

ENERGIE

Tiefe Geothermie – auf Augenhöhe mit der Atomkraft?

VON LARS FISCHER

Über zehn Kilometer tief wollen norwegische Forscher bohren, um 400 Grad Celsius heißen Dampf zu fördern. Diese tiefe Geothermie erzeugt zehnmal so viel Energie wie bisherige Erdwärme und soll sogar Atomkraftwerken das Wasser reichen können.

Der größte Teil der Hitze, die unser Planeten bei seiner Entstehung als glutflüssiger Gesteinsball besaß, ist noch da – eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle, tief unter unseren Füßen. 99 Prozent der Erde sind heißer als 1000 Grad Celsius, kühl ist nur die äußerste Kruste. Auch in Deutschland produzieren inzwischen fünf Kraftwerke unter anderem im Oberrheingraben mit Hilfe fast siedend heißer Thermalwässer aus vier Kilometer Tiefe elektrischen Strom aus Erdwärme.

Ein solches Erdwärmekraftwerk verwendet zur Energiegewinnung viele Komponenten, die auch in konventionellen Kraftwerken zum Einsatz kommen – Wärmetauscher, Turbinen, Generatoren und dergleichen. Allerdings gibt es einen wesentlichen Unterschied: Verglichen zu anderen Wärmekraftwerken operieren diese Anlagen bei Temperaturen von etwa 50 bis maximal 250 Grad Celsius. Um energetisch das ganz große Rad zu drehen, ist das schlicht noch zu kalt. Der

Fortsetzung Seite 4



© FELIX BÖRNER

SERIE ROHSTOFFE

Wie lang reicht die Kohle?

Es herrscht Streit über die Menge der weltweiten Kohlevorräte

VON DANIEL LINGENHÖHL

Braun- und Steinkohle gehören zu den wichtigsten Energieträgern. Und doch könnten die nutzbaren Reserven früher erschöpft sein als gedacht, warnen manche Experten. Andere sehen den Förderpeak dagegen erst in einigen hundert Jahren.

Pro Woche geht in China mindestens ein Kohlekraftwerk ans Netz – die Staatsregierung setzt stark auf das »schwarze Gold«: Es soll den rasch wachsenden Energiebedarf der aufstrebenden Wirtschaftsmacht decken und die Industrialisierung vorantreiben. Bis 2020 möchte das Reich der Mitte deshalb mehr als 400 große Kohlekraftwerke mit jeweils 1000 Megawatt Leistung errichten. Mit diesen Plänen bleibt Kohle auch mittelfristig der wichtigste Energieträger Chinas – womit die Nation weltweit bei Weitem nicht allein steht. »Insgesamt

liefernte Kohle im Jahr 2008 ein knappes Drittel des weltweiten Primärenergieverbrauchs, womit sie die zweite Stelle hinter Erdöl einnahm. Bei der Stromerzeugung bildete die Kohle mit einem Anteil von mehr als 40 Prozent sogar den wichtigsten Energierohstoff«, meint Sandro Schmidt, Wirtschaftsgeologe bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover.

Doch Chinas Energiehunger hat seinen Preis – national wie global. Denn die Förderung im Land selbst reicht nicht mehr aus,

Fortsetzung Seite 2

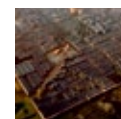
Liebe
Leserin,
lieber
Leser,



Energie ist eines der größten Zukunftsthemen: Wie stellen wir die Versorgung von Milliarden Menschen mit Wärme und Strom sicher, ohne dabei den Planeten zu ruinieren? Wissenschaftler investieren daher sehr viel eigene Energie, um neue Technologien zu entwickeln, die Schäden manch alter Kraftwerke zu verringern und Belastungen durch zukünftige Techniken schon im Vorfeld zu vermeiden. Einen kleinen Einblick in dieses große Feld, möchten wir Ihnen mit dieser Sonderausgabe von spektrumdirekt bieten.

Selbst voller Energie grüßt
Daniel Lingenhöhl

IN DIESER AUSGABE:



ZUKUNFT DER STADT
Wohnen im eigenen Kraftwerk

SEITE 5



SERIE ROHSTOFFE
Mangel trotz Anreicherung

SEITE 7



ENERGIEFORSCHUNG
Plasmalinifusion

SEITE 10



**UMWELTVER-
SCHMUTZUNG**
Ölsand-Abbau belastet Kanada stärker als behauptet

SEITE 14

FORTSETZUNG VON SEITE 1

Wie lang reicht die Kohle?

um den Binnenmarkt zu versorgen. »China ist an der Grenze: Das Land muss jetzt bereits mehr Kohle importieren, als es exportiert. Diesen Winter litten manche Regionen schon unter Kohlenot. Einige Kraftwerke verfügten nur noch über Reserven für zwei, drei Tage«, merkt Werner Zittel von der Ludwig-Bölkow-Stiftung an. Ein Versorgungsengpass, der in das Bild passt, das der Wissenschaftler zusammen mit der Energy Watch Group für die Kohle entworfen hat: »Wir erwarten, dass bereits um das Jahr 2030 das Maximum der Kohleförderung erreicht wird, da sich die als Reserven berichteten Kohlevorräte während der letzten 20 Jahre halbiert haben – weit mehr, als es dem Verbrauch entsprechen würde.«

Geschrumpfte Reserven

Laut ihrer Studie, welche die Forscher auch dem Deutschen Bundestag vorgelegt haben, seien die bekanntesten und in wirtschaftlich vertretbarem Rahmen abbaubaren Kohlevorkommen also deutlich kleiner als bislang angenommen. Eine Fehleinschätzung, die auf früheren, völlig überhöhten Schätzungen beruhe, so Zittel: »Durch die Öffnung nach

Asien und Russland beispielsweise wurden bessere Daten verfügbar: Indien etwa hat seine Reserven um die Hälfte reduziert. Aber auch in Deutschland oder Polen wurden die Vorräte drastisch zusammengestrichen – hier zu Lande im Jahr 2002 um ganze 99 Prozent, was mit dem Kohleausstiegsbeschluss begründet wurde. Deshalb seien in die Statistik nur die Mengen übernommen worden, die bis zum Stichtag durch die Förderung erreichbar sind.«

In den Vereinigten Staaten, dem zweitgrößten Erzeuger und weltgrößten Reservehalter, sei der Peak sogar schon erreicht, meint Werner Zittel: »Bis 2002 hat dort die Produktion zugenommen, seitdem nimmt sie ab. Die guten Zeiten sind also vorbei, und es wird immer schwieriger, qualitativ gute Kohle zu marktfähigen Preisen abzubauen.« Zurückgegangen ist demnach vor allem die Förderung von Anthrazit und Steinkohle, die beide sehr hohe Energiegehalte haben, während die qualitativ schlechtere Braunkohle noch verstärkt gewonnen wird. Weitere Länder könnten bald folgen: »Dazu gehört zum Beispiel Südafrika, ein wichtiges Exportland, das seit drei Jahren die Ausfuhren trotz gestiegener



© PIXELIO/DE/ROLEF VAN MELIS

Tagebau

Deutsche Steinkohle ist vor allem so teuer, weil sie tief aus Bergwerken geholt werden muss. Dagegen ist die Braunkohle hier zu Lande sehr billig zu fördern, weil sie im Tagebau mit riesigen Baggern wie hier in Garzweiler in Nordrhein-Westfalen gewonnen wird. Der Landschaftsverbrauch ist dabei aber auch erst einmal sehr groß.

Preise nicht mehr erhöhen konnte. Als Nächstes folgt Indonesien, wo es auch kaum mehr Spielraum nach oben gibt und wo in den nächsten fünf Jahren wohl die Exporte schrumpfen werden. Dabei ist das Land nach Australien der zweitgrößte Exporteur.«

Eine Ansicht, der sich auch der Energieforscher Mikael Höök von der Universität in Uppsala anschließt: »Viele wichtige Kohleförderregionen befinden sich bereits in einer Phase des Produktionsrückgangs, weil die Vorkommen erschöpft sind. Oder sie stehen zunehmend Beschränkungen

und anderen negativen Faktoren gegenüber, die die Erschließung neuer Lagerstätten erschweren.« Dazu gehören Umweltgesetze, die beispielsweise landschaftsraubende Tagebaue untersagen, oder mangelnder Zugang zu Märkten wie im Fall einer großen Lagerstätte in Sibirien. »Von dort lässt sich die Kohle nur per Eisenbahn nach Europa transportieren, was verglichen mit Schiffen sehr kostspielig ist«, bestätigt Ralf Littke von der RWTH Aachen.

Chancen für die deutsche Kohle?

Insgesamt sieht der Aachener Geologe die Situation bei der Kohle jedoch in einem deutlich rosigeren Licht und widerspricht den Pessimisten: »Es gibt keine Probleme mit den Vorkommen. Wir verfügen weltweit über sehr große Vorräte, deren statistische Reichweite in einer Größenordnung von mehreren hundert Jahren liegt. Wir sind aus mei-



Zeche Vollmond Bochum

Lange war der Ruhrpott das industrielle Herz Deutschlands, wo die Kumpels Kohle aus den Flözen schürften wie hier in Bochum. Mittlerweile gehört nicht nur dieses historische Bild der Zeche Vollmond der Vergangenheit an, sondern auch weitgehend der Kohlebergbau im Revier zwischen Duisburg und Dortmund.

ner Sicht deshalb weit von einem Peak der Kohleproduktion entfernt.« Sandro Schmidt von der BGR ergänzt dies: »Bezogen auf den Energiegehalt sind die bekannten Mengen weit größer als das gemeinsame Potenzial konventioneller Erdöl- und Erdgasressourcen. Eine in wenigen Jahren bevorstehende Krise durch eine geologisch bedingte physische Verknappung der Kohlevorräte können wir ausschließen. Gemessen am derzeitigen Verbrauch reichen allein die heute bekannten wirtschaftlich gewinnbaren Kohlevorräte weit über 100 Jahre.«

Steigen die Preise, wie während der letzten Rohstoffhaushalte, als der Preis für die Tonne Kohle zwischen 2006 und 2008 von 40 auf 160 US-Dollar in die Höhe schoss, rentiert sich zudem die Suche nach neuen Lagerstätten und deren Erschließung. Ralf Littke möchte nicht einmal ausschließen, dass die europäische Steinkohle eine Renaissance erlebt: »Sobald der Preis stimmt, das auch politisch gewollt ist und die Rahmenbedingungen passen, wäre das neuerliche Anfahren des Abbaus in Polen, Deutschland oder Großbritannien sehr gut möglich.« Immerhin gab es während des letzten Booms durchaus Pläne, sogar in Deutschland ein neues Kohlebergwerk zu eröffnen – für Kokssteinkohle im Ruhrgebiet: Sie ist qualitativ sehr hochwertig und ein stark nachgefragter Rohstoff in der Stahlherstellung. Erst die nachfolgende Weltwirtschaftskrise ab 2008 sorgte dafür, dass dieses Ansinnen vorerst wieder aufgeschoben wurde.

Mit dem Ende der Flaute und dem dann vor allem in China und Indien wieder stark ansteigenden Bedarf dürften fallende Preise jedoch bald der Vergangenheit

Kohlekraftwerk

Braun- und Steinkohle liefern ein knappes Drittel des weltweiten Energiebedarfs. Trotz aller Investitionen in erneuerbare Energien spielt Kohle auch in Deutschland noch eine wichtige Rolle – hier im Bild das Kraftwerk Weißweiler.

angehören, und die Kohle dürfte teurer werden. Ob deutsche Steinkohle trotzdem jemals ohne Subventionen für die Stromproduktion konkurrenzfähig wird, muss sich erst noch zeigen. »Der Preis müsste sich nochmals verdoppeln, damit sich der Abbau im Ruhrgebiet wieder lohnt«, schätzt Littke. Andernfalls ist 2018 hier zu Lande trotz der noch vorhandenen beträchtlichen Reserven Schluss.

Für Werner Zittel beschleunigen steigende Kosten aber wohl eher den Wandel weg von der Kohle in der Energieerzeugung: »Die Importstaaten werden große Probleme bekommen, da sie mit extrem steigenden Preisen zu kämpfen haben werden – und das erhöht den Zwang, sich nach Alternativen umzusehen. Mittlerweile sage ich schon: Jede Investition in fossile Energieträger ist Zeitverschwendung.« Eine Meinung, der Ralf Littke vehement widerspricht: »Auch wenn die deutsche Sicht eine andere ist und hier Kohle als klimaschädliche CO₂-Schleuder angesehen wird, weltweit baut man dagegen sehr viele neue Kohlekraftwerke. Zusammen mit anderen fossilen Energieträgern produzieren sie 85 Prozent des primären Weltenergieverbrauchs.

Außerdem können Sonne und Wind nicht zu allen Zeiten Strom erzeugen – für Flaute oder bedeckten Himmel muss man also konventionelle oder nukleare Kraftwerke vorhalten. Und das noch auf lange Sicht.« <<



© PIXELIO.DE/JÜRGEN NIESSEN



Abenddämmerung über der Kohle

Quo vadis, Kohle? Auch wenn die Vorräte noch lange reichen sollten, bleibt fraglich, wie lange sie noch Hauptenergielieferant bleibt – oder ob alternative Formen der Stromerzeugung sie nicht schon mittelfristig zurückdrängen.

© TEBNAD – FOTOLIA.COM

FORTSETZUNG VON SEITE 1

Tiefe Geothermie – auf Augenhöhe mit der Atomkraft?



© LAURENCE GOUGH/FOTOLIA

maximale Wirkungsgrad eines Kraftwerks hängt von seiner Arbeitstemperatur ab – deswegen schlägt das Kohlekraftwerk, das Dampf bei mehreren hundert Grad erzeugt, die kühleren Hydrothermalquellen um Längen.

Doch das soll sich in Zukunft ändern, wenn es nach Are Lund und Odd-Geir Lademo von der norwegischen Forschungsgesell-

schaft SINTEF geht. Sie schlagen vor, heißere Reservoirs als bisher geothermisch zu erschließen – und diese erneuerbare Energie damit auf Augenhöhe mit fossilen Brennstoffen und Atomkraft zu bringen.

Ziel der Wissenschaftler ist es, überkritisches Wasser zu fördern – oberhalb des kritischen Punkts bei 374 Grad Celsius und einem Druck von 220 Bar hören flüssiges Wasser und Dampf auf, als getrennte Phasen zu existieren. Wasser mit dieser Temperatur enthält etwa zehnmal so viel Energie wie bisher genutzte Thermalwasser. In diesem Parameterbereich arbeiten auch die modernen Hochleistungsturbinen mit sehr hohen Wirkungsgraden, mit denen konventionelle Kraftwerke Strom erzeugen.

»Wenn wir überkritische Reservoirs technisch beherrschen, dann können wir Großkraftwerke an Geothermiestandorten bauen«, sagt auch Ernst Huenges, der am Geoforschungszentrum Potsdam die Abteilung für Geothermie leitet. Das allerdings sei technisch durchaus anspruchsvoll: »Man müsste mindestens 400 Grad heißes Gestein erreichen. Weltweit gibt es nur wenige Bohrungen, die in diesen Bereich vorgedrungen sind.«

In Island fördert beispielsweise

das Iceland Deep Drilling Project seit März dieses Jahres überhitzten Dampf aus fünf Kilometer Tiefe. Doch die norwegischen Forscher wollen nicht von Vulkanen abhängig sein wie auf Island – die Energie des Erdinneren, finden sie, muss überall auf der Welt genutzt werden können. Die Temperatur der Erdkruste steigt mit der Tiefe an, mal 20, mal 40 Grad je Kilometer – mindestens zehn Kilometer tief müssten die Bohrungen deswegen in den meisten Regionen der Erde reichen, um überkritisches Wasser zu fördern.

Die technischen Herausforderungen bei der Umsetzung dieses Plans sind beträchtlich. Bislang existiert keine Technologie, mit hinreichender Genauigkeit so tief zu bohren, und die hohe Temperatur stellt hohe Ansprüche an das verwendete Material. Stahl wird spröde, Kunststoffe schmelzen, und elektronische Bauteile versagen durch die Hitze. Die norwegischen Forscher geben sich trotzdem zuversichtlich: Schon in 25 Jahren, sagen sie, könnten Techniken verfügbar sein, mit denen man in bis zu 500 Grad Celsius heißes Gestein bohren kann.

Druck und Temperatur stellen nicht nur das Material auf die Probe, sondern verändern auch die Eigenschaften des Gesteins

Geothermie auf Island

Geothermie ist die wichtigste Energiequelle Islands: Sie deckt mehr als 90 Prozent des Wärme- und knapp ein Fünftel des Strombedarfs ab.

selbst. Ob unter diesen Bedingungen Reservoirs in der gleichen Weise erschlossen werden können wie in geringeren Tiefen, ist unklar: Wenn das Gestein der heißen Schicht nicht durchlässig genug ist oder gar kein Wasser enthält, presst man durch eines der Bohrlöcher mit hohem Druck Wasser ein. Dadurch öffnet man Klüfte im Gestein zwischen beiden Bohrungen, so dass die Flüssigkeit von einer zur anderen fließen kann – das habe allerdings, sagt Huenges, in so großer Tiefe bisher noch nie jemand versucht. »Prinzipiell ist es wahrscheinlich möglich, aber das Gestein wird sich anders verhalten«, erklärt er. Der hohe Druck erschwert die Bildung von Klüften, während die Temperatur das Gestein leichter brechen lässt – wenn es überhaupt bricht, statt sich plastisch zu verformen.

Der eigentliche Schlüssel zur Energie des Erdinneren ist jedoch das Geld – noch ist völlig offen, ob sich Erdwärme aus mehr als zehn Kilometer Tiefe ökonomisch fördern lässt. Schon die Bohrungen selbst sind enorm teuer, hinzu kommen die Ausgaben für die Weiterentwicklung der Technik. Die Forschung müsse erst einmal staatlich gefördert werden, sagen Lademo und Lund, um der Industrie die Beteiligung an der Forschung zu erleichtern. Das Potenzial der Technik rechtfertigt jedenfalls den Aufwand.

Auch Ernst Huenges vom Geoforschungszentrum Potsdam spricht sich dafür aus, trotz der Schwierigkeiten und hohen Kosten an der tiefen Geothermie zu forschen. »Wir wollen ja auch hochwertige Energie gewinnen, und dafür müssen wir einfach tiefer bohren.«

<<

DOSSIER Energie



ENERGIE

Der Energiehunger der Menschheit steigt rapide – wie kann er gestillt werden? Fossile Brennstoffe gelten als Klimakiller, Atomkraft genießt einen schlechten Leumund. Doch die alternativen Quellen sprudeln bislang nur spärlich. Viel versprechende Ansätze lassen dennoch hoffen.

spektrumdirekt.de/energie

ZUKUNFT DER STADT

Wohnen im eigenen Kraftwerk

Gebäude entwickeln sich von Stromfressern zu Energieproduzenten

VON UWE HERZOG

Die Evolution in der Architektur bringt Häuser hervor, die mehr Energie erzeugen, als ihre Bewohner verbrauchen. Solarsiedlungen könnten eine Lösung für die Energieprobleme der Zukunft bieten.

Es war das letzte Aufbäumen einer untergehenden Epoche: Wie ein Dinosaurier aus Stahl, Beton, Aluminium und Glas richtete sich in Dubai das höchste Haus der Welt auf. 828 Meter. 163 Etagen. Baukosten: eine Milliarde Euro. Und noch ein Superlativ: Kein Gebäude der Erde belastet die Energieressourcen und das Weltklima so stark wie der »Burj Khalifa«, der »Kalifenturm«. Rund 18 Millionen Kilowattstunden Strom frisst das Monstrum pro Jahr. Vorsichtig geschätzt. Bemerkenswerterweise verließ der Architekt des Turms, Adrian Smith, das federführende Chicagoer Architekturbüro »SOM« bereits lange vor der Fertigstellung. Ihm folgten 40 weitere Architekten. Seither widmen sie sich dem nachhaltigen, energieeffizienten und ressourcenschonenden Bauen.

Vielleicht hatte Adrian Smith ja eine Vorahnung davon, dass so mancher architektonische »Menschheitstraum« eines Tages für die Welt zum Albraum werden könnte. Denn derzeit verschlingt das Leben und Arbeiten in den vier Wänden rund 40 Prozent der weltweit genutzten Energie und erweist sich damit zugleich als eine der Hauptquellen für umweltschädliche Treibhausgase.

Längst hat deshalb bei den namhaften Architekten der Gegenwart ein Umdenken begonnen. Die wahren Visionen der Zukunft heißen nicht mehr »Burj Khalifa«, sondern Masdar City oder Sejong. Diese beiden Projektnamen stehen für eine völlig neue Herangehensweise bei der Planung und Umsetzung von

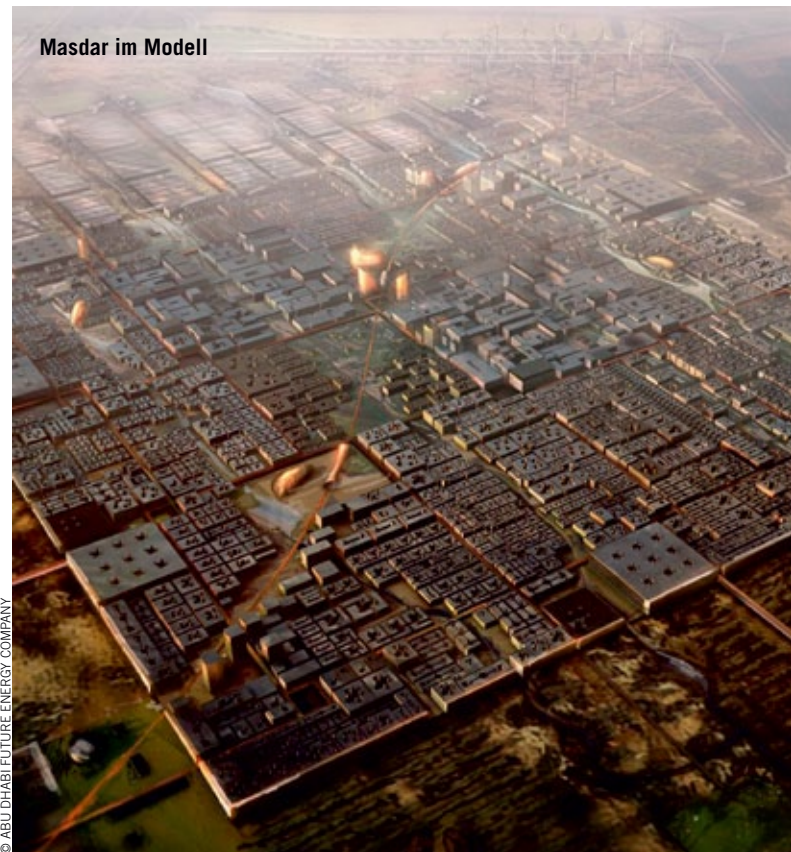
Metropolen: Nicht Energieverbrauch, sondern striktes Energiesparen in Verbindung mit eigener Energieerzeugung stehen im Vordergrund.

Wüstenstadt mit Energievorteil

Vor allem durch den flächendeckenden Einsatz leistungsfähiger Solaranlagen soll versucht werden, die Städte der Zukunft energieautark zu gestalten. In Masdar City, mitten in der Wüste von Dubais Nachbaremirat Abu Dhabi, sollen einmal 50 000 Menschen leben – ohne Energiebedarf von außen, mit eigener Wasserversorgung durch solarbetriebene Entsalzungsanlagen, elektrischen Kabinenbahnen und mit vor Ort recyceltem Müll. Im südkoreanischen Sejong sind es sogar eine halbe Million Bewohner, die in die neue autonome Ökostadt nahe Seoul einziehen werden.

Noch drohen die Auswirkungen der Finanzkrise und Ränkespiele im politischen und wirtschaftlichen Management diese beiden Projekte zu verzögern. Doch verhindern lassen werden sie sich wohl kaum.

Während Masdar City und Sejong also noch auf sich warten lassen, feiert die bislang größte Plusenergiehaussiedlung der Welt bereits ihr zehnjähriges Jubiläum: die Solarsiedlung des badischen Architekten Rolf Disch. Rund 160 Menschen wohnen hier am Rand der Freiburger City in 59 Einfamilienhäusern. Begrenzt wird das Areal von einem 120 Meter langen Gewerbekomplex, dem so genannten »Sonnenschiff«. Die großzügigen Tafeldächer sind vollständig mit Fotovoltaik-Paneelen besetzt, mit denen



Masdar im Modell

die Siedlung 420 000 Kilowattstunden (kWh) Solarstrom pro Jahr erzeugt.

Plus in der Bilanz

Dagegen fällt der Verbrauch von Primärenergie verhältnismäßig gering aus: jährlich gerade einmal 79 kWh pro Quadratmeter, haben Wissenschaftler des Wuppertaler Fachinstituts für Bauphysik in einer kürzlich durchgeführten Feldstudie für die Freiburger Solarsiedlung errechnet. Zum Vergleich: Altbauten verbrauchen vielerorts bis zu 450 kWh. Der derzeit gesetzlich vorgeschriebene Mindeststandard für Neubauten beträgt nach der Energieeinsparverordnung immerhin 260 kWh,

und selbst ein Passivhaus darf noch 120 kWh pro Quadratmeter jährlich verbrauchen.

Ein weiteres Ergebnis der Studie: Den ungewöhnlich geringen Verbrauchswerten der Freiburger Plusenergiehäuser steht deren Solarstromproduktion von durchschnittlich 115 kWh pro Quadratmeter jährlich gegenüber. Unter dem Strich attestierten die Wuppertaler Bauphysiker um Karsten Voss der Freiburger »Solarcity« ein Energieplus von immerhin 36 kWh pro Quadratmeter jährlich.

Wie kommt diese positive Bilanz zu Stande? Das Grundprinzip ist einfach: Im Sommer wird die Sonneneinstrahlung effektiv



© ROLF DISCH

Die Freiburger Solarsiedlung

Blick auf die »Solarcity« in Freiburg. Im Hintergrund ist das »Sonnenschiff« zu sehen. Wissenschaftler der Universität Wuppertal attestierten der Siedlung kürzlich ein Plus in der Energiebilanz.

abgeschattet, während die flach stehende Wintersonne die Räume auf natürliche Weise erwärmt. Möglich macht dies eine exakte Berechnung der Dachüberstand- und Balkonkonstruktion. Erreicht werden die niedrigen Energiebedarfswerte aber auch durch den Einsatz raffinierter Baumaterialien und Gebäudetechnik, die selbst zehn Jahre nach ihrer Verarbeitung noch als »State of the Art« gelten dürfen. So sind die Fenster der nach Süden ausgerichteten Holzfassaden unter anderem hochgradig lichtdurchlässig und reflektieren Infrarotlicht. Wie die gesamte Gebäudehülle sind sie wärmebrückenfrei gedämmt und dicht abgeschlossen.

Vorsprung durch Technik

Die extrem gute Dämmung erreichten die Architekten aber auch mit Hilfe spezieller Vakuumisolierpaneele, bei denen Kieselsäure in einer besonderen Barrierefolie verschweißt wurde. Trotz ihrer geringen Stärke von netto gerade einmal drei Zentimetern entfalten sie einen ungewöhnlich hohen Wirkungsgrad.

Auch um das Raumklima im »Sonnenschiff« sorgten sich die Erbauer. Eine Innenwandbeschichtung aus dünnen Gips-

kartonplatten, die mit Paraffin gefüllte Mikrokapseln enthalten, gleicht Temperaturschwankungen aus. Steigt die Raumtemperatur über 23 Grad, schmilzt das Paraffin und nimmt Wärme auf; sinkt hingegen die Temperatur, geben die Platten die Schmelzwärme wieder ab. In allen Räumen sorgt überdies ein ausgeklügeltes Belüftungssystem mit Wärmerückgewinnung dafür, dass verbrauchte Luft stets gegen Frischluft ausgetauscht wird, die Wärme jedoch in den Räumen bleibt.

Womöglich lässt sich das »Plus« in der Energiebilanz dank neuer Heiztechnologien und weiteren Optimierungen auf ganze 200 kWh pro Quadratmeter jährlich steigern – das wäre ein in der energetischen Architektur konkurrenzlos guter Wert. Da wundert es nicht, dass sich auch das Ausland für Dischs Konzepte interessiert. Derzeit entstehen Pläne für eine Plusenergiehausgruppe an Brasiliens Ostküste. Aufträge für ganze Siedlungen kommen

Das drehbare Heliotrop

Das preisgekrönte Bauwerk »Heliotrop« wurde 1994 vom Architekturbüro Rolf Disch gebaut und steht ebenfalls in Freiburg. Es richtet sich am Stand der Sonne aus.

aus der norwegischen Hafenstadt Kristiansand und den dänischen Orten Aarhus und Randers.

Energie gewinnen allerorten

Und auch hier zu Lande sind Plusenergiehaussiedlungen nach Freiburger Vorbild zunehmend gefragt. Im Breisgau fällt in Kürze der erste Spatenstich für die Errichtung 50 neuer Plusenergiehäuser. In Weissach bei Stuttgart sind mehrgeschossige Wohnhäuser und eine Gewerbeeinheit in Planung; der Schwarzwälder Kurort Königfeld wünscht sich einen fünf Hektar großen Plusenergie-Ortsteil samt Hotels.

Die bisher größten Solarsiedlungen Deutschlands könnten

sowohl in Köln-Ostheim als auch in Renningen bei Leonberg entstehen, sofern die entsprechenden Konzepte tatsächlich umgesetzt werden: Jeweils bis zu 3000 Einwohner sollen hier einmal in ihren eigenen »Kraftwerken« leben können. Laut Rolf Disch hätten rund 300 weitere deutsche Kommunen ihr grundsätzliches Interesse an solchen Plusenergiehaussiedlungen bekundet.

Angeregt vom allgemeinen Trend zeigt sich neuerdings auch die Stadt München. Im Fall eines Zuschlags für die Olympischen Winterspiele 2018 will man zwei geplante olympische Dörfer ebenfalls in Plusenergiehaus-Bauweise errichten. <<



© ROLF DISCH

SERIE ROHSTOFFE

Mangel trotz Anreicherung

Uran ist noch lange vorhanden, dennoch drohen bald Engpässe

VON CHRISTIAN MEIER

Eigentlich gibt es so viel Uran unter der Erdoberfläche, dass Atomstrom noch sehr lange fließen kann. »120 Jahre«, antwortet Ulrich Schwarz-Schampera von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) auf die Frage, wie lange die Uranreserven noch reichen werden. Außer den Lagerstätten, die beim derzeitigen Uranpreis gewinnträchtig abgebaut wer-

ausbauen wollen, ebenso wie die USA, wie die gerade bekannt gegebenen Pläne von US-Präsident Barack Obama zeigen. Allein China will in den nächsten zehn Jahren 20 neue Meiler ans Netz bringen. Die Internationale Atomenergieorganisation IAEA schätzt, dass der Uranbedarf von heute rund 65 000 Tonnen pro Jahr auf mindestens 93 000 Tonnen im Jahr 2030 ansteigen wird

»Um den Engpass zu vermeiden, hätte die Erschließung neuer Lagerstätten längst beginnen müssen«

(Peter Diehl)

den können, vermuten Geologen noch mehr Vorkommen, die den aktuellen Bedarf weitere 150 Jahre decken könnten. Von Uranknappheit also keine Rede?

Doch – denn nach Ansicht mancher Experten droht schon in den nächsten zehn Jahren ein Versorgungsengpass. »Die Konsequenzen wären höhere Erzeugungspreise für Kernenergie und die Stilllegung einzelner Kraftwerke«, sagt Thomas Seltmann, Sprecher der Organisation Energy Watch Group. Der Grund für den drohenden Mangel: Uranminen fördern jährlich nur zwei Drittel des weltweiten Bedarfs. Die Atomindustrie deckt den Rest aus den Vorräten, die vor 1980 während jahrzehntelanger Überproduktion in den Minen angesammelt wurden, und aus Beständen, die aus der atomaren Abrüstung stammen. Diese Reserven werden allerdings in den nächsten Jahren zur Neige gehen.

Gleichzeitig steigt der Uranhunger der Welt, da China, Indien und Russland die Kernkraft

[1]. Ob die Minenbetreiber rechtzeitig einen Gang zulegen und die Uranproduktion steigern, ist unter Experten umstritten.

Signal von den Märkten

Vieles hängt von den Marktpreisen ab. »Als vor drei Jahren der Preis spekulationsbedingt in die Höhe schoss, suchten die Unternehmen weltweit nach neuen Lagerstätten und wurden auch fündig«, sagt Schwarz-Schampera. Inzwischen ist der Uranpreis von seinem Allzeithoch im Sommer 2007 – ein Kilogramm kostete damals rund 360 US-Dollar – auf moderate 100 Dollar pro Kilo gesunken. Proportional dazu flaute der Eifer ab, mehr Uran zu produzieren. Die neuen Lagerstätten blieben unberührt. Aber das könne sich schnell ändern, meint Schwarz-Schampera. »Die Unternehmen warten nur auf ein Preissignal des Marktes, und der Abbau kann beginnen«, sagt der Geologe.

»Um den Engpass zu vermeiden, hätte die Erschließung neu-



© REINHARD MARSCHA / FOTOLIA

Kernkraftwerk

Auch wenn Deutschland – vorerst – weiter den Ausstieg aus der Kernenergie betreibt, so setzen andere Nationen doch auf die Technologie. Neue Reaktoren sind unter anderem in China, Indien, Brasilien und nun auch den USA geplant.

er Lagerstätten längst beginnen müssen«, entgegnet jedoch Peter Diehl, Leiter des Informationsdienstes WISE Uranium Project.

Bis eine neue Lagerstätte ihr erstes Uran liefere, dauere es in der Regel 10 bis 20 Jahre. Zudem gebe es Verzögerungen und Probleme bei wichtigen neuen Minenprojekten, was den Engpass

wahrscheinlich mache. In einer der ergiebigen neuen Lagerstätten weltweit, der kanadischen Mine »Cigar Lake«, kämpfen die Betreiber seit Jahren mit schwierigen geologischen Verhältnissen. Mehrmalige Wassereintritte setzten die Mine nach und nach vollständig unter Wasser. Die Mine hätte ein Zehntel des Weltbe-



© FLICKR / ALBERTO OG

Uranmine in Australien

Dieser Tagebau befindet sich im australischen Kakadu-Nationalpark und war schon öfter Inhalt von Kontroversen zwischen dem Bergbauunternehmen, Naturschützern und Vertretern der Aborigines. Für Letztere ist das Land heilig und wurde durch die Eröffnung der Ranger-Uranmine entweiht.

darfs decken und 2007 in Betrieb gehen sollen. Der Produktionsstart wurde aber mehrfach verschoben.

Auch andere Minen laufen nicht im Soll. »Bei einigen lässt sich das Uran schlechter aus dem Gestein herauslösen, als man zuvor gedacht hat«, sagt Diehl. Das liege an den speziellen Mineralien, in denen das Uran in diesen Minen gebunden sei. Uran gibt es in unterschiedlichen Gesteinen, aus denen es sich unterschiedlich leicht herauslösen lässt. Das Schwermetall findet sich auf fast allen Kontinenten, etwa in

im Wesentlichen eine Frage der Konzentration im Gestein: Je höher der Preis, desto geringer kann der Urananteil sein.

Konzentrationsprobleme

Und mit dieser Frage hängt ein weiterer Expertenstreit zusammen. Er dreht sich um Umweltprobleme durch den Abbau niedrig konzentrierter Uranerze. Die meisten enthalten weniger als ein Prozent Uran. Wirtschaftlich abbauen lassen sich derzeit Vorkommen mit mindestens 0,03 Prozent. Eine Mine in Namibia fördert tatsächlich Erz mit derart

würde viel mehr Gestein bewegt werden müssen, um an eine bestimmte Menge Uran heranzukommen, sagt der Kernphysiker.

Der höhere Energieverbrauch bei der Förderung falle kaum ins Gewicht, entgegnet Horst-Michael Prasser, Professor für Kernenergiesysteme an der ETH Zürich. »Selbst bei 0,03 Prozent Urangelgehalt beträgt er nur rund ein Prozent der späteren Energieausbeute im Kernkraftwerk«, betont der Nuklearingenieur. Denn im Uran steckt jede Menge Energie. Aus einem Kilogramm des Kernbrennstoffs lassen sich durchschnittlich 40 000 Kilowattstunden herausholen – das entspricht etwa dem jährlichen Strombedarf von zehn dreiköpfigen deutschen Familien. Dieser Schnitt lasse sich durch Neubaulanlagen noch deutlich verbessern, sagt Prasser, denn sie erzeugen mit einem Kilo Uran sogar rund 70 000 Kilowattstunden Strom.

Die Energy Watch Group ist weniger optimistisch: Weil bei geringen Konzentrationen ein größerer Anteil des Brennstoffs bei der Förderung und Weiterverarbeitung verloren gehe, ver-

schlechtere sich die Energiebilanz zusehends, schreibt sie in einem Papier aus dem Jahr 2006 [2].

Unterhalb von 0,01 bis 0,02 Prozent näherte sich die Energie, die für Förderung und Weiterverarbeitung des Erzes, den Betrieb des Reaktors und die Entsorgung des radioaktiven Abfalls nötig sei, dem Energiegewinn durch das Verbrennen des Urans im Reaktor an. Das ist kein marginales Problem: Lagerstätten mit extrem fein verteiltem Uran enthielten laut dem EWG-Papier die größten Ressourcen.

Allerdings sei es nicht zwangsläufig so, dass bei steigendem Preis Erze mit immer kleineren Konzentrationen gefördert werden, meint Schwarz-Schampera. »Wir kennen nur einen Bruchteil der Uranlagerstätten«, sagt der Geologe. Jede neue Suche könne auf neue hochkonzentrierte Lagerstätten stoßen.

Säure – die Lösung

Auch Landschaftszerstörung muss nicht unbedingt mit dem Uranabbau verbunden sein. Aus dem Tagebau stammte 2006 nur rund ein Viertel des Elements,

»Wir kennen nur einen Bruchteil der Uranlagerstätten« (Ulrich Schwarz-Schampera)

Sandsteinen oder in Granit. Die wichtigsten Uranproduzenten sind Kanada, Kasachstan und Australien. Auch in Russland und Afrika gibt es große Reserven. Die größten Verbraucher sind die USA, Frankreich und Japan. Deutschland rangiert auf Rang fünf. Ob sich der Abbau lohnt, ist

niedrigem Urangelgehalt. Wenn der Preis steigen sollte, könnte ein Run auf Lagerstätten mit noch geringerem Anteil des Rohstoffs beginnen. »Deren Abbau hätte mehr Landschaftszerstörung und Energieverbrauch zur Folge«, meint Heinz Smital, Kernkraftexperte von Greenpeace. Denn es



© USFWS

Grubenwasser

Bergbau bedeutet in vielen Fällen Eingriff in die Natur. Das gilt auch für den Uranabbau, der radioaktiv kontaminierte Abwässer erzeugen kann.

unter Tage wurden dagegen 40 Prozent gewonnen. Und der Rest stammte aus einer dritten Methode, die zurzeit an Beliebtheit gewinnt: Der so genannte Lösungsbergbau. Dieser kommt ganz ohne Gruben und Stollen aus, es reichen ein paar Bohrlöcher an den Rändern der Lagerstätte, in die durch Löcher säure- oder laugenhaltiges Wasser in die Tiefe gepumpt wird. Durch ein weiteres Bohrloch im Zentrum des Vorkommens wird die Flüssigkeit wieder aus dem uranhaltigen Gestein herausgesaugt. Auf seinem Weg von den Injektionsbohrlöchern zur Entnahmestelle lösen Säuren – etwa Schwefel- oder Salpetersäure – oder Basen das Uran aus dem Erz und befördern es ans Tageslicht. Die Methode funktioniert allerdings nur in porösen Gesteinen wie Sandstein. Kasachstan setzt fast vollständig auf den Lösungsbergbau.

Die Branche preist das Verfahren als besonders umweltfreundlich an. Denn die Positionierung der Bohrlöcher soll den Strom des uranbeladenen Wassers von den Rändern der Lagerstätte zu ihrem Zentrum lenken, so dass

es nicht aus dem Fördergebiet fließt. »Das lässt sich aber nicht hundertprozentig kontrollieren«, sagt Heinz Smital. Es würden Tausende von Tonnen Säure ins Erdreich gepumpt, die nicht vollständig wieder herausgeholt werden könnten, kritisiert der Greenpeace-Atomexperte. In den USA, wo er in Texas und Wyoming angewendet wird, stoße der Uran-Lösungsbergbau auf zunehmenden Widerstand, bestätigt Peter Diehl. Denn nach der Aufgabe bisheriger Projekte sei es nicht, wie zuvor versprochen, gelungen, die ursprüngliche Grundwasserqualität in den Lagerstätten wiederherzustellen. »Außerdem besteht die Gefahr, dass Trinkwasser kontaminiert wird, wenn ein entsprechender Grundwasserleiter in der Nähe der Lagerstätte verläuft«, so Diehl.

Sollten mangelnde Akzeptanz, Umweltprobleme oder technische Verzögerungen den herkömmlichen Bergbau bremsen, könnten exotischere Uranquellen zum Zuge kommen. Während der Preishausse 2007 testete eine kanadische Firma erfolgreich die Urangewinnung aus

der Flugasche eines chinesischen Kohlekraftwerks. Doch die Methode ist teuer und überlebte die sinkenden Preise nicht. Ein schier unendliches Uranreservoir sind zudem die Weltmeere. Fein verteilt enthalten sie vier Milliarden Tonnen Uran. Japanische Versuche haben gezeigt, dass das radioaktive Element mit speziell imprägnierten Matten, die man für einige Zeit im Meer versenkt, gesammelt werden kann – doch auf diese Weise gewonnenes Uran würde ebenfalls Hunderte von Dollar pro Kilogramm kosten.

Das muss allerdings kein Hindernis sein. Denn der Uranpreis schlägt, verglichen mit den Kosten für Bau und Betrieb eines Kernkraftwerks, nur mit ein paar Prozent zu Buche. Vielfach höhere Preise könnte die Branche also locker verkraften. <<

[1] OECD Nuclear Energy Agency, International Atomic Energy Agency: Uranium 2007: Resources, Production and Demand, 2008.

[2] Energy Watch Group: Uranium Resources and Nuclear Energy. EWG-Series 1, 2006.

ENERGIEFORSCHUNG

Plasmalinfusion

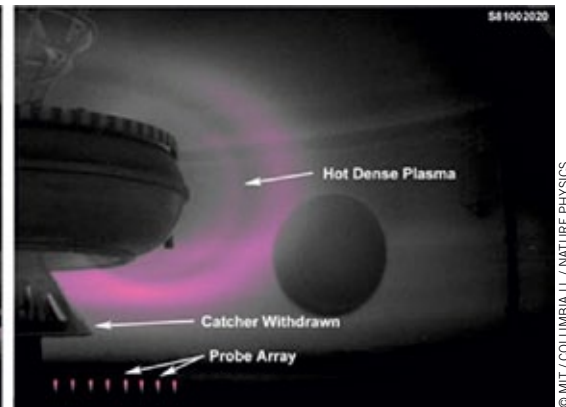
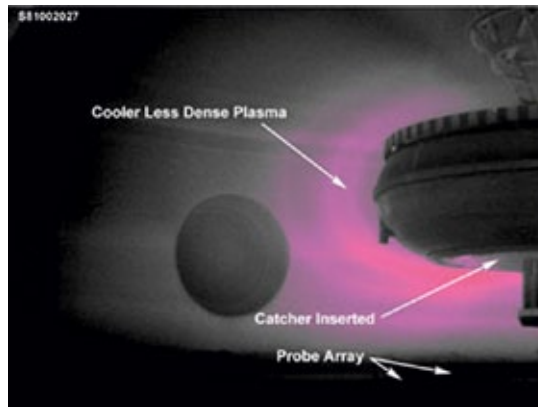
Neue Experimente bringen Kernfusionen ein Stückchen näher

VON OLIVER DREISSIGACKER

Während sich eine internationale Staatengemeinschaft in jahrelanger Abstimmung auf den Standort eines Versuchsreaktors einigte, haben die USA eine Anlage gebaut, eröffnet und erfolgreich getestet. Und zünden noch dieses Jahr zum ersten Mal einen Mikrosterne im Labor.

»Das größte Wissenschaftsprojekt seit der Internationalen Raumstation.« So bezeichnete der ehemalige französische Staatspräsident Jacques Chirac den mittlerweile begonnenen Bau des Versuchs-Fusionsreaktors Iter in Cadarache, nördlich von Marseille. Dieses Etikett ist förmlich Segen und Fluch zugleich. Denn steht es zum einen für das hehre Ziel, »saubere« Energie zu erzeugen – ohne Emission von Treibhausgasen, Ausbeutung begrenzter Rohstoffe und stark radioaktiven Abfall –, wird es zum anderen genau wie die bemannte Raumfahrt als zu teures und letztendlich vielleicht sinnloses Unterfangen kritisiert.

Dabei beschäftigen sich Wissenschaftler und Techniker ebenfalls seit mehr als einem halben Jahrhundert mit einem solchen Reaktor. Kurz nachdem Physiker wie Hans Bethe die Energiegewinnung in Sternen erklärten, wurde darüber nachgedacht, die Fusion auf der Erde zur Stromerzeugung einzusetzen – bis heute allerdings ohne Erfolg. Denn die Bedingungen im Zentrum von Sternen wie der Sonne sind extrem – hier herrschen Drücke von 300 Milliarden Atmosphären und Temperaturen von mehr als zehn Millionen Grad.



Bei dieser Hitze ist der Wasserstoff, aus dem die Sonne überwiegend besteht, ionisiert: Die Elektronen sind nicht mehr an die Atomkerne gebunden und bewegen sich frei durcheinander. Physiker nennen diesen Zustand Plasma oder den vierten Aggregatzustand neben fest, flüssig und gasförmig. Mehr als 99 Prozent der sichtbaren Materie im Universum liegt als Plasma vor. Auch die Erde ist einem ständigen Strom von solchem ionisierten Gas ausgesetzt, dem Sonnenwind. Da die Teilchen, aus denen sich das Plasma zusammensetzt, nicht neutral sind, können elektrische Ströme fließen und die Partikel werden vom Magnetfeld der Erde abgelenkt und teilweise eingefangen.

Plasma – gezähmt per Magnetfeld

Dadurch kommen zahlreiche Effekte zustande, die bei neutralen Gasen nicht beobachtet werden. Einer davon konnte jetzt in einem neuartigen Aufbau am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA, erstmals im Versuch nachgestellt werden. In ihrer Plasmakammer hielten die Forscher um Michael Mauel von der Columbia University in New York und Jay Kesner vom MIT einen supraleitenden Dipolmagneten mit einem externen Feld in der Schwebe, anstatt ihn wie gewöhnlich mechanisch zu fixieren. Die geladenen Teilchen können sich dadurch frei um den »magnetischen Donut« bewegen, ohne eine Aufhängung zu berühren.

»Unser Experiment wurde von der irdischen Magnetosphäre inspiriert«, erläutert Mauel. »Planeten wie Erde und Jupiter können mit ihrem Dipolfeld heiße, ionisierte Materie auch bei hohem Druck ansammeln«, so der Physiker weiter. Dieser Plasmaeffekt wird als Turbulent Inward Pinching bezeichnet. Neutrales Gas würde sich dagegen schnell wieder umverteilen und

Neue Magnetanordnung

Das Leuchten des Plasmas verrät dessen unterschiedliches Verhalten, wenn der quer stehende Dipolmagnetring (Bildmitte) von einer mechanischen Halterung (Catcher) fixiert wird (links), oder wenn diese nach unten weggezogen ist und der Dipol magnetisch in der Schwebe gehalten wird (rechts). Dann sammelt sich heißes Plasma nahe des Dipols an und staut sich zu hoher Dichte auf.

die Dichteunterschiede ausgleichen. Abgesehen von der Grundlagenforschung, könnte die neue Magnetanordnung auch bei der Weiterentwicklung von Fusionsexperimenten helfen.

Auch in der bisher führenden Anlage zum magnetischen Plasmaeinschluss, dem Tokamak, ließen sich diese Turbulent Inward Pinch bereits beobachten. »Aber noch nie in der Klarheit wie in diesem Versuch am MIT«, berichtet Karl Lackner, Theoretiker am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching. Die US-Forscher verweisen darauf, dass – sofern ihre Folgeexperimente weiterhin ermutigende Resultate liefern – ihre Dipolanlagen eine alternative zweite Generation von Fusionsreaktoren

Plasmagefäß der Fusionsanlage ASDEX Upgrade

Blick in das Plasmagefäß des Testreaktors, einem so genannten Tokamak, des IPP in Garching. Spulen erzeugen hier ein schraubenartig geformtes Magnetfeld in der Plasmakammer, das das heiße Gas von den Wänden weg drückt und zum Zentrum des Querschnitts hin verdichtet, wo die Fusion stattfinden soll.



© MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK IPP



Unser besonderer Tipp:



■ Energenius – Der Energie auf der Spur, CD-ROM

Entwickelt von Henrik Dransfeld und Kevin Röhl, CD-ROM für Microsoft Windows XP oder -Vista (empfohlen)
Spektrum der Wissenschaft in Kooperation mit Klaus Tschira Stiftung Gemeinnützige GmbH

Bestell-Nr. 3165 € 9,80 (D), € 9,80

Spektrum der Wissenschaft präsentiert den Gewinnerbeitrag des Jugendsoftwarepreises 2008 der Klaus Tschira Stiftung.

Energenius ist ein multimediales Lernprogramm zum Thema Energie und Energieerhaltung. Schüler der Klassen 9 bis 11 können ihr Wissen auffrischen, erweitern und überprüfen.

»Verständlich – unterhaltsam – professionell«
Jury des Jugendsoftwarepreises



■ Die Weltraumbox, 3 DVD-Videos

Drei komplette Dokumentationen

2010, Laufzeit 384 Min., Polyband.

Bestell-Nr. 3076

€ 10,99 (D), € 10,99 (A)

Drei komplette Dokumentationen auf drei DVDs mit über sechs

Stunden Gesamtlauzeit zum günstigen Paketpreis! Die Weltraumbox enthält die bekannten und beliebten Dokumentationen *Space Odyssey – Mission zu den Planeten*, *Moonshot – Der Flug von Apollo 11* und *Der Weltraum (Episode 1: Woher wir kommen, Episode 2: Die Erde in Gefahr, Episode 3: Aufbruch zu den Sternen)*. FSK: ab 12 freigegeben.



■ Das Brainfitness-Programm 1-3, 3 Video-DVDs

Entdecken Sie die Leistungsfähigkeit Ihres Gehirns

Laufzeit: 3 x 60 Min., DVD, Polyband.

Bestell-Nr. 3078

€ 39,95 (D), € 39,95 (A)

BRAIN FITNESS befasst sich mit Neuroplastizität, die Fähigkeit

des Gehirns zu Veränderung und Anpassung, sogar zur Neuvernetzung! Das Gehirn bleibt zeitlebens stark formbar und indem es entsprechenden Reizen ausgesetzt wird, können positive physikalische und funktionale Veränderungen hervorgerufen werden.



■ Abenteuer im Weltall, CD-ROM

Interaktives Lernspiel zur Astronomie und Raumfahrt

Entwickelt von Katrin Honauer und Marie Berckhan, Sprecher: Pascal Honauer und Marie Berckhan, Spektrum der Wissenschaft.

Bestell-Nr. 2959 € 9,90 (D), € 9,90 (A)

Dieses interaktive Lernspiel ist der Gewinner des Jugendsoftwarepreises 2008 der Klaus-Tschira-Stiftung. Es wurde programmiert von Jugendlichen für Kinder ab 10 Jahren. Es besteht aus zwei Teilen:

- Ein interaktives und linear aufgebautes Lernspiel. Die Kinder helfen dem Alien Sparky aus der Patsche und bestehen mit ihm gemeinsam viele Abenteuer.
- Ein umfangreiches Angebot an Texten, Schaubildern, Zeittafeln und interaktiven Aufgaben, die in individueller Reihenfolge und beliebig oft bearbeitet werden können.

Geeignet für PC mit Betriebssystem MS-Windows XP oder Vista.



Hrsg. v. Thomas Bürke u. Roland Wengenmayr

■ Erneuerbare Energie

Alternative Energiekonzepte für die Zukunft

2., aktual. und ergänzte Auflage 2010, 141 Seiten mit Farbabbildungen, geb., Wiley-VCH.

Bestell-Nr. 2986.

€ 34,- (D), € 35,- (A)

In diesem Buch erklären führende Wissenschaftler detailliert, wie Photovoltaik, Solarthermie, Windkraft, Wasserkraft, Geothermie, Brennstoffzellen und die Wasserstoffwirtschaft funktionieren. Nüchtern und ohne ideologische Scheuklappen diskutieren sie, welche Erwartungen alternative Techniken zur Erzeugung, Speicherung und zum Transport von Energie wirklich erfüllen können.

Farbige Bilder, übersichtliche Informationsgrafiken und Informationskästen lockern die Texte auf.



■ Lernpaket Tesla Energie

16 Bauteile, 32 S. Versuchsanleitung plus Experimentierhandbuch auf CD-ROM, Franzis.

Bestell-Nr. 2732

Früher € 49,95, jetzt nur € 19,95 (D), € 19,95 (A)

Mit diesem Lernpaket erarbeiten Sie die Grundlagen der Hochfrequenztechnik am Beispiel der legendären Ideen und Patenten des großen Erfinders Nikola Tesla. Sind seine Visionen einer drahtlosen Energieübertragung real umsetzbar? Experimentieren Sie selbst und bilden Sie sich ein Urte.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich*



NEU

Stephen W. Hawking, Leonard Mlodinow

■ Der große Entwurf

Eine neue Erklärung des Universums

2010, 189 S. m. zahlr. farb. Abb., geb., Rowohlt

Bestell-Nr. 3158

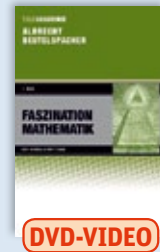
€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Warum existieren wir? Neue Antworten auf die letzten Fragen des Seins

»Um das Universum auf fundamentalster Ebene zu verstehen, müssen wir nicht nur wissen, wie sich das Universum verhält, sondern auch, warum. Warum gibt es etwas und nicht einfach nichts? Warum existieren wir? Warum dieses besondere System von Gesetzen und nicht irgendein anderes? Das ist die letztgültige Frage nach dem Leben, dem Universum und dem ganzen Rest. Wir werden versuchen, sie in diesem Buch zu beantworten.«

Stephen Hawking

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



Albrecht Beutelspacher

■ Faszination Mathematik, DVD-Video

Originalvortrag

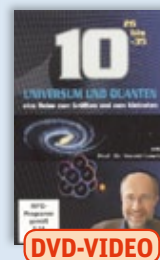
2010, Laufzeit: 45 min., DVD, Quartino.

Bestell-Nr. 3047

€ 12,95 (D), € 12,95 (A)

Albrecht Beutelspacher kennt alle Facetten seiner Wissenschaft. Ihm

ist es gelungen, die leichte und spielerische Seite der »Königin der Wissenschaften« zu vermitteln. Mit vielen Anekdoten und Beispielen präsentiert er, wie vergnüglich und unterhaltend die Beschäftigung mit den Zahlen ist. Der Vortrag fand am 10.07.2008 im Gymnasium Hohenbaden, Baden-Baden, statt.



Harald Lesch

■ Universum und Quanten, DVD-Video

Eine Reise zum Größten und zum Kleinsten

Ein Film von Gerhard Windorfer und Herbert Lenz

2010, Laufzeit 90 Min., Komplett-Media.

Bestell-Nr. 3062

€ 29,95 (D), € 29,95 (A)

Von 10 hoch 26 bis 10 hoch -35: Der Reiseführer Harald Lesch nimmt uns mit auf eine Tour durch die Größenskalen des Kosmos. Erst führt er uns aus der Milchstraße hinaus bis an den Rand des Universums, um dann mit uns hinabzusteigen zu den Quarks bis hin zur kleinsten Größe, der Planck-Länge. So schließt sich der kosmische Kreis, die dem Menschen bis heute bekannte Welt. FSK: Info-Programm.



Bequem bestellen:

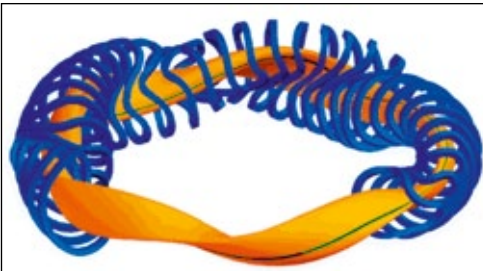
→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch 06221 9126-841

→ per Fax 0711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



Wendelstein 7-X

Computergrafik der verwundenen Magnetspulen und des Plasmas der Stellarator-Fusionsanlage Wendelstein 7-X, die am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald aufgebaut wird.

© MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

darstellen könnten. In diesen sei es dann möglich, durch den Einsatz von Helium-3 auf das Erbrüten von Tritium, einem radioaktiven Isotop des Wasserstoffs, zu verzichten. Bisher wird das überschwere Wasserstoffisotop neben Deuterium verwendet, da die Reaktionswahrscheinlichkeit und die Energiebilanz bei diesen Kernen günstiger sind. Doch der Verzicht wirft andere Probleme auf. »In Anwesenheit von Deuterium entsteht immer Tritium und damit findet auch der übliche Fusionsprozess statt. Dessen schnelle Neutronen erwärmen jedoch den gekühlten supraleitenden Magneten«, wirft Lackner ein.

Ralph Schorn, Plasmaphysiker vom Forschungszentrum Jülich, zählt weitere Schwierigkeiten auf: »Helium-3 ist auf der Erde nicht annähernd ausreichend vorhanden, kann nicht erbrütet wer-

den und müsste auf dem Mond abgebaut werden. Zudem liefert die Reaktion mit Helium-3 als Endprodukt keine Neutronen.« Das könnte zwar auch Vorteile mit sich bringen, doch die im Reaktor erzeugte Energie müsste in diesem Fall über Wärmeleitung und Oberflächenkontakt aus der Brennkammer geleitet werden. »Zusammen mit der wesentlich höheren Plasmatemperatur von 700 Millionen Grad führt das zu Problemen, die die heutige Fusionsforschung nicht annähernd lösen kann«, so Schorn.

Schwierigkeiten auf allen Wegen

Doch auch die Ansätze, die von deutschen Forschern verfolgt werden, haben mit gravierenden technischen Herausforderungen zu kämpfen. Selbst wenn das heiße Plasma weitestgehend durch

die schraubenförmig verdrehten Magnetfelder in Tokamak oder den so genannten Stellaratoren von den Wänden der Kammer fern gehalten wird, lässt sich ein Kontakt wegen Turbulenzen und Plasmainstabilitäten nie völlig vermeiden. Kommt es dazu, schlägt das Plasma Partikel aus der Wand heraus, die das ionisierte Gas verunreinigen. Gleichzeitig erodiert die Oberfläche und ändert ihre Eigenschaften.

Dies in den Griff zu bekommen wird eine der Hauptaufgaben von Iter sein. Läuft alles nach Plan, finden 2018 die ersten Versuche statt. Acht Jahre später wollen die Wissenschaftler dann erstmals mit einem Deuterium-Tritium-Plasma zeitweise Energie erzeugen. Erst wenn diese Testphasen erfolgreich verlaufen, beginnt der Bau des eigentlichen Kraftwerkprototyps »Demo«, der

im Idealfall Mitte des Jahrhunderts ans Netz geht.

In den Vereinigten Staaten wird neben den Reaktoren mit magnetischem Plasmaeinschluss – wie beim Tokamak oder den Stellaratoren – noch ein anderer Weg verfolgt: Die Trägheitsfusion. Dass diese Methode umsetzbar ist, zeigte sich bereits in den 1950er Jahren. In Wasserstoffbomben wurde der Brennstoff durch den Druck einer explodierenden Atombombe auf die nötige Temperatur und Dichte gebracht.

Mittlerweile forschen Wissenschaftler daran, dies durch massiven Laserbeschuss zu bewerkstelligen. Die auf europäischer und deutscher Ebene geförderte Wissenschaft verzichtet bislang allerdings auf die Entwicklung dieser Methode und konzentriert sich auf den magnetischen Einschluss. Auf Grund der langjährigen militärischen Grundlagenforschung in diesem Sektor hat die Trägheitsfusion allerdings einen merklichen Vorsprung.

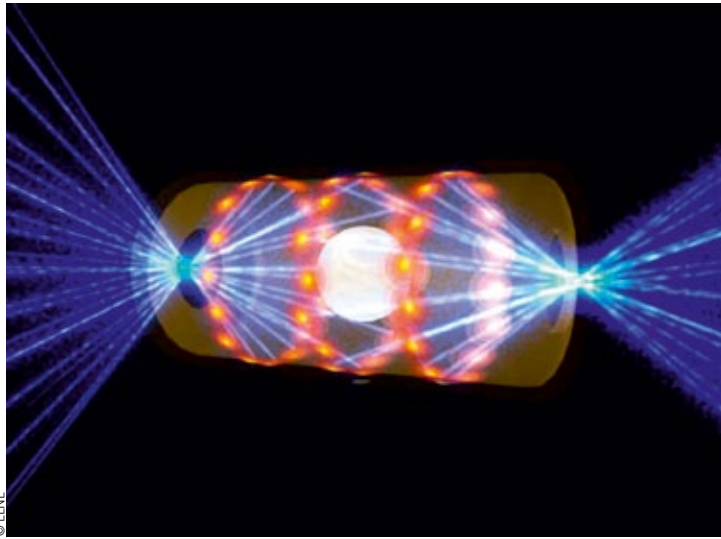
»Stern in der Schachtel«

Jetzt, da die Lasertechnik genug Leistung erbringt, soll der endgültige Durchbruch neben der militärischen auch die zivile Nut-

Reaktionskammer für die Kernfusion an der NIF

Ein Techniker bringt am Ausleger der etwa zehn Meter großen Targetkammer der National Ignition Facility einen kleinen Goldzylinder an, in den 192 Laserstrahlen geschossen werden. Das Pellet in seinem Innern wird dadurch extrem zusammengedrückt und Kernfusion setzt ein.





Lasergetriebene Trägheitsfusion

An der National Ignition Facility des Livermore Labors in Kalifornien werden 192 Laserstrahlen in einen kleinen hohlen Goldzylinder gerichtet. Darin befindet sich ein kugelförmiges Pellet mit dem Treibstoff für die Kernfusion, das von der Strahlung auf eine Dichte und Temperatur komprimiert wird, wie sie im Zentrum von Sternen herrschen. Dann setzt spontan Kernfusion ein.

zung möglich machen. Im Mai 2009 wurde am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien die National Ignition Facility (NIF) eingeweiht. 192 Hochleistungslaserstrahlen werden hier auf einer Fläche von drei Fußballfeldern erzeugt, mehrfach verstärkt und dann in der Experimentierkammer auf einen weniger als einen Zentimeter großen, hohlen Goldzylinder gerichtet. In dessen Zentrum befindet sich die eigentliche Fusionskapsel mit 1,8 Millimeter Durchmesser.

Durch die Einstrahlung des Laserlichts entsteht im Hohlraum Röntgenstrahlung, die die äußere Schicht der Kapsel explosionshaft verdampft, wodurch der Kern schlagartig verdichtet wird. Allein die Trägheit der Plasmateilchen ist dann ausreichend, um einige Milliardstelsekunden lang genügend Druck beizubehalten, damit die Kernfusion zündet. »Die Vorabversuche Nova und Omega haben die nötige Kompression mit viel kleineren Kapseln schon erreicht«, erklärt Siegfried Glenzer vom Livermore Labor. »Aber wir brauchen die jetzige Pelletgröße, wenn wir einen Energieüberschuss erzielen wollen. Einen ‚Mikrosterne‘ erzeugen – das ist die Aufgabe der NIF und wir werden es noch dieses Jahr versuchen.«

Die Ergebnisse der ersten Tests haben Glenzer und seine Kollegen jetzt veröffentlicht. Mit etwa

der Hälfte der nominalen Laserenergie von ungefähr 1,3 Megajoule konnten sie eine Dummy-Kapsel auf die gewünschte Weise komprimieren. »Ein Meilenstein«, attestiert Lackner, »damit ist der Beweis erbracht, dass das Prinzip funktioniert. Ein gewaltiger Schritt vorwärts.« Wenn es dann so weit ist, verwenden die Forscher ein Pellet mit Deuterium und Tritium und komprimieren es mit ihrer Laserphalanx doppelt so stark wie im Test. Das Plasma erreicht dann mehr als 100 Milliarden Atmosphären Druck und eine Temperatur von mehr als 100 Millionen Grad, genug für das Einsetzen der Fusionsreaktion.

Dies ist freilich nur von kurzer Dauer. Wollte man damit dauerhaft Strom erzeugen, müsste der gesamte Vorgang bis zu zehnmal pro Sekunde wiederholt werden. Glenzer führt aus: »Der Prozess wird im gepulsten Modus durchgeführt und um ihn zur Energiegewinnung weiterzuentwickeln, benötigt man kurze Zyklen für den Laserbeschuss und die Pelletfabrikation. Solche Pläne exi-

Iter

In einer ringförmigen Brennkammer von etlichen Metern Durchmesser sollen im Kernfusionsreaktion Iter Wasserstoff- zu Heliumkernen verschmelzen und dabei Energie frei setzen. Die Kammer hat den für Tokamaks typischen »D«-Querschnitt.

stieren bereits unter dem Projektnamen Life.« Diese schnelle Taktung von Explosionen birgt im Dauerbetrieb Tücken.

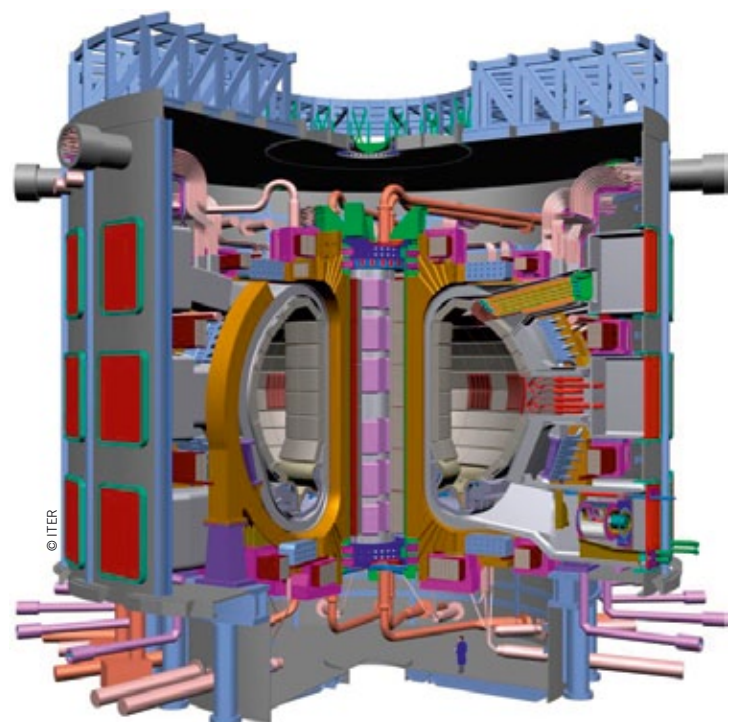
»Beim magnetischen Einschluss des Plasmas in einem Tokamak oder Stellarator läuft die Fusion dagegen stationär ab, vergleichbar einer chemischen Verbrennung bei einem Plasmadruck von nur zehn Atmosphären«, beschreibt Lackner. Kein Wunder also, dass die deutschen Forscher mit ihren Anlagentypen wie Asdex und Wendelstein am Ball bleiben wollen – liefern sie doch wesentliche Grundlagen, die bei Konstruktion

und Betrieb von Iter berücksichtigt werden. Für das drei Jahrzehnte dauernde Projekt ist mit Kosten jenseits der Zehn-Milliarden-Euro-Grenze zu rechnen, verteilt auf die Schultern der Europäischen Union, Japans, Russlands, der USA, der Volksrepublik China, Südkoreas und Indiens.

Auch wenn die Energieerzeugung im Iter – geschweige denn der Bau des ersten Fusionskraftwerks – vielleicht noch weiter entfernt liegt als eine Mondstation oder ein bemannter Flug zum Mars, könnte die Forschung auf diesem Gebiet durch die absehbare Zündung des ersten Mikrosterne im Labor deutlich mehr Rückhalt erlangen. Letzten Endes ist fraglich, ob sich die Menschheit angesichts des Klimawandels den Luxus erlauben kann, auf die mögliche Energiegewinnung durch Kernfusion von vornherein zu verzichten – trotz ungelöster technischer Probleme und enormer Entwicklungskosten. <<

Boxer, A.C. et al. Turbulent inward pinch of plasma confined by a levitated dipole magnet. In: *Nature Physics*, 10.1038/NPHYS1510, 2010.

Glenzer, S.H. et al. Symmetric Inertial Confinement Fusion Implosions at Ultra-High Laser Energies. In: *Science*, 10.1126/science.1185634, 2010.



UMWELTVERSCHMUTZUNG

Ölsand-Abbau belastet Kanada stärker als behauptet

Kanadische Wissenschaftler der University of Alberta haben rund um die Ölsand-Abbaugelände in der Provinz Alberta erhöhte Mengen giftiger Schadstoffe und Schwermetalle gemessen. Ihrer Meinung nach steht die Verschmutzung der Flüsse und Seen in engem Zusammenhang mit der umstrittenen Rohölgewinnung und lasse sich nicht durch natürlich austretendes Öl erklären. Sie widersprechen damit einer gemeinsamen Einschätzung der Ölindustrie und der kanadischen Regierung.

Die Gruppe um Charlene Nielsen nahm im Jahr 2008 zu verschiedenen Jahreszeiten Schnee- und Wasserproben aus dem Athabascafluss und seinem Einzugsgebiet. Anschließend analysierte sie sie auf ihren Gehalt an 13 wichtigen Schadstoffen. Im Allgemeinen waren diese in einem Umkreis von 50 Kilometern um Abbaugelände und Aufbereitungsanlagen sowie stromabwärts dieser Zonen erhöht verglichen mit naturbelassenen Regionen.

Sieben dieser Substanzen – Blei, Kadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Silber und Zink – überschritten die offiziellen Grenzwerte des kanadischen Rats der Umweltminister zum Schutz

von Wasserbewohnern um das Vielfache. Nielsen und Kollegen zufolge stellt die Belastung eine Bedrohung für die Fischlaichgebiete im Athabascafluss und die landlebenden Wildtiere dar. Über die Nahrungskette könnten sich solche Schadstoffe auch zu einer Gesundheitsgefahr für Menschen auswachsen, warnen die Forscher. Frühere Studien hatten bereits einen Zusammenhang zwischen der örtlichen Schadstoffbelastung und einem erhöhten Krebsrisiko bei den Ortsansässigen nahegelegt.

Eine Untersuchung des Regional Aquatic Monitoring Program (RAMP), einem Gremium aus Vertretern von Regierung und Industrie, hatte der Ölgewinnung aus den Sanden Unbedenklichkeit bescheinigt und den erhöhten Schadstoffeintrag natürlichen Quellen zugeschrieben. Nielsen und Kollegen äußern nun massive Zweifel an Methode und Schlussfolgerung der RAMP-Studie.

Auf Grund steigender Energiepreise wurde die teure und Ressourcen verschlingende Gewinnung von Rohöl aus Ölsanden in den vergangenen Jahren immer rentabler und gilt als lukrativer Wirtschaftsfaktor in Kanada. Um an den begehrten Rohstoff zu



Mine der Syncrude Canada Ltd. zum Abbau der Athabasca-Ölsande

Auf einem Gebiet von mehreren Quadratkilometern Größe baut Syncrude in der Mildred Lake Plant Ölsande ab und bereitet sie auf. Im Hintergrund ist der künstliche See zu sehen, in dem verunreinigtes Wasser aufbewahrt wird.

gelangen, wird der mit Bitumen angereicherte Sand großflächig abgebaggert und unter anderem mit großen Mengen Heißwasser gespült. Bei der anschließenden Aufbereitung, dem so genannten Upgrading zu Rohöl, gelangen außerdem vielfach Schadstoffe in Luft und Umgebung, wie die Autoren der Studie feststellten. Seit 1995 hat sich die tägliche Förder-

leistung im Athabascagebiet verdreifacht. 530 Quadratkilometer borealer Nadelwald sind der Ölsandindustrie bereits zum Opfer gefallen. (jd) <<

Kelly, E.N. Oil sands development contributes elements toxic at low concentrations to the Athabasca River and its tributaries. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 10.1073/pnas.1008754107, 2010.

SONNENENERGIE

Effizientere Solarmodule nutzen Abwärme

Ein US-amerikanisches Forscherteam glaubt, den derzeit technisch erreichbaren Wirkungsgrad von Solarzellen nahezu verdoppeln zu können. Dazu soll auch ein Anteil bislang nicht nutzbarer eingestrahelter Sonnenenergie in Elektrizität umgewan-

delt werden, der derzeit noch als Wärme verloren geht. Grundlage der neuen Zellen soll eine clevere Kombination zweier spezieller Nanokristall-Materialien sein, mit denen sich die so genannten »heißen Elektronen« sammeln und ernten lassen.

Solarzellen funktionieren, weil die Sonnenstrahlung an der Oberfläche des Materials Elektronen freischlägt, wodurch bewegliche Ladungsträger entstehen. In den speziell zusammengesetzten Halbleiterzellen fließen dann negative und positive Ladungen

(Elektronen und »Löcher«) aufgrund der Materialeigenschaften in einem elektrischen Feld in unterschiedliche Richtungen, wodurch eine elektrische Spannung aufgebaut und somit am Ende Strom produziert wird. Ein Großteil des Sonnenlichtes regt

aber nicht die Elektronen wie gewünscht an, sondern geht als Wärme verloren – weil die Elektronen sich schnell wieder mit Atomrümpfen vereinigen oder sofort einen Großteil der hohen Anregungsenergie durch Photonen wieder abstrahlen.

Solche Verluste wollen Xiaoyang Zhu von der University of Texas in Austin und seine Mitarbeiter vermeiden. Sie beobachteten zunächst, dass durch die Absorption von energiereichem Licht angeregte, »heiße« Elektronen rasch zu wandern beginnen. Sie bewegen sich dabei aus Blei-Selenid-Nanokristallen in angrenzende Titan-Dioxid-Elemente – ohne lange die Gelegenheit zur Rekombination zu haben oder als Wärmeverlust für die Stromproduktion auszufal-

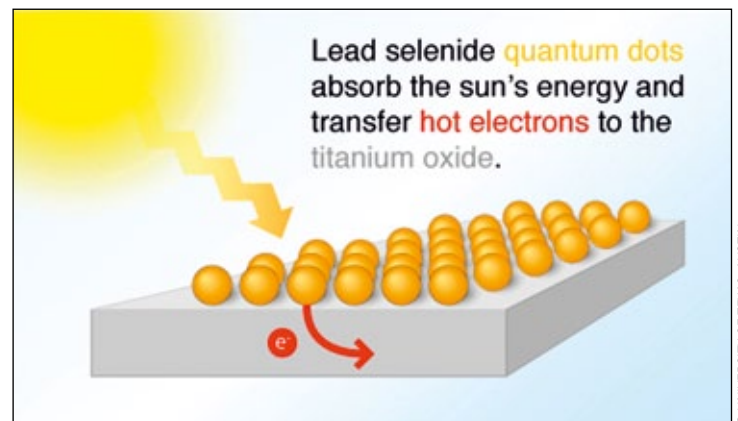
len. Mit den Ladungen, die in den TiO₂-Akzeptor überführt wurden, »kann dann weiter gearbeitet werden«, meint Zhu. Entscheidend für eine maximale Ausbeute sei die Kombination der unterschiedlichen Halbleiter-Nanokristalle: Ihre Valenzbänder – Energieniveaus, in denen die Elektronen sich aufhalten dürfen – sollten quasi-kontinuierliche Kontinuität der Energie ermöglichen; möglichst also überlappen, so dass die Ladungsträger einfach zwischen den Materialien wechseln können, ohne dabei viele Photonen, also Energie, freizusetzen. Dies erhöhe die Lebensdauer der heißen Elektronen lange genug, um sie ableiten und nutzen zu können.

Indem Halbleiter geschickt kombiniert und chemisch sinn-

voll modifiziert werden, könnte der theoretisch erreichbare maximale Wirkungsgrad typischer Solarzellen – er liegt bei rund 30 Prozent der eingestrahnten Energiemenge – vielleicht einmal sogar verdoppelt werden, hofft Zhu. (jo) <<

Effizientere Solarzelle

Aus einer von der Sonne angestrahlten Oberfläche von Blei-Selen-Nanokristall können angeregte »heiße« Elektronen in einen Elektronenkollektor aus Titanoxid überführt werden. Die so transferierten Elektronen geben ihre Energie nicht in Form von Wärme ab – eine Solarzelle nach diesem Prinzip arbeitet also effizienter.



ABWASSERREINIGUNG

Im Kurzschluss Energie sparen

Die herkömmliche Abwasserreinigung setzt auf Mikroorganismen, die organische Reste und Nährstoffe wie Ammonium oxidieren. Dafür wird sehr viel Sauerstoff gebraucht, der bei den verbreiteten Belebtschlammbecken unter hohem Energieaufwand eingeblasen werden muss. Ein alternativer Abbauweg, der einen Kurzschluss im Stickstoffkreislauf darstellt, böte dagegen sogar die Möglichkeit, Energie aus dem Prozess zu gewinnen.

Um Ammonium zu molekularem Stickstoff zu reduzieren, der dann als Gas aus dem Abwasser entweicht, wird der Nährstoff normalerweise in einer ersten Reaktion – der Nitrifikation – über Nitrit zu Nitrat oxidiert. In einem zweiten Schritt, der Denitrifikation, entsteht schließlich unter Luftabschluss N₂. Bei der Kurzschluss-Variante, die Forscher in den 1990er Jahren in den Niederlanden entdeckten, wandeln spezialisierte Bakterien

Ammonium und Nitrit direkt zu Stickstoff und Wasser um – bekannt als Anammox-Reaktion, einer Abkürzung für anoxische Ammonium-Oxidation. Die Bakterien besitzen dafür eine eigene Zellorganelle in ihrer Zellmembran und bestimmte Lipide, die ihnen wohl dabei helfen, ein giftiges Zwischenprodukt in Schach zu halten.

Was speziell klingt, ist jedoch keineswegs unbedeutend, immerhin ist diese Anammox-Reaktion verantwortlich für die Hälfte oder sogar mehr des Stoffumsatzes an Stickstoff in marinen Lebensräumen. Und für die Abwasserreinigung wäre sie vor allem deshalb interessant, weil sie die teure Sauerstoffeinspeisung deutlich reduzieren bis überflüssig machen würde, fassen Gijs Kuenen von der Universität Delft und seine Kollegen zusammen. Kuenen gehört zu den Entdeckern dieser bakteriellen Spezialisten, von denen eine Art auch nach ihm be-

nannt ist. Bisheriges Handikap des Verfahrens besteht allerdings darin, dass diese Mikroorganismen sehr langsam wachsen und daher nur für warmes Abwasser mit hoher Ammoniumbelastung geeignet sind, was aber untypisch ist für das klassische häusliche Abwasser. Kuenen und seine Mitarbeiter sehen die Lösung in granulärem Belebtschlamm. Demnach würde das Abwasser zunächst in ein normales Belebtschlammbecken fließen, in dem die gelöste organische Materie zu Biomasse umgebaut wird. Diese wird zusammen mit anderen absetzbaren Stoffen sedimentiert, um dann eine Biogasanlage zu speisen. Der Abfluss aus Belebtschlammbecken und aus der Biogasanlage – reich an Ammonium – würde dann zusammen in einem granulären Anammox-Belebtschlammreaktor behandelt. Auf diese Weise, so Kuenen und Co, ließen sich 24 Wattstunden pro Person und Tag gewinnen, während der

herkömmliche Prozess 44 Wattstunden pro Person und Tag verschlingt.

Eine andere Möglichkeit, das Problem der Sauerstoffzufuhr zu lösen, nutzen Pflanzenkläranlagen: Die Wurzeln der Vegetation versorgen hier das Filtersubstrat mit Luftsauerstoff und ermöglichen so die Oxidation der unerwünschten Substanzen im eingespeisten Abwasser. Quasi direkt daneben bestehen sauerstofffreie Bereiche, in denen die Denitrifikation ablaufen kann. Ist das Filterbett mit sehr feinem Material gefüllt, gelingt es zudem, auch den Nährstoff Phosphat in größeren Mengen abzufangen. Allerdings muss hier immer abgewogen werden: Feinere Filter verstopfen schneller, was die Reinigungsleistung insgesamt mindert. (af) <<

Kartal, B. et al.: Sewage treatment with Anammox. In: Science 328, S. 702-703, 2010.

FOTOSYNTHESE

Strom mit Licht und Kaktus erzeugt

Franszösische Wissenschaftler haben einen Kaktus angezapft und die bei der Fotosynthese gewonnene Energie in Strom umgewandelt. Normalerweise entstehen in einer Pflanze bei Lichteinfall Sauerstoff und der chemische Energielieferant Glukose. Enzyme in den Elektroden der Forscher erlauben es jedoch, die chemische in elektrische Energie zu transformieren. Die Technik könnte eines Tages sauberen Strom erzeugen, doch noch geht es den Forschern vor allem darum, den Ablauf der Fotosyn-

these besser zu verstehen.

Victoria Flexner und Nicolas Mano von der Universität de Bordeaux verwendeten ein Enzym, das darauf spezialisiert ist, Glukosemoleküle chemisch zu oxidieren, und ein weiteres, das Sauerstoff zu Wasser reduziert. Dabei werden Elektronen freigesetzt beziehungsweise eingefangen. Je eines der Enzyme betteten sie in Anode und Kathode ein, als Trägermaterial diente eine gelartige Substanz, die den Kontakt zu metallenen Stromleitern herstellte.

Die so vorbereiteten Elek-

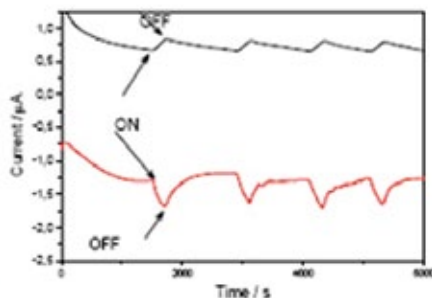
troden implantierten sie in die Oberfläche eines Kaktus. Schalteten sie dann das Licht einer Schreibtischlampe ein, stieg der Stromfluss, und er sackte wieder ab, wenn das Licht ausging. Vom Prinzip her ähnele ihr Versuchsaufbau einer »biologischen Brennstoffzelle«, bei der ebenfalls durch gleichzeitige Reduktions- und Oxidationsprozesse Strom erzeugt wird. Mit dem Anzapfen des Kaktus ließ sich allerdings keine nennenswerte oder praktikable Leistung erzeugen.

Wie Flexner und Mano schrei-

ben, sei ihr eigentliches Ziel ein anderes gewesen: Die Enzymelektroden sollen als empfindliche Sensoren für die Moleküllkonzentrationen innerhalb der Pflanze dienen. Auch wenn die Vorgänge während der Fotosynthese bereits gut verstanden seien, könne man die Reaktionsprodukte bislang nur indirekt messen. Setzt man die Elektroden hingegen als Sensoren ein, würden Veränderungen im Stromfluss nahezu verzögerungsfrei mitteilen, wie viel Glukose und Sauerstoff in den Pflanzen entstehe.

Dass die Forscher ausgerechnet einen Kaktus als Versuchsobjekt verwendeten, habe einen einfachen Grund: Der fleischige Körper des Gewächses ist robust genug, um die Elektroden zu tragen, und obendrein sehr wasserhaltig, was die Leitfähigkeit erhöhe. (jd) <<

Flexner, V., Mano, N.: From Dynamic Measurements of Photosynthesis in a Living Plant to Sunlight Transformation into Electricity. In: Analytical Chemistry 82(4), S. 1444–1449, 2010.



Angezapfter Kaktus

Elektroden, die mit Enzymen präpariert wurden, erlauben es, durch Fotosynthese Strom zu erzeugen. Dazu werden die bei der Reaktion in der Pflanze erzeugten Substanzen reduziert und oxidiert. Stellt man das Licht an, fließt ein wenig Strom.

KLIMASCHUTZ

Negative Bilanz

Agrartreibstoffe weiter stark in der Kritik

VON DANIEL LINGENHÖHL

Wenn herkömmliche Äcker der Biospritproduktion weichen müssen, dürfte dessen Umweltbilanz noch schlechter ausfallen, als ohnehin befürchtet.

Können Agrarkraftstoffe in ihrer heutigen Form etwas zum Klimaschutz beitragen? Wohl kaum, behauptet jetzt erneut eine Studie. Im Gegenteil: Bei ihrer Produktion könnte sogar mehr als doppelt so viel Kohlendioxid entstehen, wie die Energiepflanzen

während ihres Wachstums aufnehmen. Die Bilanz wäre also negativ und würde dem Klima damit mehr schaden als nützen, wie Jerry Melillo vom Marine Biological Laboratory in Woods Hole und seine Kollegen berichten [1].

Dazu kämen Lachgasemissionen aus stickstoffhaltigen Düngemitteln, die beim Anbau von Sojabohnen oder Mais eingesetzt werden und deren Treibhauspotenzial noch größer ist als das von Kohlendioxid. Bereits mehrfach hatten Studien darauf

hingewiesen, dass Energie vom Acker eine miserable Umweltbilanz aufweist – etwa, wenn Regenwälder gerodet werden, um Platz für Ölpalmen oder Sojafelder zu schaffen. Wird Agrardiesel beispielsweise aus brasilianischem Soja vom Amazonas gewonnen,



© CHRIS NEILL

Brandrodung in Indonesien

Bei der Umwandlung ursprünglicher Urwälder auf Torfböden – eine gängige Praxis in Indonesien – werden enorme Mengen an Kohlendioxid frei. Hier müssen jahrzehntelang Energiepflanzen wachsen, damit die Kohlendioxidbilanz wieder ausgeglichen wird. Bis dahin schadet der vermeintlich grüne Treibstoff dem Klima nur.

sind sogar fossile Brennstoffe wie Diesel und Benzin noch klimafreundlicher.

Diese aktuellen Ergebnisse schrieb Melillos Team nun für die Zukunft fort: Sie entwickelten ein Computermodell, in das ökonomische und biogeochemische Daten einfließen – zum Beispiel CO₂-Emissionen aus Böden und CO₂-Aufnahmekapazitäten von Ökosystemen oder die Preisentwicklung von Rohstoffen. Danach spielten sie verschiedene Szenarien durch, wie sich zukünftig die mit Agrarkraftstoffen verbundenen Emissionen verändern, wenn die Staatengemeinschaft weiterhin konsequent auf diese Energieträger setzt und sie finanziell fördert.

Fatale Konsequenzen hätte sowohl die direkte Umwandlung natürlicher Ökosysteme wie Wälder und Grasländer als auch die Nutzung bisheriger landwirtschaftlicher Flächen für die Energieerzeugung. Um ausreichend Nahrungsmittel zu erzeugen, sind

die Landwirte dann gezwungen, auszuweichen und neue Gebiete für Ackerbau und Viehzucht zu erschließen. In beiden Fällen überstieg aber das zur Energiegewinnung genutzte Land jenes für die Nahrungsmittelproduktion und es würden riesige Mengen Kohlendioxid frei werden, etwa aus der Brandrodung oder weil es wegen verstärkter mikrobieller Aktivität aus Böden ausgasst: »Die massiv entweichenden Treibhausgase sind die unbeabsichtigten Folgen der weltweiten Bioenergieprogramme. Sie verstärken die Erderwärmung eher noch, als dass sie zu deren Vermeidung beitragen«, kommentiert Jerry Melillo die Ergebnisse seiner Studie.

Während sich jedoch die CO₂-Bilanz der Energiepflanzen bis zum Ende des Jahrhunderts insgesamt etwas verbessert, weil sie die Kohlendioxidverluste aus der Brandrodung oder den Böden wieder zum Teil kompensieren, fallen die freigesetzten Stickoxide immer stärker ins Gewicht:

Bis 2100 könnten sie nach den Prognosen den Treibhauseffekt umfangreicher beeinflussen als Kohlendioxid. Die Hälfte des weltweit produzierten Stickstoffdüngers wird dann womöglich im Anbau von Energiepflanzen verbraucht.

In diesem Zusammenhang bemängeln Melillo und seine Kollegen auch eine Lücke im Kyoto-Protokoll, die sich ihrer Ansicht nach aber leicht schließen ließe [2]: Das Klimaschutzabkommen erfasst bislang keine CO₂-Emissionen aus dem Bioenergiesektor – weder direkte durch deren Nutzung noch indirekte, die bei der Produktion freigesetzt werden. Agrarkraftstoffe gelten demnach stets als kohlenstoffneutral, weil die Pflanzen so viel Kohlendioxid während ihres Wachstums aufnehmen, wie sie später bei der Verbrennung wieder freisetzen, so Melillo. Dies gilt sogar, wenn für Ihre Erzeugung Brandrodung betrieben wird. Dies sei aber falsch, so die Forscher. Wenn Ölpalm-

plantagen ursprüngliche Regenwälder verdrängen oder Maisäcker beweidetes Grünland, setze dies mehr Kohlendioxid frei, als die Nutzpflanzen wieder binden könnten – die Bilanz ist mitunter über Jahrzehnte hinweg negativ. Jedes Folgeabkommen müsse deshalb die entsprechenden Emissionen berücksichtigen und in die gesamte Kohlenstoffbilanz einberechnen. Nur so könne gewährleistet werden, dass im Extremfall nicht einzelne Staaten ihre natürlichen Ökosysteme zerstören, stattdessen Energiepflanzen anbauen und so ihren Kohlendioxidausstoß künstlich kleinrechnen, obwohl er faktisch deutlich größer geworden ist. <<

[1] Melillo, J. et al.: Indirect Emissions from Biofuels: How Important? In: Science 10.1126/science.1180251, 2009.

[2] Searchinger, T. et al.: Fixing a Critical Climate Accounting Error. In: Science 326, S. 527-528, 2009.

REGENERATIVE ENERGIEN

Windanlagen könnten globalen Energiehunger stillen

Windkraftanlagen könnten den heutigen und zukünftigen Energiebedarf der Menschheit um ein Vielfaches decken, berichten Michael McElroy von der Harvard University in Cambridge und Kollegen, nachdem sie meteorologische Daten zusammengetragen und mit Hilfe von Computermodellen ausgewertet haben. Nötig sei allerdings ein Netzwerk aus vielen landgebundenen Windkraftanlagen.

In ihrem Modell teilten die Wissenschaftler den Globus in Flächenbereiche von etwa 3300

Quadratkilometern auf und unterteilten darin insgesamt 72 Schichten der Luftmasse bis zu einer Höhe von rund 80 Kilometern, um ein Modell des globalen Windsystems zu simulieren. Zudem ermittelten sie mit Meßstationen in 100 Meter Höhe in außerstädtischen, nicht bewaldeten und nicht mit Eis bedeckten Gebieten alle sechs Stunden Windgeschwindigkeit, Luftdruck und Temperatur.

Mit den Messwerten, dem Modell und verschiedenen optimierten Parametern von Win-

danlagen – etwa dem Abstand der Anlagen und der Größe ihrer Rotorblätter – berechneten die Forscher um McElroy, dass ein Netzwerk aus 2,5-Megawatt-Windkraftanlagen an Land den derzeitigen Stromverbrauch mehr als 40-mal decken könnte. Dabei müssten die Anlagen allerdings bei mindestens 20 Prozent ihrer Kapazität arbeiten, so das Team. Ein ähnlich großes Energiepotenzial stecke auch in einem Verbund von 3,6-Megawatt-Offshore-Windanlagen, die weniger als 90 Kilometer von der Küste entfernt

in Wassertiefen von unter 200 Metern entstehen könnten.

Mögliche Hindernisse für Windparks sehen die Autoren allerdings in der Entfernung von geeigneten Standorten zu Bevölkerungszentren, was hohe Anforderungen an das auszubauende Stromnetz stellt. Zudem bestehen ökologische und ästhetische Einwände gegen Offshore-Anlagen. (mp) <<

Lu X. et al.: Global potential for wind generated electricity. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 10.1073/pnas.0904101106, 2009.

KLIMASCHUTZ

Wind könnte Chinas zukünftigen Strombedarf decken

Das Potenzial für Windkraft ist in China so groß, dass der gesamte Elektrizitätsbedarf des Landes bis 2030 durch diese Quelle gedeckt werden könnte. Gegenwärtig trägt die Windenergie nur 0,4 Prozent zur Gesamtversorgung der Nation mit Strom bei, dagegen dominiert die Energieproduktion aus Kohle, die China unter anderem zum mittlerweile weltweit größten Emittenten von Kohlendioxid gemacht hat.

Wie die Ingenieurwissenschaftler um Michael McElroy von der Harvard University und seine Kollegen aber vermerken, stellt China mittlerweile auch einen der am stärksten wachsenden Märkte für Windenergie-technologie dar. Und das Land selbst steht hinter den USA, Deutschland und Spanien an vierter Stelle hinsichtlich der installierten Ka-

pazitäten – dank eines Gesetzes, das seit 2005 alternative Energieerzeugung fördert.

Nun haben die Forscher mit Hilfe meteorologischer Daten eine Karte entwickelt, welche die Qualität einzelner Standorte für die Errichtung von Turbinen aufzeigen soll und sie in Bezug setzt zu den jeweiligen Kosten und Erträgen, die pro Ort durch Bau und Betrieb der Anlagen entstehen. Besonders günstige Voraussetzungen herrschen demnach auf dem tibetischen Hochplateau sowie im Nordosten des Landes, weniger gute dagegen im wirtschaftsstarken Südosten – der Strom müsste also über Fernleitungen von den Produktionszentren zu den Verbrauchern transportiert werden. Würden nur 20 Prozent der maximal möglichen Windenergiekapazitäten genutzt, so ließen sich jährlich 24,7 Peta-

wattstunden Elektrizität produzieren – mehr als sieben Mal so viel, wie China heute verbraucht.

Die nötigen Investitionen rechneten sich dabei schon ab einem garantierten Preis von 7,6 US-Cent pro Kilowattstunde über zehn Jahre hinweg, was gegenwärtig etwa 0,5 Renminbi oder 5 Euro-Cent entspräche, rechnen die Forscher vor. Allein damit ließe sich der für 2030 prognostizierte Strombedarf decken – er soll doppelt so hoch liegen wie heute. Selbst bei einem niedrigeren Strompreis von 0,4 Renminbi könnte ein knappes Viertel der Stromerzeugung aus Kohle durch Wind ersetzt werden. Als Flächenbedarf für die Windparks veranschlagen McElroy und Co für alle Windkraftanlagen zusammen etwa 500 000 Quadratkilometer, also knapp fünf Prozent des Staatsterritoriums – der tat-

sächliche Bedeckungsgrad wäre allerdings geringer, da zwischen den einzelnen Masten genügend Freiräume für beispielsweise die Landwirtschaft bliebe.

Müsste das Reich der Mitte dagegen seinen Energiebedarf mit zusätzlichen Kohlekraftwerken decken, müsste es in den nächsten 20 Jahren neue Anlagen mit einer Leistung von 800 Gigawatt bauen. Dadurch würden schätzungsweise weitere 3,5 Gigatonnen Kohlendioxid zusätzlich in die Atmosphäre ausgestoßen und das Klima belastet – das entspräche dem Vierfachen des momentanen jährlichen Gesamtausstoßes der Bundesrepublik. (dl) <<

McElroy, M. et al.: Potential for Wind-Generated Electricity in China. In: Science 325, S. 1378-1380, 2009.



Thomas Kästner, Andreas Kießling
Energie in 60 Minuten
 VS Verlag
 ISBN: 3531170589

Dieses Buch können Sie im Science-Shop für
 16,90 € (D), 17,40 € (A) kaufen.
www.science-shop.de/artikel/1026934

REZENSION

Energieversorgung für Jedermann

Die Versorgung mit Energie ist eine der Schlüsselfragen des 21. Jahrhunderts, und unzählige Menschen widmen sich ihr: Volkswirte, Sachverständige, Techniker, Professoren, Gutachter, Journalisten, Politiker und viele mehr. In der breiten Mehrheit der Bevölkerung macht sich dagegen immer mehr Verwirrung und Unsicherheit breit – Atomausstieg, Endlager, Klimawandel, Ölknappheit sind nur ein paar der Schlagwörter –, die Energieversorgung wird zum Mysterium. Und ein Energieprogramm, das von Wirtschaft, Politik und Gesellschaft gemeinsam getragen wird, rückt in weite Ferne. Thomas Kästner und Andreas Kießling treten mit »Energie in 60 Minuten – Ein Reiseführer durch die Stromwirtschaft« an, zumindest die Grundlagen unserer Energieversorgung zu erklären.

Als roten Faden haben sie den Dreiklang »Energie -Wirtschaft-Klima«, der sich durch das Buch zieht. Dieses überzeugt durch erstklassige Grafiken und Daten etwa zu den durchschnittlichen Stromausfallzeiten in Europa (zeigt die Güteklassen der Netzwerke in den Ländern) oder der mittleren Stromnachfrage über den Tag hinweg (Grund-, Mittel- und Spitzenlastzeiträume). Gezeigt werden Aufbauskißzen der Kohle-, Gas- und Kernenergiekraftwerke, Schätzungen zu verschiedenen verfügbaren Energiereserven oder Übersichten der Gesamtenergiekosten pro Haushalt.

Auf nur 100 Seiten gelingt es den Autoren gut, die Materie »Energie« zu erläutern. Technische, rechtliche, ökonomische und politische Zusammenhänge werden aufgezeigt und verständlich erklärt. Nach einem Einmaleins der Strombegriffe werden jeweils in wenigen Seiten die »Schlüsselfaktoren« der Stromwirtschaft dargestellt und zur Diskussion gestellt: zum Beispiel erneuerbare Energiequellen aus Wasser, Wind und Sonne, fossile Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle, Kernenergie, Netze und Energietransport, Markt und Preise sowie zur Zukunft der Technik.

Im letzten Kapitel wird schließlich kurz der Alltag in einem Haushalt im Jahr 2030 ge-

schildert: »Smart-Metering« ist eine Selbstverständlichkeit geworden. Modernste Informationstechnologie ist mit der Stromlieferung kombiniert und ermöglicht die Identifikation der Stromfresser im Haushalt wie auch ein neues Verhaltensmuster beim Stromverbrauch. Die Klimabilanz eines Haushaltes umfasst dann nicht nur den direkten Stromverbrauch zuhause, sondern auch die Energieaufwendungen bei der Herstellung und dem Transport genutzter Konsumgüter. Elektroautos sind aus dem Alltag ebenfalls nicht mehr wegzudenken.

Das Buch hat mich ermutigt, wieder viel kritischer allen Energiefressern im Haushalt gegenüberzutreten. Bestechend ist der Service-Annex, indem die wichtigsten Akteure und Links zu Veröffentlichungen und Energieportalen gesammelt sind: Er umfasst insgesamt 16 Seiten. Der Buchtitel verspricht »Energie in 60 Minuten«, doch findet sich wesentlich mehr zwischen den Buchdeckeln. Ein Buch, das verantwortungsvolle Menschen im Regal besitzen sollten. <<

Richard Mischak

Der Rezensent ist habilitierter Mathematiker
 an der Fachhochschule Salzburg

5 x 5-Bewertung	
Inhalt	■ ■ ■ ■ ■ □
Vermittlung	■ ■ ■ ■ ■ ■
Verständlichkeit	■ ■ ■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■ □
Preis-Leistung	■ ■ ■ ■ ■ ■
Expertenwertung	23

Was ist eigentlich spektrumdirekt?

spektrumdirekt ist die Online-Zeitung aus dem Verlag Spektrum der Wissenschaft.

Täglich berichtet die Redaktion von spektrumdirekt verständlich und unterhaltsam über neueste Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung.

In den Händen halten Sie ein Spezial zum Thema »Energie«. Wenn es Ihnen gefällt, besuchen Sie uns doch auf

www.spektrumdirekt.de

Weitere Informationen finden Sie unter

www.spektrumdirekt.de/info



[spektrumdirekt.de](http://www.spektrumdirekt.de)