagen trotz
höherer Investitions- und Wartungskosten.
Jeder dieser Rotoren vor der belgischen Kü-
ste hat einen Durchmesser von 126 m und
eine Leistung von 5 MW.

seit langem von Telefongtarifen oder
Preisen von Flugreisen. Beispielsweise
würde dann die Tiefkühltruhe nicht ge-
rade zu den Spitzenlastzeiten ansprin-
gen, und Waschmaschine und Ge-
schirrspüler könnten so programmiert
werden, dass sie dann laufen, wenn der
Strom billig ist.

Regenerative Energien: Biomasse, Wasser, Wind und Erdwärme

Die regenerativen Energien sind Ener-
giequellen, die nicht „verbraucht“ wer-
den oder zumindest wieder nachwach-
sen. Das Lagerfeuer aus Holz ist so lange
regenerativ, wie das Holz in gleicher
Menge nachwächst, wie es verbraucht
wird. Genauso ist eine Pelletheizung nur
so lange regenerativ, wie nur wenige
Leute sie nutzen. Würde jeder Deutsche
eine Pelletheizung nutzen, so wären un-
sere Wälder sehr schnell restlos abgehol-
zt. Die Verbrennung von *Biomasse* setzt
CO₂ frei und kann also nur dann als re-
generativ eingestuft werden, wenn nur
so viel Biomasse verbrannt wird wie neu
angebaut wird oder nachwächst. Es lässt
sich leicht zeigen, dass die Biomasse kei-
ne Option zur Lösung des Energiepro-
blems darstellt, da sie riesige landwirt-
schaftliche Flächen braucht und somit
in Konkurrenz zur Nahrungsmittelpro-
duktion steht. *Der Mais für eine Tankfüll-*



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

Michael Düren, Jahrgang 1957, hat an der RWTH Aachen Physik studiert und über
nukleare Effekte auf Quarks im Atomkern in einem Experiment am CERN in Genf
promoviert. Anschließend war er am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidel-
berg und an der Universität Erlangen-Nürnberg tätig. 1996 habilitierte er sich über
das HERMES-Experiment am DESY in Hamburg. Nach einer Lehrstuhlvertretung in
Bayreuth wurde er 2001 nach Gießen berufen. Im Rahmen großer internationaler
Kooperationen am CERN, DESY und der GSI/FAIR führt er Experimente zur Erfor-
schung der inneren Struktur des Protons durch. Seit 1998 ist Prof. Düren Mitglied
im Arbeitskreis Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und setzt sich
dort mit technisch-gesellschaftlichen Aspekten der Energieversorgung und der Kli-
maproblematik auseinander. Er gehört zu den Initiatoren einer interdisziplinären
Seminarreihe und eines Workshops zur Solarenergiepartnerschaft mit Afrika (SEPA)
an der Universität Gießen.

lung reicht aus, um einen Menschen ein Jahr lang satt zu machen. Wer wagt es in Anbetracht des Hungers auf der Welt da noch Auto zu fahren?

Die *Wasserkraft* wird an Stauseen effizient und zuverlässig zur Stromerzeugung genutzt. Dort wo viel Wasser und Berge vorhanden sind, wie beispielsweise in Skandinavien, spielt sie eine große Rolle. Der Bau neuer großer Stauseen hat aber auch negative Seiten, da er schwere ökologische Schäden hervorrufen kann. Insgesamt ist das Potential der Wasserkraft in vielen Ländern bereits weitgehend ausgeschöpft und kann nur einen kleinen Beitrag zur Lösung des Energieproblems leisten. Anders ist das möglicherweise bei der Nutzung der Wasserkraft im Meer. Die Forschung wird zeigen, ob durch *Gezeiten- und Wellenkraftwerke* sowie *Hydrothermalkraftwerke* in Zukunft große Energiemengen erzeugt werden können.

Der Wind, der schon in früheren Zeiten bei Segelschiffen und in Windmühlen als Energiequelle genutzt wurde erlebt derzeit mit modernen *Windanlagen* einen Siegeszug. Windanlagen erzeugen an guten Standorten sehr kostengünstigen regenerativen Strom. Inzwischen werden über 6% des deutschen Stroms durch Windenergie erzeugt. Besonders gute Standorte sind die Küstengebiete der Nord- und Ost-

see im Norden Europas und die Passatwindbereiche südlich von Europa, z.B. Marokko. Besonders stark sind die Winde auf See, was so genannte offshore-Windparks rentabel macht, die derzeit in der Nord- und Ostsee geplant werden. Ein Hauptproblem der Windanlagen sind die Leistungsschwankungen dieser Energiequellen. Drei Maßnahmen sind geeignet diesen Nachteil zu kompensieren: Durch großflächiges Zusammenschalten von Windanlagen werden die relativen Fluktuationen kleiner, Speicherkraftwerke können Strom zwischenspeichern, und Lastmanagement erlaubt die Kompensation der Fluktuationen.

Erdwärme wird seit langem in geologisch aktiven Regionen für Fernwärme und zur Stromerzeugung genutzt (z.B. in Island). Ihre Nutzung in durchschnittlichen Regionen mit geringem geothermischem Temperaturgradienten ist interessant zur Wärmeerzeugung für Wohnhäuser, eine Option zur Stromerzeugung durch Nutzung von Tiefbohrungen wird derzeit intensiv untersucht. Zur Lösung des Energieproblems wird Geothermie vermutlich nur einen begrenzten Beitrag leisten können.

Solarenergie: das Brot und die Krümel

Hani el Nokraschy, ein ägyptischer Referent auf unserem Workshop SE-

Foto: JUMI Group



Abb. 6: Im Waldpolenz-Solarpark in der Nähe von Leipzig wird derzeit die größte Photovoltaikanlage aus Cadmiumtellurid-Dünnschichtzellen aufgebaut, die bei Sonnenschein eine Leistung bis zu 40 MW hat.

PA2008 (SolarEnergie-Partnerschaft mit Afrika), verglich das Potential der Solarenergie mit einem Brot und alle anderen regenerativen Energien aufgrund ihrer wesentlich geringeren Potentiale mit den Brotkrümel. *Die Energie, die die Sonne an einem Tag auf die Wüsten unserer Erde strahlt, ist größer als der Jahresenergieverbrauch der ganzen Menschheit.* Insofern gibt es physikalisch gesehen gar kein Energieproblem. Nutzt man einen minimalen Anteil der Solarenergie in den Wüsten, so haben wir Energie im Überfluss.

Zur Umwandlung von Sonnenlicht in Strom stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung: *Photovoltaik* ist die elegante Hightech-Methode. Wir alle kennen die schwarz-blau glitzernden Solarmodule auf deutschen Dächern. Photovoltaik ist in Deutschland durch eine Einspeisevergütung hoch subventioniert und erbringt trotz tausendfacher privater Installationen keinen nennenswerten Beitrag zur nationalen Stromversorgung. Die Subventionen fließen letztlich zu den (ausländischen) Modulherstellern, die sich weigern die Module billiger anzubieten. Photovoltaikzellen sind derzeit noch Thema physikalischer Grundlagenforschung. Ziel ist es, preiswerte und effiziente Zellen zu entwickeln, die einen geringen Energie- und Rohstoffverbrauch bei ih-

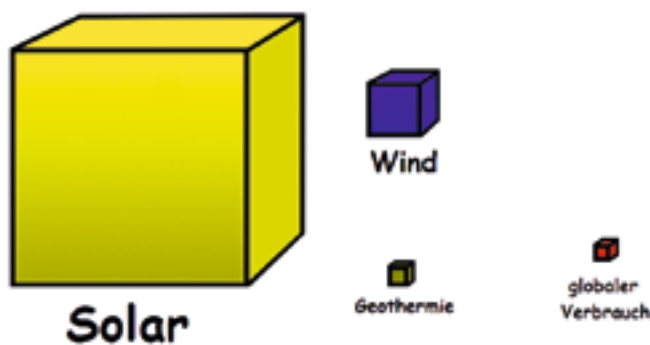


Abb. 5: Die Würfel zeigen anschaulich die Größenordnungen der prinzipiell auf der Erde verfügbaren regenerativen Energien im Vergleich zum Weltenergiebedarf. Würden wir die Solarenergie systematisch nutzen, so hätten wir keine Energieprobleme. (Bildnachweis: frei nach Wikipedia)

rer Herstellung haben. Die Chancen stehen gut dieses Ziel in den kommenden Jahrzehnten zu erreichen.

Die weniger bekannte Art aus Sonnenlicht Strom zu erzeugen geschieht in Solarthermischen Kraftwerken. Sie fokussieren das Sonnenlicht mit großen Spiegelanlagen auf Absorber, die das Licht in Wärmeenergie umwandeln. Die Wärme wird anschließend entweder zwischengespeichert oder gleich in einem traditionellen Wärmekraftwerk in elektrischen Strom umgewandelt. Solarthermische Kraftwerke wurden schon in den 1980-er Jahren gebaut, sind zuverlässig und stellen derzeit die preiswerteste Art dar, in großem Maßstab aus Sonnenenergie Strom zu erzeugen. Die Möglichkeit der Zwischenspeicherung der Wärme erlaubt einen Betrieb des Kraftwerkes rund um die Uhr.

Strom aus der Wüste

Moderne Hochspannungsgleichstromkabel sind in der Lage, über Tausende von Kilometern elektrische Energie in großem Stil und mit geringen Verlusten zu übertragen. So beträgt der Verlust beim Transport von Solarenergie aus Nordafrika nach Europa nur etwa 10 bis 15 Prozent. Es lässt sich leicht zeigen, dass eine Fläche von weniger als einem Prozent der Fläche der Sahara ausreicht, um mit Hilfe Solarthermischer Kraftwerke und entsprechender Wärmespeicher rund um die Uhr den Strombedarf von ganz Europa zu generieren [4]. Details dieses Szenarios finden Sie in dem Artikel über Solarthermische Kraftwerke (siehe Artikel von Daniel Schäfer Seite 11 ff.) in diesem Heft.

Fazit

Aufgrund des Klimaproblems muss der Verbrauch der fossilen Energieträger in den nächsten Jahren drastisch reduziert werden. Ein großes, bisher wenig beachtetes Energiepotential bilden Solarkraftwerke in den Wüstenregionen der Erde. Diese unerschöpfliche und gefahrlose Energiequelle gilt es zu er-

schließen, damit sie den Menschen im Norden und im Süden des Sonnengürtels der Erde zu Gute kommt. •

LITERATUR

[1] DPG, *Warnung vor drohenden weltweiten Klimaänderungen durch den Menschen*, Physikalische Blätter 43 (1987) 347, <http://www.dpg-physik.de/>

[gliederung/ak/ake/studien/dpgauf-ruf1987.pdf](http://www.dpg-physik.de/gliederung/ak/ake/studien/dpgauf-ruf1987.pdf)

[2] IPCC, 4. *Sachstandsbericht des Weltklimarats*, 2007, <http://www.ipcc.ch/>

[3] DPG, *Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990–2020*, Sept. 2005, <http://www.dpg-physik.de/gliederung/ak/ake/studien/energiestudie.pdf>

[4] The Club of Rome, *Clean Power from Deserts*, White Paper, Nov. 2007, <http://www.desertec.org>