

# SPEKTRUM

 UNIVERSITÄT  
BAYREUTH

10. JAHRGANG • AUSGABE 2 • NOVEMBER 2014

FORSCHUNG & TECHNIK

**Stromnetze in Zeiten  
der Energiewende**

SEITEN 30-33

RECHT & WIRTSCHAFT

**Markt  
oder Staat?**

SEITEN 38-41

KULTUR & REGIONEN

**Energietechnologien und  
Energiewandel in Afrika**

SEITEN 46-49

THEMA

**ENERGIE**

# Liebe Leserinnen und Leser,



Prof. Dr. Stefan Leible,  
Präsident der Universität  
Bayreuth.

Ich freue mich, Sie zu einer neuen Ausgabe unseres Universitätsmagazins SPEKTRUM begrüßen zu dürfen, das sich diesmal ganz dem Thema „Energie“ widmet.

An der Universität Bayreuth ist die Forschung auf diesem Gebiet unter anderem im aufstrebenden Profildfeld „Energieforschung und Energietechnologie“ verankert. Unsere Profildfelder sind strategisch ausgewählte fächerübergreifende Schwerpunkte, die neben unseren hervorragend ausgewiesenen Fachdisziplinen ausschlaggebend für den ausgezeichneten Ruf unserer Universität in Forschung und Lehre sind. Aufgeteilt in die bereits etablierten Advanced Fields und die jüngeren Emerging Fields bündeln wir dort unsere interdisziplinären Kompetenzen und erzeugen Synergien.

Besonders stolz ist die Universität Bayreuth jedoch darauf, dass das für die Zukunft so wichtige Themengebiet „Energie“ nicht – wie vielleicht andersorts – nur aus natur- und ingenieurwissenschaftlicher Sicht betrachtet wird. Vielmehr sind rechts-, wirtschafts- und kulturwissenschaftliche Forschungsfragen in die Beschäftigung mit diesem Zukunftsthema eingebettet. Deswegen entstammen die Beiträge in dieser SPEKTRUM-Ausgabe nicht nur den Bereichen Forschung und Technik, sondern beleuchten das Thema auch aus der Perspektive der Rechts- und Wirtschaftswissenschaften und gehen auf kulturelle und regionale Aspekte ein.

Die Vielzahl der an unserer Universität bearbeiteten Projekte zum Thema „Energie“, von der internationalen Ebene bis zur Regionalforschung, ist wirklich eindrucksvoll. Davon können Sie sich beim Lesen des vorliegenden SPEKTRUM-Hefts selbst überzeugen – dabei stellen die abgedruckten Beiträge nur eine Auswahl dar.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre und viele neue Erkenntnisse!

Ihr

Prof. Dr. Stefan Leible  
Präsident der Universität Bayreuth

**K**ein Tag vergeht, ohne dass in der Zeitung, im Fernsehen und in anderen Medien über das Thema „Energie“ berichtet und diskutiert wird. Meist sind damit Ärger und Sorgen verbunden: persönlich, wenn Strom, Gas, Öl und Kraftstoffe teuer werden; auf kommunaler und regionaler Ebene, etwa wenn man fürchtet, dass Windkraftanlagen oder Stromtrassen die Landschaft nachteilig verändern; national, wenn man sich um eine sichere und preislich akzeptable Energieversorgung des Industriestandorts Deutschland sorgt; nicht zuletzt aber auch global, wenn man an begrenzte fossile Ressourcen und drohende Klimaveränderungen bei einem zugleich weltweit anzustrebenden menschengerechten Grundwohlstand denkt.

Der in Deutschland geprägte, inzwischen international bekannte Begriff der „Energiewende“ fordert nicht nur eine vollständige Abkehr von der Kernenergie, sondern auch eine schrittweise Senkung des Verbrauchs fossiler Energieträger. Dies alles soll durch erneuerbare Energien und eine effizientere Nutzung gelingen. Zunächst weniger bedacht hatte man die damit verbundene Notwendigkeit, die sehr großen naturbedingten Schwankungen

im Angebot von Wind- und Sonnenenergie zum Beispiel durch Speicher und Lastmanagement auszugleichen. Bis heute unterschätzt wird auch die gesellschaftspolitische Bedeutung der Energiewende: Wie weit will und kann man Großkraftwerke durch eine dezentrale Struktur, Energiekonzerne durch kommunale, oft genossenschaftliche Initiativen ersetzen?

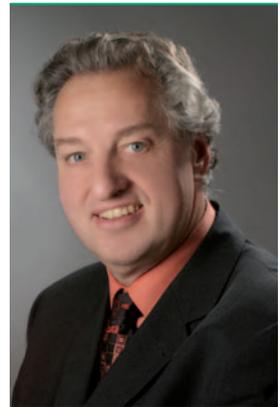
Bereits diese Beispiele zeigen, dass Energiefragen nicht nur wichtig, sondern auch kompliziert, vielfältig und interdisziplinär sind. – Wer wäre also besser geeignet als unsere Universität Bayreuth mit ihrem Profildfeld „Energieforschung und Energietechnologie“, durch Forschung, Entwicklung und Lehre zur Lösung zumindest einiger der Herausforderungen beizutragen?

Dass die ausgewählten Beiträge in diesem Heft Sie informieren und anregen, wünscht

Ihr



Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann  
Sprecher des Profildfelds  
„Energieforschung und Energietechnologie“



Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann leitet den Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) und ist Direktor des Zentrums für Energietechnik (ZET) an der Universität Bayreuth.

## IMPRESSUM

### Spektrum-Magazin der Universität Bayreuth

**AUFLAGE:**  
3.000 Stück

**HERAUSGEBER:**  
Universität Bayreuth  
Stabsabteilung PMK – Presse,  
Marketing und Kommunikation  
95440 Bayreuth  
Telefon (09 21) 55 - 53 56 / - 53 24  
Telefax (09 21) 55 - 53 25  
pressestelle@uni-bayreuth.de

**REDAKTIONSLEITUNG:**  
Christian Wißler (V.i.S.d.P.)

**DRUCK:**  
bonitasprint gmbh, Würzburg

**SATZ UND LAYOUT:**  
GAUBE media agentur, Bayreuth  
Telefon (09 21) 5 07 14 41  
spektrum@gaube-media.de

**BILDQUELLEN-KENNZEICHNUNG:**  
sst: www.shutterstock.com



Christian Wißler M.A.,  
Fachwirt Public Relations  
(BAW), Stabsabteilung PMK der  
Universität Bayreuth, Wissen-  
schaftskommunikation.

Alle Beiträge sind bei Quellenangaben und Belegexemplaren frei zur Veröffentlichung.

Fotos Titelseite, Editorialeiten:  
sst. Inhaltsverzeichnis: u.a. Chris-  
topher Halloran / Shutterstock.com  
und fineart-collection / fotolia.com.

# ENERGIE

- 2 **Grußwort**  
Prof. Dr. Stefan Leible  
Präsident der Universität Bayreuth
- 3 **Editorial**  
Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann  
Sprecher des Profilfelds „Energie-  
forschung und Energietechnologie“
- 3 **Impressum**
- 4 **Inhaltsverzeichnis**

## FORSCHUNG & TECHNIK I

- 10 **Die Natur als Vorbild:  
Licht sammeln und verwerten**  
Grundlagenforschung für neue  
Wege der Energieerzeugung



Mit hocheffizienten, auf Folien gedruckten Photovoltaikzellen hat die Solarenergie Zukunft.

## ENERGIE GLOBAL

- 6 **Energieversorgung  
im 21. Jahrhundert**  
Technische, soziale und  
ökonomische Aspekte



Fracking: eine verantwortbare Technologie?

- 14 **Organische Solarzellen und  
Hybridsolarzellen**  
Polymerforschung für die  
Umwandlung von Solarenergie
- 18 **Fracking – vorwärts  
mit Mut zum Risiko?**  
Eine Abwägung aus umwelt-  
wissenschaftlicher Sicht
- 22 **Flüssige Kraftstoffe aus CO<sub>2</sub>  
und regenerativem Strom**  
Ein zukunftsweisender  
Forschungsansatz zur Sicherung  
der Energieversorgung

- 26 **Kontrollierte Kernfusion**  
Eine vielversprechende  
Energiequelle und ein spannendes  
Forschungsgebiet
- 30 **Stromnetze in Zeiten  
der Energiewende**  
Neue Herausforderungen  
bei der Energieübertragung  
über große Entfernungen

## RECHT & WIRTSCHAFT

- 34 **Wettbewerb im Energiesektor  
durch Regulierung der  
Energienetze**  
Europäische Erfolgsgeschichte  
und bleibende Herausforderung
- 38 **Markt oder Staat?**  
Die Energiebranche zwischen  
Wettbewerb und Regulierung





## ETHIK

- 42 **Gerechtigkeit in der Energieversorgung**  
Eine ethische Herausforderung

## KULTUR & REGIONEN

- 46 **Energietechnologien und Energiewandel in Afrika**  
Kulturelle und anthropologische Aspekte von Innovationen
- 48 **Elektrifizierung des Sudans**  
Ein umstrittenes Mega-Energieprojekt
- 50 **Bioenergie-Potenziale in Ostafrika**  
Entwicklungsgeographische Perspektiven künftiger Energieversorgung

- 54 **Erneuerbare Energien im ländlichen Raum**  
Potenziale für die regionale Wertschöpfung



70  
Wohin entwickelt sich die Biogas-Technologie?  
Von Anlagen wird künftig ein hohes Maß an Flexibilität gefordert.

## SCHULE

- 58 **Erneuerbare Energien im Schulunterricht**  
Moderne Unterrichtskonzepte zu Müllverbrennungsenergie und Erneuerbaren Energien



58  
Mit dem „Energiespiel Bayern“ können sich auch Schülerinnen und Schüler mit Fragen der Energieversorgung vertraut machen.

## FORSCHUNG & TECHNIK II

- 62 **Das Zentrum für Energietechnik (ZET)**  
Von der Grundlagenforschung bis zu neuen Produkten und Verfahren
- 66 **Neue Wege der dezentralen Stromerzeugung**  
Von der Geothermie zur industriellen Abwärme
- 70 **Energiegewinnung aus Biogas**  
Ein Beitrag zur Energiewende
- 74 **Energieeffiziente Fabriken**  
„Green Factory Bayreuth“ – ein Beispiel für die Kooperation von Forschung und Wirtschaft
- 78 **Neue Werkstoffe steigern die Energieeffizienz**  
Innovative Entwicklungen aus der Materialwissenschaft
- 86 **TechnologieAllianzOberfranken (TAO)**  
Forschungsk Kooperationen in den Schwerpunktfeldern Energie und Mobilität



78  
Polymerschäum aus Pflanzen – ein vielversprechendes Material auch für die Einsparung von Energie.



■ DIETER BRÜGGEMANN  
ANDREAS JESS

# Energieversorgung im 21. Jahrhundert

TECHNISCHE, SOZIALE UND ÖKONOMISCHE ASPEKTE

■ Der rasant steigende Energiebedarf in den Megastädten zählt zu den weltweiten Herausforderungen im 21. Jahrhundert (Foto: Naufal MQ / Shutterstock.com).

## DER ENERGIEVERBRAUCH IM WELTWEITEN VERGLEICH

**P**rimärenergie (PE) ist die Energie, die ursprünglich als Brennstoff (Kohle, Erdöl, Erdgas, Biomasse) oder als Wasserkraft, Kernenergie, Wind- und Solarenergie zur Verfügung steht. Sie wird durch Umwandlungsprozesse, die mit Verlusten behaftet sind, in Sekundärenergieträger wie Strom oder in Kraftstoffe wie Benzin und Dieselöl umgewandelt. Durch eine wiederum mit Verlusten verbundene Übertragung zum Verbraucher wird sie schließlich zur nutzbaren Endenergie.

Abbildung 1 zeigt die Anteile einzelner Primärenergieträger am deutschen sowie am weltweiten Primärenergieverbrauch. Es wird deutlich, dass bereits heute schon regenerative Energien in Deutschland (mit einem Anteil von 16 Prozent) eine im weltweiten Vergleich (mit durchschnittlich etwa 8 Prozent) deutlich größere Rolle spielen. Allerdings sind fossile Energieträger (Erdöl, Erdgas, Kohle) derzeit immer noch die dominierenden PE-Träger (D: 76 Prozent, Welt: 81 Prozent). Der Rest wird durch Kernenergie und vor allem in Entwicklungsländern noch durch die sogenannte traditionelle Biomasse gedeckt, die zumeist mit der Abholzung bestehender Wälder verbunden ist und daher nicht als regenerativ und klimaneutral betrachtet werden kann.

Um den Energieverbrauch eines Landes oder einer Region zu charakterisieren und Energieträger vergleichen zu können, werden häufig Rohöläquivalente verwendet. 1 Tonne Erdöl (1 toe) entspricht einer Energie von 42 Mio. kJ (Kilojoule) oder 42 GJ (Gigajoule). Der derzeitige deutsche PE-Verbrauch beträgt 310 Mio. toe pro Jahr; weltweit sind es 13 Mrd. toe.

Der Primärenergieverbrauch ist regional sehr ungleich verteilt (Tabelle 1): So beträgt der Anteil am globalen Energieverbrauch der wohlhabenden

Industriestaaten (OECD) 42 Prozent, obwohl der Anteil an der Weltbevölkerung nur 18 Prozent ausmacht. Entsprechend umgekehrt ist die Situation in Asien, Lateinamerika und besonders in Afrika. Die Zahlen des jährlichen Pro-Kopf-Energieverbrauchs einiger Länder unterstreichen dieses Ungleichgewicht: In den USA liegt dieser bei 7,1 toe, in Deutschland bei 3,7 toe, wohingegen er in China und Brasilien (noch) bei 1,8 bzw. 1,4 toe, in Indien und Äthiopien bei nur 0,6 bzw. 0,4 toe liegt.

## ENERGIE UND WOHLSTAND: WIEVIEL STEHT JEDEM MENSCHEN ZU?

Wie hoch ist der Energieverbrauch, den jeder Mensch für einen ausreichenden Wohlstand benötigt? Um diese Frage zu beantworten, ist der Human Development Index (HDI) der Vereinten Nationen hilfreich. Es handelt sich dabei um einen Wohlstandsindikator, der mit jeweils gleicher Gewichtung das Pro-Kopf-Einkommen (kaufkraftkorrigiert), die medizinische Versorgung (Lebenserwartung) und den Bildungsgrad eines Landes berücksichtigt. Bei Entwicklungsländern ist der HDI kleiner als 0,5; bei Schwellenländern liegt er zwischen 0,5 und 0,8; bei Industrieländern ist der HDI größer als 0,8.

In Ländern, die einen HDI-Wert größer als 0,8 erreicht haben, liegt der jährliche PE-Verbrauch bei mindestens etwa 2 toe pro Kopf (siehe Abb. 2). Ein höherer Verbrauch führt allerdings nicht zu einer merklichen Steigerung des HDI, also des Wohlstands und Wohlergehens. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass hier eine Grenze erreicht wird, von der an eine weitere Steigerung des Energieverbrauchs nicht zu rechtfertigen ist. Regionen und Länder, die einen Wert von 2 toe deutlich überschreiten – wie etwa Nordamerika, Australien, Japan und Europa, darunter auch Deutschland – sollten sich daher in der Pflicht sehen, Maßnahmen für eine noch effizientere Energienutzung zu ergreifen.

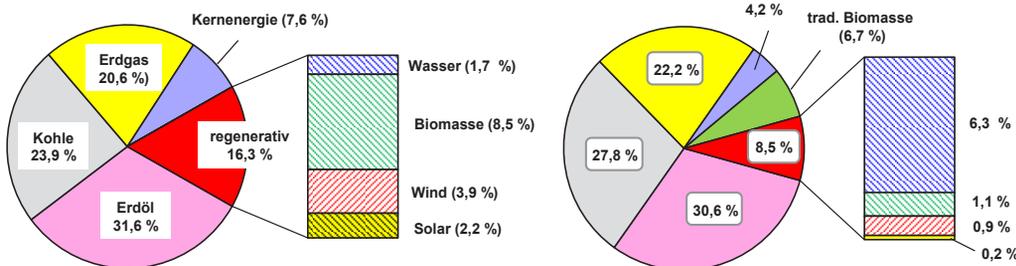


Abb. 1: Anteile einzelner Energieträger am Primärenergieverbrauch (PEV) in Deutschland und weltweit 2013. Bei der hier verwendeten Substitutionsmethode wird angenommen, dass der Strom aus den Energieträgern, denen kein Heizwert beigemessen werden kann (Kernkraft, Wasserkraft, Wind und Photovoltaik) die entsprechende Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken mit einem Wirkungsgrad von rund 40 Prozent substituiert, d.h. 1 kWh Strom = 2,5 kWh PE. Berechnungen (A. Jess) auf der Basis der Angaben von BP (Statistical Review of World Energy) und der International Energy Agency (IEA).

## AUTOREN

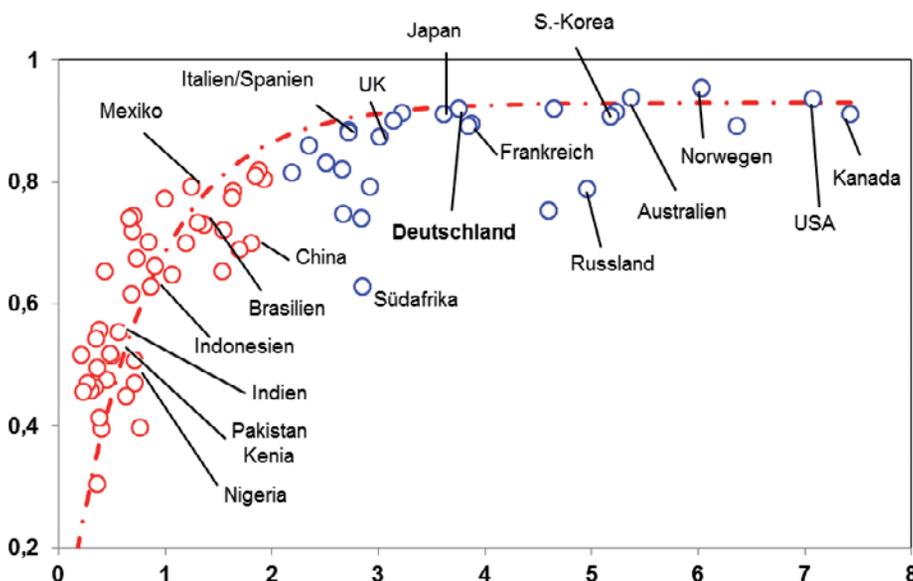


Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann leitet den Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) und ist Direktor des Zentrums für Energietechnik (ZET) an der Universität Bayreuth.



Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess ist Inhaber des Lehrstuhls für Chemische Verfahrenstechnik an der Universität Bayreuth.

Region	Anteil an der Weltbevölkerung		Anteil am globalen Primärenergieverbrauch	
OECD	18%		42%	
ehemalige UDSSR & nicht-OECD-Europa	5%	26%	9%	56%
Mittlerer Osten	3%		5%	4 toe pro Kopf und Jahr
Asien	52%		34%	
Lateinamerika	7%	74%	5%	44%
Afrika	15%		5%	1,1 toe pro Kopf und Jahr
Welt	100%	100%	100%	100%
				1,9 toe pro Kopf und Jahr



↑ Wohlergehen: Human Development Index (2012)  
 → jährlicher Pro-Kopf-Primärenergieverbrauch in ausgewählten Ländern in toe (2010/11)

Tabelle 1: Regionale Verteilung des globalen Primärenergieverbrauchs (2011).  
 Daten: International Energy Agency (IEA), Key World Energy Statistics 2013.

Abb. 2: Wohlergehen im Verhältnis zum jährlichen Pro-Kopf-Primärenergieverbrauch. Um den Maximalwert 1 zu erreichen, wäre eine Lebenserwartung von 84 Jahren, eine durchschnittliche Bildungs-/Schulbildungsdauer von 13 Jahren und ein jährliches Pro-Kopf-Bruttonationaleinkommen von 87.000 Dollar erforderlich; alle drei Faktoren werden gleich gewichtet. HDI-Daten aus: United Nations Development Programme (UNDP), Human Development Report 2013.

Eine deutliche Senkung des Energieverbrauchs in den Industrieländern ist auch deshalb angezeigt, weil zu erwarten ist, dass der Wohlstand in einigen Entwicklungs- und Schwellenländern – zum Beispiel in China, Indien oder Brasilien – in den kommenden Jahrzehnten steigen wird. Abbildung 2 zeigt zwei bemerkenswerte Ausnahmen vom (gestrichelt angedeuteten) Trend: Sowohl Russland (und auch andere Länder der ehemaligen UdSSR) als auch Südafrika haben einen im Vergleich zum Wohlergehen (HDI < 0,8) besonders hohen jährlichen Pro-Kopf-Energieverbrauch von rund 3 bzw. 5 toe, also eine geringe Energieeffizienz.

Ungeachtet einer gewissen Streubreite lässt sich aus Abbildung 2 eines klar entnehmen: Es scheint ein Verbrauch von ungefähr 2 toe/Jahr für einen ausreichenden Lebensstandard erforderlich zu sein. Interessanterweise entspricht dieser Wert ungefähr dem Wert, den im weltweiten Durchschnitt jeder Mensch

(1,9 toe) verbraucht. Falls die Weltbevölkerung, wie prognostiziert, also bis zum Jahr 2050 auf 9 Mrd. Menschen ansteigt, ist davon auszugehen, dass der globale Energieverbrauch von derzeit 13 Mrd. auf mindestens 17 Mrd. toe pro Jahr ansteigt.

**GRENZEN DES VERBRAUCHS FOSSILER ENERGIETRÄGER: RESERVEN UND RESSOURCEN**

Reserven eines Energieträgers sind die derzeit gesicherten und wirtschaftlich abbaubaren Vorräte; Ressourcen sind die zusätzlich nachgewiesenen und vermuteten Vorräte. Abbildung 3 zeigt die entsprechenden Werte für die fossilen Rohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle in Gigatonnen (Gt) Kohlenstoff (C). Berücksichtigt man die derzeitigen jährlichen Verbrauchszahlen (3,4 Gt Kohlenstoff in Form von Erdöl, 2 Gt als Erdgas und 4 Gt als Kohle) ergeben sich auf der Basis der Reserven sogenannte statische Reichweiten von 53 Jahren für Erdöl, 59 Jahren für Erdgas und 140 Jahren für Kohle. Legt man die Ressourcen zugrunde, kommt man auf deutlich höhere Werte von 170 Jahren für Erdöl, 1.000 Jahren für Erdgas und 3.000 Jahren für Kohle. Die letztgenannten Werte sind sicherlich viel zu optimistisch, da man nur einen geringen Anteil der Ressourcen wirtschaftlich und technisch nutzen können wird. Aber die häufig zu lesende baldige Verknappung der fossilen Energieträger ist unbegründet.

Es gibt aber mindestens zwei andere gute Gründe, die für eine deutlich verminderten Verbrauch fossiler Energien sprechen:

- Die Reserven von Erdöl und Erdgas konzentrieren sich auf wenige Regionen (vor allem Mittlerer Osten, Russland), die aus europäischer Sicht politisch problematisch sind oder werden können.
- Vermutlich weitaus bedeutsamer sind die von der Mehrzahl der Klimaexperten prognostizierten Folgen eines gleichbleibend hohen Anteils fossiler Energieträger am globalen PE-Verbrauch: Die in Form von Kohlendioxid gebundene Masse an Kohlenstoff in der Erdatmosphäre liegt derzeit bei 850 Gt (Abb. 3). Ohne eine drastische Senkung dieses fossilen Anteils wird diese im Jahr 2050 bei über 1.000 Gt liegen. Die Folge wäre – so die Prognosen des International Panel of Climate Change (IPCC) – eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um 2°C gegenüber dem Beginn der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert. Um

die Klimaerwärmung zumindest langfristig zu begrenzen, wird daher eine möglichst weitgehende Umstellung von fossilen hin zu alternativen Energieträgern angestrebt.

### ENERGIEPOLITISCHE ENTSCHEIDUNGEN IM INTERNATIONALEN VERGLEICH

Die meisten Staaten stimmen den genannten Zielen zwar grundsätzlich zu, unternehmen aber sehr unterschiedliche Anstrengungen, um diese zu erreichen. Dies sollte nicht überraschen, denn bereits die Ausgangslage, also der bisherige Anteil der erneuerbaren im Vergleich zu fossilen und nuklearen Energien ist sehr unterschiedlich. Dies hängt zum Teil mit natürlichen Gegebenheiten (z.B. Wasserkraft) zusammen und ist zum Teil auf die unterschiedliche gesellschaftliche Akzeptanz energiepolitischer Entscheidungen (z.B. Kernenergie) zurückzuführen.

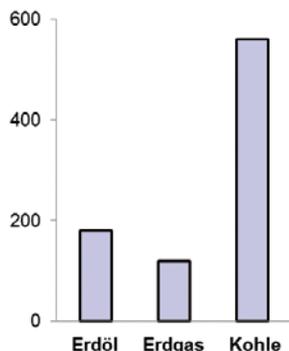
Solche Unterschiede werden in Abbildung 4 sichtbar, in der die Wege ausgewählter Staaten im Energiemix dargestellt sind. So erkennt man, dass die deutsche „Energiewende“ tatsächlich zu einer drastischen Änderung geführt hat und nach Beschlusslage weiter führen wird (gestrichelter Verlauf), während z.B. die USA sich deutlich weniger verändert haben.

### WERDEN WIR ENERGIEEFFIZIENTER?

Ein Schlüssel zur weiteren positiven Entwicklung der Energiesituation liegt zweifellos in der Erhöhung der Energieeffizienz in allen Bereichen. Tabelle 2 zeigt sehr deutlich, dass wir im Wesentlichen durch technische Entwicklungen bereits erhebliche Fortschritte erzielt haben. Es ist noch unklar, ob auch in privaten Haushalten und im straßengebundenen Individualverkehr Änderungen des Nutzerverhaltens eine größere Rolle spielen werden.

Häufig allerdings werden Effizienzsteigerungen, die durch technischen Fortschritt erreicht wurden, überdeckt; und zwar dadurch, dass zugleich höhere Anforderungen an die Leistung gestellt werden. Ein Beispiel hierfür bietet der Pkw: Der Antrieb unserer Autos ist heute sehr viel effizienter als vor drei, vier oder fünf Jahrzehnten. Allerdings ist das heutige Durchschnittsfahrzeug auch deutlich leistungsstärker, schwerer und mit zahlreichen Komponenten für Sicherheit und Komfort ausgestattet, was die mögliche Kraftstoffeinsparung kompensiert.

Reserven (gesicherte, derzeit wirtschaftlich abbaubare Vorräte) in Gt C



Ressourcen (zusätzlich nachgewiesene und vermutete Vorräte) in Gt C

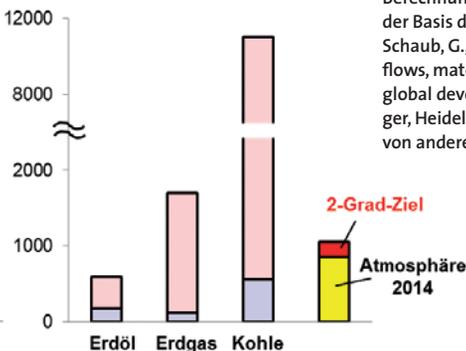


Abb. 3: Reserven und Ressourcen fossiler Energieträger. Eigene Berechnungen (A. Jess) auf der Basis der Angaben von Schaub, G., Turek, T.: Energy flows, material cycles and global development. Springer, Heidelberg, 2011, und von anderen Quellen.

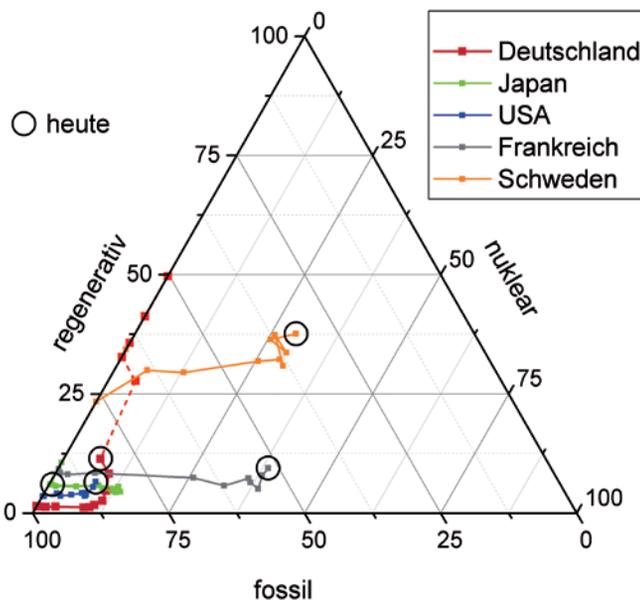


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der Anteile fossiler, nuklearer und regenerativer Energien am Primärenergieverbrauch ausgewählter Staaten von 1965 bis heute (Kreis) in 5-Jahresschritten (Punkte). Die Eckpunkte im Dreiecksdiagramm stehen jeweils für 100 Prozent fossile, nukleare und regenerative Energien. Für Deutschland ist zudem ein Trendszenario bis 2050 dargestellt. Daten: BP 2014; Prognos/EWI/GWS 2014; Umrechnung gemäß Substitutionsmethode (vgl. dazu Abb. 1).

### KANN MAN EIN FAZIT ZIEHEN?

Die Energieversorgung bei weltweit wachsendem Bedarf ist eine wichtige Frage und wird dies auch noch lange Zeit bleiben. Sie ist nicht allein technisch zu lösen, sondern erfordert die Einbeziehung vieler weiterer Aspekte. Diese sind unter Anderem wirtschaftlicher Natur (Energie muss bezahlbar sein), politisch bedingt (z.B. Abhängigkeiten von anderen Staaten), aber auch ethisch motiviert (z.B. wachsender Energiebedarf für einen globalen Wohlstand).

Tabelle 2: Der Energieverbrauch in Relation zu den in Klammern angegebenen Bezugsgrößen ist in Deutschland zwischen 1990 und 2012 deutlich gesunken (Daten: BMWi 2014).

Stromerzeugung (kWh Strom)	- 10,7%
Stromverbrauch (€ Bruttoinlandsprodukt)	- 10,9%
Industrie (€ Bruttoproduktionswert)	- 19,3%
Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (€ Bruttowertschöpfung)	- 33,3%
Private Haushalte (m² Wohnfläche)	- 24,0%
Verkehr (Tonnen- und Personen-km)	- 32,0%

# Die Natur als Vorbild: Licht sammeln und verwerten

GRUNDLAGENFORSCHUNG  
FÜR NEUE WEGE DER  
ENERGIEERZEUGUNG

■ Wie lässt sich die Energie des Sonnenlichts möglichst effizient in elektrische oder chemische Energie umwandeln und verwerten? Pflanzen und Bakterien liefern dafür wertvolle Anhaltspunkte (sst).

Die Energiemenge, die während einer Stunde von der Sonne auf die Erde einstrahlt, entspricht in etwa der Energiemenge, die von der gesamten Menschheit im Verlauf eines Jahres verbraucht wird. Wenn man sich dies vor Augen führt, dann wundert es nicht, dass beim Umbau der Energiewirtschaft Solarzellen eine wichtige Rolle spielen. Jedoch sind die heute üblichen Photovoltaikanlagen, die aus hochreinen Halbleitermaterialien bestehen, sehr rohstoff- und energieintensiv in der Herstellung. Daher sind sie gerade für Entwicklungsländer, in denen oft sehr viel Sonnenlicht zur Verfügung stehen würde, unerschwinglich.

„KÖNNEN WIR  
VON DER NATUR LERNEN,  
ENERGIE AUS LICHT  
ZU GEWINNEN?“

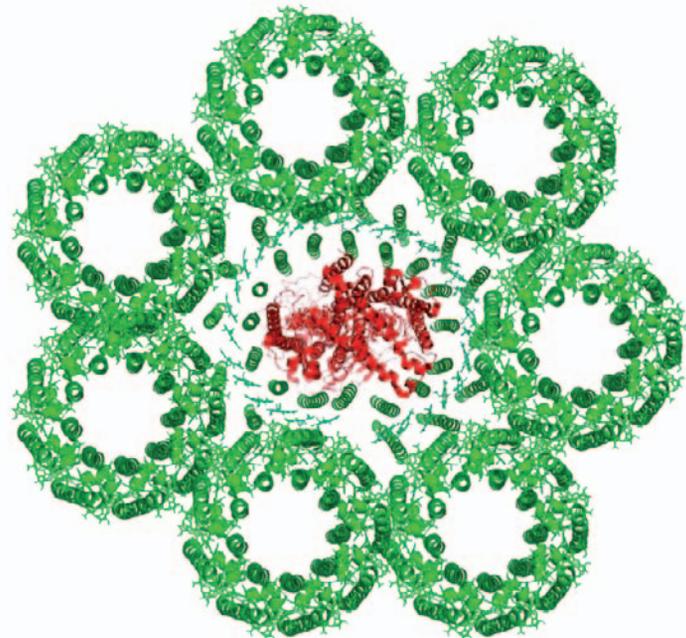
Große Hoffnungen setzt man deshalb auf Solarzellen der nächsten Generation, die aus organischen Materialien aufgebaut sind. Dass organische Materie zu diesem Zweck durchaus geeignet ist, macht uns die Natur seit Jahrmilliarden mit der Photo-

synthese sehr erfolgreich vor. Pflanzen, Algen und einige Bakteriengruppen sind in der Lage, Sonnenstrahlung unter den unterschiedlichsten Lebensbedingungen einzufangen und umzusetzen.

Wenn ein Molekül eines für Solarzellen geeigneten organischen Materials ein Lichtteilchen (Photon) absorbiert, übernimmt es die Energie des Photons. Dadurch gerät es in einen angeregten Zustand. Leider findet ein solcher Absorptionsvorgang unter normaler Sonneneinstrahlung nur ca. 1-mal pro Sekunde pro Molekül statt – viel zu selten, um eine effiziente Energieversorgung zu gewährleisten. Die Zahl der Photonen, die von der Sonne zur Erde gelangen, ist zwar unvorstellbar groß, doch sind die Moleküle auch unvorstellbar klein, so dass sich beide Effekte kompensieren.

„LICHTERTE“ IN DER NATUR

Bei der Photosynthese hat die Natur dieses Problem gelöst, indem sie *Light Harvesting* (Lichternte) betreibt und das Licht in speziellen Strukturen sammelt. Eine Schlüsselfunktion haben dabei Proteine, die als „Licht-Antennen“ fungieren; sie werden daher auch als Antennenproteine bezeichnet. Jedes dieser Proteine enthält eine Vielzahl von Farbstoffmolekülen (Pigmenten). Die Farbstoffmoleküle nehmen Lichtenergie auf und übertragen diese mit extrem hoher Geschwindigkeit auf benachbarte



**AUTOR**



Prof. Dr. Jürgen Köhler ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik IV und Sprecher des Graduiertenkollegs 1640 „Photophysik synthetischer und biologischer multichromophorer Systeme“ an der Universität Bayreuth.

Abb. 1 und 2: Gleichartige Probleme, gleichartige Lösungen. Links: Parabolspiegel (Antenne) zur Sammlung von Sonnenstrahlung für die Erwärmung von Wasser. Rechts: Mutmaßliche Anordnung von Pigment-Protein-Komplexen (Antennenproteinen) in der Membran von photosynthetischen Bakterien. Die grün markierten Strukturen enthalten zahlreiche Pigmente, die die Funktion haben, Licht zu absorbieren. Die aufgenommene Energie wird in die Mitte zur rot markierten Struktur geleitet, wo eine Ladungstrennung ausgelöst wird.

## Grundlagenforschung für Solarzellen der Zukunft: ein DFG-gefördertes Graduiertenkolleg



In einer gemeinsamen Initiative, dem Graduiertenkolleg 1640, arbeiten seit Oktober 2010 zahlreiche Bayreuther Forschungsgruppen aus der Bioinformatik, der Chemie und der Physik zum Thema „Photophysik synthetischer und biologischer multichromophorer Systeme“. Als Chromophore bezeichnet man Moleküle, die in Wechselwirkung mit Licht treten können – also genau solche Moleküle, wie sie für die Entwicklung von Solarzellen der nächsten Generation relevant sind. Der Weg hin zur Entwicklung von Solarmodulen aus organischen Materialien ist noch sehr weit. Es bedarf der interdisziplinären Grundlagenforschung, wie sie in Bayreuth betrieben wird, um das komplexe Zusammenspiel der zugrunde liegenden Prozesse zu entschlüsseln.

Diese Initiative wurde bisher von der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit rund 3,1 Mio. Euro gefördert. Eingebettet in die hervorragende Forschungsinfrastruktur an der Universität Bayreuth, bietet sie derzeit 25 jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ein interdisziplinäres Ausbildungsprogramm und vermittelt Schlüsselqualifikationen jenseits des naturwissenschaftlichen Fachwissens. Bislang sind rund 70 Publikationen in renommierten, international begutachteten Fachzeitschriften daraus hervorgegangen.

- [www.multichromophores.uni-bayreuth.de](http://www.multichromophores.uni-bayreuth.de)

GRK 1640 

Farbstoffmoleküle: zunächst auf Moleküle innerhalb desselben Antennenproteins, dann auf Moleküle in einem angrenzenden Antennenprotein. So durchläuft die absorbierte Lichtenergie eine Kette mehrerer Antennenproteine, bis sie schließlich in einem Reaktionszentrum ankommt. Hier werden die Prozesse der Photosynthese in Gang gesetzt, die aus der Lichtenergie chemische Energie erzeugen.

Mit dieser Arbeitsteilung zwischen den „Licht-Antennen“ und einem Reaktionszentrum gelingt es Pflanzen und einigen Bakterienarten, die Energie des Sonnenlichts, dem sie in der Natur ausgesetzt sind, in chemische Energie zu verwandeln. Gegenstand aktueller Forschung ist die Frage, ob die Prozesse der Sammlung und Verwertung von Licht, wie sie in Pflanzen und Bakterien ablaufen, als Blaupause für neue Formen der Energiegewinnung dienen können.

Experimentell kann man solche Vorgänge mit den verschiedensten Methoden der Laserspektroskopie untersuchen. Dazu muss man wissen, dass die oben beschriebenen Energie- und Ladungstransferprozesse auf einer ultraschnellen Zeitskala von einigen Pikosekunden ablaufen. Daher kommen hier spezielle Laser zum Einsatz, die ultrakurze Impulse aussenden können. Eine Pikosekunde ist eine Billionstel Sekunde ( $10^{-12}$  s). In dieser Zeit legt ein Lichtstrahl eine Strecke von nur 0,3 mm zurück. Zum Vergleich: Vom Mond bis zur Erde benötigt ein Lichtstrahl nur unwesentlich länger als eine Sekunde.

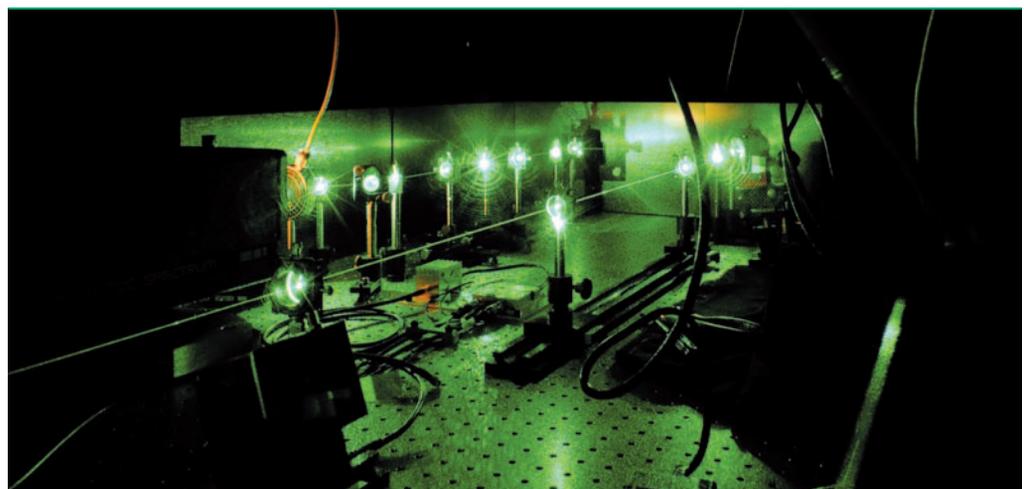


Abb. 3: Laserspektroskopie in einem Physiklabor der Universität Bayreuth.

## INTERDISZIPLINÄRE ZUSAMMENARBEIT IN DER FORSCHUNG ZUR SOLARENERGIE

An der Universität Bayreuth werden aber nicht nur biologische Systeme untersucht, um aus pflanzlichen Lichtsammelprozessen neue Erkenntnisse für den Bau organischer Solarzellen abzuleiten. Es werden ebenso auch Lichtsammelprozesse in chemisch synthetisierten Systemen erforscht und daraufhin getestet, ob man aus ihnen einfache und zugleich kostengünstige Solarzellen bauen kann. Dabei kann es sehr aufwändig sein, Moleküle mit den geforderten Eigenschaften im Labor herzustellen und anschließend zu erproben. Eine alternative Vorgehensweise besteht darin, gewisse Eigenschaften von Molekülgruppen theoretisch – sozusagen am Reißbrett – zu untersuchen und dann gezielt Voraussagen über deren Eignung zu treffen.

Daher berühren sich Forschungsarbeiten zum *Light Harvesting*, das in Pflanzen und Bakterien abläuft, mit neuen Projekten in der Polymerwissenschaft, die auf die Konzeption hocheffizienter Solarzellen abzielen.<sup>1</sup> Insgesamt sind an der Universität Bayreuth verschiedene Arbeitsgruppen aus der Physik und der Chemie mit Lichtsammelprozessen befasst. Einige sind dabei eher in der Grundlagenforschung angesiedelt, andere interessieren sich stärker für konkrete technische Anwendungen. Das gemeinsame Ziel ist es, möglichst genau zu verstehen, welche Vorgänge in Lichtsammelstrukturen ablaufen und wie diese von den Eigenschaften der verwendeten Moleküle abhängen.

## Neue Einsichten in den Energietransport

Dr. Richard Hildner, der heute an der Universität Bayreuth forscht, hat während seiner Zeit als Postdoktorand am Institute for Photonic Sciences (ICFO) in Casteldefels (Spanien) überraschende Entdeckungen gemacht:

- Wenn Lichtenergie ihren Weg durch die Antennenmoleküle bis zum Reaktionszentrum nimmt, arbeiten die Farbstoffmoleküle in einem gleichmäßigen Takt: ein Phänomen, das die Physik als quantenmechanisch kohärenten Transport bezeichnet. Auf diese Weise kann sich die Energie wie eine Welle ungehindert durch ein Antennenprotein bewegen.
- Die Lichtenergie durchläuft keineswegs immer die gleichen Ketten von Farbstoffmolekülen auf ihrem Weg durch die Antennenproteine. Die Transportwege ändern sich ständig.

Variabilität der Transportwege und Kohärenz – diese Kombination ist für den Energietransport in Pflanzen und Bakterien charakteristisch.

Wie sich bei diesen Forschungsarbeiten herausstellte, erfüllt diese Kombination einen biologischen Zweck: Die Energie findet immer den jeweils günstigsten Pfad durch ein Antennenprotein. Dies trägt wesentlich dazu bei, dass der Transport der Lichtenergie auch dann effizient verläuft, wenn sich bestimmte Voraussetzungen ändern – sei es, dass die Temperatur schwankt; sei es, dass sich die innere Struktur der Antennenproteine ändert.



Dr. Richard Hildner ist für seine herausragenden Forschungsarbeiten mit dem Wissenschaftspreis 2014 des Universitätsvereins Bayreuth ausgezeichnet worden. 2013 erhielt er den Sturge Prize, eine bedeutende Auszeichnung für den wissenschaftlichen Nachwuchs auf dem Gebiet der Physik.

<sup>1</sup> Im folgenden Beitrag von Prof. Dr. Mukundan Thelakkat werden einige dieser Forschungsarbeiten an der Universität Bayreuth vorgestellt.

## Internationale Konferenzreihe: „Lichternte“ auf Kloster Banz

Forschung auf dem Gebiet des *Light Harvesting* lebt von der Zusammenarbeit von Fachleuten aus unterschiedlichen Disziplinen, insbesondere der Biologie, Chemie und Physik, und vom wechselseitigen Austausch neuer Forschungsideen und -konzepte. Zu diesem Zweck veranstalten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die an der Universität Bayreuth zu Fragen der Energiegewinnung aus Licht arbeiten, regelmäßig eine internationale Konferenz. Sie findet seit 2007 im Zweijahresrhythmus unter dem Leitthema „Light-Harvesting Processes (LHP)“ auf Kloster Banz statt. Mehr als hundert Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus allen Kontinenten nehmen jedesmal daran teil.

- Termin für das nächste Treffen: 8. bis 12. März 2015
- Weitere Informationen: [www.lhp-bayreuth.de](http://www.lhp-bayreuth.de)



Kloster Banz bei Bad Staffelstein.  
Foto: Simon Koopmann, CC-BY-SA-2.0-DE



■ MUKUNDAN THELAKKAT

# Organische Solarzellen und Hybridsolarzellen

POLYMERFORSCHUNG FÜR DIE UMWANDLUNG VON SOLARENERGIE

■ Organische Photovoltaikzellen auf bedruckten Folien werden im Rahmen des europäischen Projekts LARGECELLS im Freien getestet.

**W**enn es um die effiziente und kostengünstige Erzeugung von Solarstrom geht, gibt es heute vielversprechende Alternativen zu klassischen Siliziumzellen: Organische Solarzellen aus Kunststoff und Hybridsolarzellen, die im großflächigen Format mit so genannten „Roll to Roll“-Druckverfahren (R2R) hergestellt werden können. Unter Hybridsolarzellen versteht man die Verwendung einer Kombination von anorganischen und organischen Halbleitermaterialien. An diesen zukunftsweisenden Technologien war und ist die Universität Bayreuth mit mehreren Projekten beteiligt.

### LARGECELLS – EIN EUROPÄISCH-INDISCHES PROJEKT

Organische Photovoltaikzellen (OPV), die aus Kunststoff bestehen, eignen sich ideal für die Anwendung auf Textilien oder im Bauwesen, da sie sehr leicht, flexibel und großflächig einsetzbar sind. Damit diese OPV-Zellen wettbewerbsfähiger werden, müssen sie eine noch höhere Energieeffizienz und Lebensdauer aufweisen. Zudem ist es erforderlich, dass großflächige Module mittels optimierter „Roll to Roll“-Druckverfahren hergestellt werden, um die Produktionskosten zu senken.

Diesen Herausforderungen stellt sich das Projekt LARGECELLS, das im September 2010 an den Start ging. Im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union wurde das gemeinsame Projekt mit Indien über vier Jahre mit 1,64 Mio. Euro gefördert. An dem von Prof. Dr. Mukundan Thelakkat geleiteten Konsortium der EU waren zusammen mit der Universität Bayreuth auch die TU Eindhoven (Niederlande), Dänemarks Technische Universität (DTU) und die Ben-Gurion Universität (Israel) beteiligt. Das indische Konsortium hingegen wurde separat vom Department of Science and Technology – einer Abteilung im indischen Wissenschaftsministerium – gefördert. Insgesamt nahmen fünf hochkarätige wissenschaftliche Institutionen aus Indien teil, die bei der Erforschung neuer Materialien für Solarzellen und bei deren Erprobung im Freien sehr eng mit ihren EU-Partnern kooperierten. Darüber hinaus entwickelte sich ein lebhafter Austausch sowohl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als auch auf der Ebene der Studierenden. Einige Studierende aus Indien bzw. der EU haben Forschungsaufenthalte von bis zu drei Monaten an den jeweiligen Partnerinstitutionen absolviert. So entstanden



Abb. 1: Auch im indischen Bangalore wurden Module gedruckter organischer Photovoltaikzellen getestet. Hier: Aufbau eines Experiments.

innovative Ideen, tragfähige neue Konzepte und Forschungsk Kooperationen, die von Synergie-Effekten erheblich profitierten.

Um die Energieeffizienz der OPV-Zellen zu erhöhen, haben die an LARGECELLS beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler neue, für Solarzellen besonders geeignete polymere Funktionsmaterialien hergestellt. Vor allem durch die Synthese lichtabsorbierender Donormaterialien ist es gelungen, eine höhere Effizienz in der Energieumwandlung zu erreichen. Der Wirkungsgrad der Solarzellen, d.h. das in Prozent dargestellte Verhältnis von erzeugter elektrischer Energie zur einfallenden Lichtenergie, konnte so bedeutend gesteigert werden.

Insbesondere wurde im Rahmen von LARGECELLS ein Polymer auf der Basis eines Diketopyrrolopyrrols entwickelt. Es handelt sich hierbei um den Farbstoff, dem Ferraris ihre rote Farbe verdanken. Im Labor konnte damit ein Wirkungsgrad von 7,4 Prozent erzielt werden. Durch die Realisierung von übergeordneten Solarzellen, die zwei oder mehr Solarzellen aus verschiedenen Materialien enthalten, ließ sich der Wirkungsgrad auf 8,9 Prozent (bei Tandem-Zellen) bzw. auf 9,6 Prozent (bei Triple-Zellen) steigern. Außerdem erreichte das Projekt einen Wirkungsgrad von rund 4 Prozent bei R2R-gedruckten großflächigen flexiblen Solarzellen, die ohne das relativ teure Indiumzinnoxid (indium tin oxide, ITO) auskommen.

#### AUTOR



Prof. Dr. Mukundan Thelakkat leitet die Arbeitsgruppe „Angewandte Funktionspolymere“ am Lehrstuhl Makromolekulare Chemie I (Leitung: Prof. Dr. Hans-Werner Schmidt).

Abb. 2: Mit organischen Photovoltaikzellen bedruckte Folie.





Abb. 3: Chemische Synthese und Reinigung von Materialien in einem Labor der Universität Bayreuth.

Die Steigerung der Energieeffizienz war aber nur ein Aspekt von LARGECELLS. Die Forschungsarbeiten zielten zugleich darauf ab, die Lebensdauer der Solarmodule zu erhöhen. Um die Langzeitstabilität der neuen OPV-Zellen zu testen, wurden diese Module verschiedenen Testszenarien unterzogen – nicht nur im Labor, sondern auch im Freien, wo zu Testzwecken eine künstliche beschleunigte Alterung der OPV-Zellen herbeigeführt wurde. Insgesamt wurden die neuen OPV-Solarmodule 9.000 Stunden lang in Outdoor-Anlagen getestet. Die Ergebnisse dieser Tests werden die weitere Entwicklung optimierter Trägermaterialien unterstützen.

### UMWELTnanOTECH – EIN BAYERISCHER PROJEKTVERBUND

Unter dem Dach des Bayerischen Projektverbunds „Umweltverträgliche Anwendungen der Nanotechnologie“ (UMWELTnanoTECH) – arbeiten Hochschulen und Forschungsinstitute bayernweit an Projekten zum verantwortungsbewussten Ein-

satz der Nanotechnologie. Gemeinsam wollen sie umweltschonende Anwendungen entwickeln, und zwar in den drei Schwerpunkten „Organische Photovoltaik“, „Energiespeicher“ und „Thermoelektrizität“. Im Rahmen dieses Projektverbunds, den der Freistaat Bayern mit knapp drei Millionen Euro finanziert, starteten zehn Einzelprojekte im Jahr 2013.

Eines dieser Projekte ist an der Universität Bayreuth angesiedelt.<sup>1</sup> Es zielt darauf ab, die Verträglichkeit von Komponenten für die organische Photovoltaik zu verbessern. Es befasst sich insbesondere mit leicht verfügbaren und unbedenklichen Stoffen, die es ermöglichen, auf den großflächigen Einsatz ressourcen- und energieintensiver Materialien zu verzichten. Zu diesem Zweck sollen Nanostrukturen in organischen Solarzellen und Hybridsolarzellen kontrolliert und damit deren Wirkungsgrad und Langzeitstabilität erhöht werden. Von besonderem Interesse ist dabei die umweltverträgliche Verarbeitung aus nicht-chlorierten Lösungsmitteln.

## Blick ins Innere einer organischen Solarzelle

Im Gegensatz zu anorganischen Halbleitern werden in organischen Halbleitermaterialien unter Beleuchtung keine freien Ladungsträger erzeugt, sondern Elektronen-Loch-Paare. Ein solches Paar besteht aus einem Elektron, das sich aufgrund der Absorption von Energie in einem angeregten Zustand befindet, und einer Elektronenfehlstelle (Loch). Die Elektronen-Loch-Paare – sie werden in der Forschung als Exzitonen bezeichnet – müssen getrennt und ihre Bestandteile zu den Elektroden der Solarzellen abtransportiert werden. Nur dann können organische Solarzellen effizient arbeiten.

Damit die Exzitonen getrennt werden, müssen sie innerhalb der Solarzelle auf eine Grenzfläche treffen, die aus zwei Materialkomponenten besteht: einem elektronenreichen Donormaterial (D) und einem elektronenarmen Akzeptormaterial (A). In der Regel wird ein langkettiges Halbleiterpolymer als Donor und ein Fulleren-Derivat als Akzeptor verwendet. Aber das Fulleren-Derivat kann auch beliebig mit anorganischen Halbleitermaterialien ersetzt werden; in diesem Fall spricht man von einer Hybridsolarzelle.

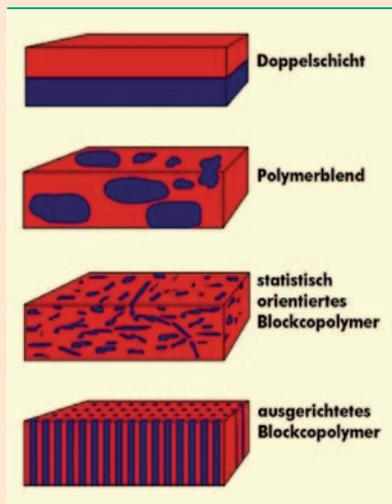


Abb 4: Verschiedene Architekturen der photoaktiven Schicht dienen der Erzeugung von D-A-Grenzflächen für die Ladungstrennung.

Exzitonen haben eine äußerst kurze Lebensdauer. Deshalb wäre es vorteilhaft, wenn sie bis zur D-A-Grenzfläche einen möglichst kurzen Weg zurücklegen müssen. Der Weg ist umso kürzer, je dünner die Absorptionsschicht der Solarzelle ist. Doch damit die Solarzelle viel Lichtenergie absorbieren kann, muss die Absorptionsschicht umgekehrt möglichst dick sein. Um dieses Dilemma zu lösen, wurden neuartige Solarzellen entwickelt, die auf der Nanostrukturierung der D-A-Absorptionsschicht beruhen: die Multischicht-solarzelle und die Polymerblendsolarzelle. Letzere erhält man durch die Mischung des Donormaterials (D) und des Akzeptormaterials (A). Um die Polymerblendsolarzelle optimal weiterzuentwickeln, müssen stabile Nanostrukturen – wie z.B. in einem D-A-Blockcopolymer (Abb. 4) – vertikal ausgerichtet werden.

Alle diese Solarzellentypen können im großflächigen Format mittels „Roll to Roll“-Druckverfahren hergestellt werden. Die Arbeitsgruppe „Angewandte Funktionspolymere“ an der Universität Bayreuth widmet sich unterschiedlichen Aspekten dieser zukunftsweisenden Technologie. Dabei werden neue Materialien synthetisiert, völlig neue Konzepte zu Donor-Akzeptor-Solarzellen entwickelt und die Nanostrukturierung und -stabilisierung in diesen Systemen erforscht.

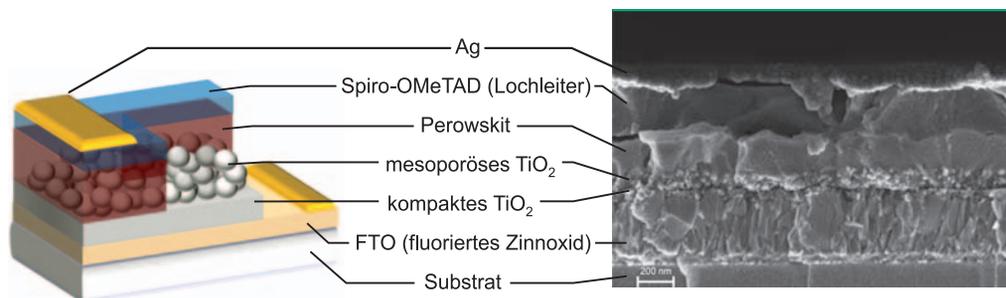


Abb. 5: Schematischer Aufbau einer Hybrid-Perowskitsolarzelle (links) und Querschnitt einer solchen Solarzelle in einer rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme (rechts).

## SOLTECH – EIN VERBUND BAYERISCHER UNIVERSITÄTEN

Im Projekt „Solar Technologies go Hybrid“ (Sol-Tech), das 2012 an den Start ging, kooperieren fünf bayerische Universitäten: die Universität Bayreuth, die FAU Erlangen-Nürnberg, die LMU München, die TU München und die Universität Würzburg. Gemeinsam und interdisziplinär wollen sie die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Umwandlung von Solarenergie in elektrischen Strom oder in transportable und lagerbare Brennstoffe vorantreiben. Mit diesem Ziel haben sich die Projektpartner in fünf „Key Labs“ organisiert, die auf die Expertise der einzelnen Universitäten spezialisiert sind:

- Bayreuth: Makromolekulare Materialien
- Erlangen: Kohlenstoffreiche Hybride
- LMU München: Anorganische und hybride Nanosysteme
- TU München: Hybridsysteme mit Nanomaterialien
- Würzburg: Supramolekulare Materialien für Photovoltaik und Photokatalyse

Die Forschung des am Bayreuther Institut für Makromolekülforschung (BIMF) angesiedelten Key Labs „Makromolekulare Materialien“ umfasst:

- 1) das Design und die Synthese von Funktionsmaterialien/Polymeren
- 2) grundlegende physikalische Untersuchungen zur Photophysik sowie zum Energie- und Ladungstransport
- 3) die theoretische Behandlung dieser Prozesse in Modellen und realen Systemen
- 4) die Herstellung von Bauelementen und deren Charakterisierung

Am Bayreuther KeyLab sind sechs Arbeitsgruppen der Universität Bayreuth beteiligt.<sup>2</sup> Zusätzlich wurde hier eine Juniorprofessur (Prof. Dr. Sven Hüttner) im Rahmen des Verbundprojekts SolTech neu eingerichtet.

Ein Highlight aus diesem KeyLab ist die rasante Entwicklung von hocheffizienten Hybrid-Perowskitsolarzellen. In der Regel besteht eine Perowskitsolarzelle aus einem bleihaltigen anorganischen Halbleitersalz (Perowskit:  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) und einem organischen Lochleiter (Spiro-OMeTAD) im Schichtaufbau (Abb. 4). Auf diesem Gebiet wurden in den letzten zwei Jahren bedeutsame Fortschritte bezüglich der Effizienz erzielt. Der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Mukundan Thelakkat gelang es im Jahr 2014, einen Wirkungsgrad von rund 15 Prozent zu erreichen. Ein wichtiges Ziel der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet ist es zudem, das toxische Element Blei durch nicht-toxische Substanzen zu ersetzen und die Lebensdauer der neuen Hybrid-Perowskitsolarzellen zu erhöhen. Anknüpfend an die vielversprechenden Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet, startete 2014 ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Forschungsprojekt, das sich mit technologierelevanten Fragen in Bezug auf Hybrid-Perowskitsolarzellen befassen wird. Eine Forschungsgruppe an der Universität Bayreuth<sup>3</sup> ist in dieses – vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg koordinierte – Vorhaben eingebunden.

## WEITERE PROJEKTE

Zusätzlich zu den genannten Solarzell-Forschungsvorhaben arbeiten mehrere Arbeitsgruppen aus der Chemie und der Physik an der Universität Bayreuth in grundlagenorientierten Verbundprojekten. So ist das Graduiertenkolleg 1640 „Photophysik synthetischer und biologischer multichromophorer Systeme“ auf die Photophysik von Ladungstransfer und -transport in unterschiedlichen Materialien spezialisiert. Die plasmonische Lichteinkopplung in Hybridsolarzellen ist wiederum eine wichtige Frage des DFG-Sonderforschungsbereichs 840 „Von partikulären Nanosystemen zur Mesotechnologie“ auf dem Gebiet der Solarenergieforschung.

## LINKTIPPS

- [www.largecells.eu](http://www.largecells.eu)
- [www.soltech-go-hybrid.de](http://www.soltech-go-hybrid.de)

<sup>1</sup> Die Leitung liegt bei Prof. Dr. Mukundan Thelakkat.  
<sup>2</sup> Diese Arbeitsgruppen werden geleitet von Prof. Dr. Anna Köhler, Prof. Dr. Jürgen Köhler, Prof. Dr. Stefan Kümmel, Prof. Dr. Hans-Werner Schmidt, Prof. Dr. Peter Strohrig und Prof. Dr. Mukundan Thelakkat.  
<sup>3</sup> Auch dieses Projekt wird von Prof. Dr. Mukundan Thelakkat geleitet.

# Fracking – vorwärts mit Mut zum Risiko ?

EINE ABWÄGUNG AUS UMWELT-  
WISSENSCHAFTLICHER SICHT

■ Fracking im Kern County in Kalifornien: Mit einer Tiefpumpe wird das Erdöl, wenn der natürliche Lagerstättendruck nicht ausreicht, zutage gefördert (Foto: Christopher Halloran / Shutterstock.com).



„Fracking“, ein Begriff mit hohem emotionalen Inhalt, vergleichbar mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) oder Atomkraft, der in der Bevölkerung in höchstem Maße Unruhe erzeugt. Im Raum Bayreuth hat dieses Schlagwort noch dazu eine regionale Komponente, seit eine britische Firma beim Bayerischen Wirtschaftsministerium den Antrag gestellt hat, den Untergrund der nördlichen Oberpfalz im Hinblick auf die Gewinnung von Öl und Gas zu erkunden. Da eine herkömmliche Förderung im Raum Weiden nicht möglich ist, liegt der Schluss nahe, dass es sich um eine Exploration in Bezug auf eine sogenannte unkonventionelle Nutzung von Schiefergas und Erdöl handelt. Diese Nutzung wird in der Regel durch ein hydraulisches Aufbrechen des gas- und ölführenden Gesteins ermöglicht – also durch das *hydraulic fracturing* oder kurz *fracking*.

### EINE BOOMENDE TECHNOLOGIE MIT ÖKOLOGISCHEN RISIKEN

Über den technischen Ablauf des Frackings kann man sich mittlerweile im Internet einen vorzüglichen Überblick verschaffen.<sup>1</sup> Die Technologie wird seit Ende der 1940er Jahre, auch in Deutschland, in unterschiedlichen Zusammenhängen eingesetzt:

- bei der Erschließung tiefer Grundwasserleiter für die Wassergewinnung
- bei der Verbesserung des Wärmetransports bei der tiefen Geothermie
- vor allem bei der Erdöl- und Erdgasförderung

Und dennoch scheiden sich die Geister, wenn es um dieses Thema geht. Warum ist das so?

Die öffentliche Diskussion hat zunächst einmal mit dem Boom zu tun, den die Fracking-Technik in den letzten Jahren insbesondere in den USA, aber auch in anderen Ländern ausgelöst hat. Dieser Boom hat die USA nach 40 Jahren wieder zum Ölexporteur gemacht und lässt die Energiepreise in den USA deutlich sinken. Naturgemäß entsteht daraus ein großes Interesse, diese Technik auch in Deutschland zur Anwendung zu bringen. Denn es sind auch hier Lagerstätten von Erdöl und Schiefergas vorhanden, die mit der Fracking-Technologie ausgebeutet werden könnten. Der katastrophale Umgang mit dieser Technik in den USA, was Umweltschäden betrifft, lässt jedoch die Bevölkerung entsprechend argwöhnisch darauf blicken. Dies wiederum ruft

das notorische Beschwichtigen seitens interessierter Kreise auf den Plan, wonach die Einwände schon bekannt und das Fracking mittlerweile eine bereits eingespielte Technik sei, die sich aus Sicht des Umweltschutzes gut beherrschen lasse.

Doch auch wenn tatsächliche oder potenzielle ökologische Folgen im einzelnen hochumstritten sind, gibt es jedoch keinen Zweifel: Fracking beinhaltet eine Vielzahl von Umweltrisiken, die Experten aus den USA in einem hervorragenden Überblicksaufsatz<sup>2</sup> ausführlich zusammengefasst haben. Daher soll es im folgenden darum gehen, das Fracking aus der Sicht eines „Umweltnaturwissenschaftlers mit hydrologischer Brille“ kritisch zu erörtern.

### EINPRESSEN VON CHEMIKALIEN IN TIEFE GESTEINSSCHICHTEN

Bei der sogenannten unkonventionellen Gas- und Ölförderung durch Fracking werden spezielle Flüssigkeiten (Fracfluide) entlang von zementierten Bohrlöchern in die Lagerstätten gepumpt. Sie enthalten Stützmittel und/oder chemische Zusätze, die benötigt werden, um den Untergrund „aufzubrechen“ und die entstandenen Risse zu stabilisieren.<sup>3</sup> Aus dem aufgebrochenen Gestein kann darin eingepresstes Gas entweichen und gefördert werden. Die Lagerstätten befinden sich in Europa bzw. in Deutschland in einer Tiefe zwischen 3.000 und 4.000 Metern. In den USA hingegen liegen sie sehr viel näher an der Oberfläche und daher in unmittelbarer Nähe von Grundwasserleitern, die in einer Tiefe zwischen 500 und 600 Metern verlaufen und für die Trinkwassernutzung bedeutsam sind. Nach Beenden des Fracking-Vorgangs fließt das unter Druck stehende Öl-Wasser-Gas-Gemisch als sogenannter „Flowback“ wieder zurück.

### UNDICHTHE BOHRLÖCHER

3.000 bis 4.000 Meter tief unter dem Erdboden: Eine solche Entfernung klingt beruhigend, und in der Tat scheint es unwahrscheinlich, dass Verunreinigungen in dieser Tiefe (häufig handelt es sich um salziges tiefes Grundwasser) eine nennenswerte Rolle spielen. Doch die Musik spielt natürlich in den kilometerlangen Bohrlöchern und Transportwegen, die von der Erdoberfläche nach unten und wieder zurück nach oben führen. Welche Umweltrisiken bestehen hier? Infolge von Fracking wurden in einigen Fällen Verunreinigungen des Trinkwas-

„FRACKING BEINHÄLTET  
EINE VIELZAHL VON  
UMWELTRISIKEN.“

AUTOR



Prof. Dr. Stefan Peiffer ist Inhaber des Lehrstuhls für Hydrologie und Geschäftsführender Direktor des Bayreuther Zentrums für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) an der Universität Bayreuth.

Abb. 1: Fracking in der Bakken Formation in North Dakota/USA (Foto: Joshua Doubek, CC-BY-SA-3.0).

sers mit Kohlenwasserstoffen beobachtet. Diese Kontaminationen sind offenbar meist auf undichte Bohrlöcher zurückzuführen. Eine kürzlich erschienene Studie in den USA vermutet, dass in der Regel nicht das Aufsprengen des Gesteins in der Tiefe für Verschmutzungen des Grund- und Trinkwassers verantwortlich sei, die in der Tat in Zusammenhang mit Fracking aufgetreten sind. Vielmehr seien die Kontaminationen durch Undichtigkeiten entlang von Bohrlöchern<sup>4,5</sup> entstanden, die durch Grundwasserschichten hindurchstoßen, die für die Trinkwassergewinnung genutzt werden. Von daher liegt die Argumentation nahe, dass Umweltrisiken eine Frage der Technik und minimierbar seien, wenn man nur einen entsprechenden Ausbaustandard verwendet. Doch es gibt auch weitere Bedenken.



**„WOLLEN WIR EIN (NOCH) UNBEKANNTES RESTRISIKO TRAGEN, UM EINE TECHNOLOGIE ZU FÖRDERN, DIE FOSSILE ROHSTOFFE PRODUZIERT, BEI DEREN VERBRENNUNG TREIBHAUSGASE ENTSTEHEN?“**

**HOHER WASSERVERBRAUCH, STARKE VERUNREINIGUNGEN**

Insgesamt werden pro Fracking-Vorgang rund 10.000 m<sup>3</sup> Wasser verbraucht. Bei einem durchschnittlichen Wasserverbrauch pro Kopf und Tag

von 120 Litern in Deutschland entspricht diese Wassermenge in etwa dem täglichen Wasserverbrauch der Stadt Bayreuth. Die Bereitstellung einer derart hohen Wassermenge hat nicht unerhebliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Dies ist insbesondere in trockenen Gebieten des mittleren Westens der USA ein Problem, kann aber auch in trockenen Gebieten Deutschlands Konsequenzen haben. In den USA wird das Wasser häufig in Tankwagen angeliefert, mit entsprechenden Risiken von Unfällen und Ölverschmutzungen in Böden und Oberflächengewässern.

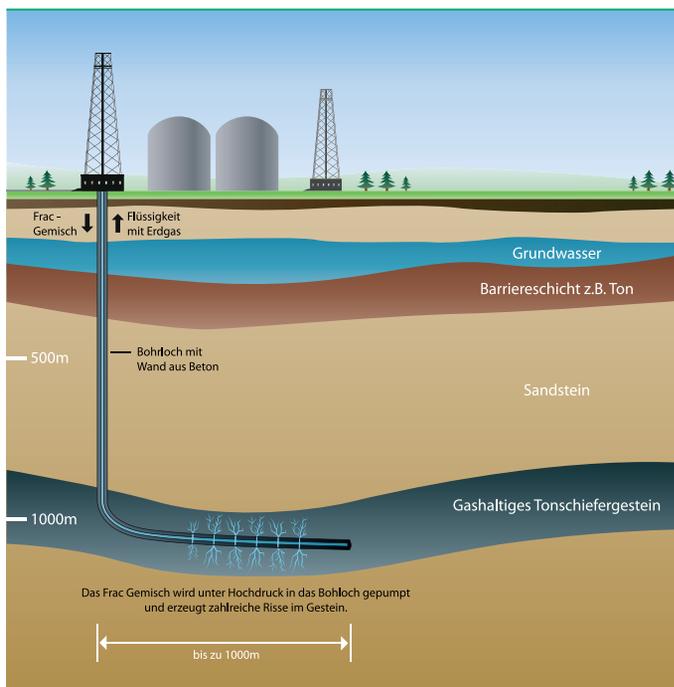


Abb. 2: Prinzip der Erdgasgewinnung durch Fracking (Grafik: Bilderzweig / fotolia.com).

Die verschiedenen Chemikalien (u. a. Biozide, Tenside, Gele und Säuren), die in den für das Fracking verwendeten Flüssigkeiten enthalten sind, haben darin einen Gesamtanteil von 0,5 bis 2 Volumenprozent. Es fallen daher als Flowback erhebliche Wassermengen an (4.000 bis 5.000 m<sup>3</sup> pro Bohrung), die verunreinigt sind. Zu dieser Verschmutzung tragen auch Inhaltsstoffe des tiefen Grundwassers bei, wie etwa Salz, aber auch Erdöl und Kohlenwasserstoffe. Bevor das Wasser entweder endgültig entsorgt oder für den Frackingprozess wiederverwendet wird, muss es behandelt und aufbereitet werden. In den USA lagert man das kontaminierte Wasser in großen Becken, was jedoch in Deutschland rechtlich nicht möglich ist.

Insgesamt handelt es sich bei einer Fracking-Bohrung um einen mittelgroßen Industriekomplex, der im Hinblick auf Technik und Verkehr von einer leistungsstarken Infrastruktur abhängt. Diese wiederum zieht das Risiko einer Kontamination von Böden und Oberflächenwasser sowie einen nicht unerheblichen Landverbrauch nach sich.



## HOHE KOSTEN

Sichere Bohrungen, nachhaltiges Wassermanagement und Aufbereitung des Flowbacks sind Faktoren, die das Fracking teuer machen. Sie wurden deswegen in den USA bisher lax gehandhabt, und erst vor kurzem hat eine sehr kontrovers geführte Diskussion darüber begonnen. Nicht umsonst hat die Interessenvertretung der öffentlichen Wasserwirtschaft in Deutschland bereits 2012 baldige schärfere gesetzliche Regelungen zum Grundwasser- und Umweltschutz beim Fracking angemahnt, die nun auch tatsächlich von der Bundesumweltministerin angekündigt sind.<sup>6</sup>

Die ökonomische Rentabilität des Fracking steht und fällt also mit der Einbeziehung der externen Kosten – also der Umweltkosten – in den Frackingprozess. Der Aufwand für entsprechende Maßnahmen verringert dann auch das entsprechende Risiko für Umweltschäden.

## LOHNT SICH DIE INKAUFNAHME VON UMWELTRISIKEN?

Insgesamt ist man sich inzwischen über die möglichen Risiken der Fracking-Technologien im klaren, doch man kann sie (noch) nicht quantifizieren. Und damit kommt der wohl wichtigste Aspekt der Anwendung der Fracking-Technologie in den Blick. Wollen wir ein (noch) unbekanntes Restrisiko tragen, um eine Technologie zu fördern, die fossile Rohstoffe produziert, bei deren Verbrennung Treibhausgase entstehen? Die Frage ist provokativ gestellt. Sie ist aber durchaus ernsthaft zu disku-

tieren, wenn man fossile Kohlenwasserstoffe als Vorprodukte für eine entsprechende Kunststoffindustrie sieht, die nicht notwendigerweise eine Verbrennung ihrer Produkte zum Ziel haben muss, und wenn man sich als Staat unabhängig von Importen machen will.

In Deutschland muss diese Frage jedoch vor dem Hintergrund diskutiert werden, dass einem jährlichen Verbrauch (2010) von 95 Milliarden m<sup>3</sup> Erdgas lediglich eine technisch gewinnbare Menge an Schiefergas von 1,3 Billionen m<sup>3</sup> gegenüber steht, wie die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in einer Studie für die Bundesregierung ermittelt hat<sup>7</sup>. Das entspricht einer Reichweite von 14 Jahren. Soll man dafür Umweltrisiken mit einer wesentlich längeren Schadensreichweite in Kauf nehmen? Konterkariert solch ein Ansatz nicht die Energiewende hin zu erneuerbaren Energien?

Die Antwort auf diese Frage ist eine politische. In welche Richtung der „Umweltnaturwissenschaftler mit hydrologischer Brille“ tendiert, dürften die bisherigen Ausführungen deutlich gemacht haben. Allerdings enden geologische Formationen nicht an Landesgrenzen, und in den Nachbarländern Polen und den Niederlanden wird gefracked. Die Risiken sollten aber wissenschaftlich aufgeklärt werden – nicht zuletzt vor dem Hintergrund, dass nur bei Kenntnis der Risiken auch die Fracking-Technik verbessert werden kann. Forschung zu dieser Thematik muss daher auch in Deutschland erfolgen, zumal die Nutzung des unterirdischen Raums im Bereich der Geothermie in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird und mit ganz ähnlichen Risikoabschätzungen konfrontiert ist. Das Thema Fracking darf also nicht tabuisiert werden. Die Wissenschaft und die Universitäten müssen es offensiv angehen, um dem Gesetzgeber Entscheidungsgrundlagen an die Hand zu geben.



Abb. 3: Fracking-Proteste in North Carolina, USA (Foto: EPG\_EuroPhotographics / shutterstock.com).

- zum Beispiel hier: [http://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_Fracturing](http://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_Fracturing)
- Avner Vengosh, Robert B. Jackson, Nathaniel Warner, Thomas H. Darrah, Andrew Kondash (2014), A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 2014, 48 (15), 8334–8348, DOI: 10.1021/es405118y
- Eine gute Übersicht über die Art der Chemikalien und ihren Einsatzzweck findet sich in einem Beitrag des Arbeitskreises Fracking der Wasserchemischen Gesellschaft in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh): [www.aktuelle-wochenschau.de/main-navi/aktuelle-wochenschau-2014/kw16-chemikalien-beim-fracking-zur-gewinnung-unkonventioneller-erdgasressourcen.html](http://www.aktuelle-wochenschau.de/main-navi/aktuelle-wochenschau-2014/kw16-chemikalien-beim-fracking-zur-gewinnung-unkonventioneller-erdgasressourcen.html)
- Thomas H. Darrah, Avner Vengosh, Robert B. Jackson, Nathaniel R. Warner and Robert J. Poreda (2014), Noble Gases Identify the Mechanisms of Fugitive Gas Contamination in Drinking-Water Wells Overlying the Marcellus and Barnett Shales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, DOI: 10.1073/pnas.1322107111
- [www.spiegel.de/wissenschaft/technik/fracking-gase-durch-unkonventionelle-gasfoerderung-ins-trinkwasser-a-991817.html](http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/fracking-gase-durch-unkonventionelle-gasfoerderung-ins-trinkwasser-a-991817.html)
- Auch das Umweltbundesamt (UBA) fordert derzeit eine rasche Regulierung der Fracking-Technologie, siehe: [www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/fracking-jetzt-regulieren](http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/fracking-jetzt-regulieren) - Im Juli 2014 wurde vom UBA ein neues, mehr als 600 Seiten umfassendes Gutachten zu den „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas insbesondere aus Schiefergaslagerstätten“ veröffentlicht: [www.umweltbundesamt.de/publikationen/](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/)
- [www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-120625.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-120625.html)

# Flüssige Kraftstoffe aus CO<sub>2</sub> und regenerativem Strom

EIN ZUKUNFTSWEISENDER  
FORSCHUNGSANSATZ  
ZUR SICHERUNG DER  
ENERGIEVERSORGUNG

■ Ein neues Verfahren zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe nutzt Abgase aus Industrieanlagen und dient zugleich der Speicherung überschüssiger Energie, die in Wind- oder Photovoltaikanlagen erzeugt wird (sst).

## SPEICHERUNG ELEKTRISCHER ENERGIE: EIN WESENTLICHER BAUSTEIN DER ENERGIEWENDE

In Zukunft sollen Wind- und Solarenergie in Deutschland – und vermutlich mittel- und langfristig auch in anderen Ländern – einen erheblich größeren Beitrag für eine umwelt- und klimafreundliche Energieversorgung leisten. Bereits heute liegt der Beitrag von Windkraft- und Photovoltaikanlagen zum Stromverbrauch in Deutschland bei 17 Prozent (2013). Für den angestrebten deutlichen Ausbau erneuerbarer Energien ist jedoch entscheidend, dass die zeitlich fluktuierende Stromproduktion aus Sonne und Wind effizient genutzt wird. Dies erfordert nicht nur zusätzliche Kapazitäten, sondern auch innovative Lösungen bei der Speicherung und dem Transport von Energie. Darüber hinaus sind auch geographische Herausforderungen bedeutsam: Windenergie wird zunehmend auch offshore anfallen, und Solarenergie steht potenziell in Südeuropa und Nordafrika in großen Mengen zur Verfügung.

Elektrische Netze mit ausreichender Kapazität wären für den Energietransport in technischer Hinsicht die beste Lösung, stehen aber derzeit nicht ausreichend zur Verfügung. Das Thema der Energieversorgungssicherheit ist daher, angesichts derzeit unzureichender Speichermöglichkeiten, ein zentraler Punkt im geplanten Ausbau erneuerbarer Energieträger.

### FLÜSSIGE KRAFTSTOFFE: LEISTUNGSSTARKE ENERGIESPEICHER

Flüssige Kraftstoffe wie Dieselöl oder Flugturbinenkraftstoff (Kerosin) können zur Lösung der Speicher- und Transportfrage einen wesentlichen Beitrag leisten. Sie sind bei Umgebungsbedingungen flüssig und benötigen keine speziellen Lager- oder Transportbehälter. Zudem besitzen sie die höchste verfügbare Speicherdichte (Tabelle 1): Die Energie, die pro Kubikmeter gespeichert werden kann, ist beispielsweise 30-mal höher als bei derzeitigen Batterien. Das Potenzial von Batterien als Langzeitspeicher für erneuerbare Energien ist sehr begrenzt und vermutlich auch problematisch für großtechnische Anwendungen.

Auch gegenüber gasförmigen Brennstoffen sind flüssige Brennstoffe deutlich im Vorteil. Ihre Speicherdichte ist 4- bis 6-mal höher als bei komprimiertem Erdgas (200 bar) oder Wasserstoff (700 bar). Insbesondere im Vergleich mit Wasserstoff

Stoff	Volumen zur Speicherung von 10 MWh elektrischer Energie (entspricht 5 Std. Volllast einer typischen Windkraftanlage)
Dieselöl	1 m <sup>3</sup>
komprimiertes Erdgas (200 bar, 20°C)	4 m <sup>3</sup>
kompr. Wasserstoff (700 bar, 20°C)	6 m <sup>3</sup>
Li-Ionen-Batterie	30 m <sup>3</sup>
komprimierte Luft (20 bar)	3.400 m <sup>3</sup>
Wasser (Pumpspeicher, Höhe 300 m)	14.000 m <sup>3</sup>

lassen sich flüssige Brennstoffe deutlich einfacher und sicherer handhaben. Auch die bestehende Infrastruktur im Transportbereich (Straßenverkehr, Luftfahrt) beruht derzeit noch beinahe ausschließlich auf erdölbasierten Kraftstoffen wie Benzin, Dieselöl und Kerosin. In der Chemieindustrie wird vor allem in Europa hauptsächlich Naphtha (Leichtbenzin) eingesetzt, um chemische Grundstoffe wie Ethen, Propen etc. zu produzieren.

### ERZEUGUNG FLÜSSIGER KRAFTSTOFFE AUS REGENERATIVEM WASSERSTOFF UND CO<sub>2</sub>

Vor diesem Hintergrund hat in jüngster Zeit ein Forschungsansatz an Bedeutung gewonnen, der auf die Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus Wasserstoff und Kohlendioxid abzielt; Abbildung 1 verdeutlicht sehr vereinfachend die Grundidee. Dieser Ansatz ist in doppelter Hinsicht zukunftsweisend:

- Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen wie Kohle und Erdgas befeuert werden, haben einen sehr hohen Ausstoß an CO<sub>2</sub>-haltigen Abgasen. Auch in der Zement- und Stahlindustrie enthalten die Abgase CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von etwa 10 Volumenprozent. Das Kohlendioxid aus diesen industriellen Prozessen, die zumindest mittelfristig unentbehrlich sind, lässt sich für die Erzeugung flüssiger Kraftstoffe nutzen. Das bedeutet vereinfacht gesagt: Die weitgehend auf fossilen Rohstoffen wie Kohle und Erdgas basierenden Kraftwerke, die für etwa 50 Prozent der gesamten globalen CO<sub>2</sub>-Emission verantwortlich sind, könnte man „CO<sub>2</sub>-neutral“ gestalten. Die Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus industriellen Abgasen ist dabei umso interessanter, als es für die Energiewirtschaft derzeit noch nicht möglich ist, CO<sub>2</sub> auf rentable Weise direkt aus Luft

Tabelle 1: Energiedichten von Stoffen/ Systemen zur Speicherung elektrischer Energie.

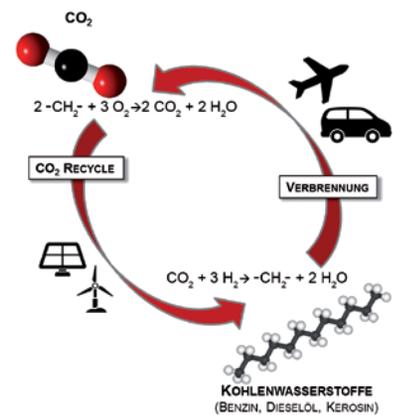


Abb. 1: Vereinfachte Darstellung der Grundidee zur Nutzung von CO<sub>2</sub> zur Erzeugung flüssiger Kraftstoffe aus regenerativer Energie durch Fischer-Tropsch-Synthese (FTS): Das bei der Kraftstoffverbrennung freigesetzte CO<sub>2</sub> wird zusammen mit Wasserstoff – der seinerseits aus Solar- oder Windstrom (Wasserelektrolyse) erzeugt wird – wieder in Kraftstoff umgesetzt. -CH<sub>2</sub>- symbolisiert ein Kettenglied in einem langkettigen Kohlenwasserstoff wie zum Beispiel einem typischen Dieselölbestandteil.

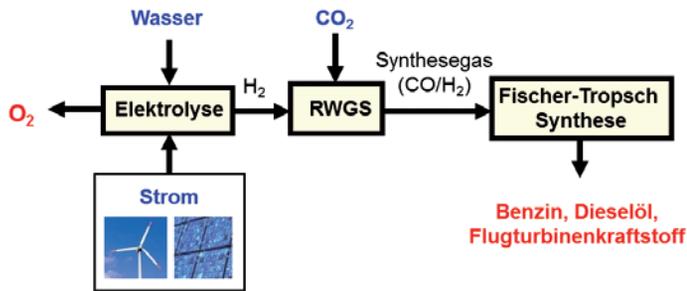


Abb. 2: Verfahrensschema zur Erzeugung von Dieselöl und Kerosin aus regenerativ erzeugtem Strom und Kohlendioxid (RWGS: reverse Wassergas-Shift-Reaktion).

zu gewinnen. In der Atmosphäre liegt CO<sub>2</sub> nur in einer sehr geringen Konzentration von 0,04 Volumenprozent vor. Dieser Anteil, und erst recht ein weiterer CO<sub>2</sub>-Konzentrationsanstieg, ist hinsichtlich der globalen Erwärmung nach Meinung der Mehrheit der Klimaexperten bereits sehr problematisch. Für eine technische effiziente Abtrennung aus der Luft aber ist die geringe Konzentration derzeit noch eine sehr große Hürde.

- Windkraft- und Photovoltaikanlagen erzeugen oftmals Strom, der nicht unmittelbar benötigt wird. Diese elektrische Energie kann genutzt werden, um durch Wasserelektrolyse Wasserstoff erzeugen – die zweite Komponente, die für die synthetische Herstellung flüssiger Kraftstoffe benötigt wird.

Die so erzeugten Kraftstoffe können im Verkehrsbereich, zur Wärmeerzeugung in Haushalten und in der chemischen Industrie eingesetzt werden. Sie treten dann an die Stelle von Erdöl und Erdgas, das derzeit weitgehend importiert werden muss. Zwar würde das in vielen kleinen Anlagen wie Autos oder Heizungen freigesetzte CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben; aber immerhin können die CO<sub>2</sub>-Emissionen um insgesamt 50 Prozent gesenkt werden. Zudem arbeitet die Forschung heute darauf hin, die Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Benzin, Diesel und Kerosin in Motoren und Turbinen deutlich zu senken. Die Hoffnung ist nicht unrealistisch, dass sich eines Tages aus Wasserstoff und Kohlendioxid Kraftstoffe gewinnen lassen, die weniger Schadstoffe emittieren als heutige erdölbasierte Kraftstoffe.

### ZWEI GROSSE VERBUNDPROJEKTE VON WISSENSCHAFT UND INDUSTRIE

Um flüssige Kraftstoffe aus regenerativem Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zu erzeugen und bereitzustellen, ist ein mehrstufiger Prozess notwendig (vgl. Abb. 2). Diesen Prozess zu analysieren und ihn in technischer wie in wirtschaftlicher Hinsicht zu optimieren, ist das Ziel aktueller Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik, der

Mitglied des Zentrums für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth ist. Die hiesigen Forschungsarbeiten sind in zwei große Verbundprojekte eingebettet, in denen Partner aus Wissenschaft und Industrie eng zusammenarbeiten:

- das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „Herstellung von Kraftstoffen aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O unter Nutzung regenerativer Energie“, an dem die Sunfire GmbH in Dresden als Koordinator sowie weitere Partner beteiligt sind, und
- die Helmholtz-Energie-Allianz „Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe – Speicher mit höchster Energiedichte“, in der die Universität Bayreuth mit der Universität Stuttgart sowie den dortigen DLR-Instituten für Verbrennungstechnik und Technische Thermodynamik kooperiert.

### DER CHEMISCHE GESAMTPROZESS

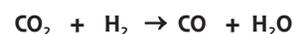
Das gesamte chemische Verfahren verläuft in drei Stufen (vgl. Abb. 2):

1. Der Prozess beginnt bei der elektrischen Energie, die zeitlich und/oder örtlich überschüssig von Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen erzeugt wird. Durch Wasserelektrolyse wird diese regenerative Energie zur Bereitstellung von Sauerstoff und Wasserstoff genutzt:



Der dabei anfallende hochreine Sauerstoff kann anderweitig genutzt werden, etwa in einem Oxyfuel-Kraftwerk. Hier wird zum Beispiel Erdgas mit Sauerstoff und nicht wie üblich mit Luft verbrannt. Nach der Kondensation des Wasserdampfes entsteht praktisch reines CO<sub>2</sub>, das u.a. in der folgenden zweiten Stufe eingesetzt werden könnte.

2. Danach wird CO<sub>2</sub> – das aus industriellen Abgasen (in ferner Zukunft vielleicht auch aus Luft) gewonnen wird – in Kohlenmonoxid (CO) überführt. Dabei kommt ein Teil des in der ersten Stufe erzeugten H<sub>2</sub> zum Einsatz:



Es handelt sich hierbei um die sogenannte reverse Wassergas-Shiftreaktion (RWGS). Das

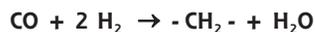
### AUTOR



Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess ist Leiter des Lehrstuhls für Chemische Verfahrenstechnik an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Bayreuth.

entstehende CO ist Bestandteil eines Synthesegases, einer Mischung aus CO, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>.

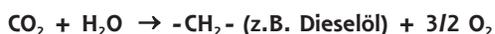
- Das Synthesegas wird schließlich an Eisen- oder Cobalt-Katalysatoren durch Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) in höhere Kohlenwasserstoffe umgesetzt:



„-CH<sub>2</sub>-“ steht in dieser Reaktionsgleichung für ein Kettenglied in langkettigen Kohlenwasserstoffen, wie beispielsweise Dieselöl. Aus der FTS können grundsätzlich sehr unterschiedliche Produkte hervorgehen: gasförmiges Methan, flüssiges Benzin, Dieselöl/Kerosin oder auch langkettige, bei Umgebungsbedingungen feste Wachse. Welche Produkte im Einzelfall tatsächlich entstehen, kann durch die Wahl von Temperatur, Druck sowie des Katalysators gesteuert werden. Die Wachse lassen sich durch Hydrocracken in flüssige Kraftstoffe mit einer gewünschten Kettenlänge überführen. Die Herausforderung besteht darin, mithilfe der FTS einen flüssigen Kraftstoff zu entwickeln, der für die Nutzung als Energiespeicher optimal geeignet ist.

Die Fischer-Tropsch-Synthese ist schon seit den 1920er Jahren bekannt und wurde im Zweiten Weltkrieg in Deutschland in großem Umfang auf der Basis von Kohle genutzt – was nicht nur historisch betrachtet die schmutzigste Art ist, diesen Prozess zu nutzen. Heutzutage wird die FTS großtechnisch auf der Basis von kohle- oder erdgasstämmigem Synthesegas in Südafrika, Katar und Malaysia durchgeführt. Die Koppelung mit einer vorgeschalteten RWGS (siehe Stufe 2) ist aber völlig neuartig.

In Summe ergibt sich aus den drei Prozessstufen die Gesamtreaktion



Diese Gesamtreaktion hat eine Analogie in der Natur: Auch bei der Photosynthese werden als Synthesebausteine Kohlendioxid und Wasser eingesetzt:



Hierbei allerdings ist Zucker – neben Sauerstoff – das Zielprodukt, und nicht wie im hier vorgestellten Konzept Kohlenwasserstoffe.

## FORSCHUNGSZIELE AN DER UNIVERSITÄT BAYREUTH

Die Forschungsaktivitäten des Lehrstuhls für Chemische Verfahrenstechnik konzentrieren sich innerhalb des beschriebenen Gesamtverfahrens auf folgende Ziele:

- Identifikation geeigneter Katalysatoren für die Syntheseverfahren RWGS und FTS
- Bestimmung der kinetischen Basisdaten dieser Reaktionssysteme
- Reaktorsimulation bzw. -auslegung der untersuchten Prozesse

Abbildung 3 bietet einen Eindruck von einer der am Lehrstuhl betriebenen Laboranlagen, die der Erzeugung von Dieselöl aus Kohlendioxid und Wasserstoff dient. Erste Berechnungsergebnisse, denen die bisher durchgeführten Experimente und die hierauf aufbauende Modellierung der Prozessschritte zugrunde liegen, zeigt Tabelle 2. Demnach könnte ein großtechnischer Fischer-Tropsch-Reaktor mit einem Durchmesser von etwa 6 Metern und einer Länge von 15 Metern den gesamten Primärenergiebedarf zur Deckung des Strom-, Wärme- und Kraftstoffbedarfs von 20.000 „Durchschnittsdeutschen“ decken; für die Stadt Bayreuth würden also etwa vier Reaktoren ausreichen.



Abb. 3: Laboranlage am Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik zur Erzeugung von Dieselöl aus Kohlendioxid und Wasserstoff.

Tabelle 2: Modellierung eines technischen Fischer-Tropsch-Reaktors (Basisdaten).

	Cobalt-Katalysator	Eisen-Katalysator
Einsatzmenge CO <sub>2</sub>	128 Mio. m <sup>3</sup> /Jahr	
Einsatzmenge H <sub>2</sub>	384 Mio. m <sup>3</sup> /Jahr	380 Mio. m <sup>3</sup> /Jahr
Gesamtdruck	30 bar	
Reaktorlänge	15 m	
Reaktordurchmesser	6,2 m	5,2 m
Einzelrohrdurchmesser (Rohrzahl)	3 cm (8.000)	6 cm (2.630)
Katalysatormasse	54 Tonnen	78 Tonnen
Produktion höherer Kohlenwasserstoffe (flüssiger Kraftstoffe)	75.720 Tonnen/Jahr (= Primärenergiebedarf von 20.000 Deutschen)	

## LITERATURHINWEISE

- P. Kaiser, R. Unde, C. Kern, A. Jess: Production of liquid hydrocarbons with CO<sub>2</sub> as carbon source based on reverse water-gas shift and Fischer-Tropsch synthesis. Chem. Ing. Techn. 85 (2013), 489 - 499.
- C. Kern, P. Kaiser, R. Unde, C. von Olshausen, A. Jess: Considerations concerning the energy demand and mix for global welfare and stable ecosystems. Chem. Ing. Techn. 83 (2011), 1777 - 1791
- P. Kaiser, A. Jess: Modeling of technical multi-tubular reactors for iron and cobalt catalyzed Fischer-Tropsch syntheses for application in a power-to-liquid process. Energy Technology 2 (2014), 486 - 497.



■ ARTHUR G. PEETERS

# Kontrollierte Kernfusion

EINE VIELVERSPRECHENDE ENERGIEQUELLE UND EIN SPANNENDES FORSCHUNGSGEBIET

■ Blick in das Plasmagefäß der Fusionsanlage ASDEX Upgrade am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching. In der Großanlage ASDEX Upgrade werden die Bedingungen untersucht, die in einem viele Millionen Grad heißen ionisierten Gas, einem Plasma, Fusionsreaktionen möglich machen (Foto: IPP).

Unsere Sonne erzeugt ihre Energie durch Fusionsreaktionen, in denen leichtere Atomkerne wie Wasserstoff sich zu schwereren Atomkernen wie Helium verbinden. Wären wir in der Lage, diese Reaktionen auf der Erde kontrolliert und sicher zu erzeugen, stünde uns eine fast unendliche Energiequelle zur Verfügung. Die Bedingungen einer erfolgreichen Fusionsreaktion sind allerdings extrem: Der Brennstoff muss eine Temperatur von mehreren zehn Millionen Grad Celsius und eine Dichte von  $10^{20}$  Teilchen pro Kubikmetern aufweisen. Seit langem schon versucht die Forschung, diese Bedingungen zu realisieren – mit beeindruckenden Fortschritten, aber bislang ohne bahnbrechenden Erfolg.

### HEISSES PLASMA IM TOKAMAK

Bei einer derart hohen Temperatur des Brennstoffs sind die negativ geladenen Elektronen nicht mehr an die positiv geladenen Kerne gebunden. Man spricht von einem Plasma-Zustand. Ein zentrale Herausforderung für die Fusionsforschung besteht darin, das Plasma räumlich einzuschließen. Dies ist möglich durch die Nutzung von Magnetfeldern. In der ausgeklügelten Geometrie des sogenannten Tokamak hat das Plasma die Form eines Donuts. Elektronen und Kerne folgen hier einem Magnetfeld, das sich helikal um den Donut wickelt. Auf diese Weise wird ein ständiger Abstand zwischen dem Brennstoff und der Innenwand des Tokamak erzeugt.

Tokamak stellen zur Zeit das erfolgreichste Konzept in der Fusionsforschung dar. Im Jahr 2007 hat das internationale Forschungsprojekt ITER im Süden von Frankreich mit dem Aufbau des weltweit größten experimentellen Kernfusionsreaktors begonnen. ITER verfolgt das Ziel, den Übergang von experimentellen Untersuchungen in der

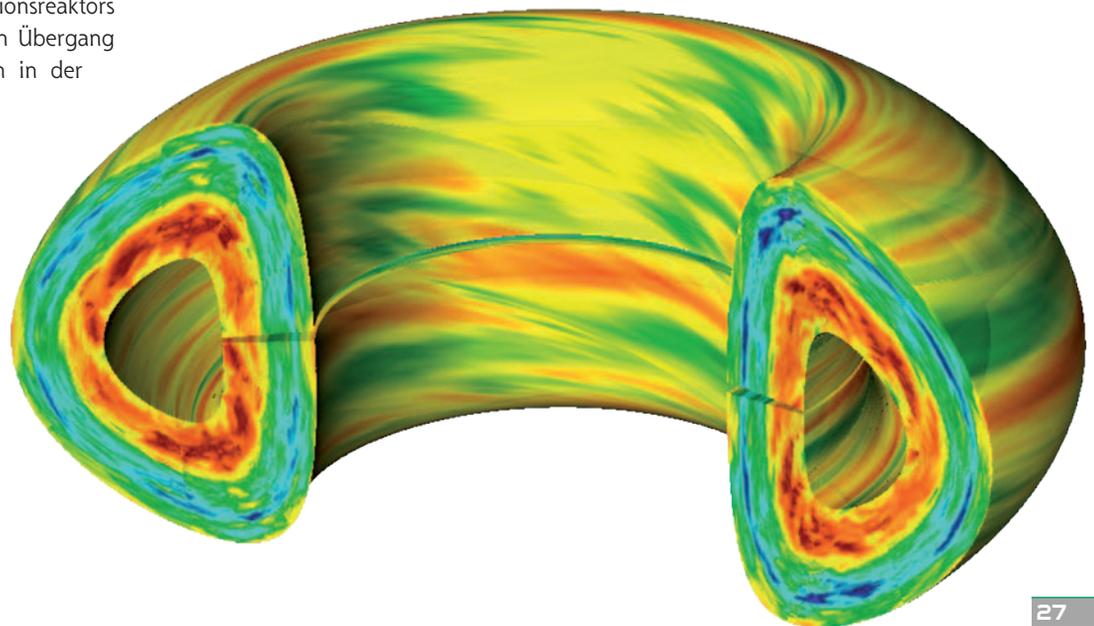
Plasmaphysik zur Stromerzeugung durch Fusionskraftwerke endlich zu realisieren. Angestrebt wird eine Fusionsleistung von 500 Megawatt – zehnmal soviel Energie, wie für die Plasmaheizung notwendig ist. Das Projekt wird finanziert von der Europäischen Union, China, Indien, Japan, Russland, Südkorea und den Vereinigten Staaten.

### TURBULENTE WIRBELSTRÖME SCHWÄCHEN DIE REAKTORLEISTUNG

Das Plasma in einem Tokamak ist aber nicht absolut stabil. Große Temperaturunterschiede zwischen dem Zentrum, wo die Fusionsreaktionen das Plasma heizen, und dem Plasmarand treiben Turbulenzen an (Abb. 1). Die dadurch erzeugten Wirbelströme transportieren Wärme vom Zentrum zum Rand und kühlen somit das Plasma-Zentrum. Wenn aber die Temperatur im Zentrum fällt, bedeutet dies wiederum eine Abnahme der Fusionsreaktionen und damit der erbrachten Leistung. Eine ausreichend hohe Temperatur im Zentrum ist nur gewährleistet, wenn der Fusionsreaktor relativ groß ist. ITER, zum Beispiel, hat ein Plasmavolumen von  $700 \text{ m}^3$  bei einer Magnetfeldstärke von 5,3 Tesla. Der Bau von Reaktoren in einer derartigen Größenordnung bringt aber wiederum andere Probleme mit sich, insbesondere hohe Kosten und eine hohe Wärmebelastung auf der Plasmawand.

Forschungsarbeiten, die zu einem tieferen Verständnis der Plasma-Turbulenz führen, können vor diesem Hintergrund einen wesentlichen Beitrag zur Fusionsforschung leisten:

Abb. 1: Grafische Darstellung auf der Basis einer numerischen Rechnung. Gezeigt ist ein Teil des Donut-förmigen Plasmas im Tokamak zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Farbe deutet das elektrostatische Potenzial an. Positive Potenziale sind rot, negative Potenziale blau dargestellt. Turbulente Wirbelströmungen gibt es entlang von Flächen mit konstantem Potenzial. Die helikale Struktur, die auf der Außenfläche zu beobachten ist, wird durch das helikale Magnetfeld verursacht.



AUTOR



Prof. Dr. Arthur G. Peeters ist Inhaber einer von der VolkswagenStiftung geförderten Lichtenberg-Professur und leitet den Lehrstuhl Theoretische Physik V an der Universität Bayreuth.

Abb. 2: Schnitt durch den Reaktor des ITER. Rechts unten eine Person (CC-BY-SA-2.0-FR).



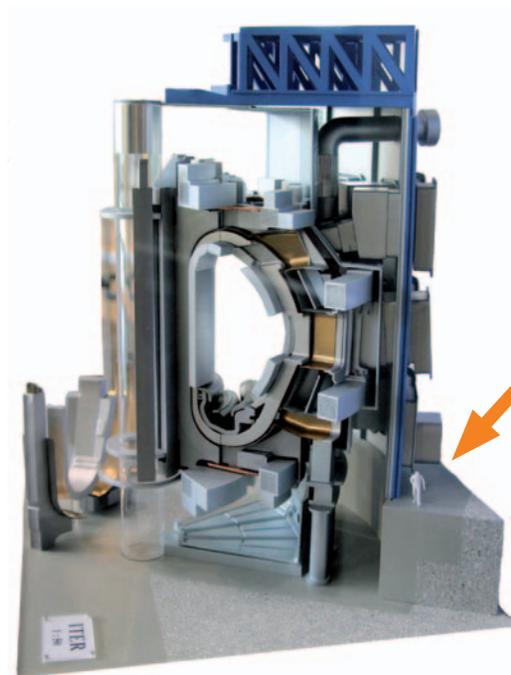
Beteiligte Nationen am Forschungsprojekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

- Ließe sich der turbulente Wärmetransport unterdrücken oder verringern, würde dies den Bau und Betrieb von Fusionsreaktoren im Prinzip billiger und einfacher machen.
- Die Entwurfs-, Aufbau- und Experiment-Phasen eines Reaktors dauern sehr lange; bei ITER belaufen sie sich insgesamt auf mehr als 30 Jahre. Daher ist es nicht möglich, verschiedene alternative Entwürfe eines Reaktors experimentell zu untersuchen. Zuverlässige theoretische Vorhersagen können daher bei der Entwicklung eines Reaktors eine wertvolle Unterstützung sein.

Der Weg zu einem solchen Verständnis führt allerdings über eine Reihe hoher wissenschaftlicher Hürden. Denn bei der Turbulenz handelt es sich um einen stark nicht-linearen Prozess, was ihre analytische Beschreibung erheblich erschwert. Eine weitere Komplikation ergibt sich daraus, dass die Teilchen im Plasma elektrisch geladen sind; ihre Beschreibung muss deswegen auch die Erzeugung elektromagnetischer Felder berücksichtigen. Schließlich wird die Beschreibung dadurch behindert, dass die Teilchen im Fusionsreaktor relativ selten aneinander stoßen.

### NEUE ERKENNTNISSE DURCH NUMERISCHE SIMULATIONEN

In der Physik, aber auch in den Ingenieurwissenschaften, der Chemie und der Biologie entwickeln sich numerische Simulationen mehr und mehr zu einem Forschungsinstrument, das eigenständig neben den klassischen experimentellen und ana-



lytischen Methoden zum Einsatz kommt. Numerische Simulationen werden auch an der Universität Bayreuth am Lehrstuhl für Plasmaphysik angewendet, wenn es um theoretische Beschreibungen von Plasmaturbulenzen geht. In Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching, der Université de Provence Aix-Marseille sowie der University of Warwick und dem Culham Centre for Fusion Energy in Großbritannien wurde ein Computercode zur Beschreibung von Plasmaturbulenz entwickelt. Dieser Code integriert eine fünfdimensionale Differentialgleichung in der Zeit (drei Dimensionen in Raum und zwei im Geschwindigkeitsraum). Das numerische Problem ist von einer Größe, die es erfordert, dass Tausende von

## Plasmaphysikalische Forschung an der Universität Bayreuth

Im Jahr 2010 hat die Universität Bayreuth einen neuen Lehrstuhl in der Theoretischen Physik für die Erforschung von Hochtemperatur-Plasmen eingerichtet. Der Lehrstuhl wird von der VolkswagenStiftung durch eine Lichtenberg-Professur für Prof. Dr. Arthur G. Peeters und vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) gefördert. Die engagierte Zusammenarbeit kommt auch darin zum Ausdruck, dass PD Dr. Wolfgang Suttrop vom IPP in die Lehre auf dem Bayreuther Campus einbezogen ist.

Die Forschungsarbeiten des Lehrstuhls verbinden und stärken zwei Profildfelder der Universität Bayreuth: „Nichtlineare Dynamik“ sowie „Energieforschung und Energietechnologie“. Über die intensive Zusammenarbeit mit dem IPP hinaus kooperiert die plasmaphysikalische Forschung in Bayreuth vor allem mit dem Culham Centre for Fusion Energy (CCFE) in Culham/Großbritannien, der Université de Provence Aix-Marseille und der Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l’Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile (ENEA) in Mailand.

Prozessoren parallel arbeiten – was erfolgreich geschieht (Abb. 3). Berechnungen werden auf dem in Bayreuth neu installierten Computercluster, aber auch auf dem Helios-Supercomputer in Japan durchgeführt.

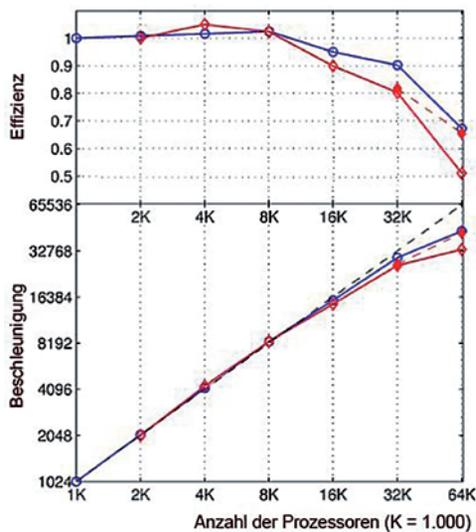


Abb. 3: Effizienz und Beschleunigung der Simulationsrechnungen hängen von der Anzahl der Prozessoren ab ( $K = 1.000$ ). Im Idealfall ist die Effizienz = 1. Dies entspricht einer Beschleunigung der Simulation proportional zur Anzahl der Prozessoren (gestrichelte Linie).

### BAYREUTHER FORSCHUNGSERGEBNISSE ZUR SPONTANEN ROTATION

Im Zusammenhang mit diesen Forschungsarbeiten ist an der Universität Bayreuth erstmals eine theoretische Beschreibung der spontanen Plasmarotation gelungen. Es handelt sich dabei um eine Rotation, die das Plasma ohne externes Drehmoment entwickelt. Dies geschieht durch eine komplizierte Kopplung von Wärme- und Impulstransport, die dazu führen kann, dass sich der Drehimpuls des Plasmas ändert, wenn Wärme nach außen transportiert wird. Die spontane Rotation ist beim Fusionsreaktor von besonderem Interesse. Denn eine gescherte Plasmarotation kann die turbulenten Wirbel auseinanderreißen und die Turbulenz zumindest teilweise unterdrücken.

Forschungen an der Universität Bayreuth haben gezeigt, dass die spontane Rotation eng mit einer Symmetriebrechung in den zugrunde liegenden Gleichungen verbunden ist. Aufgrund dieser Entdeckung lassen sich die Mechanismen identifizieren, die die spontane Rotation antreiben können.

## Hochleistungsrechner auf dem Bayreuther Campus



Der Bayreuther Linux-Cluster gehörte bei seiner Inbetriebnahme im Juli 2013 zu den 500 größten und leistungstärksten Rechnern der Welt. Im neuen Gebäude NW III der Universität Bayreuth sind 425 Einzelrechner dieses Verbunds zusammengeschaltet, jeder dieser Rechner hat 2 Prozessoren mit 12 Rechenwerken (Cores). Von der Philosophie bis zur Physik reicht das Spektrum der wissenschaftlichen Disziplinen, die die vielfältigen Möglichkeiten dieses Rechners für Forschungsarbeiten nutzen. Insbesondere ist der Cluster eine unentbehrliche Voraussetzung für die Erforschung von Hochtemperatur-Plasmen.

Einige dieser Mechanismen sind in Bayreuth bereits im Detail untersucht worden, sowohl analytisch als auch numerisch. Die numerischen Rechnungen unterstützen die Annahme, dass in einem Reaktor eine endliche moderate toroidale Plasmarotation stattfindet.

### GEZIELTE BEEINFLUSSUNG DER ROTATIONSGESCHWINDIGKEIT

Zudem ist durch Bayreuther Forschungsarbeiten die Möglichkeit nachgewiesen worden, die Rotationsgeschwindigkeit und damit die Turbulenz gezielt zu beeinflussen. Es ist zur Zeit unklar, ob und wie ein solcher Effekt beim Betrieb eines Fusionsreaktors ausgenutzt werden kann. Aber Forschungsergebnisse wie diese sind kleine Fortschritte auf einem langen Weg, der eines Tages – vielleicht – zu einer Energiegewinnung durch kontrollierte Kernfusion führt.

■ MARK-M. BAKRAN  
GERHARD FISCHERAUER

# Stromnetze in Zeiten der Energiewende

NEUE HERAUSFORDERUNGEN  
BEI DER ENERGIEÜBERTRAGUNG  
ÜBER GROSSE ENTFERNUNGEN

■ Tonnenmast für zwei Drehspannungssysteme. Die Isolatoren (links im Bild) haben die Aufgabe, die Hochspannung vom geerdeten Mast zu isolieren (sst).



Seit einigen Jahren bewegt kaum ein anderes Thema die Öffentlichkeit so stark wie die Zukunft der elektrischen Energieversorgung. Das Gebiet war früher von fachlichen Aspekten geprägt, wenn man einmal von den freilich harten Auseinandersetzungen um die Kernkraft absieht. Neuerdings aber ist die Diskussion ideologisch aufgeladen. Der Strom aus der Steckdose soll wie bisher unterbrechungsfrei verfügbar sein, darf aber nur noch aus „guten“, weil regenerativen Quellen stammen. Diese verlieren ihrerseits allerdings schnell an Akzeptanz, wenn sie mit Einrichtungen vor der eigenen Haustür verbunden sind (Windkraftanlagen, Übertragungsleitungen) oder landwirtschaftliche Flächen verbrauchen (Biogas) oder den Strom verteuern (Photovoltaik).

Das Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth richtet seinen Blick auf die technischen Fragen, die Energieerzeuger und -verteiler heute in Deutschland lösen müssen, um eine konsensfähige Energieversorgung sicherzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Steigerung der Leistungsfähigkeit auch eine demokratisierende Wirkung hat, wie schon der folgende Vergleich zeigt: Im Jahr 1900 musste ein Arbeiter das Doppelte eines Stundenlohns für eine Kilowattstunde elektrischer Energie aufbringen; diese kostet heute rund 0,30 Euro und damit nur 3,5 Prozent des soeben eingeführten gesetzlichen Mindeststundenlohnes von 8,50 Euro.

## STROMNETZE FRÜHER UND HEUTE

Bis vor kurzem basierte das Stromnetz auf der Philosophie, dass einige wenige Kraftwerke Strom erzeugen und dieser zu vielen kleinen Verbrauchern hin geführt wird. Die Organisation des Energieflusses weg von den Kraftwerken und hin zu den Verbrauchern war insofern übersichtlich, als man direkt an den Generatoren im Kraftwerk merkte, wenn der Stromverbrauch ab- oder zunahm. Mehr Last für die Generatoren bedeutete etwa, dass deren Rotoren anfangen, sich langsamer zu drehen. Das damit einhergehende Absinken der Netzfrequenz gegenüber dem Nominalwert von 50 Hz war das Signal dafür, die Generatoren stärker anzutreiben. Hinzu kam noch der Vorteil der Massenträgheit: Die rotierenden Massen in den Generatoren änderten ihre Drehzahl nur langsam und wirkten damit frequenzstabilisierend im Stromnetz.

„IM JAHR 1900 MUSSTE EIN ARBEITER DAS DOPPELTE EINES STUNDENLOHNS FÜR EINE KILOWATTSTUNDE ELEKTRISCHER ENERGIE AUFBRINGEN; DIESE KOSTET HEUTE NUR 3,5 PROZENT DES GESETZLICHEN MINDESTSTUNDENLOHNES.“

Nach der neuen Konzeption der Energieerzeugung fallen Kraftwerke und damit rotierende Massen weg. Stattdessen wird Energie an vielen Punkten aus untergeordneten Spannungsebenen eingespeist. Wenn das Energienetz auf diese Weise dezentralisiert wird, greifen die etablierten Methoden zur Stabilisierung des Netzes und der Netzqualität nicht mehr. Was passiert, wenn viele dezentrale und voneinander unabhängige Beteiligte handeln, lässt sich unschwer am Verkehrswesen ablesen. Es kommt zu Überlastungen der Infrastruktur, Stockungen, Engpässen, Staus. Um ähnliche Unzulänglichkeiten bei der Stromversorgung zu vermeiden, bedarf es erheblicher konzentrierter Anstrengungen in Forschung und Entwicklung.

Diese Anstrengungen sind auch aus einem weiteren Grund geboten. Bisher waren die Kraftwerke relativ gleichmäßig über das Land verteilt. Dies gilt jedoch nicht mehr für regenerative Stromerzeuger, wie beispielsweise Windkraftanlagen: Der Wind weht im Norden Deutschlands stärker als im Süden. Infolge der ungleichmäßigen Stromerzeugung müssen viel größere Mengen an Energie als früher übertragen werden.

## ENERGIEÜBERTRAGUNG MIT HOHEN SPANNUNGEN

Ein Grundprinzip bei der Energieübertragung lautet: Spannung, Spannung, Spannung. Je höher die Spannung, umso weniger Strom fließt durch die Überlandleitung, und umso geringer sind die Verluste durch Aufheizen dieser Leitung. Da Gleichspannungen nie verschwinden, während Wechselspannungen sinusförmig sind und daher in regelmäßigen Abständen zu Null werden, sind Gleichspannungssysteme die sachlich bessere Lösung. In der Tat zieht man ausschließlich Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) in Betracht, wenn große Mengen elektrischer Energie über weite Strecken übertragen werden sollen – beispielsweise aus der Sahara nach Europa oder auch von Nord- nach Süddeutschland.

## AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischer-auer ist Inhaber des Lehrstuhls für Mess- und Regeltechnik an der Universität Bayreuth.



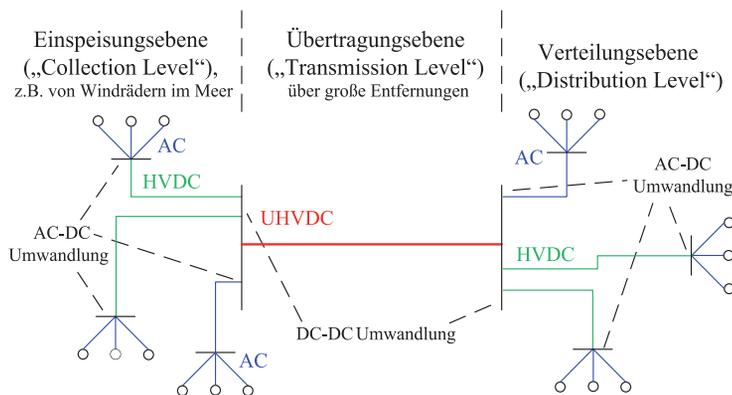
Prof. Dr.-Ing. Mark-M. Bakran ist Inhaber des Lehrstuhls für Mechatronik an der Universität Bayreuth.

Das ZET befasst sich in diesem Zusammenhang unter anderem mit der Frage: Wie wirkt es sich auf die Stabilität des vermaschten – also aus verschiedenen Netzknoten bestehenden – Übertragungsnetzes aus, wenn eine HGÜ-Strecke in ein bestehendes Höchstspannungsnetz integriert wird? Aus regelungstechnischer Sicht besteht die Aufgabe darin, die Netzstabilität auch bei Störungen sicherzustellen und die verfügbaren Leitungskapazitäten jeweils bestmöglich zu nutzen. Eine entscheidende Rolle spielen dabei rechnergestützte Simulationen. Denn wie sich ein Fehlerzustand im laufenden Netz auswirkt, kann verständlicherweise nicht im Experiment untersucht werden. Die Software- und Hardware-Ausstattung des ZET macht es möglich, auch sehr komplexe Energiesysteme und andere Systeme zu simulieren. Auf dieser Basis wird aktuell untersucht, wie sich das Betriebsverhalten eines künftigen Energieübertragungsnetzes verbessern lassen könnte.

### EIN ZUKÜNFTIGES GLEICHSPANNUNGSNETZ FÜR EUROPA

Weil die Übertragung von elektrischer Energie mit Gleichstrom sowohl effizienter als auch besser steuerbar ist, gilt ein zukünftiges Gleichstromnetz über Europa als ideales Mittel für eine Verteilung der erzeugten elektrischen Energie. Denn die energetisch und ökonomisch sinnvollste Verwendung der Energie besteht grundsätzlich darin, sie genau den Verbrauchern zur Verfügung zu stellen, die gerade Bedarf haben. Daraus ergibt sich die Vision eines europäischen Gleichspannungs-Supergrids. Über Europa gespannt, ermöglicht ein solches Supergrid, dass jeweils die am effektivsten erzeugte Energie ihren Weg zu den Verbrauchern findet.

Abb. 1: Übertragung von Offshore-Windenergie über verschiedene Gleichspannungsebenen.



AC Wechselstrom  
DC Gleichstrom  
HVDC Hochspannungs-Gleichstromübertragung  
UHVDC Ultra-Hochspannungs-Gleichstromübertragung

Eine Vorstufe zum Supergrid ist die in Abb. 1 gezeigte Energieübertragung über verschiedene Gleichspannungsebenen. So wird aktuell als Spannungsebene im Offshore-Bereich typischerweise eine Spannung von 320 kV (Kilovolt) verwendet. Für die höheren Leistungen über Land wird hingegen die Ebene von 500 kV (jeweils Gleichspannung) angestrebt.

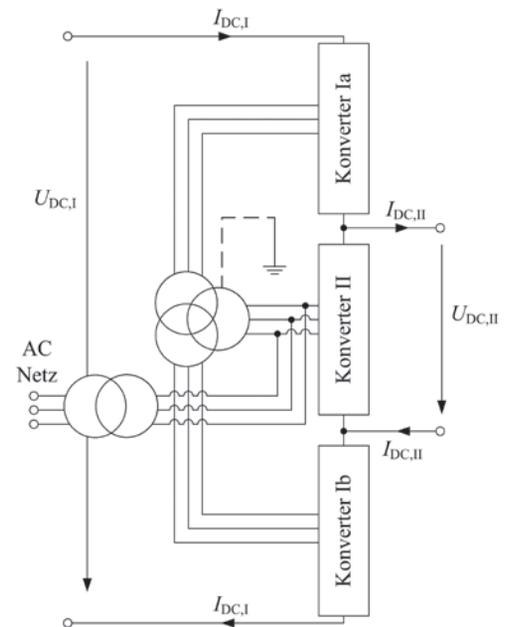


Abb. 2: Effiziente Umformung von Energie zwischen Gleichspannungsebenen mit Hilfe einer an der Universität Bayreuth neu entwickelten Schaltungstopologie.

Daher benötigt das Übertragungsnetz der Zukunft neue Komponenten, die imstande sind, die Leistung zwischen verschiedenen Gleichspannungsebenen zu wandeln. Forschungsarbeiten am ZET richten sich daher auf eine spezielle Leistungselektronik, welche diese Umformung leisten kann. Die in Abbildung 2 dargestellte Schaltung ist in der Lage, die Leistung zwischen zwei Gleichspannungsnetzen und einem Wechselspannungsnetz auszutauschen – und zwar mit einer Effizienz, die doppelt so hoch ist wie der gegenwärtige Stand der Technik.

### ELEKTRISCHER LEISTUNGSFLUSS BRAUCHT STEUERBARKEIT

Die starken regionalen Verschiebungen in der Energieerzeugung haben dazu geführt, dass neue Leistungsflüsse im heutigen Netz entstehen. Ein

plakatives Beispiel ist die Überlastung des polnischen Netzes. Denn wenn im Norden Deutschlands Windenergie eingespeist wird, führt der daraus resultierende Leistungsfluss nach Süden eben auch über Polen. Auch hier bietet die Forschung neue technische Lösungen, welche derzeit am ZET untersucht werden.

Mit Hilfe spezieller Schaltungen, wie schematisch in Abbildung 3 dargestellt, kann der Leistungsfluss nach Wunsch eingestellt werden. Es ist dann immer für eine optimale Nutzung der Leitungskapazitäten gesorgt. Auch hierfür werden neue Technologien benötigt, die beste Effizienz mit hoher Verfügbarkeit und maximaler Kontrolle kombinieren.

### LEISTUNGSELEKTRONIK ALS GRUNDBAUSTEIN DER MODERNEN ENERGIEÜBERTRAGUNG

Damit ist deutlich geworden: Die Übertragung mit Gleichstrom sowie die Steuerbarkeit sind Schlüsselthemen der zukünftigen Energieverteilung. Die dazu benötigten Stellglieder verwenden Leistungshalbleiter, welche Spannungen von bis zu 6.500 Volt bei Strömen bis zu 1.000 Ampere aushalten müssen. Dazu ist es erforderlich, hohe Spannungen auf wenigen Mikrometern Länge zu sperren

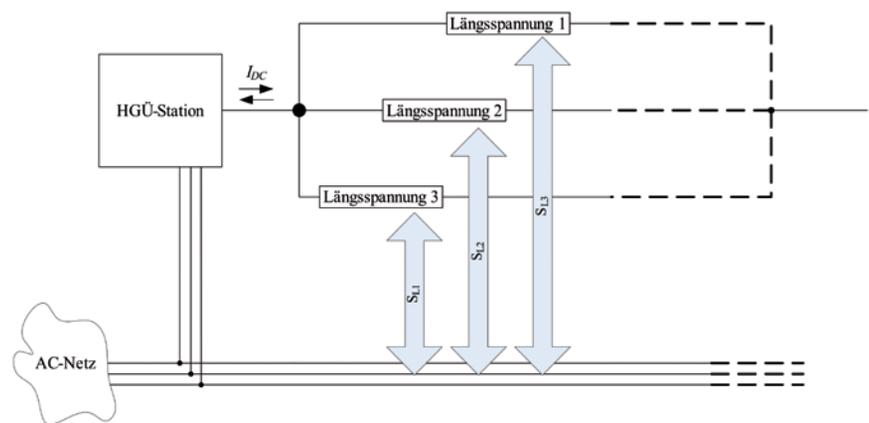


Abb. 3: Steuerung des Leistungsflusses in einem künftigen vermaschten Gleichspannungsnetz.

und gleichzeitig hohe Ströme über wenige Quadratmillimeter Querschnitt zu führen. Diese Halbleiter werden in besonderen Schaltungen und bei herausfordernden Umgebungsbedingungen – wie zum Beispiel bei hohen Temperaturen – eingesetzt. Ziel ist es hier, durch besonders schnelle Schaltvorgänge die Effizienz zu maximieren. Das ZET ist an dieser technischen Entwicklung aktiv mitbeteiligt, denn hier wird die optimale Leistungsausnutzung von Halbleitern und die Optimierung der Einsatzbedingungen untersucht. Ein speziell entwickelter Teststand (Abb. 4) erlaubt dabei die künstliche Erzeugung der entsprechenden thermischen und elektrischen Belastungen für die Halbleiter.



Abb 4: Steuerstand eines Testgerätes für Hochleistungshalbleiter am Zentrum für Energietechnik (ZET).



■ JÖRG GUNDEL  
RAPHAEL POMPL

# Wettbewerb im Energiesektor durch Regulierung der Energienetze

EUROPÄISCHE ERFOLGSGESCHICHTE UND BLEIBENDE HERAUSFORDERUNG

■ Das Satellitenbild lässt erkennen, wie sich die Regionen Europas hinsichtlich ihres Stromverbrauchs unterscheiden (sst).

## NETZREGULIERUNG IM ENERGIESEKTOR: EINE NOTWENDIGKEIT

**E**nergienetze sind sogenannte „natürliche Monopole“. Ihre Vervielfachung ist zwar rechtlich zulässig und möglich, doch die Errichtung solcher Parallelstrukturen ist volkswirtschaftlich und ökologisch nicht sinnvoll. Anders als in den Bereichen Post und Telekommunikation, in denen in der Vergangenheit gesetzliche Monopole bestanden, waren die Energienetze nie durch solche gesetzliche Ausschließlichkeitsrechte abgesichert.

Der Netzbetreiber ist im Falle eines natürlichen Monopols in einer komfortablen Situation. Denn Nutzer wie Erzeuger sind auf seine Infrastruktur angewiesen – letztere allerdings nur, soweit unabhängige Erzeuger überhaupt existieren. Dieser Vorbehalt erscheint heute hypothetisch, nachdem bekanntermaßen eine Vielzahl von Anbietern auf den Strom- und Gasmärkten auch für Haushalts-Endkunden existieren. Noch vor 20 Jahren war dieser Vorbehalt in Deutschland ebenso wie in anderen EU-Mitgliedstaaten aber höchst real, weil eine freie Wahl des Versorgers ausgeschlossen war. Tatsächlich besteht die effektivste Form der Nutzung eines natürlichen Monopols im Netzsektor darin, dieses Netz nur für die Erbringung eigener Leistungen zu nutzen und Dritten den Netzzugang zu verweigern. Das natürliche Monopol dehnt sich dadurch auf den Erzeugungsbereich aus, obwohl die Erzeugung für sich betrachtet wettbewerblich stattfinden könnte.

An dieser Stelle setzt der Regulierungsgedanke an: Der Netzbetreiber als Inhaber des natürlichen Monopols wird verpflichtet, anderen Erzeugern Netzzugang in diskriminierungsfreier Weise und zu angemessenen Bedingungen zu gewähren:

- Die Vorgabe der Gleichbehandlung soll dabei ausschließen, dass die eigene Erzeugungssparte des Netzbetreibers beim Zugang bevorzugt wird.
- Die Forderung angemessener Entgelte soll der Entstehung von Monopolrenten vorbeugen – wobei diese Entgeltkontrolle eine schwierige Gratwanderung bedeutet. Denn auf der anderen Seite muss auch ein rentabler Netzbetrieb gewährleistet werden, der notwendige Maßnahmen der Netzpflege und des Netzausbaus ermöglicht.

Die damit skizzierte Aufgabenstellung macht deutlich, dass der Wettbewerb in Netzsektoren nicht

ohne zusätzliche Bürokratie zu haben ist. Gerade Deutschland hat zunächst versucht, die europäisch vorgegebene Öffnung der Energienetze ohne zusätzliche Behördenstrukturen zu verwirklichen. Das Experiment war aber von kurzer Dauer (1998 – 2005). Denn im Jahr 2005 wurde die Aufsicht über die Netzbetreiber schließlich doch – wiederum europäischen Vorgaben folgend – der Bundesnetzagentur übertragen, die ursprünglich nur für Post und Telekommunikation zuständig gewesen war.

## EUROPÄISCHES RECHT: TREIBER FÜR DEN NATIONALEN REGULIERUNGSRAHMEN

Wie damit bereits angedeutet, geht die heutige Wettbewerbs- und Regulierungsstruktur im deutschen Energiesektor zentral auf europäische Vorgaben und Impulse zurück: Tatsächlich bestanden in allen Mitgliedstaaten zunächst Versorgungsmonopole. Dabei lagen Netzbetrieb, Erzeugung und Versorgung in einer Hand. Nur die rechtliche Ausgestaltung und Absicherung variierte. Sie reichte vom gesetzlichen Monopol (Frankreich, Italien) bis zu einer kartellrechtlich abgesicherten Vertragskonstruktion auf Basis des natürlichen Netzmonopols (System der „geschlossenen Versorgungsgebiete“ in Deutschland).

Europarechtlich ist dieser Zustand erstaunlich lange unbehelligt geblieben, obwohl auf der Hand liegt, dass ein Nebeneinander nationaler Monopolversorger in deutlichem Kontrast zur Idee eines europäischen Binnenmarktes steht. Diese Diskrepanz ist dann aber bei den Arbeiten zur Vollendung des EU-Binnenmarktes zu Beginn der 1990er Jahre doch thematisiert worden. Allerdings konnten die bestehenden Strukturen noch längere Zeit mit dem Argument der Versorgungssicherheit verteidigt werden, bis dann in den Jahren 1996 (Strom) und 1998 (Gas) die erste Generation der Energie-Binnenmarkttrichtlinien eine zunächst beschränkte Marktöffnung – und damit zugleich eine Öffnung der Netze – vorgeben.

In deutsches Recht umgesetzt wurden die Vorgaben durch die Novellierung des noch aus dem Jahr 1935 stammenden – und danach weitgehend unverändert gebliebenen – Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) im Jahr 1998. Diese Umsetzung ging über die Vorgaben der EU-Richtlinien hinaus, indem eine vollständige Liberalisierung bis hin zur Herstellung von Wahlfreiheit für die Haushaltskunden vorgesehen wurde. In den meisten anderen

## AUTOREN



Prof. Dr. Jörg Gundel ist Inhaber des Lehrstuhls für Öffentliches Recht, Völker- und Europarecht sowie Geschäftsführender Direktor der Forschungsstelle für deutsches und europäisches Energierecht (FER) an der Universität Bayreuth.



Raphael Pompl, Wirtschaftsjurist (Univ. Bayreuth), ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Öffentliches Recht, Völker- und Europarecht.

Abb 1. Im Foyer der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Bayreuth.



**„DER ENERGIESEKTOR IST WESENTLICH STÄRKER ALS DIE MEISTEN ANDEREN INDUSTRIESEKTOREN DURCH WEICHENSTELLUNGEN DER NATIONALEN ENERGIEPOLITIK GEPRÄGT.“**

Ausgebaut wurden darüber hinaus die zuvor nur in Ansätzen bestehenden Entflechtungsvorgaben für Unternehmen, die zugleich in der Erzeugung und im Netzbetrieb aktiv sind („vertikal integrierte Energieversorger“). Diese Kombination, die sich als strukturelles Erbe aus der Zeit der Versorgungsmonopole ergab, birgt tatsächlich besondere Gefahren für den Wettbewerb. Denn der Netzbetreiber muss dabei stets in Versuchung geraten, seine eigene Erzeugungssparte beim Netzzugang zu bevorzugen. Zugleich enthielt dieses Paket erstmals Regelungen zum grenzüberschreitenden Energiehandel und zur Nutzung bzw. zum Ausbau der dafür notwendigen Infrastruktur. Dazu zählten insbesondere die sogenannten Grenzkuppelstellen, die die nationalen Netze verbinden und aufgrund der ursprünglich rein nationalen Ausrichtung dieser

EU-Mitgliedstaaten hingegen blieben die Haushaltskunden zunächst an ihren bisherigen Monopolversorger gebunden. Auf der anderen Seite war die Durchsetzung der Marktöffnung in Deutschland – wie schon erwähnt – sehr schwach ausgestaltet. Als einziger Mitgliedstaat hatte Deutschland auf eine Regulierungsbehörde verzichtet und stattdessen das Modell des sogenannten „verhandelten Netzzugangs“ gewählt. Diesem Modell zufolge sollten Netzbetreiber und Erzeuger die Zugangsbedingungen untereinander aushandeln.

Aus europäischer Sicht war diese beschränkte Öffnung allerdings nur eine Zwischenstation. Das im Sommer 2003 verabschiedete „Beschleunigungspaket“ aus zwei EU-Richtlinien und einer Verordnung hat die Spielregeln nochmals neu geordnet. Vorgeesehen war nun:

- Die vollständige Marktöffnung in allen Mitgliedstaaten bis spätestens 2007.
- Die verbindliche Einrichtung von Regulierungsbehörden zur Überwachung der Netzbetreiber, was bei der Umsetzung in Deutschland durch das Energiewirtschaftsgesetz 2005 zur bereits erwähnten Zuständigkeit der Bundesnetzagentur geführt hat.



Netze als Engpässe wirken. Die ersten EU-Richtlinien hatten die Tatsache, dass ein funktionierender Energiebinnenmarkt nicht rechtlich dekretiert werden kann, sondern auch auf einen physischen Unterbau angewiesen ist, noch weitgehend ignoriert.

Den (vorläufigen) Endpunkt des europäischen Liberalisierungsprozesses bildete schließlich das im Sommer 2009 ergangene dritte EU-Binnenmarktpaket, dessen Vorgaben im Zuge der EnWG-Novelle 2011 in deutsches Recht überführt wurden. Hierbei wurden die Entflechtungsvorgaben für vertikal integrierte Energieversorger nochmals verschärft. Zugleich wurde eine intensive Kooperation der europäischen Netzbetreiber und auch der Regulierungsbehörden vorgegeben. Diesem Zweck dient auch die mit diesem Paket gegründete EU-Agentur für die Zusammenarbeit der Energieregulierungsbehörden (ACER) mit Sitz in Ljubljana.

#### FORTBESTEHENDE HERAUSFORDERUNGEN

Wie im Titel des Beitrags angesprochen, kann diese Entwicklung als europäische Erfolgsgeschichte gelesen werden. In mehreren Etappen, aber insgesamt doch in recht kurzer Zeit ist es gelungen, einen traditionell vom Wettbewerb abgeschirmten Industriezweig in wettbewerbliche Strukturen zu überführen. Anders als zunächst befürchtet, hat die Versorgungssicherheit dabei nicht gelitten. Ungetrübt ist dieses Bild allerdings wiederum nicht: Die früheren Monopolisten sind (naturgemäß) nicht verschwunden, sondern nehmen als marktstarke Unternehmen am Wettbewerb teil. Daher stellt sich – wie in anderen früheren Monopolsektoren auch – eine wirkliche Anbietervielfalt nur schleppend ein. Die Effizienzgewinne durch die Überwachung der Netzbetreiber (die auf diese Weise keine Monopolrenditen erzielen können)



Abb. 2: Konferenzraum der Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER) in der slowenischen Hauptstadt Ljubljana (Foto: ACER).

sind zwar erheblich. Doch kommen sie kaum als Preissenkungen beim Endverbraucher an, weil sie durch steigende Kosten der Energieträger und vor allem durch eine steigende Abgabenbelastung (über-)kompensiert werden.

Eine bleibende Herausforderung ist zudem die Schaffung und Erhaltung einer zuverlässigen und leistungsstarken Energieinfrastruktur. Dazu gehört insbesondere der Ausbau der grenzüberschreitenden Transportnetze. Konsequenterweise wurde das Ziel der Interkonnektion, also der Verknüpfung der nationalen Energienetze, durch den Vertrag von Lissabon neben den anderen Zielen der europäischen Energiepolitik in der neuen Energie-Kompetenz der EU verankert (Art. 194 Abs. 1 lit. d) AEUV). Ferner wurde im Jahr 2013 die „Verordnung zu Leitlinien für die transeuropäische Energieinfrastruktur“, die sogenannte TEN-E-Verordnung, erlassen. Diese soll als neuer Rechtsrahmen für den grenzüberschreitenden Netzausbau dazu beitragen, den Energiebinnenmarkt zu vertiefen.

Die größte Gefährdung für den erreichten Stand des Energiebinnenmarktes und für eine wettbewerbliche Struktur dieses Sektors geht allerdings von der Tatsache aus, dass die politischen Weichenstellungen für die Wahl der Energieträger (der sogenannte „Energimix“) weiter jedenfalls faktisch in der Hand der Mitgliedstaaten liegen und die Grundpositionen dieser Staaten sich derzeit eher voneinander entfernen, als dass sie konvergieren.

So wird die deutsche Energiewende als nationales Projekt begriffen; die hierfür eingesetzten Steuerungsmechanismen wie Einspeisevorrang und gesetzliche Einspeisevergütung gelten nur für die nationale Produktion. Auch die in anderen Mitgliedstaaten getroffene Entscheidung, die Kern-

energie beizubehalten oder sogar auszubauen, trägt zum Auseinanderdriften der nationalen Rahmenbedingungen der Energieversorgung bei. Diese Unterschiede in den Rahmenbedingungen der einzelnen EU-Mitgliedstaaten können durch keine Netzregulierung ausgeglichen werden.

## FAZIT

Die Bilanz der europäisch geprägten Reform des Rechtsrahmens der Energieversorgung fällt damit gemischt aus: Auf der einen Seite ist es gelungen, die Energieversorgungsmonopole auf ihren „natürlichen Kern“ – eben das natürliche Monopol des Netzbetriebes – zurückzuführen. Auf der anderen Seite ist ein echter europäischer Binnenmarkt noch nicht entstanden, weil der Infrastrukturausbau mit der rechtlichen Entwicklung nicht Schritt gehalten hat. Vor allem aber ist der Energiesektor wesentlich stärker als die meisten anderen Industriesektoren durch Weichenstellungen der nationalen Energiepolitik geprägt. Gegenläufige Entscheidungen der Mitgliedstaaten in diesen Punkten lassen sich durch die europäische Netzregulierung nicht auffangen.

## LITERATURHINWEISE

- Jörg Gundel, Der Verbraucherschutz im Energiesektor zwischen Marktliberalisierung und Klimaschutzzielen, Gewerbearchiv 2012, 137 ff.;
- ders., Europäisches Energierecht, in: Danner/Theobald (Hrsg.), Energierecht-Kommentar, München (Loseblatt, 79. Erg.-Liefg. 2013).

## Forschungsstelle für deutsches und europäisches Energierecht

Weder der Lebensstandard noch die Industrieproduktion in Deutschland sind ohne eine dauerhaft gesicherte Energieversorgung zu halten. Die Energiewirtschaft bildet das Rückgrat jeder modernen Volkswirtschaft. Aber trotz seiner erheblichen wirtschaftlichen und gesellschaftspolitischen Bedeutung sind das deutsche und europäische Energierecht an deutschen Universitäten noch immer unterrepräsentiert. Um diese Lücke zu schließen, wurde an der Universität Bayreuth die Forschungsstelle für deutsches und europäisches Energierecht – kurz: FER – ins Leben gerufen. Sie vereint Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedlicher Rechtsdisziplinen, die sich bei ihrer Mitwirkung in der Forschungsstelle vor allem auf das Energierecht im engeren Sinne konzentrieren, also auf das Recht der leitungsgebundenen Energieversorgung mit Elektrizität und Gas.

Die Forschungsstelle will den Dialog zwischen Wissenschaft und Praxis über aktuelle energierechtliche Themen aktiv vorantreiben. Darin wird sie durch die engen Kontakte ihrer Mitglieder zu Unternehmen, Verbänden, Verwaltung und Politik unterstützt. Ein bewährtes Forum für diesen Dialog sind die „Energierechtstage“, die 2015 bereits zum sechsten Mal von der FER auf dem Bayreuther Campus veranstaltet werden. „Energieversorgung in Zeiten der Energiewende“ wird das Thema sein.

- [www.fer.uni-bayreuth.de](http://www.fer.uni-bayreuth.de)



DEUTSCHE BÖRSE

Mit uns

## RECHT & WIRTSCHAFT

■ KNUT WERNER LANGE



# Markt oder Staat?



DIE ENERGIEBRANCHE  
ZWISCHEN WETTBEWERB  
UND REGULIERUNG

■ Oben: Die Börse in Frankfurt am Main.  
■ Unten: Abstimmung im Deutschen Bundestag  
(Foto: © Deutscher Bundestag / Achim Melde).

**K**aum eine Branche sieht sich seit Jahren so raschen und tiefgreifenden Veränderungen ausgesetzt wie die Energiewirtschaft. Bürgerinnen und Bürger stellen sich ebenso häufig wie Unternehmen die Frage, warum der Energiesektor (Strom, Gas und Fernwärme) nicht ebenso wie die meisten anderen Wirtschaftszweige den allgemeinen rechtlichen Rahmenbedingungen einer Marktwirtschaft überlassen wird, sondern einer besonderen staatlichen Kontrolle unterliegen muss. Der Grund dafür liegt vor allem in zwei Besonderheiten des Energiesektors, die ihn von anderen Branchen unserer Volkswirtschaft unterscheiden:

- An erster Stelle ist die Gemeinwohlbezogenheit des Energiesektors zu nennen. Verbraucher und Industrie sind auf eine sichere, preisgünstige, effiziente und umweltverträgliche Energieversorgung zwingend angewiesen.
- Ferner ist die Leitungsgebundenheit des Energiesektors zu beachten. Da die Strom-, Fernwärme- und Gasversorgung aus technisch-physikalischen Gründen nur über eine Leitung erfolgen kann und eine Duplizierung solcher Leitungen nicht sinnvoll ist, erfolgt die Versorgung entgegen den grundsätzlichen Regeln der Marktwirtschaft auf effizienteste Weise in einem Monopol. Eine solche Monopolsituation schafft jedoch für den Monopolisten die Möglichkeit des Missbrauchs seiner marktbeherrschenden Stellung. Sie erfordert daher eine dauerhafte staatliche Aufsicht, die in Deutschland vor allem durch die Bundesnetzagentur und das Bundeskartellamt gewährleistet wird.

Vor diesem Hintergrund ist es verständlich, dass in der Bundesrepublik lange Zeit kartellrechtliche Sonderregelungen existierten. So waren früher beispielsweise Demarkations- und Konzessionsverträge zwischen Gemeinden und Versorgungsunternehmen vom Kartellverbot befreit, was zum sogenannten System der geschlossenen Versorgungsgebiete führte. Dieses Modell liegt heute noch der öffentlichen Wasserversorgung zugrunde, zumal die öffentlichen Wege und Straßen im Eigentum der jeweiligen Gemeinde stehen (Wegemonopol). Die Rechtfertigung solcher aufgeteilten Versorgungsgebiete, die erst durch die Energierechtsnovelle 1998 endgültig aufgehoben wurden, bestand in der Sicherstellung einer geregelten und preisgünstigen Energieversorgung.

## WACHSENDER STAATLICHER EINFLUSS

*Hat der alte Herrenmeister  
Sich doch einmal wegbegeben!  
Und nun sollen seine Geister  
Auch nach meinem Willen leben.*

Aufgrund umfassender Gesetzgebungspakete auf europäischer Ebene wurde in Deutschland nach der Jahrtausendwende das Energiewirtschaftsgesetz mehrfach grundlegend novelliert. Die von der Europäischen Kommission forcierte strikte Trennung von Erzeugung und Transport („unbundling“ oder „Entflechtung“) hat seither den staatlichen Einfluss auf den Energiemarkt deutlich anwachsen lassen. Zuständig für die Versorgungssicherheit mit Strom sind, anders als beispielsweise bei der Bahn, nicht länger die im Hinblick auf Transport und Erzeugung vertikal integrierten Energieversorgungsunternehmen alten Typs. Zuständig sind nur noch die „entflochtenen“ und ausschließlich für den Stromtransport verantwortlichen vier Übertragungsnetzbetreiber sowie die Verteilnetzbetreiber.

Abb. 1: Illustration zu „Der Zauberlehrling.“ Aus „Goethe's Werke“, 1882, Zeichnung von Ferdinand Barth (1842–1892). Zitate „Der Zauberlehrling“ aus: Goethes Werke. Vollständige Ausgabe letzter Hand. Erster Band. S. 217–220.



Alle diese Schritte des europäischen wie des nationalen Gesetzgebers sollten den Wettbewerb stimulieren, was teilweise auch gelungen ist. Die traditionelle Liberalisierungsaufgabe des diskriminierungsfreien Netzzugangs bzw. Netzanschlusses wird heute zumeist als Erfolgsgeschichte begriffen. Dies zeigt sich etwa daran, dass die Konsumenten seit einigen Jahren zwischen vielen Versorgern für Strom und Gas wählen können. Mit dem Wechsel von einer monopolistischen in eine vermehrt wettbewerblich geprägte Marktstruktur sind aber weitreichende staatliche Marktinterventionen notwendig geworden. Sie gehen deutlich über die klassische Regulierung hinaus, um insbesondere die Versorgungssicherheit weiterhin sicherstellen zu können und Anreize für Investitionen in die Netze zu gewährleisten.

### SORGE UM DIE NETZSTABILITÄT

*Seine Wort' und Werke  
Merkt' ich, und den Brauch,  
Und mit Geistesstärke  
Thu' ich Wunder auch.*

Die Liberalisierungsansätze wurden von der breiten Öffentlichkeit kaum zur Kenntnis genommen. Sie verbindet mit dem Begriff der Energiewende den Ausstieg aus der Atomkraft im Jahr 2011 als Reaktion auf die Reaktorkatastrophe im japanischen Fukushima. Diese politisch gewollte und von der großen Mehrheit der Bevölkerung bis heute unterstützte Neuausrichtung der deutschen Energiewirtschaft traf eine Branche, die sich – wie gezeigt – mitten in einer Phase des Umbruchs befand. Anders als das Aufbrechen der geschlossenen Versorgungsgebiete oder die „Entflechtung“ der vertikal integrierten großen Energieversorgungsunternehmen greift die zweite staatlich verordnete Energiewende in die Art und Weise ein, wie Energie in Deutschland erzeugt werden soll. Dieser Umbau hat den Charakter eines Paradigmenwechsels und löst seither den zuvor gültigen Liberalisierungs-Ansatz Schritt für Schritt ab.

Schon vor 2011 hatte sich der Energiesektor mit dem zunehmenden dezentralen Ausbau erneuerbarer Energien langsam aber stetig gewandelt. Der seit 2011/2012 begonnene massive Rückbau

der Stromerzeugung aus Kernenergie und der gleichzeitige enorme Zuwachs der regenerativen Erzeugung verlangt aber Veränderungen in einem vollkommen unbekanntem Maße und in einer atemberaubenden Geschwindigkeit. Bislang wurde der benötigte Strom vor allem in stets verfügbaren konventionellen Kraftwerken und in Atomreaktoren im Westen und Süden der Republik erzeugt, wo auch die bedeutsamen Nachfragezentren liegen. Künftig soll er jedoch fluktuierend durch Wind und Sonne dezentral hergestellt werden. Die Verlagerung der Erzeugungsschwerpunkte von Süd nach Nord (insbesondere Windstrom) verlangt erhebliche zusätzliche Investitionen in den Ausbau und die Verstärkung der bisherigen Übertragungsnetze, um den Stromtransport in die Verbrauchszentren im Westen und Süden Deutschlands zu gewährleisten. Die Sorge um die Netzstabilität ist mehr als begründet. Sie betrifft übrigens keineswegs nur die sogenannten Stromautobahnen. Auch die Verteilnetze sind längst an ihre Grenzen gestoßen. Denn sie waren für die Aufnahme der Stromerzeugung „vor Ort“ nie ausgelegt und müssen daher von uni- zu bidirektionalen Systemen weiterentwickelt werden.

### GEFAHREN FÜR DIE ÖFFENTLICHE AKZEPTANZ

*Herr, die Noth ist groß!  
Die ich rief, die Geister,  
Werd' ich nun nicht los.*

Immer häufiger zeigt sich, dass die zweite Energiewende zu viele Fehlerquellen aufweist, bei deren Beseitigung die Politik den Marktrealitäten und der technischen Entwicklung zunehmend hinterher hinkt. Eine auf Instrumente einer staatlichen Planwirtschaft zurückgreifende Politik droht bei dem Versuch zu scheitern, die Energieversorgungslandschaft in einem modernen Hochindustrialand neu zu ordnen. Während der Staat auf eine Regulierung von oben setzt, suchen immer mehr Privathaushalte und Industrieunternehmen ihr Heil in der Eigenversorgung. Sie werden zu sogenannten Prosumenten – nicht zuletzt, um ihre kontinuierlich steigenden Energiekosten in den Griff zu bekommen.

Industrieunternehmen wie Bürgerinnen und Bürger setzen also gleichermaßen auf die Mechanis-

### AUTOR



Prof. Dr. Knut Werner Lange ist Inhaber des Lehrstuhls für Bürgerliches Recht, deutsches und europäisches Handels- und Wirtschaftsrecht und stellvertretender Direktor der Forschungsstelle für deutsches und europäisches Energierecht (FER) an der Universität Bayreuth.

men eines staatlich subventionierten, also manipulierten Marktes. Weil aber nirgends exakte Vorstellungen darüber vorhanden sind, wie sich der Ausbau der fluktuierenden Erzeugung aus Wind und Sonne mengenmäßig und regional entwickelt, bekommt man staatlicherseits Probleme, den exakten Netzausbaubedarf für die kommenden Jahre zutreffend zu beschreiben. Vor diesem Hintergrund häufen sich rechtliche Fragestellungen und Schwierigkeiten. Das sogenannte Moratorium etwa, also die unmittelbare Stilllegung einiger Atomkraftwerke wenige Tage nach der Kernschmelze in Fukushima, war nach Ansicht des Bundesverwaltungsgerichts rechtswidrig. Daraus folgt die schlichte Erkenntnis: Wenn der Staat so radikal in eine Wirtschaft eingreift, wie es in der Energiebranche gegenwärtig geschieht, so muss dies mit der größtmöglichen Sorgfalt geschehen.

Infolge seiner marktfernen Steuerung der Energiewirtschaft („Strommarkt-Design“) drohen dem Staat zudem zwei Akteure abhanden zu kommen, auf deren Unterstützung er dringend angewiesen ist: die Bürgerinnen und Bürger sowie die Industrie. Unsere Gesellschaft läuft Gefahr, in eine Gruppe von Zahlmeistern, die ständig steigende Belastungen zu schultern haben (zum Beispiel Mieten), und eine wachsende Gruppe von Privilegierten zu zerfallen, die an der Energiewende verdienen (zum Beispiel durch den Betrieb von Photovoltaikanlagen im eigenen Haus). Der jüngste Streit um die Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes hat dies deutlich vor Augen geführt. Dennoch weicht die Politik der Frage nach der gerechten Finanzierung der Belastungen aus. Die Versorgungswirtschaft erkennt zwar den enormen Investitionsbedarf; ihr sind aber die Erträge weggebrochen, aus denen sie diese Investitionen hätte bezahlen können. Ihr Großkraftwerkspark ist zunehmend unrentabel geworden, und die Gewinne aus den



noch laufenden Kernkraftwerken werden mit der Brennelementesteuer teilweise abgeschöpft.

Wer aber das Zustandekommen freier Marktpreise verhindert, muss die Produktions- und Verteilungsentscheidungen nach anderen Kriterien treffen. Sind dies Zufall, Zwang oder gute Lobbyarbeit, nagt der Staatsinterventionismus an den ethischen Wurzeln unserer Wirtschaftsverfassung und droht, die Akzeptanz der Rechtsordnung insgesamt zu unterhöhlen. Zudem setzt der Staat die Ursache für die Wettbewerbsprobleme stromintensiver Industrien auf internationalen Märkten.

Energiewenden sind Herkulesaufgaben – Deutschland hat sich gleich zwei davon geleistet. Damit gehen eine Fülle von ungeklärten Problemen, offenen Fragen und rivalisierenden Lösungsansätzen einher. Die Rechtswissenschaft ist dazu aufgerufen, sich aktiv in die Debatte einzuschalten und ihren Beitrag zum Gelingen des Projektes zu leisten.

Abb. 2: Entwicklung der Strompreise für die mittelspannungsseitig versorgte Industrie in Deutschland mit einem Jahresverbrauch zwischen 160 und 20.000 MWh inklusive Stromsteuer (Index 1998 = 100).  
Quelle: Strompreisanalyse Juni 2014 des BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.



Abb. 3: Steigende Energiekosten stärken den Trend zur Eigenversorgung (sst).



ETHIK

■ RUDOLF SCHÜSSLER

# Gerechtigkeit in der Energie- versorgung

EINE ETHISCHE  
HERAUSFORDERUNG

■ Es besteht Konsens darüber, dass es bei der Energieversorgung gerecht zugehen sollte. Doch nach welchen Kriterien? (sst).

Die Energiewende in Deutschland weg vom Atomstrom und hin zu umweltverträglichen Energieträgern hat sich anspruchsvolle Ziele gesetzt. Sie will – idealer Weise – Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit, europäische Binnenmarktcompatibilität und soziale Gerechtigkeit vereinbaren. Weil man anfangs nur einen geringen Anstieg der Haushaltspreise für Strom erwartete, wurde das Ziel der sozialen Gerechtigkeit vergleichsweise wenig beachtet. Doch in den letzten Jahren sind die Haushaltspreise für Strom kräftig gestiegen. Dies geschah unter maßgeblicher Beteiligung der Energiepolitik, obwohl diese sicherlich nicht die einzige Ursache des Preisanstiegs darstellt. Die Ethikkommission für eine sichere Energieversorgung, die 2011 von der Bundeskanzlerin eingesetzt wurde, ging in ihren Erwägungen zunächst noch davon aus, der Umstieg auf erneuerbare Energien werde für Haushalte nicht mehr als 1,4 Cent pro Kilowattstunde zusätzliche Kosten verursachen. Doch die aktuelle EEG-Umlage liegt bereits bei 6,24 Cent pro Kilowattstunde – und das ist nicht der einzige energiepolitisch bedingte Preisaufschlag. Insgesamt sind inzwischen knapp über 50 Prozent des Haushaltspreises für Strom regulativ bedingt, 1998 waren es noch ungefähr 25 Prozent.<sup>1</sup>

Zu einem Problem der sozialen Gerechtigkeit werden die wachsenden Kosten der Energiepolitik vornehmlich dann, wenn sie regressiv wirken – d.h. wenn sie überproportional den weniger gut verdienenden Haushalten aufgebürdet werden oder solche Haushalte sogar überlasten. Für die Überlastung von Haushalten durch Energieausgaben steht in Industriestaaten der Begriff der Energiearmut. Regressive Kostenlast und Energiearmut werden inzwischen in zahlreichen Forschungsvorhaben untersucht. Dazu zählt insbesondere auch ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt mit dem Kurznamen „SoKo Energiewende“.

Der volle Name lautet „Sozialpolitische Konsequenzen der Energiewende in Deutschland“. Das Projekt hat eine Laufzeit von 2013 bis 2016 und ist Teil des Programms FONA (Forschung für Nachhaltigkeit). Es wird getragen von einem Konsortium aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Universitäten Bayreuth, Eichstätt-Ingolstadt, Heidelberg und Kassel, das vom Zen-



trum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) in Mannheim geleitet wird. Seitens der Universität Bayreuth ist der Lehrstuhl Philosophie II an dem Projekt beteiligt, insbesondere mit

- grundlegenden Überlegungen zu Fragen der sozialen Gerechtigkeit in Zusammenhang mit der Energiewende,
- konzeptuellen Analysen zu Indikatoren der Energiearmut sowie
- der Mitarbeit am Fragebogen für eine umfangliche Haushaltsbefragung.

Im folgenden sollen einige grundsätzliche Überlegungen aus diesem Forschungszusammenhang vorgestellt werden.

### ENERGIEWENDE UND SOZIALE GERECHTIGKEIT

Fragen sozialer Gerechtigkeit gestatten zumeist mehr als eine Antwort. Hinter ihnen verbirgt sich eine Vielfalt disparater Vorstellungen, die in der öffentlichen Arena vertreten werden. Aussicht auf Einigkeit besteht nur, wenn ein Begriffskern oder Begriffsverwendungen gefunden werden, hinsichtlich derer die meisten Vorstellungen von sozialer Gerechtigkeit übereinstimmen. Das ist bei den genannten Fragestellungen in Bezug auf eine gerechte Energieversorgung der Fall. Es herrscht weitgehend Konsens, dass die Lasten von Gemeinschaftsaufgaben nicht überproportional den Schwächeren in einer Gesellschaft aufgebürdet werden sollten. Einigkeit besteht überwiegend auch darüber, dass die Lasten einer Gemeinschaftsaufgabe niemanden in die Armut drücken sollten. Insofern, so scheint es, lässt sich die konzeptuelle Aufgabe der Philosophie schnell erledigen.

Bei näherer Betrachtung erweist sich die Lage dann doch nicht als so einfach. Können oder sollen nicht sogar eindeutige Forderungen sozialer Gerechtigkeit hintangestellt werden, um andere gebotene Ziele der Energiepolitik zu erreichen, beispielsweise eine intakte Umwelt oder eine ‚gesunde Wirtschaftskraft‘? Der Bericht der Ethikkommission für eine sichere Energieversorgung lässt diese Möglichkeit anscheinend offen.<sup>2</sup> Es bedarf einiger argumentativer Bemühungen, um zu zeigen, weshalb eine derart begründete Hintanstellung sozialer Gerechtigkeit nicht zugelassen werden sollte. Die Gründe sind darin zu suchen, dass das Kernanliegen der Energiewende überhaupt nicht in einem möglichen Widerspruch zu sozialer Gerechtigkeit

#### AUTOR



Prof. Dr. Rudolf Schüßler ist Inhaber des Lehrstuhls Philosophie II an der Universität Bayreuth.

#### LINKTIPP

- [www.zew.de/soko2013](http://www.zew.de/soko2013)

steht. Probleme sozialer Gerechtigkeit können sich immer nur aus einer konkreten Ausgestaltung der Energiepolitik ergeben, und die lässt sich durch Zusatzprogramme sozial abfedern. Hiervon sind weder Umweltziele noch die Wettbewerbschancen von Unternehmen (das ist mit ‚gesunder Wirtschaftskraft‘ gemeint) unmittelbar betroffen.

Differenzierterer Überlegungen bedarf auch die Entlastung einkommensschwacher Bevölkerungsschichten von steigenden Stromkosten. Würde eine solche Politik nicht zur Verschwendung von Strom anreizen? Eine mögliche, aber umstrittene Antwort auf diese Frage besteht darin, Stromkonsum sozialpolitisch nur soweit zu unterstützen wie das bei einer ökologisch nachhaltigen Lebensweise erforderlich ist. Eine derartige Begrenzung würde mit „suffizientaristischen“ Theorien sozialer Gerechtigkeit übereinstimmen, die darauf abzielen, Forderungen nach mehr Gerechtigkeit mit Bezug auf geeignete Schwellenwerte zu deckeln. Tatsächlich werden seit längerem Rufe nach einem Öko-Suffizientarismus laut, der eine langfristige Perspektive der deutschen Energiepolitik sein solle.<sup>3</sup>

Parallel dazu, aber ohne eigentliche Verbindung, gibt es seit wenigen Jahrzehnten eine Debatte um suffizientaristische Ideen in der philosophischen Gerechtigkeitstheorie.<sup>4</sup> Bislang wurde der Öko-Suffizientarismus weder zustimmend noch kritisch zu den Thesen und Ergebnissen dieser Debatte in Beziehung gesetzt. Hierin liegt, gerade auch im Hinblick auf die Probleme der deutschen Energiepolitik, eine Herausforderung für weitere philosophische Untersuchungen.

■ **Strompreisanalyse Juni 2014: Entwicklung der Strompreise für Haushaltsstrom in Deutschland, bezogen auf einen durchschnittlichen Haushalt mit einem Jahresverbrauch von 3.500 kWh (1998 = 100%).**  
Quelle: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.



An der Universität Bayreuth ist ein Forschungsteam derzeit damit befasst, die skizzierten philosophischen Fragestellungen für die internationale wissenschaftliche Diskussion aufzubereiten. Dieses Ziel stand allerdings in der Anfangsphase des Projekts „SoKo Energiewende“ noch nicht im Vordergrund. Hier galt es zunächst, die empirische Arbeit des Konsortiums direkt zu unterstützen: durch eine Diskussion der wechselseitigen Bezüge von Armut und Energiearmut (Philipp Kanschik) und eine kritische Analyse vorhandener Indikatoren für Energiearmut (Rudolf Schüssler).

### INDIKATOREN FÜR ENERGIEARMUT

Einige Aussagen zu den sozialpolitischen Auswirkungen der deutschen Energiepolitik lassen sich bereits mit vorhandenen Datensätzen und einem etablierten begrifflichen Instrumentarium gewinnen. Anhand von Daten aus der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) und dem Sozioökonomischen Panel (SOEP) lassen sich regressive Wirkungen der aktuellen Stromkosten-Struktur valide belegen: Haushalte mit geringeren Einkommen müssen überproportional mehr für elektrische Energie ausgeben als Haushalte mit hohen Einkommen.<sup>5</sup>

Schwieriger stellt sich die Lage hinsichtlich der Energiearmut in Deutschland dar. Hier gibt es weder einen offiziellen Indikator noch eine zufrieden stellende Datenlage. Hilfsweise werden – auch von der Bundesregierung – für Großbritannien entwickelte Indikatoren auf die genannten Datensätze angewendet.<sup>6</sup> Dabei stellt sich natürlich die Frage: Wie gut sind die Indikatoren für diese Aufgabe geeignet?

Es erscheint plausibel, einige der Bedingungen, die für die Angemessenheit von Armutsindikatoren gelten, auf den Kontext der Energiearmut zu übertragen. Nur Indikatoren, die diese Bedingungen erfüllen, sollten daher bei Untersuchungen zur Energiearmut in Deutschland herangezogen werden.

### NICHT ÜBERZEUGEND: DER „DOPPELMEDIAN-INDIKATOR“

Wie die im Rahmen des Projekts „SoKo Energiewende“ erarbeiteten Analysen zeigen, schneiden die offiziellen britischen Indikatoren in dieser Hinsicht nicht gut ab. Der lange Zeit (von 2001 bis 2012) gültige Zehn-Prozent-Indikator (ZPI) für Energiearmut, den auch die Bundesregierung bei Anfragen verwendet,

steht auf einer problematischen normativen Grundlage.<sup>7</sup> Der ZPI zählt Haushalte als energiearm, wenn sie mehr als 10 Prozent ihres Nettoeinkommens für angemessene Energiedienstleistungen aufbringen müssen. Dieser Wert war im Jahr 1988 doppelt so hoch wie der Anteil des Nettoeinkommens, den ein typischer britischer Haushalt insgesamt für Energie aufbringen musste. Als „typisch“ gilt dabei der gesellschaftliche Median, der wie folgt ermittelt wird: Wenn man alle Haushalte mit ihren für Energie verausgabten Einkommensanteilen in einer aufsteigenden Liste ordnet, ist der Median genau derjenige Einkommensanteil, über und unter dem jeweils 50 Prozent der Haushalte liegen.

An den ZPI schloss sich in der weiteren Diskussion die normative Überlegung an, dass übermäßig durch Energieausgaben belastet wird, wer vom eigenen Einkommen mehr als das Doppelte des gesellschaftlichen Medians für Energie ausgeben muss. Diese Norm aber führt zu unplausiblen Ergebnissen. Denn sie hat zur Folge, dass die Zahl der energiearmen Haushalte schrumpft, falls die Energieausgaben aller Haushalte steigen, ohne dass dabei die relative Position der Haushalte geändert wird.<sup>8</sup> Damit verstößt der Doppelmedian-Indikator zum einen gegen den Alltagsverstand und zum anderen gegen Plausibilitätsbedingungen für Armutsindikatoren. Wenn keine Änderung der relativen Position der Haushalte eintritt, sollten zusätzliche Ausgaben für alle nämlich zu mehr Armut führen, aber jedenfalls nicht zu sinkender Armut. Das sollte natürlich auch für Energiearmut gelten. Fazit: Es gilt nach einer anderen Rechtfertigung zu suchen, wenn der ZPI beibehalten werden soll.

### SINKENDE REALEINKOMMEN ALS GEFAHR FÜR ENERGIEARMUT

Tatsächlich hat die britische Regierung den ZPI bereits 2012 aufgegeben. Sie misst – zumindest für England – Energiearmut inzwischen mit einem neuen „Low Income High Cost“ (LIHC) Indikator.<sup>9</sup> Dieser Indikator wertet Haushalte als energiearm,

- wenn ihre Ausgaben für angemessene Energiedienstleistungen über dem Median der Ausgaben liegen, die den britischen Haushalten insgesamt für angemessene Energiedienstleistungen entstehen,
- und wenn sie dabei durch eben diese Ausgaben unter die offizielle Armutsschwelle gedrückt werden.



Dadurch wird die Problematik des doppelten Medians vermieden. Doch der LIHC-Indikator hat eine andere entscheidende Schwäche. Es gibt viele Haushalte, deren Energieausgaben den gesellschaftlichen Median nicht übersteigen und die auch nicht unter der offiziellen Armutsschwelle liegen. Wenn nun aber die Realeinkommen sinken, besteht gerade für solche Haushalte die Gefahr, dass sie durch unveränderte und anteilig am Einkommen wachsende Energieausgaben unter die Armutsschwelle gedrückt werden. Die Annahme ist plausibel, dass sie auf diesem Weg auch energiearm werden können. Doch genau dies schließt der LIHC-Indikator aus. Er erkennt als energiearm nur solche Haushalte an, deren Energieausgaben über dem gesellschaftlichen Median liegen. Aber dies ist in der beschriebenen Konstellation mit sinkenden Realeinkommen nicht zwangsläufig der Fall.

Der Bundesregierung ist daher nicht anzuraten, sich der englischen Regierung anzuschließen und den LIHC-Indikator unverändert zu übernehmen. Daher wollen die am Projekt „SoKo Energiewende“ beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Indikatoren erarbeiten, welche die genannten Schwächen vermeiden und gesellschaftliche Prozesse, die zur Energiearmut führen können, angemessen abbilden.

■ Im interdisziplinären Studiengang „Philosophy & Economics“ an der Universität Bayreuth sind auch Fragen zur Definition und zu den Kriterien sozialer Gerechtigkeit ein wichtiges Thema (Foto: Chr. Wißler).

- 1 Für die Daten vgl. *Ethik-Kommission* ‚Sichere Energieversorgung‘, Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft, Berlin 2011, S. 56; *Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft* (BDEW), Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken, Berlin 2013, eigene Rechnung.
- 2 *Ethik-Kommission* ‚Sichere Energieversorgung‘, S. 18, für die Trias der Forderungen nach intakter Umwelt, gesunder Wirtschaftskraft und sozialer Gerechtigkeit.
- 3 Vgl. C. Fischer, R. Grießhammer, Mehr als nur weniger. Suffizienz: Begriff, Begründung und Potenziale, *Öko-Institut Working Paper 2/2013*.
- 4 R. Huseby, Sufficiency: Restated and Defended, *The Journal of Political Philosophy* 18, 2010, 178-197; L. Shields, The Prospects for Sufficientarianism, *Utilitas* 24, 2012, 101-117.
- 5 Vgl. A. Löschel, F. Flues, P. Heindl, Verteilungswirkungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes – Das Erneuerbare-Energien-Gesetz in der Diskussion, *Wirtschaftsdienst* 92, 2012, S. 515-519; K. Neuhoff et al., Steigende EEG-Umlage: Unerwünschte Verteilungseffekte können vermindert werden, *DIW Wochenberichte* 41, 2012; P. Heindl, A. Löschel, R. Schüssler, Ist die Energiewende sozial gerecht?, *Wirtschaftsdienst* 7, 2014, 508-514.
- 6 Für eine aktuelle empirische Analyse mit SOEP-Daten vgl. P. Heindl, Measuring Fuel Poverty. General Considerations and Application to German Household Data, *ZEW Discussion Paper No. 13-046*, Mannheim 2013.
- 7 Der ZPI geht zurück auf B. Boardman, Fuel Poverty. From Cold Homes to Affordable Warmth, London 1991.
- 8 Vgl. R. Schuessler, Energy Poverty Indicators: Conceptual Issues, *ZEW discussion paper 14-037*, 2014.
- 9 J. Hills, Getting the Measure of Fuel Poverty, London 2012.



■ ULI BEISEL  
MANFRED STOPPOK

# Energietechnologien und Energiewandel in Afrika

KULTURELLE UND ANTHROPOLOGISCHE ASPEKTE VON INNOVATIONEN

■ Der Merowe-Staudamm im Sudan. Für seine Errichtung wurden 70.000 Menschen unter Missachtung ihrer Rechte umgesiedelt.

Im globalen Kontext von Klimawandel und der Endlichkeit fossiler Brennstoffe vollziehen sich auch auf dem afrikanischen Kontinent im Energiebereich große Wandlungsprozesse. Allerdings sind diese auch durch eine langanhaltende Krise gekennzeichnet. Die Energieversorgung ist für die Mehrheit der Endnutzer bis heute unregelmäßig und überdies schwer erreichbar und bezahlbar. Die Weltbank konstatiert daher in 25 afrikanischen Ländern eine Energiekrise. Der Kontinent muss nicht nur seine Kapazitäten in der Energieerzeugung stark erhöhen und ökologisch nachhaltig gestalten, sondern steht auch vor der Herausforderung einer gerechten und von der Bevölkerungsmehrheit getragenen Implementierung neuer Energietechnologien.

### ENTSCHEIDUNGSTRÄGER MÜSSEN UMDENKEN

Die Geschichte der Entwicklungszusammenarbeit ist allerdings von fehlgeschlagenen Technologietransfers, ungenutzten Anlagen und sozialen Konflikten rund um Energieproduktionsstätten geprägt. Zu oft werden soziale, kulturelle und politische Faktoren bei der Entwicklung und Implementierung neuer Energietechnologien zu wenig berücksichtigt. Die Akzeptanz neuer Maßnahmen ist besonders problematisch, wenn (inter)nationale Interessen im Vordergrund stehen und lokale Akteure keine Vorteile von der Energiegewinnung haben. So wurden beispielsweise die meisten der rund 80.000 Menschen, die für den Akosombo-Staudamm in Ghana in den 1960er Jahren umsiedeln mussten, erst 30 Jahre später an das Stromnetz angeschlossen – eine Tendenz, die auch in heutigen Projekten weiterhin zu beobachten ist.

Damit die Menschen, die neue Energietechnologien potenziell nutzen, frühzeitig und umfassend in die Entwicklungs- und Entscheidungsprozesse einbezogen werden, ist vielfach ein Umdenken bei den Verantwortlichen in Politik und Industrie erforderlich. Deren Handeln ist, wie Studien aus der Wissenschafts- und Technikforschung zeigen, in vielen Fällen von einem Defizitmodell geprägt. Darin werden den unmittelbar Betroffenen Verständnis und Urteilskraft abgesprochen<sup>1</sup> – was sich als hochproblematisch für die Akzeptanz und Nutzung neuer Technologien erwiesen hat. Diese müssen, um in sozialer wie in technischer Hinsicht adäquat zu sein, in einem zweiseitigen Aushandlungsprozess gestaltet werden: zwischen denen, die sie nutzen, und denen, die sie entwickeln.

### EIN NEUES FORSCHUNGSFELD: LOCALE ENERGIEVORSTELLUNGEN UND IHRE FOLGEN

Energie wird zumeist als etwas Gegebenes, funktionell Definiertes und materiell klar Existentes verstanden. Dabei ist sie als materielles Produkt nicht greifbar, sondern kann nur mittels technischer Geräte in Form von Elektrizität, Wärme oder mechanischer Energie nutzbar gemacht werden. Neuere anthropologische Studien fragen daher nach Konzeptionen und Vorstellungen von Energie. Grundannahme dabei ist, dass die technische und materielle Infrastruktur der Energieversorgung ihrerseits auf soziokulturellen Infrastrukturen oder Konzeptionen von Energie beruht.

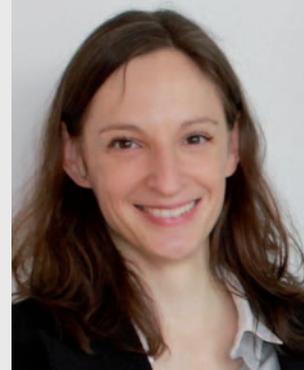
Die Einführung neuer Technologien geht daher immer auch mit sozialen Veränderungen einher. Wie eine Studie zur Einführung von Elektrizität auf Sansibar gezeigt hat, lässt sich auf Sansibar beobachten, dass das Leben allgemein beschleunigt wird und der zuvor klare Unterschied zwischen Tag und Nacht infolge der neuen Beleuchtungsmöglichkeiten zunehmend verschwimmt. Ebenso wichtig erscheinen aber auch die Veränderungen auf der Ebene normativer Werte. Elektrizität wird zunehmend als etwas gesehen, das der Ehemann seine Familie zur Verfügung stellen sollte.<sup>2</sup> Diese möglichen Prozesse und Veränderungen gilt es bei der Planung und Entwicklung der aufzubauenden Infrastrukturen im Energiesektor auf dem afrikanischen Kontinent zu berücksichtigen, da diese Infrastrukturen den Energiemix in der Energieproduktion in den nächsten Jahrzehnten prägen werden.

Aus kultur- und sozialwissenschaftlicher Perspektive stehen daher in der Forschung zur Energieversorgung in Afrika Fragen der lokalen Energievorstellungen, Nutzungspraktiken und -politiken im Vordergrund, aber auch das Spannungsfeld zwischen lokalen, nationalen und globalen Prioritäten. Diesen Fragen wird sich an der Universität Bayreuth insbesondere die neue Juniorprofessur für Kultur und Technik in Afrika sowie ein kürzlich gestartetes Promotionsprojekt am Lehrstuhl für Sozialanthropologie und der Bayreuth International Graduate School of African Studies (BIGSAS) in den kommenden Jahren widmen.

<sup>1</sup> Vgl. z.B. A. Irwin & B. Wynne (1996), *Misunderstanding Science? The Public Reconstruction of Science and Technology*, Cambridge: University Press

<sup>2</sup> T. Winther (2013), *Space, Time, and Sociomaterial Relationships: Moral Aspects of the Arrival of Electricity in Rural Zanzibar*, in: S. Strauss; S. Rupp & T. Love (ed.), *Cultures of Energy: Power, Practices, Technologies*. Left Coast Press Inc., S. 164 –176

### AUTOREN



Prof. Dr. Uli Beisel ist Juniorprofessorin für Kultur und Technik in Afrika, die zur Facheinheit Ethnologie der Universität Bayreuth gehört.



Manfred Stoppok, M.A., ist Doktorand am Lehrstuhl für Sozialanthropologie und der BIGSAS. Sein Dissertationsprojekt, das in Kooperation mit den Lehrstühlen für Bioprozesstechnik und Chemische Verfahrenstechnik erfolgt, befasst sich insbesondere mit Fragen des Energiewandels in Afrika.



In der Bayreuth International Graduate School of African Studies (BIGSAS) hat sich eine Zusammenarbeit von Kultur- und Ingenieurwissenschaften entwickelt.

# Elektrifizierung des Sudans

## EIN UMSTRITTENES MEGA-ENERGIEPROJEKT

■ VALERIE HÄNSCH

### AUTORIN



Valerie Hänsch, M.A., ist Doktorandin am Lehrstuhl für Ethnologie und der Bayreuth International Graduate School of African Studies (BIGSAS). Die Forschungsarbeiten zum Merowe-Damm und den damit verbundenen Umsiedlungen sind Teil ihres Dissertationsprojekts.

**E**lektrifizierung, Industrialisierung und Wirtschaftswachstum setzen in Afrika vor allem auf Wasserkraftwerke. Einige große Talsperren sind seit den 1950er Jahren, als der globale Dammbauboom einsetzte, gebaut worden. Von der Industrie und Politik als kostengünstige Erzeugung „grüner Energie“ gepriesen und von Kritikern als „ökologische Desaster“ beschrieben, sind Großstaudämme heute höchst umstritten. Seit einigen Jahren ist eine neue Welle an massiven Dammbauten in Afrika zu beobachten, allen voran der im Bau befindliche Millennium-Damm (5.200 Megawatt) in Äthiopien, der geplante Inga III-Damm (4.800 Megawatt) in der Demokratischen Republik Kongo und der 2009 in Betrieb genommene Merowe-Damm (1.250 Megawatt) im Sudan.

Ein eigenes Forschungsvorhaben befasst sich mit der Implementierung des Merowe-Staudamms am 4. Nilkatarakt des Sudan und den damit einhergehenden Umsiedlungen. Aufbauend auf der in dieser Region geleisteten Grundlagenforschung von Prof. Dr. Kurt Beck an der Universität Bayreuth, nimmt das Projekt lokale Prozesse in den Blick. Denn Infrastrukturprojekte werden durch divergierende Interessen und Visionen einer Vielzahl unterschiedlicher Akteure beeinflusst und geformt. Die Untersuchung zeigt, dass die dabei entstehenden sozialen und politischen Dynamiken einem Planungsparadigma zuwiderlaufen, das sich mit der Moderne herausbildete: der technischen Kontrollierbarkeit von Natur und Gesellschaft.

Der Merowe-Damm ist Teil eines umfangreichen Plans zur Entwicklung des sudanesischen Niltals. Sechs weitere Staudämme sind entlang des Nils in Planung. Das Ziel ist, die existierende Leistung von 1.000 auf etwa 3.400 Megawatt zu steigern. Die Gesamtkosten des Merowe-Projektes von rund 2 Mrd. Euro werden zum überwiegenden Teil von Entwicklungsbanken der Golfstaaten und von der chinesischen Export-Import-Bank finanziert. Für die Bauarbeiten ist seit 2003 ein chinesisches Konsortium zuständig, die Bauleitung liegt dabei in den Händen der deutschen Ingenieursfirma Lahmeyer International.

### VERTREIBUNG DER LOKALEN BEVÖLKERUNG MIT KATASTROPHALEN FOLGEN

70.000 Menschen mussten dem Stausee weichen. Die überwiegend bäuerliche Bevölkerung betrieb hauptsächlich Bewässerungsfeldbau an den Flussufern. Regierung und beteiligte Firmen versprachen viele Vorteile durch die Umsiedlung. Auch eine Mehrheit der Gemeinschaft der Manasir (rund 67 Prozent der Umzusiedelnden) stimmte einer Umsiedlung in staatliche Großbewässerungsprojekte unter bestimmten Bedingungen zunächst zu. Im Laufe der Verhandlungen regten sich allerdings immer mehr Zweifel, da die Menschen ihre Rechte und Interessen an den Rand gedrängt sahen.

Zugleich entwickelte sich eine alternative Vision der Umsiedlung: Ein Großteil der Menschen wollte um

■ Abb. 1: Steigende Flut. Kinder beim Abbau eines provisorischen Lagers, das als Zuflucht gedient hatte (Foto: V. Hänsch).



den beim Bau des Merowe-Damms entstehenden Stausee siedeln. Sie hofften, auf diese Weise ihre kulturelle Autonomie und wirtschaftliche Eigenständigkeit zu bewahren. Nach zahlreichen Verhandlungsversuchen, Verhaftungen und militärischer Gewaltandrohung konnte 2006/07 ein Abkommen mit der Regierung erzielt werden, das den Bau von lokalen Siedlungsgebieten um den künftigen Stausee sowie einen Besitzstandsensus garantierte.

Im Sommer 2008 erfolgte die Aufstauung des Nils, noch bevor die lokalen Siedlungsgebiete fertiggestellt waren. Die Menschen interpretierten das Ansteigen des Nils zunächst als die jedes Jahr um diese Zeit einsetzende Hochflut. Sie mussten aber, als die Flut ihre Gehöfte überschwemmte, in die angrenzenden Wüsten flüchten. Die mehrere Monate andauernde Überflutung zwang viele Familien zu weiteren Umzügen. Ihre Lebensgrundlage, etwa zwei Drittel der landwirtschaftlichen Flächen und Dörfer, versank im Nil. In der darauf folgenden Zeit errichteten die Bewohner improvisierte Unterkünfte, versuchten neue Felder anzulegen und Fischereiprojekte für den Lebensunterhalt zu etablieren. Nur etwa ein Drittel der Manasir siedelte in die staatlichen Umsiedlungsprojekte über.

### PLÄDOYER FÜR FLEXIBLERE PLANUNGEN VON GROSSPROJEKTEN

Die Forschungsarbeiten zeigen, dass Umsiedlungen nicht auf lange Sicht, auf ein festgelegtes Ziel hin, gemäß einer technischen Logik geplant werden können. Was die Implementierung von Technologien und kulturellen Praktiken betrifft, so wird deutlich, dass es sich dabei um offene und nicht vorhersehbare Prozesse handelt. Mit diesen Forschungsergebnissen ist das Plädoyer für einen flexibleren Planungsansatz verbunden, der sich der Dynamik dieser Prozesse stellt. Großprojekten zugrunde liegende Modernisierungsvorstellungen neigen dazu, Umsiedlungen als Abläufe aufzufassen, die sich rational konzipieren und stringent umsetzen lassen – durch eine transnationale Gemeinschaft von Akteuren aus den Bereichen Planung, Technik und Politik, die alle ähnliche epistemische Voraussetzungen teilen.

Meinungen und Interessen unterscheiden sich jedoch und ändern sich in einem komplexen sozialpolitischen Prozess, der maßgeblich von Machtkämpfen gekennzeichnet ist; gerade dann, wenn grundlegende Lebenschancen auf dem Spiel ste-

hen. Die von der World Commission on Dams im Jahr 2000 entwickelten Richtlinien wurden beim Bau des Merowe-Damms nicht eingehalten, die Rechte der Menschen wurden nicht gewahrt. Die Konsequenz ist eine Vertreibung, die zu einer sozialen Tragödie führte.<sup>1</sup>



Abb. 2 und 3: Oben: Insel Shirri, Manasirland, vor der Überflutung. Unten: Folgen der Überflutung für die Menschen (Fotos: V. Hänsch).

<sup>1</sup> Vgl. World Commission on Dams (2000), Dams and Development: A New Framework for Decision-Making, London: Earthscan



■ FABIAN SCHWARZ

# Bioenergie-Potenziale in Ostafrika

ENTWICKLUNGSGEOGRAPHISCHE PERSPEKTIVEN KÜNFTIGER ENERGIEVERSORGUNG

■ Zuckerrohrplantage in Kakira,  
Uganda (Foto: F. Schwarz).

**E**ntwicklung braucht Energie. Es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen dem Fehlen von Energiedienstleistungen und vielen Armutsindikatoren, wie Analphabetismus, Kindersterblichkeit und Lebenserwartung. Dieser Zusammenhang ist anerkannt und unbestritten. Er macht die Bereitstellung einer flächendeckenden Energieversorgung in den Ländern des Südens notwendig, damit die Millenniums-Entwicklungsziele der Vereinten Nationen erreicht werden können. Eine flächendeckende Energieversorgung, wie sie in Europa selbstverständlich ist, ist in weiten Teilen Subsahara-Afrikas nicht vorhanden. In vielen Staaten werden nur die städtischen Zentren mit Elektrizität versorgt. Besonders in ländlichen Räumen ist der nicht vorhandene Zugang zu nationalen Stromnetzen ein zentrales Entwicklungshemmnis. Dies schwächt die wirtschaftliche Entwicklung und verstärkt die Migrationstendenzen arbeitssuchender Menschen in die Städte. Die schon bestehenden räumlichen Disparitäten zwischen Stadt und Land werden dadurch in vielen Regionen verschärft.

Der Bedarf an Energie und Treibstoffen steigt stetig an. Neben technologischem Fortschritt, Urbanisierung und einer anspruchsvollen, schnell wachsenden Mittelschicht sind dafür vor allem zwei Faktoren ausschlaggebend; das wirtschaftliche Wachstum und die stark wachsende Bevölkerung des Kontinents. Der Internationale Währungsfonds (IWF) geht von einem durchschnittlichen wirtschaftlichen Wachstum von 5,5 Prozent für das Jahr 2014 im subsaharischen Afrika aus. Gleichzeitig liegt das durchschnittliche Bevölkerungswachstum bei 2,7 Prozent. Trotz ihres Reichtums an fossilen Rohstoffen sind viele Staaten bisher auf den Import von Erdgas, Erdöl und bereits raffinierten Treibstoffen angewiesen.

Diese Abhängigkeit der Energieversorgung vom internationalen Rohstoffmarkt und den erdölexportierenden Ländern macht die Staaten anfällig für schwankende Energiepreise. Daher versuchen viele Regierungen nationale Energiepotenziale in Wert zu setzen, um ihren Bedarf zu decken. Dafür ist der Ausbau der Infrastruktur, der Bau von Kraftwerken, Stromnetzen und Raffinerien sowie die Erschließung neuer Erdgas- und Erdölvorkommen notwendig. Doch allein auf die fossilen Energiepotenziale zu setzen, ist in den vom Klimawandel stark betroffenen Ländern keine vernünftige Alternative, zumal viele Staaten in Subsahara-Afrika auch ein enormes Potenzial im Bereich der erneu-

erbaren Energien besitzen. Der Ausbau von Wasser- und Windkraft, Solarenergie und Geothermie sowie die Energiegewinnung aus Biomasse wurden daher in vielen Staaten als wichtiger Bestandteil nationaler Energiepolitik formuliert und mit sehr ambitionierten Zielen verknüpft.

Vor allem die Energiegewinnung aus agrarischen Reststoffen ist vielversprechend. Denn dadurch können vorhandene Potenziale genutzt werden, ohne dass daraus negative soziale oder ökologische Auswirkungen resultieren.

### ENERGIEVERSORGUNG IN TANSANIA UND UGANDA

Konkrete Beispiele lassen sich u.a. in Tansania und Uganda finden. Beide Staaten haben aktuell ein Bevölkerungswachstum von über 3 Prozent, ihre Einwohnerzahl wird sich bei gleichbleibendem Wachstum in weniger als 25 Jahren verdoppelt haben. Das wirtschaftliche Wachstum, gemessen am Bruttoinlandsprodukt, liegt in beiden Staaten deutlich über dem durchschnittlichen Wachstum in Subsahara-Afrika (Abb. 1). Die Versorgung mit Elektrizität aus dem nationalen Stromnetz ist in Tansania und Uganda auf die städtischen Zentren konzentriert. In den ländlichen Regionen haben mehr als 90 Prozent der Bewohner keinen Zugang zu Strom. In beiden Staaten arbeitet der größte Teil der Bevöl-



Abb. 1 und Tabelle 1: Bevölkerungsentwicklung und Zugang zu Elektrizität in Tansania und Uganda (Daten: REA 2014, UNEP 2013, The World Bank 2013, eigene Daten, alle Werte für 2013. Entwurf: F. Schwarz, Kartographie: J. Blauhut).

	Tansania	Uganda
Einwohnerzahl	49,25 Mio.	37,58 Mio.
Bevölkerungswachstum (pro Jahr)	3,1 %	3,5 %
Wirtschaftswachstum (pro Jahr)	7,0 %	6,0 %
Zugang zu Elektrizität	15 %	24 %
Zugang zu Elektrizität in ländlichen Gebieten	5 - 6 %	7 %

## AUTOR



Fabian Schwarz, M.A., arbeitet am Lehrstuhl für Geographische Entwicklungsforschung der Universität Bayreuth. Er ist Doktorand der Bayreuth International Graduate School of African Studies (BIGSAS) und untersucht in seiner Dissertation die Erzeugung und Nutzung von Bioenergien in Tansania und Uganda.

Abb. 2: Reishülsen einer Reismühle, Mngeta, Tansania (Foto: F. Schwarz).



kerung in der Landwirtschaft. Die Landwirtschaft ist geprägt von kleinbäuerlichem Anbau, der hauptsächlich auf die Selbstversorgung ausgerichtet ist. Daneben gibt es wenige marktorientierte Großbetriebe, die Flächen von mehreren tausend Hektar bewirtschaften. Auf diesen großen Farmen werden vor allem Cash Crops wie Reis, Mais, Zuckerrohr, Ölpalmen oder Sisal angebaut. Beim Anbau und dessen Weiterverarbeitung fallen verschiedene energiereiche Nebenprodukte an. Diese „Abfallprodukte“ wie Maiskolben, Reishülsen (Abb. 2) oder Molasse und Bagasse (Abb. 3) eignen sich sehr gut für die Erzeugung von Elektrizität oder Treibstoff.

Politisch haben sich beide Staaten hohe Ziele gesetzt. Tansania möchte den Beitrag erneuerbarer Energien von 4 Prozent im Jahr 2011 auf 10 Prozent bis zum Jahr 2016 steigern. Uganda hat noch ambitioniertere Ziele ausgegeben: 2007 lag der Beitrag erneuerbarer Energien bei 4 Prozent; bis 2017 soll er auf 61 Prozent ansteigen. Beide Ziele werden nicht erreicht werden. Warum dies trotz politischer Willensbekundungen und des enormen Potenzials in den letzten Jahren nicht gelungen ist, soll im Folgenden näher untersucht werden.

## „VIELE STAATEN IN SUBSAHARA-AFRIKA HABEN EIN ENORMES POTENZIAL IM BEREICH DER ERNEUERBAREN ENERGIEN.“

### ZUCKERINDUSTRIE – EINE GRUNDLAGE FÜR DIE BIOENERGIE-ERZEUGUNG

Die Zuckerindustrie ist in Tansania und Uganda traditionell der flächenmäßig bedeutendste Cash Crop Produzent. Allein die sieben größten Plantagen mit ihren zugehörigen Vertragsbauern bauen Zuckerrohr auf einer Fläche von mehr als 110.000 ha an. Dies entspricht mehr als der doppelten Fläche des Bodensees. Während der Verarbeitung von Zuckerrohr fallen zwei wesentliche energetische Nebenprodukte an, Bagasse und Molasse.

Nach der Ernte werden die Zuckerrohrstangen in eine Presse geworfen, um den zuckerhaltigen Saft zu extrahieren. Die feste Biomasse, die nach diesem Prozess übrig bleibt, wird als Bagasse bezeichnet. Sie wird in den Zuckerrohrfabriken

als Brennstoff für die zur Weiterverarbeitung benötigte Wärme und Elektrizität verwendet. Unter modernen Produktionsbedingungen werden dabei etwa 40 Prozent für den eigenen Betrieb benötigt, die restliche Energie kann in das nationale Stromnetz exportiert werden.

Der zweite hoch energetische Reststoff, der bei der Zuckerproduktion anfällt, ist Molasse. Molasse ist die übrigbleibende flüssige Biomasse nach der Extraktion des Zuckers. Sie kann zu verschiedenen Produkten weiterverarbeitet werden, u.a. auch zu Ethanol, das dann als Treibstoffbeimischung in Ottomotoren verwendet werden kann. In Deutschland werden dem normalen Super-Benzin (E5) 5 Prozent Ethanol beigemischt; E10 besteht aus einem Benzin-Alkoholgemisch im Verhältnis von 90:10. In Brasilien, dem weltgrößten Zuckerrohrproduzenten, hatte Ethanol in den letzten 5 Jahren einen Anteil von 30 bis 50 Prozent des Gesamtverbrauchs. Dies liegt auch daran, dass viele Motoren moderner Fahrzeuge in Brasilien einen deutlich höheren Anteil von Ethanol (E85) in ihrem Treibstoff vertragen.

Selbst durch eine geringe Beimischung von 5 bis 10 Prozent Ethanol würden die Importkosten für Treibstoff deutlich verringert und gleichzeitig nationale Wirtschaftskreisläufe gestärkt werden. In Tansania und Uganda bleibt dieses Potenzial bisher ungenutzt. Trotz des in beiden Staaten bekundeten politischen Willens ist bisher kein Gesetz, das die Beimischung von Ethanol regelt, verabschiedet worden. Ähnlich verhält es sich mit dem Export von Elektrizität. Mit einer Ausnahme wird das Potenzial zur Erzeugung von Elektrizität bisher nicht oder nur marginal genutzt. Diese Ausnahme ist Kakira Sugar, der größte Zuckerproduzent Ugandas. Kakira Sugar produziert 52 Megawatt Elektrizität. Davon werden 20 Megawatt zum Betrieb der eigenen Zuckerfabrik verbraucht, die überschüssigen 32 Megawatt werden in das nationale Stromnetz exportiert. Allein dieser Export entspricht etwa 4 Prozent der Elektrizität, die insgesamt durch das nationale Stromnetz zur Verfügung gestellt wird, und verdeutlicht das enorme Potenzial der Nutzung von Reststoffen.

### HINDERNISSE FÜR EINE VERSTÄRKTE NUTZUNG VON BIOMASSE

Warum haben sich diese Technologien bisher kaum durchsetzen können? Forschungsergebnisse



Abb. 3: Bagasse einer Zuckerfabrik, Moshi, Tansania (Foto: F. Schwarz).

nologischen Barrieren, die einen Erfolg der Holzvergaser verhindern. Hauptproblem der kleineren Unternehmen ist die Finanzierung. Auch wenn sich diese Kleinstkraftwerke innerhalb weniger Jahre amortisieren und verhältnismäßig kleine Beträge für deren Anschaffung nötig sind, sind der Zugang zu Krediten und hohe Zinsen (häufig mehr als 20 Prozent jährlich) die Hauptbarrieren. Auch Korruption innerhalb von Behörden und im Zoll bereitet Unternehmern, die nicht bereit sind Bestechungsgelder zu zahlen, erhebliche Schwierigkeiten.

zeigen, dass die Technologien selbst keine Barriere darstellen, da sie weitverbreitet und in anderen Staaten wie Mauritius, Indien oder Brasilien seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt werden. Die Ursachen liegen in dem schleppenden Gesetzgebungsprozess, der den Export von Elektrizität in die nationalen Stromnetze durch Privatfirmen nicht detailliert genug regelt. Darüber hinaus müsste die Regierung durch garantierte Abnahmepreise pro kW/h Investitionssicherheit für die Unternehmen schaffen. Die Gesetzgebungsverfahren für die Beimischung von Ethanol werden in beiden Staaten durch eine starke Lobby der Öl- und Treibstoffimporteure, die Gewinneinbußen durch die Beimischung von Ethanol befürchten, blockiert.

Es gibt aber auch Biomassetechnologie, die in weit kleinerem Maßstab geeignet und wirtschaftlich tragfähig ist, um in ländlichen Regionen Elektrizität zu erzeugen. Eine Technologie, die für die Bedingungen in Tansania und Uganda geeignet ist, ist der Einsatz von Holzvergasern (Abb. 4). Diese ermöglichen die Verstromung von fester Biomasse wie Reishülsen oder leeren Maiskolben, die in großen Mengen anfallen und bei den Kleinbauern keiner weiteren Nutzung zukommen. Besonders in entlegenen Regionen, in denen kein Zugang zum nationalen Stromnetz besteht, kann so nicht nur der teure Diesel für den Betrieb der Generatoren an den Mais- oder Reismühlen ersetzt werden. Es kann darüber hinaus auch ein „mini grid“ – ein kleines dezentrales Stromnetz – für mehrere hundert Haushalte betrieben werden.

Trotz ihres erheblichen Einsparpotenzials gegenüber den Dieselgeneratoren setzt sich diese Technologie nur langsam durch. Für kleine Unternehmen, die in beiden Staaten diese Technologie einzuführen versuchen, gilt es viele Barrieren zu überwinden. Auch hier sind es weniger die tech-

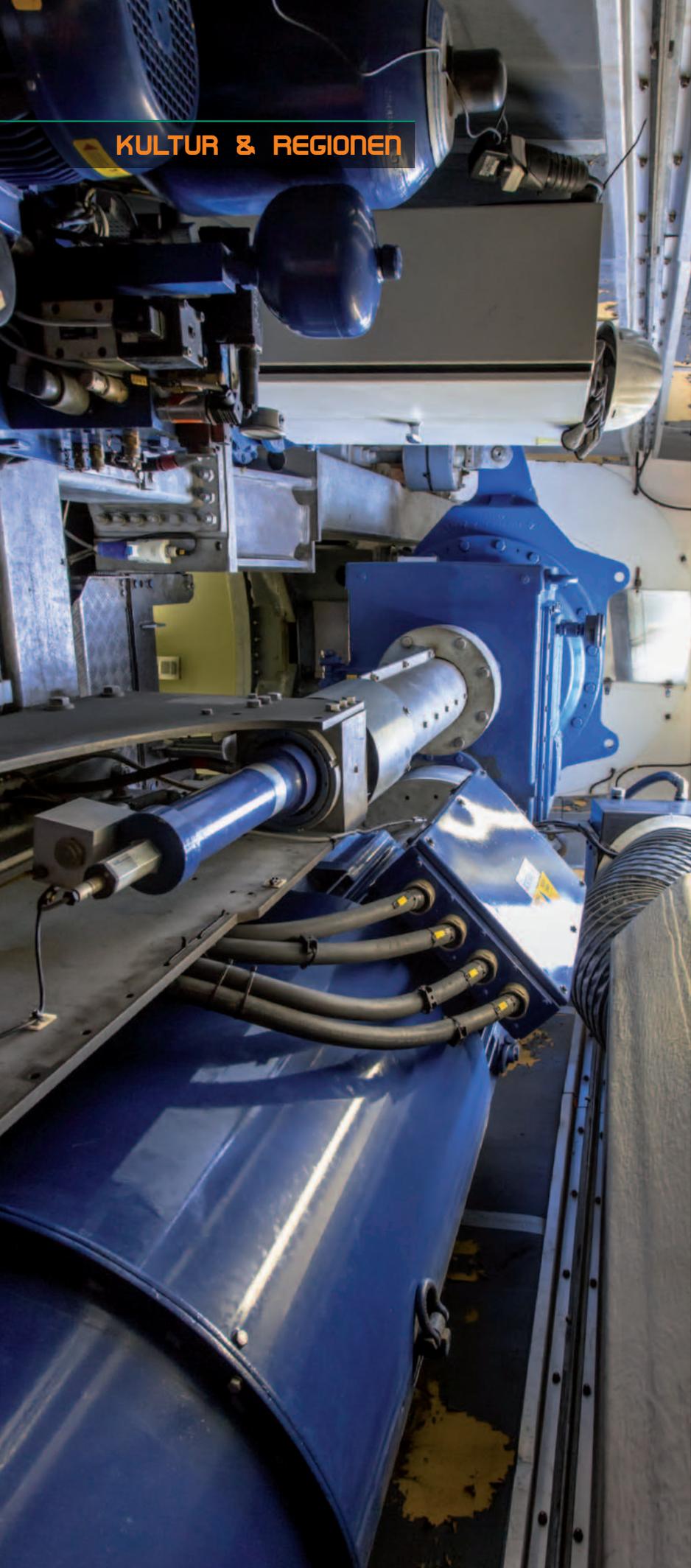
Bisher wird im subsaharischen Afrika ein sehr geringer Prozentsatz des zur Verfügung stehenden Biomasse-Potenzials für die Energieerzeugung genutzt. Institutionelle Rahmenbedingungen, Finanzierung, Gesetzgebung und Korruption, sowie die Lobby der Erdölimporteure verhindern einen schnelleren Erfolg von Biomassetechnologien. Diese Barrieren müssen schrittweise abgebaut werden, damit eine nachhaltige Energieversorgung unter Nutzung heimischer Ressourcen möglich wird.

Abb. 4: 32 kW-Holzvergaser in Tiribogo, Uganda (Foto: F. Schwarz).



## LITERATURHINWEISE

- Johnson, Francis X. & Seebaluck, Vikram (eds.) (2013), Bioenergy for Sustainable Development and International Competitiveness: The Role of Sugar Cane in Africa. Routledge
- Mitchell, Donald. 2011: Biofuels in Africa: Opportunities, Prospects, and Challenges. New York
- Tenenbaum, Bernard et al. (2013), From the Bottom Up: How Small Power Producers and Mini-Grids Can Deliver Electrification and Renewable Energy in Africa. New York



KULTUR & REGIONEN

■ MANFRED MIOSGA

# Erneuerbare Energien im ländlichen Raum

POTENZIALE FÜR DIE  
REGIONALE WERTSCHÖPFUNG

■ Blick ins Innere einer Windkraftanlage  
(Foto: creativenature.nl / Fotolia.com).

Die Energiewende führt zu einem tiefgreifenden Strukturwandel in der Energiewirtschaft. Die Energieversorgung wird dezentraler und eröffnet neue Möglichkeiten für eine regionale Wertschöpfung. Im ländlichen Raum steigt die Zahl der Unternehmen und Initiativen für eine dezentrale Energieversorgung, wie etwa Bürgerenergiegenossenschaften oder Bioenergiedörfer. Die Veränderungen der Landschaft führen aber auch zu Konflikten um die Raumnutzung.

### NEUE STUDIE ZEIGT HOHE WERTSCHÖPFUNG DURCH ENERGIEERZEUGUNG IN DER REGION

Die Abteilung Stadt- und Regionalentwicklung am Geographischen Institut der Universität Bayreuth beschäftigt sich unter der Leitung von Prof. Dr. Manfred Miosga in vielfältigen Forschungsarbeiten mit diesem Strukturwandel. Sie war maßgeblich an einer Studie beteiligt, die vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) in Auftrag gegeben wurde.<sup>1</sup> Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Wertschöpfung, die durch die Nutzung regenerativer Energien ausgelöst wird, die wirtschaftliche Entwicklung von Regionen erheblich beeinflussen kann. Im Mittelpunkt der Untersuchung standen dabei fünf Beispielregionen: Lausitz-Spreewald, Dithmarschen, Rhein-Sieg-Kreis, Nordhessen und Westmittelfranken.

Aufbauend auf einer früheren Untersuchung, die die Wertschöpfungseffekte einzelner Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Sonne, Wind, Wasser und Biomasse ohne Berücksichtigung regionaler Besonderheiten erfasst, wurden die regionalwirtschaftlichen Effekte der Nutzung erneuerbarer Energien erstmals konkret berechnet. Dazu wurden die jeweiligen räumlichen Verhältnisse wie Windhöffigkeit (d.h. das Windaufkommen am jeweiligen Standort), Sonnenscheindauer und Strahlungsintensität detailliert berücksichtigt. Zudem wurden auch indirekte ökonomische Effekte einbezogen, wie zum Beispiel die Tatsache, dass die mit Bau, Betrieb und Finanzierung befassten Beschäftigten Anteile ihres Einkommens in der Region wieder ausgeben. Mit Blick auf den tatsächlich vorhandenen Anlagenbestand konnten schließlich die jeweiligen Gesamteffekte der erzeugten erneuerbaren Energien in den fünf Beispielregionen berechnet werden.

Erwartungsgemäß lässt sich in Dithmarschen durch Photovoltaik eine geringere Wertschöpfung pro

Megawatt installierter Leistung erzielen als in Westmittelfranken, während es beim Wind umgekehrt ist. Über alle Anlagen hinweg liefern die erneuerbaren Energien im landwirtschaftlich geprägten windreichen Küstenlandkreis Dithmarschen jedoch bereits eine höhere regionale Wertschöpfung als Land- und Forstwirtschaft zusammen.

Indem die Studie auf diese Weise regionale Wertschöpfungseffekte konkret berechnet, beschreitet sie Neuland. Sie fördert eine für die Regionalentwicklung entscheidende Erkenntnis zutage: Anlagen, die von Unternehmen betrieben werden, die ihren Sitz in der Region haben und deren Eigen- und Fremdfinanzierung zu 100 Prozent aus regionalen Quellen geschöpft werden, weisen regionale Wertschöpfungseffekte auf, die um rund 500 Prozent höher sind als bei Anlagen, die von externen Firmen betrieben und finanziert werden.

### POTENZIALE ERNEUERBARER ENERGIE AM BEISPIEL NORDOSTBAYERN

Die potenziellen Wertschöpfungseffekte machen die Energiewende für Regionen interessant, die durch eine anhaltende Strukturschwäche gekennzeichnet sind und naturräumliche Qualitäten aufweisen, die eine wirtschaftliche Erschließung erneuerbarer Energien möglich machen. Diese beiden Merkmale treffen für den Nordosten Bayerns in besonderem Maße zu.

Auf Initiative einer Landtagsabgeordneten aus der nördlichen Oberpfalz wurde im Jahr 2010 die Gründung einer Arbeitsgemeinschaft auf den Weg gebracht, die eine Studie zu den Perspektiven für einen „Aufschwung durch Energiewende“ erstellt hat. Die Abteilung für Stadt- und Regionalentwicklung der Universität Bayreuth, die Beratungsge-

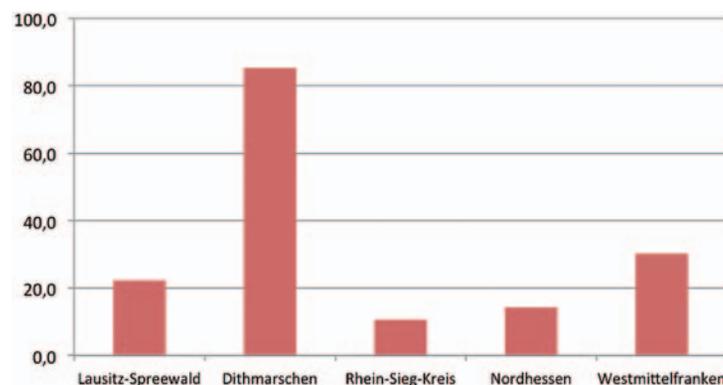
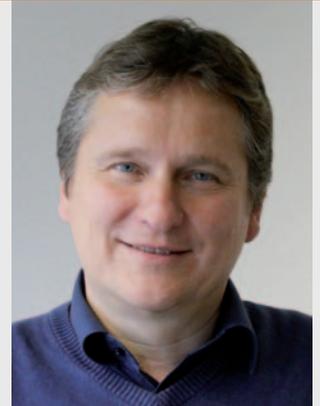


Abb. 1: Jährliche Wertschöpfungseffekte durch die Erzeugung von Strom aus Sonne, Wind, Wasser und Biomasse pro km<sup>2</sup> und Jahr in den fünf Modellregionen der Studie (in Tsd. Euro; Stand 2011). Quelle: BMVBS 2013, S. 148.

AUTOR



Prof. Dr. Manfred Miosga leitet die Abteilung Stadt- und Regionalentwicklung am Geographischen Institut der Universität Bayreuth.



Abb. 2: Photovoltaik-Anlage im ländlichen Raum (sst).

sellschaft KlimaKom eG in Hummeltal, das Institut für Energietechnik an der Hochschule Amberg-Weiden und die Energieagentur Nordbayern in Kulmbach sind gemeinsam der Frage nachgegangen: Könnte in Nordostbayern über den eigenen Bedarf hinaus Energie erzeugt werden, die als neues Exportgut in andere Regionen geliefert wird?

Die Untersuchung verlief in zwei Schritten:

- Zunächst wurde für Nordostbayern die Größenordnung der derzeitigen Energieverbräuche ermittelt, mögliche Einsparpotenziale beziffert und künftige Energiebedarfe errechnet.
- Anschließend wurden die Potenziale erneuerbarer Energien abgeschätzt und Szenarien entworfen, ob und inwieweit in der Region die erneuerbaren Energien zu einer neuen Exportbasis ausgebaut werden könnten.

Die energiefachlichen Betrachtungen beruhten dabei auf Sekundäranalysen und der Auswertung

vorhandener Statistiken, Datensammlungen und Gutachten.

Wie die Studie ergab, beläuft sich der gesamte Endenergieverbrauch in der Region Nordostbayern auf rund 29.500.000 Megawattstunden (MWh) pro Jahr (Stand 2010).<sup>2</sup> Bereits jährlich wird eine elektrische Energiemenge von rund 887.000 MWh aus erneuerbaren Quellen erzeugt und eingespeist. Dies entspricht einem Anteil der erneuerbaren Energien in Höhe von rund 14 Prozent am gesamten Stromverbrauch. Dabei verteilen sich die einzelnen Energiequellen wie folgt:

- Biomasse- und Biogasverstromung: ca. 50%
- Photovoltaik (Solarenergie): ca. 25%
- Wasserkraft: ca. 13%
- Windenergie: ca. 10%

Der Anteil erneuerbarer Energieträger an der thermischen Energieversorgung liegt in Nordostbayern derzeit bei einem Wert von etwa 1.974.000 MWh pro Jahr.

Angenommen, in dieser Region würde das Potenzial zur Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen komplett ausgebaut werden: Dann könnten pro Jahr etwa 9.414.000 MWh an elektrischer Energie bereitgestellt werden. Den Hauptanteil an der Stromerzeugung hätte dabei die Windenergie. Hierfür müssten rund 1.200 Windkraftanlagen mit 2 MW-Leistung installiert werden, was auf den verfügbaren Flächen grundsätzlich auch möglich wäre. Zudem müsste ein erheblicher Teil des Stroms aus Biomasse und Biogas erzeugt werden. Im Bereich der solaren Nutzung besteht allein auf Dachflächen ein Ausbaupotenzial von rund 551.000 kWp an Photovoltaik; würde dieses Potenzial genutzt, können zusammen mit den be-

Tab. 1: Potenziale erneuerbarer Energien in Nordostbayern, das sich in der Studie aus zwei Planungsregionen zusammensetzt: „Oberfranken-Ost“ besteht aus den kreisfreien Städten Bayreuth und Hof sowie den Landkreisen Bayreuth, Hof, Kulmbach und Wunsiedel im Fichtelgebirge. Die Planungsregion „Oberpfalz-Nord“ wird durch die kreisfreien Städte Amberg-Sulzbach, Neustadt an der Waldnaab, Schwandorf und Tirschenreuth gebildet.

Potenzial EE	Bestand [MWh/a]		Gesamtpotenzial [MWh/a]		Ausbaupotenzial [MWh/a]	
	Endenergie elektrisch	Endenergie thermisch	Endenergie elektrisch	Endenergie thermisch	Endenergie elektrisch	Endenergie thermisch
Photovoltaik	229.200	0	731.260	0	502.060	0
Solarthermie	0	99.800	0	347.772	0	247.972
Wind	91.982	0	7.011.400	0	6.919.418	0
Bioenergie [Biogas, Energieholz etc.]	445.174	1.853.719	1.549.480	5.275.767	1.104.306	3.422.048
Wasserkraft	110.785	0	121.864	0	11.079	0
oberflächennahe Geothermie	0	20.632	0	385.200	0	364.568
Summe	887.141	1.974.150	9.414.003	6.008.739	8.536.862	4.034.588

stehenden Anlagen insgesamt rund 731.000 MWh pro Jahr an elektrischer Energie erzeugt werden.<sup>3</sup>

Im Bereich der *thermischen* Endenergie ergibt sich für Nordostbayern ein Gesamtpotenzial von rund 6.008.000 MWh im Jahr. Dies beruht größtenteils auf der Nutzung von Brennholz aus heimischen Wäldern und der thermischen Energieauskoppelung aus der landwirtschaftlichen Biomassenutzung (Kraft-Wärme-Kopplung).

Die Studie geht davon aus, dass bis 2030 erhebliche Energiemengen auf wirtschaftlich verträgliche Art eingespart werden können: insbesondere durch Investitionen in gesteigerte Energieeffizienz sowie durch die Anschaffung neuer Geräte in Unternehmen und privaten Haushalten. Die Berechnungen führen so zu folgenden Ergebnissen:

- Durch Effizienzsteigerung und den Umstieg auf moderne Technologien kann der Bedarf an *elektrischer* Energie in Nordostbayern von rund 6.145.000 MWh im Jahr 2010 auf rund 3.863.000 MWh im Jahr 2030 gesenkt werden. Damit dieser Bedarf bis 2030 mit erneuerbaren Energien gedeckt werden kann, müssten bis 2030 etwas mehr als 40 Prozent der Potenziale zur Stromerzeugung erschlossen werden. Dabei kommt der Nutzung der Windkraft eine zentrale Bedeutung zu. Je nach Ausbaugeschwindigkeit der anderen Energieträger (Biomasse, Photovoltaik) wäre zur Deckung des Eigenbedarfs ein Zubau von 420 bis 500 Windenergieanlagen in Nordostbayern erforderlich.
- Anders verhält es sich im Bereich der *thermischen* Energie. Selbst wenn man die erheblichen Einsparpotenziale bis 2030 berücksichtigt, wird es voraussichtlich nicht möglich sein, den verbleibenden Bedarf in Nordostbayern allein durch die direkte Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Energieträgern zu decken. Es verbleibt ein Restbedarf von rund 1.850.000 MWh an thermischer Endenergie pro Jahr. Um auch diese Menge auf der Basis erneuerbarer Energieträger herzustellen, müsste regenerativ erzeugter Strom zur Wärmeherstellung genutzt werden.<sup>4</sup>

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien in Nordostbayern ausreichen würden, um über den eigenen Bedarf hinaus Energie zu produzieren und in andere Regionen zu exportieren. Auf der Basis der Be-

rechnungsmethoden des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (2010 und 2011) ergibt sich: *Wenn die Potenziale erneuerbarer Energien in Nordostbayern voll ausgeschöpft werden, können – über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren – knapp 7 Milliarden Euro kommunale Wertschöpfung generiert werden, also etwa 350 Millionen Euro pro Jahr. Die Effekte aus der Produktion der Anlagen sind dabei nicht berücksichtigt.*

### REGIONALE STRATEGIEN ZUR MAXIMALEN WERTSCHÖPFUNG

Aus beiden Studien folgt, dass insbesondere eine dezentral organisierte Energiewende positive Effekte für die Regionalentwicklung erzielen kann. Wenn die Nutzung erneuerbarer Energien rasch und kontinuierlich ausgebaut wird, kann dies den Anteil der regionalen Wertschöpfung deutlich erhöhen – vorausgesetzt, dass der Ausbau durch regionale Unternehmen, mit Hilfe regionaler Finanzierungsquellen und nach Möglichkeit in regionalen Eigentümerstrukturen und Betreibergesellschaften erfolgt. Ein möglichst direkter Vertrieb der regional erzeugten Energie in der Region kann zudem dazu beitragen, dass Geld, das sonst für fossile Energieträger ausgegeben würde, in regionale Kreisläufe umgelenkt wird.

Eine umfassende Strategie für eine dezentrale Energiewende erfordert jedoch auch umfangreiche soziale Innovationen – beispielsweise in den Aufbau von Regionalwerken, Bürgerenergiegenossenschaften oder anderen Kooperationen, die auf den energiewirtschaftlichen Märkten aktiv werden können. Dafür gibt es eine wachsende Zahl von Anknüpfungsmöglichkeiten bei Kommunen, Stadtwerken und zivilgesellschaftlichen Initiativen.

Allerdings wird die Nutzung erneuerbarer Energiequellen insbesondere für die Menschen im ländlichen Raum immer stärker wahrnehmbar. Dies führt zu Akzeptanzproblemen etwa bei Windenergieanlagen oder bei der Biomasseproduktion. Derzeit entwickelt die Abteilung Stadt- und Regionalentwicklung an der Universität Bayreuth neue Konzepte für eine transdisziplinäre Forschung in der Region, die Universitäten als Wissensproduzenten mit Unternehmen, Kommunen und zivilgesellschaftlichen Akteuren zusammenbringt. Das Ziel ist es, passende Lösungen für die Herausforderungen einer gesellschaftlich und ökologisch akzeptierten Form der Energiewende in Regionen zu erarbeiten.



Abb 3: Die Untersuchungsregion der Studie zu den Potenzialen erneuerbarer Energien in Nordostbayern (Grafik: B. John).

- 1 In dem vom Bundesverkehrsministerium (BMVBS) in Auftrag gegebenen Projekt hat die Abteilung Stadt- und Regionalentwicklung der Universität Bayreuth mit Prof. Dr. Reinhold Kosfeld an der Universität Kassel sowie mit dem Kasseler Ingenieurbüro MUT-Energiesysteme zusammengearbeitet.
- 2 Vgl. zu diesen und den folgenden Ergebnissen: EWENOB 2012: Energiewende Nordostbayern. Konzeptstudie für einen Aufschwung durch Energiewende. Amberg, Bayreuth, Kulmbach. Online unter: [www.stadregion.uni-bayreuth.de/de/projects/Ewenoby/](http://www.stadregion.uni-bayreuth.de/de/projects/Ewenoby/)
- 3 Bei der Ermittlung des Potenzials zur Erzeugung erneuerbarer Energien bis 2030 wurden ökologische und immissionsschutzrechtliche Aspekte besonders berücksichtigt. Bei der Berechnung der Potenzialflächen zu Windkraftnutzung wurden die Mindestabstände möglicher Windenergieanlagen zu Bauflächen noch um einen zusätzlichen „Puffer“ von 200m auf 1.000 m erhöht und Naturschutzgebiete unterschiedlicher Schutzkategorien (inkl. Landschaftsschutzgebiete) ausgeschlossen.
- 4 Der Bereich Mobilität wurde in diesem Szenario nicht betrachtet.



SCHULE

■ FRANZ X. BOGNER  
GERDI HAVERKAMP-HERMANS  
MAXIMILIANE SCHUMM

# Erneuerbare Energien im Schul- unterricht

MODERNE  
UNTERRICKTSKONZEPTE ZU  
MÜLLVERBRENNUNGSENERGIE  
UND ERNEUERBAREN ENERGIEN

■ Schülerinnen und Schüler besichtigen  
einen Müllbunker des Müllkraftwerks  
Schwandorf (Foto: G. Haverkamp-Hermans).

**M**ia und ihr kleiner Bruder Thomas sind glücklich. Am letzten Schultag vor den Herbstferien werden sie von Papa mit dem Auto von der Schule abgeholt. Das Wetter ist kalt und grau, aber wen kümmert das, wenn man doch jetzt die ganze nächste Woche in seinem warmen Haus verbringen kann. Mia wird sich gleich, wenn sie zu Hause angekommen ist, ein warmes Bad einlassen und dort mit ihrer besten Freundin telefonieren, bis ihre Mutter zum Abendessen ruft. Hoffentlich gibt es eine leckere Tiefkühlpizza frisch aus dem Backofen. Thomas träumt schon davon, dass ihn die Eltern heute ein bisschen länger am Computer spielen lassen als sonst.

Andere Kinder würden sich währenddessen wohl kaum Gedanken darüber machen, dass sie bei ihren Lieblingstätigkeiten auf eine kontinuierliche Strom- und Wärmeversorgung angewiesen sind. Doch Mia und Thomas gehören zu den mehr als 700 Schülerinnen und Schülern, die an zwei unterschiedlichen Bildungsprogrammen des Lehrstuhls Didaktik der Biologie unter der Leitung von Prof. Dr. Franz X. Bogner teilgenommen haben:

- Ein Unterrichtsprojekt von Gerdi Haverkamp-Hermans in Kooperation mit der Müllverwertungsanlage Schwandorf richtete sich an die 4. Jahrgangsstufe;
- Maximiliane Schumm hingegen unterrichtete die Thematik „Erneuerbare Energien“ in mehreren 10. Klassen oberfränkischer Gymnasien.

## ENERGIEGEGWINNUNG DURCH MÜLLVERBRENNUNG

Die Begriffe Reduce, Reuse, Recycle sind bekannt; ein viertes R, Recover, wird in diesem Zusammenhang immer wichtiger. Nach Vermeidung, Wiederverwendung und Recycling geht es bei dem vierten R um die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Restmüll. Neben wertvollen Bestandteilen (z.B. Metall) steckt aber auch viel Energie im Restmüll; diese Ressourcen sollen nicht verloren gehen. Am außerschulischen Lernort „Müllkraftwerk Schwandorf“ lernen Schülerinnen und Schüler, wie sie selbst zu den 4 R's beitragen können. In einer Gruppenarbeit erfahren sie, wie verschiedene Müllarten entsorgt, wiederverwendet oder von vornherein vermieden werden können. Sie lernen die Abfallhierarchie kennen und erfahren, wie sie am besten mit dem anfallenden Hausmüll verfahren sollten.

Danach wird aufgezeigt, wie der Restmüll von zu Hause ins Müllkraftwerk transportiert wird und was dort mit ihm geschieht. Anhand einer Modell-Dampfmaschine wird erklärt, wie aus Brennstoff Strom produziert werden kann. Im anschließenden Unterrichtsgang im Müllkraftwerk erleben die Schülerinnen und Schüler, wie Restmüll verarbeitet und dabei in Strom und Wärme umgesetzt wird.

## LERNEN AM AUSSERSCHULISCHEN LERNORT

Thomas macht eine Klassenfahrt zum Müllkraftwerk. Hier erlebt er, welche große Mengen Müll mit dem Zug und mit LKWs angeliefert und im Müllbunker zusammengeführt werden. Er sieht, wie riesige Kräne den Müll vom Bunker in die vier Ofenlinien befördern. Ein Greifer des Krans kann mit einem einzigen Griff eine Müllmenge befördern, mit deren Verbrennung ein ganzer Privathaushalt ein ganzes Jahr lang mit Strom versorgt werden könnte.

Aber wie gewinnt man aus Müll Strom? Thomas kann über ein spezielles Beobachtungsloch in die Ofenlinie schauen und den brennenden Müll sehen. Er erfährt, dass es im Ofen mit 800°C bis 1.000°C sehr heiß ist! Mit der hier entstehenden Wärme wird Wasserdampf für die Turbinen hergestellt, deren Generatoren den elektrischen Strom produzieren. Ein Müllkraftwerk ist daher eigentlich eine riesige Dampfmaschine, in der Müll statt Kohle oder Öl verbrannt wird. In gewisser Weise funktioniert dies sogar noch effizienter als eine Dampfmaschine, weil der Dampf zusätzlich als Fernwärme zum Heizen eines ganzen Ortsteils eingesetzt wird.

Thomas und seine Mitschülerinnen und Mitschüler erfahren, wie Müllberge verringert werden können, wo und wie Restmüll entsorgt wird und was davon am Schluss übrig bleibt. Zwar wissen sie jetzt, dass aus Müll Strom und Fernwärme gewonnen werden kann, aber trotzdem gilt immer noch: Der beste Müll ist der Müll, der erst gar nicht entsteht!

## AUTOR



Prof. Dr. Franz X. Bogner ist Inhaber des Lehrstuhls für Didaktik der Biologie an der Universität Bayreuth.

Abb. 1: Schülerinnen und Schüler werfen einen Blick in eine Ofenlinie des Müllkraftwerks Schwandorf (Foto: G. Haverkamp-Hermans).



## ERNEUERBARE ENERGIEN VS. FOSSILE ROHSTOFFE

### AUTORINNEN



Gerdi Haverkamp-Hermans und Maximiliane Schumm sind Mitarbeiterinnen am Lehrstuhl für Didaktik der Biologie an der Universität Bayreuth.

Das Lernmodul „Energie – heute und morgen“ ist für 10. Jahrgangsstufen des Gymnasiums konzipiert. In möglichst kurzer Zeit soll dabei ein Überblick über das Thema „Erneuerbare Energien“ vermittelt werden. Dies geschieht in einem Lernzirkel mit neun Lernstationen. Hierfür stehen unterschiedliche Lernmaterialien zur Verfügung, die unterschiedliche Aspekte von Energienutzung und -produktion in unserem Leben abbilden.

Um zu verstehen, warum die Auseinandersetzung mit Energieversorgung zukunftsträchtig ist, beschäftigen sich Mia und ihre Mitschülerinnen und Mitschüler mit der Problematik der Nutzung fossiler Rohstoffe. Die über Jahrtausende dauernde Entstehung von Erdöl und Erdgas sowie das bei deren Verbrennung freiwerdende Treibhausgas Kohlendioxid, das u.a. für die steigenden Temperaturen auf der Erde Verantwortung trägt, macht den Ruf nach Alternativen klar. Hinzu kommen die politisch gesteckten Ziele der Energiewende, die nur mit einer Energieversorgung weitgehend weg von fossilen oder nuklearen Brennstoffen erreicht werden können.

Ob Energie in der Photosynthese chemisch fixiert und danach durch Verbrennung oder Vergärung wieder freigesetzt wird, ob Wind durch Erwärmung und Abkühlung von Luftmassen entsteht, ob Sonnenenergie direkt genutzt wird oder Nie-

derschlagswasser in Wasserkraftwerken zur Energieerzeugung verwendet wird – die Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind vielfältig. Die Grundlage aller erneuerbaren Energiequellen, die Geothermie ausgenommen, ist jedoch dieselbe: die Sonne.

### EIGENE VERANTWORTUNG

Mia kann ihre Eltern immer wieder dazu anhalten, die Energieversorgung der Familie nachhaltiger zu gestalten, sie kann aber auch selbst viel für einen schonenden Umgang mit Ressourcen tun. Genau deswegen erarbeitet das Lernmodul Handlungsmöglichkeiten für die Schule und zu Hause. Ziel ist es, jeden Einzelnen und jede Einzelne in die Lage zu versetzen, eigenes Handeln energieeffizienter zu gestalten.

Mündige Bürgerinnen und Bürger müssen aber auch die Kehrseite der Medaille kennen, um sich ein eigenes Urteil über die Nutzung erneuerbarer Energien bilden zu können. Dazu zählt auch der „Tank-Teller-Konflikt“, also das Spannungsverhältnis zwischen Nahrungsmittelproduktion und der Erzeugung von Biomasse zur Strom- und Brennstoffgewinnung. Die Jugendlichen beschäftigen sich mit weiteren Anliegen verschiedener Interessengruppen und Hindernissen in Bezug auf die Nutzung und den Ausbau erneuerbarer Energien.



Abb. 2: Schülerinnen und Schüler arbeiten mit der Simulation „Energiespiel Bayern“ (Foto: M. Schumm).

## LERNMATERIALIEN STÄRKEN DIE FÄHIGKEIT ZUR SELBSTSTÄNDIGEN PROBLEMLÖSUNG

Die Intention des Lernmaterials ist es, dass die Schülerinnen und Schüler sich selbsttätig mit den oben beschriebenen Inhalten auseinandersetzen – sei es, ein Wasserrad zum Laufen zu bekommen, genau 1kWh Stunde Holz in die Hand nehmen können, eine fiktive Landschaft mit erneuerbaren Energien zu versorgen oder selbst auszurechnen, wie die individuelle Energiebilanz im eigenen Alltag aussieht. Des Weiteren wird die kognitive Aktivität immer wieder durch Fragen herausgefordert, die nicht direkt aus den bereitgelegten Materialien abgeleitet werden können. Schülerinnen und Schüler müssen sozusagen „um die Ecke denken“, um so ihre Problemlösefähigkeiten zu trainieren.

In das Unterrichtsprojekt ist auch eine Unterrichtsstunde mit der interaktiven Simulation „Energiespiel Bayern“ integriert: In einer virtuellen Landkarte des Freistaates Bayern soll im Zeitraum zwischen 2013 und 2022 die Energieversorgung des Landes so geplant werden, dass nach Abschaltung aller Atomkraftwerke eine Versorgung mit alternativen Energiequellen sicher gewährleistet wird. Trotz komplexer Anforderungen sind die Vorteile einer solchen eLearning-Einheit klar: Sie liegen in höherer Anschaulichkeit, einer Darstellung komplexer Zusammenhänge und einer Lösungsfindung durch Versuch und Irrtum. Die forschend-entdeckende Beschäftigung mit dem Thema „Erneuerbare Energien“ versetzt Schülerinnen und Schüler in die Lage, besonders nachhaltig zu lernen.

## BEGLEITFORSCHUNG

Während der Projekte von Gerdi Haverkamp-Hermans und Maximiliane Schumm wurden die Schülerinnen und Schüler mehrmals nach ihrem Wissensstand befragt: vor, unmittelbar nach und einige Wochen nach der Teilnahme. Unterschiede im Wissen werden nun mit dem jeweiligen individuellen Umweltverhalten und der Umwelteinstellung in Beziehung gesetzt. Der Erhebung liegt das Bayreuther Umweltkompetenzmodell zugrunde, das gezielt Wissen über die Zusammenhänge

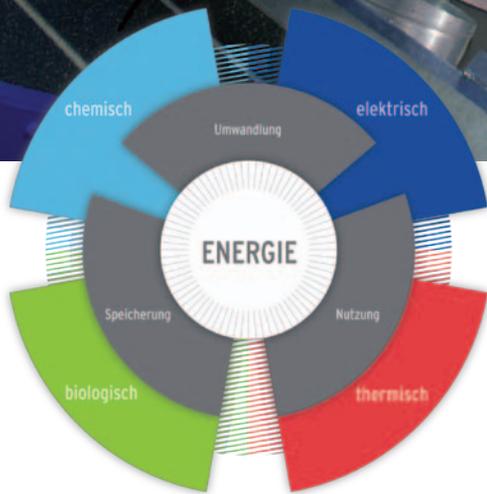
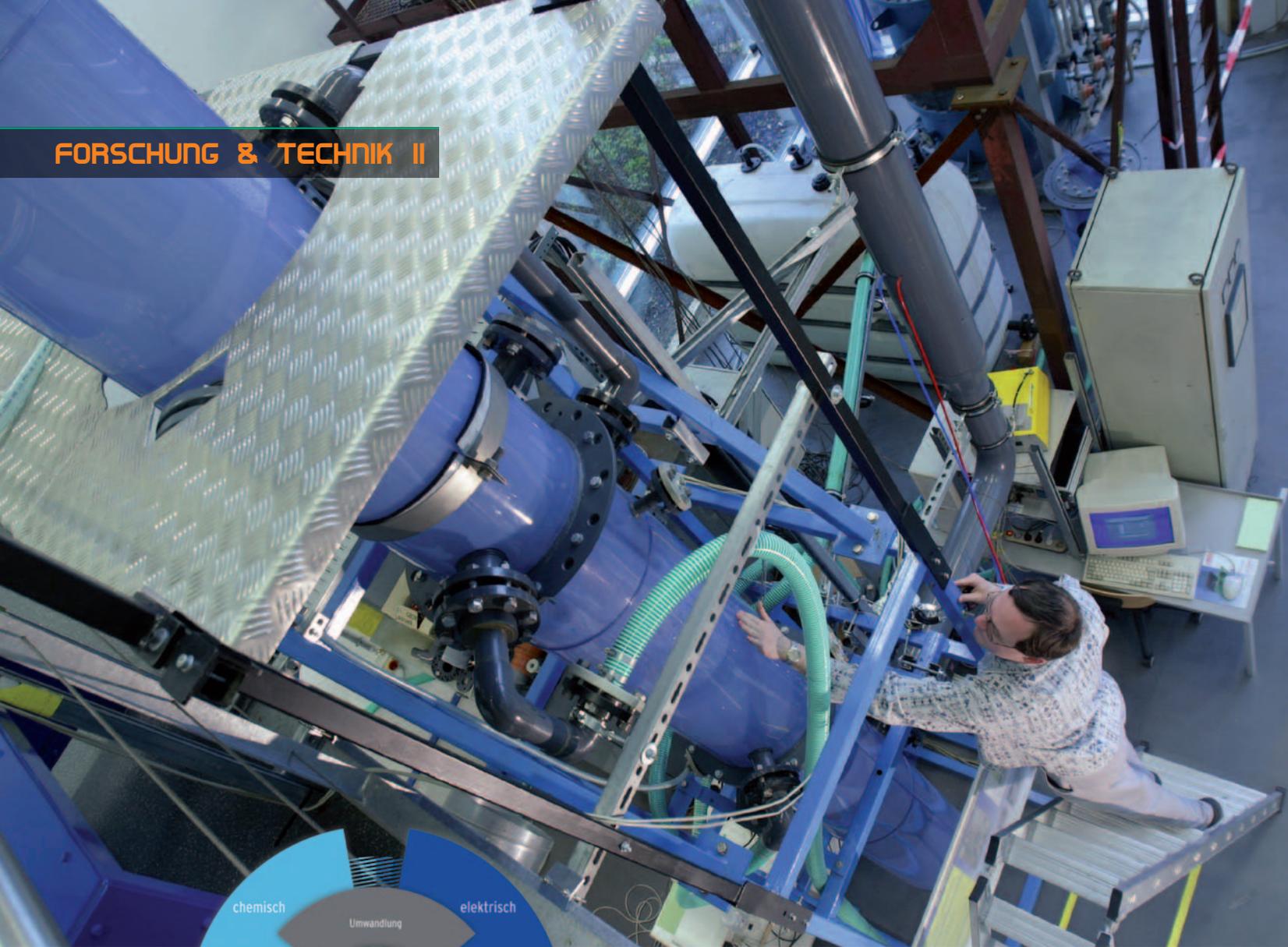


in (Öko-)systemen, Handlungsoptionen und ihre Wirksamkeit erfasst. Wer zum Beispiel weiß, wie der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid und der Klimawandel miteinander zusammenhängen, sollte besser entscheiden können, was man tun kann, um gegen den Klimawandel anzukämpfen. Er oder sie weiß dann besser, welche Auswirkungen das eigene Handeln auf den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß hat.

Abb. 3: Schülerinnen und Schüler arbeiten mit Unterrichtsmaterialien zum Thema „Biogas“ (Foto: M. Schumm).

## LINKTIPP

- [www.energiespiel.bayern.de](http://www.energiespiel.bayern.de)



# Das Zentrum für Energietechnik (ZET)

VON DER GRUNDLAGENFORSCHUNG BIS ZU NEUEN PRODUKTEN UND VERFAHREN

 Venturiwäscher im Zentrum für Energietechnik. Mit dieser Anlage können feinste Partikel aus Abgasen entfernt werden (Foto: ZET).

**D**as ZET ist eine Säule des Profildfelds „Energieforschung und Energietechnologie“ der Universität Bayreuth. Das Zentrum bündelt in der Forschung die energietechnischen Kompetenzen und Projekte der Fakultät für Ingenieurwissenschaften (Ing.). In der Lehre koordiniert und entwickelt es deren energietechnisches Lehrangebot.

Die derzeit acht Lehrstühle, die zum ZET mit ihrer jeweiligen Expertise beitragen, umspannen thermische, elektrische, chemische und biologische Aspekte der Erzeugung, Übertragung, Speicherung und Nutzung von Energie.

Unternehmen, Kommunen und andere Interessenten finden im ZET eine zentrale Anlaufstelle für ihre Energie-Fragen:

- Projekte der anwendungsnahen Grundlagenforschung
- Konkrete Studien und Bewertungen
- Entwicklung energietechnisch relevanter Produkte und Verfahren für Anwender

Das ZET leistet zudem einen wichtigen Beitrag zur TechnologieAllianzOberfranken (TAO). Es trägt zu dessen Themenschwerpunkt „Energie“ mit Forschungsvorhaben zu den folgenden Themenfeldern bei:

- Umwandlung, Verteilung und Speicherung regenerativer Energien
- Energieeffiziente Gebäude
- Kraftstoffe, Verbrennung und Emissionen
- Sensorik in der Energietechnik

#### LINKTIPP

- [www.zet.uni-bayreuth.de](http://www.zet.uni-bayreuth.de)

### Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT)

*Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann*

Der LTTT beschäftigt sich innerhalb des ZET mit

- übergreifenden Aspekten von Energiesystemen und Energietechnologien bis hin zu ökonomischen, ökologischen und gesellschaftspolitischen Analysen und mit
- Themen der thermischen Energie, z.B. der Abwärmenutzung und der Kraft-Wärme-Kopplung.

Besondere FuE-Schwerpunkte sind aktuell:

- dezentrale Stromerzeugungsanlagen und hierbei insbesondere der Organic Rankine Cycle sowie
- stationäre und mobile latente thermische Speicher

### Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik (MRT)

*Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer*

Der Lehrstuhl MRT bringt in das ZET solche Aspekte der Automatisierungstechnik ein, die mit energietechnischen Fragestellungen zu tun haben. Die Kompetenzen liegen beispielsweise in den folgenden Bereichen:

- Modellbildung, Simulation und Entwurf (FEM, Matlab/Simulink)
- Herstellung von Strukturen und Bauelementen, vor allem Sensoren, in Dünnschichttechnologie
- Schaltungsentwicklung, Steuerungstechnik
- Prüfstandsbauelemente, Test und Charakterisierung

Damit werden Lösungen unter anderem für folgende Anwendungsgebiete erarbeitet:

- Elektromotoren
- Windkraftanlagen
- Verbrennungsprozesse
- thermoelektrische Generatoren
- Energieübertragung
- drahtlose Informationssysteme

## Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik (CVT)

Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess

Der Lehrstuhl CVT befasst sich innerhalb des ZET unter anderem mit

- chemisch-verfahrenstechnischen Aspekten der Erzeugung von Energieträgern vom Labormaßstab bis hin zur Modellierung technischer Reaktoren und
- globalen Stoff- und Energiebilanzen sowie mit sozialen und ökologischen Aspekten der zukünftigen Energieversorgung.

Besondere Schwerpunkte in Forschung und Entwicklung sind aktuell:

- die Erzeugung gasförmiger bzw. flüssiger Kraftstoffe (SNG, Dieselöl, Kerosin) aus regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Kohlendioxid durch Methanisierung bzw. Fischer-Tropsch-Synthese
- der Einsatz ionischer Fluide in der thermischen Verfahrenstechnik und der heterogenen Katalyse

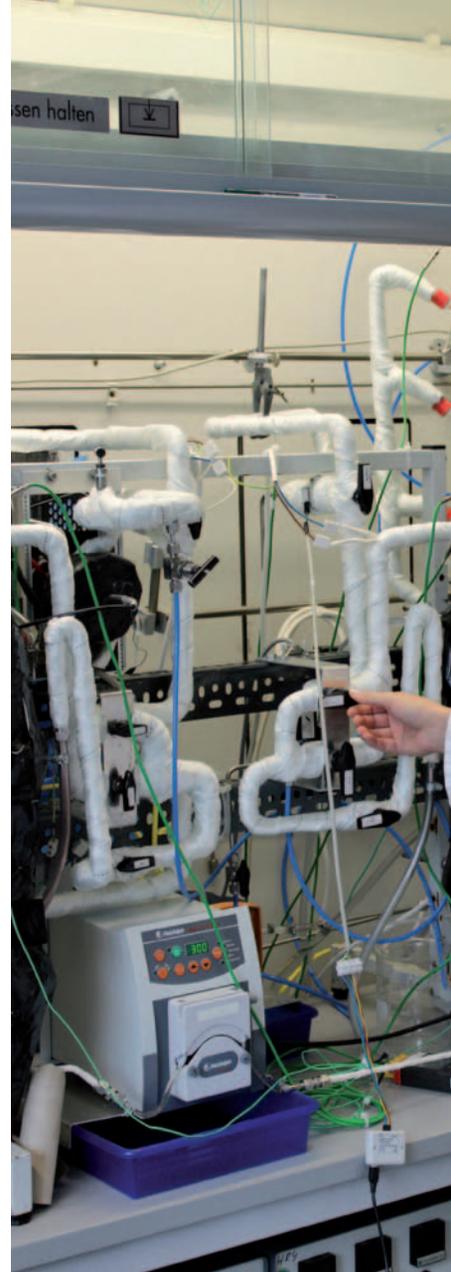
## Lehrstuhl für Bioprozesstechnik (BPT)

Prof. Dr. Ruth Freitag

Der Lehrstuhl BPT beschäftigt sich innerhalb des ZET mit Fragen der Produktion und Transformation von Energieträgern mittels biologischer Systeme.

Besondere Schwerpunkte in Forschung und Entwicklung sind aktuell:

- molekularbiologische und biochemische Grundlagen der Biogasproduktion
- Prozessentwicklung und -optimierung in der Biogasproduktion
- Stoffkreisläufe in der Biogasproduktion
- Simulation mittels CFD der Durchmischungsvorgänge in Anlagen zur Bioenergieproduktion
- mikrobielle Brennstoffzelle (biologische Komponente)



## Lehrstuhl für Funktionsmaterialien (FM)

Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos

Die Kompetenz des Lehrstuhls FM im Rahmen des ZET liegt im Bereich neuer Technologien und Materialien zur Schadstoffminderung und Energiewandlung.

Energierrelevante Themen sind insbesondere:

- Emissionsreduktion im Abgas von Motoren und Turbinen durch hochtemperaturstabile Katalysator- und Abgasminderungssysteme
- robuste chemische Sensoren für den Abgasstrang und zur Luftqualitätskontrolle
- effiziente und kostengünstige Materialien für thermoelektrische Generatoren
- Materialien und Verfahren für die elektrochemische CO<sub>2</sub>-Reduktion

Dabei stehen die Technologie und das Know-how von der Materialsynthese über die Simulation bis hin zur Charakterisierung der Kenngrößen zur Verfügung. Eine enge Kooperation mit Industriepartnern gewährleistet anwendungsnahe Forschung.



## Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung (WV)

*Prof. Dr. rer. nat. Monika Willert-Porada*

Der Lehrstuhl WV beschäftigt sich innerhalb des ZET mit

- materialwissenschaftlichen Aspekten von Energiesystemen und -technologien unter Einbeziehung der Verfügbarkeit von Rohstoffen und Schließung von Stoffkreisläufen und mit
- Werkstoff- und Verfahrensentwicklung für die elektrochemische und elektrothermische Energiespeicherung und -wandlung.

Besondere FuE-Schwerpunkte sind aktuell:

- neue Materialien für Lithium-Ionen-, Zink-Luft- und Bleibatterien, PEM-Brennstoffzellen sowie für Hochtemperatur-Energiewandlungssysteme
- photokatalytische und bioelektrochemische Wasserstoffherstellung und -nutzung

## Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD (CAD)

*Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg*

Der Lehrstuhl CAD befasst sich innerhalb des ZET mit der Anwendung neuartiger Berechnungsmethoden in den Bereichen Werkstoffe, Energie, Mobilität und Informationstechnologie.

Besondere Schwerpunkte in Forschung und Entwicklung sind aktuell:

- Motorenentwicklung für Heimkraftwerke
- Dimensionierung und Festigkeitsberechnung von Brennelemente-Transportbehältern
- Entwicklung alternativer Raumklimatisierungssysteme
- Entwicklung innovativer Fenstermaterialien
- Entwicklung von alternativen Windkraftanlagenmaterialien

## Lehrstuhl für Mechatronik (LfM)

*Prof. Dr.-Ing. Mark-M. Bakran*

Das energietechnische Forschungsportfolio des LfM wird von folgenden Themen repräsentiert:

- sichere elektrische Wandler
- HVDC-Energieübertragung
- elektrische Energiespeicher
- Leistungselektronik

Die Forschung des Lehrstuhls konzentriert sich auf energietechnische und antriebstechnische Anwendungen der Mechatronik, wobei die Leistungselektronik die verbindende Rolle einnimmt. In der modernen Energiewandlung entspricht das dem Trend, dass ein immer größerer Anteil der Energie elektrisch ist und dabei wiederum die Leistungselektronik die zentrale Rolle des Energiewandlers einnimmt.

Die Entwicklung von neuen Schaltungstechniken, die Nutzung neuartiger Bauelemente und die systemtechnische Optimierung sind Schwerpunkte der Arbeit.

 Dipl.-Ing. Theresa Mangartz an einer Anlage zur Trocknung von Erdgas (Foto: Chr. Wißler).



■ DIETER BRÜGGEMANN

# Neue Wege der dezentralen Stromerzeugung

VON DER GEOTHERMIE ZUR INDUSTRIELLEN ABWÄRME

■ Geothermie-Kraftwerk bei Wairakei  
in der Region Taupo, Neuseeland (sst).

**T**rotz des massiven Ausbaus an Photovoltaik- und Windkraftanlagen wird in Deutschland Strom noch immer zum größten Teil aus fossilen Energieträgern wie Kohle und Erdgas sowie aus Kernenergie erzeugt. Im Jahr 2012 betrug dieser Anteil 72 Prozent. Dabei werden in der Regel zentrale Großkraftwerke eingesetzt, die Anlagenleistungen von mehr als 100 Kilowatt erbringen – und zwar auf der Grundlage eines Dampfkraftprozesses, der schon im 19. Jahrhundert von William Rankine vorgeschlagen wurde. Bei diesem Kraftwerkstyp wird die thermische Energie, die bei der Verbrennung bzw. aus der Spaltung von Uran entsteht, an einen Wasserkreislauf übertragen. Das Wasser wird dadurch erwärmt und vollständig verdampft. Der Dampf wird noch weiter überhitzt und in eine Turbine geleitet. Die Druckenergie des Wasserdampfes wird über die Turbinenschaufeln in kinetische Energie gewandelt. Die Turbine dreht sich und treibt einen Generator an. Der so erzeugte Strom kann dann in die Verteilnetze eingespeist werden.

Mit der geplanten Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien werden mehr und mehr zentrale Großkraftwerke, die auf fossilen oder nuklearen Energieträgern basieren, durch viele kleine und dezentrale Anlagen ersetzt. Die bekanntesten Varianten der dezentralen Stromerzeugung sind die Photovoltaik, Windkraftanlagen sowie Wasserkraftwerke. Weil das Angebot an Sonne und Wind naturgemäß stark schwankt, wird nach ergänzenden Lösungen gesucht, die eine dauerhafte und sichere Substitution der fossil befeuerten Großkraftwerke ermöglichen.

Eine hierfür besonders aussichtsreiche Technologie beruht auf dem Organic Rankine Cycle (ORC). Dies ist ein Dampfkraftprozess nach dem von William Rankine entwickelten Prinzip; doch wird statt Wasser ein organisches Fluid als Arbeitsmedium eingesetzt. Zu der Vielzahl an hierfür geeigneten Stoffen zählen Kältemittel, wie sie in Kühlschränken verwendet werden, und Kohlenwasserstoffe, die auch als Bestandteile in Otto- oder Dieselmotoren vorkommen. Der Vorteil solcher organischen Fluide besteht darin, dass sie bereits bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen verdampfen und dabei höhere Drücke aufbauen als Wasser. Dieser Vorteil wurde bereits in den 1960er Jahren für die dezentrale Stromerzeugung aus Abwärme erkannt. Er erlangte aber erst in den 1980er Jahren infolge der beiden vorangegangenen Öl-

krisen technologische Bedeutung, bevor weltweit fallende Energiepreise eine Stromerzeugung aus Niedertemperaturquellen wirtschaftlich wieder unattraktiv werden ließen. Aufgrund der im neuen Jahrtausend stetig steigenden Energiepreise erfuhr die ORC-Technologie eine Renaissance. Es hat sich dabei als besonders wichtig herausgestellt, dieses Verfahren der Energiegewinnung im Wechselspiel von Forschung und Anwendung technisch und wirtschaftlich zu verbessern.

---

**„EIN ANWENDUNGSFELD FÜR ORC-ANLAGEN, DAS FÜR DIE NÄCHSTEN JAHRE EIN ENORMES WACHSTUM VERSPRICHT, IST DIE NUTZUNG DER IN INDUSTRIEANLAGEN ENTSTEHENDEN ABWÄRME.“**

Der Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) im Zentrum für Energietechnik (ZET) hat diese Herausforderung frühzeitig wahrgenommen. Im Laufe eines Jahrzehnts hat sich daher an der Universität Bayreuth eine international sichtbare Forschungsgruppe zum Organic Rankine Cycle etabliert. Zahlreiche Projekte spannen den Bogen von der Grundlagenforschung zur Anwendung gemeinsam mit Industriepartnern. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung von ORC-Systemen, die thermoökonomisch – also sowohl in energetischer wie in wirtschaftlicher Hinsicht – optimiert sind. Diese Systeme dienen der dezentralen Stromerzeugung in geothermischen Kraftwerken und bei der Nutzung industrieller Abwärme.



**Abb. 1:** Der Organic Rankine Cycle ist nach dem schottischen Physiker und Ingenieur William John Macquorn Rankine (1820 – 1872) benannt. Rankine zählt zu den Begründern der Thermodynamik und hat wesentliche Beiträge zur Wärmetheorie und zur Funktionsweise der Dampfmaschine geliefert.

## AUTOR



Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann ist Direktor des Zentrums für Energietechnik (ZET) und Inhaber des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT).

## GEOTHERMISCHE STROMERZEUGUNG

Bei der geothermischen Stromerzeugung dient Heißwasser aus dem Erdinneren als Wärmequelle für den ORC. Das Wasser wird teilweise aus einer Tiefe (der sogenannten Teufe) von über 5.000 m an die Oberfläche gepumpt. Aussichtsreiche Standorte in Deutschland sind insbesondere das Süddeutsche Molassebecken südlich von München sowie der Oberrheingraben von Köln bis Basel. Das Potenzial ist mit 8,5 Gigawatt, also 10 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs, beträchtlich. Aufgrund der enormen Kosten für die Tiefenbohrung ist es wichtig, ein möglichst effizientes Kraftwerkskonzept zu wählen. Am LTTT / ZET wird dabei besonders der Einsatz von Fluidgemischen untersucht.

„Weil sich die Temperatur während der Verdampfung ändert, können wir die geothermische Quelle besser ausnutzen und erreichen somit erhöhte Wirkungsgrade“, erklärt Dr.-Ing. Florian Heberle, der sich in seiner Bayreuther Dissertation mit genau diesem Phänomen beschäftigt hat. Auch der Ein-

satz von mehrstufigen Anlagen zielt auf eine Erhöhung des Wirkungsgrades. Es ist dabei besonders wichtig, neuartige Kraftwerkskonzepte mit den Betriebsdaten bereits realisierter Anlagen ständig zu vergleichen. Daher hat die Bayreuther ORC-Forschungsgruppe bereits zwei geothermische Kraftwerke bei der Inbetriebnahme wissenschaftlich begleitet. „Dadurch haben wir sehr interessante Impulse für zukünftige Forschungsvorhaben gewonnen“, so Dr.-Ing. Heberle.

## NUTZUNG INDUSTRIELLER ABWÄRME

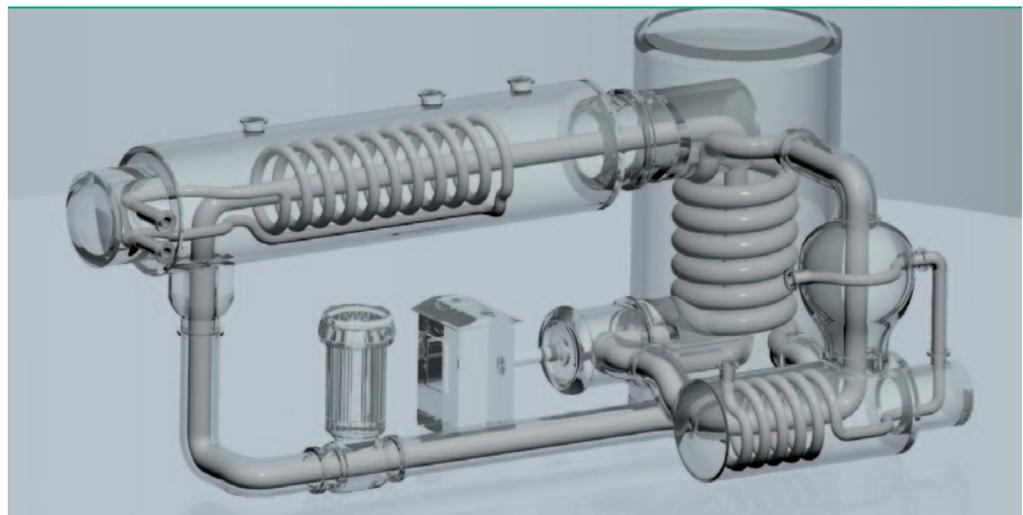
Ein weiteres Anwendungsfeld für ORC-Anlagen, das für die nächsten Jahre ein enormes Wachstum verspricht, ist die Nutzung der in Industrieanlagen entstehenden Abwärme. Diese wird bisher meist ungenutzt über Kamine oder über Kühlsysteme an die Umgebung abgegeben. Die Nutzung von Abwärmeströmen in Mini-ORC-Anlagen ist ein Forschungsschwerpunkt am LTTT / ZET. Allein in Deutschland gehen mehrere Studien davon aus, dass die technisch-wirtschaftlich erschließbare elektrische Leistung im Durchschnitt rund 5 Gigawatt beträgt. Zum Vergleich: Die drei größten noch am Netz befindlichen Kernreaktoren in Deutschland (Isar/Ohu 2, Brokdorf, Philippsburg 2) weisen eine elektrische Leistung von 4,4 Gigawatt auf.

Dieses Potenzial ist derzeit jedoch kaum erschlossen. Das Hauptproblem liegt darin, dass die Abwärmeströme hinsichtlich ihrer Temperatur und der abgegebenen Leistung starken Schwankungen unterliegen. Da viele Prozesse bei einer bestimmten Temperatur betrieben werden müssen, bedarf



Abb. 2 (oben): Tiefenbohrung für das Geothermie-Kraftwerk in Insheim/Pfalz, das 2012 in Betrieb ging (Foto: Claus Ableiter, CC-BY-3.0).

Abb. 3: Modell eines Organic Rankine Cycles (ORC). Nach diesem Verfahren werden Dampfturbinen betrieben – aber nicht mit Wasser, sondern mit organischen Fluiden, die schon bei niedrigen Temperaturen verdampfen (Bild: LTTT).





Dr.-Ing. Florian Heberle und Dr.-Ing. Markus Preißinger (v.l.) an einem Teststand zur Messung von Wärmeübergangskoeffizienten für die Verdampfung und Kondensation in geothermischen Kraftwerken (Foto: Chr. Wißler).

es auch für den nachgeschalteten Prozess einer maßgeschneiderten Lösung, die genau an das vorhandene Temperatur- und Leistungsniveau angepasst werden muss. „Jedes ORC-Mini-Kraftwerk ist sozusagen ein Unikat. Das führt zu erhöhten Entwicklungs- und damit Investitionskosten“ erklärt Theresa Weith, wissenschaftliche Mitarbeiterin am LTTT. „Es dauert derzeit noch zu lang, bis sich diese Kosten amortisieren.“



Als eine Lösung für dieses Problem kommen modular aufgebaute ORC-Anlagen infrage. Darin werden Standardkomponenten eingesetzt, die dann lediglich auf die jeweiligen Randbedingungen präzise abgestimmt werden müssen. In Bayreuth wurde hierfür ein thermoökonomisches Modell entwickelt, auf dessen Basis vielversprechende Konzepte bewertet werden können. Dadurch ist

es möglich, ORC-Anlagen speziell für Nieder- oder Hochtemperaturanwendungen zu entwickeln. Die Ergebnisse sollen dabei einen Weg zur Serienfertigung aufzeigen. Denn diese ist für eine Senkung der Investitionskosten und damit für den flächendeckenden Einsatz der Technologie nötig. „Jetzt wollen wir an einer Demonstrationsanlage im ORC-Testfeld des Zentrums für Energietechnik zeigen, dass sich unsere Ergebnisse aus der Simulation auch in der Praxis bewahrheiten“, so Dr.-Ing. Markus Preißinger, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und zugleich Geschäftsführer des ZET.

#### MIT WEITBLICK IN DIE ZUKUNFT

Es sind jetzt zwölf Jahre vergangen, seit der LTTT mit einem Doktoranden das damals noch etwas „exotische“ Thema ORC aufgegriffen hat. Heute ist daraus eine vor allem durch Drittmittel finanzierte Forschungsgruppe von sieben Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern entstanden. Hinzu kommen internationale Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die aus dem Ausland gezielt nach Bayreuth kommen wollen. Der Blick ist dabei weiter nach vorn gerichtet, und an Visionen fehlt es nicht. Ein Ziel künftiger Forschungsarbeiten ist es, die ORC-Technologie mit thermischen Speichersystemen zu koppeln, um damit ein noch größeres Maß an Effizienz und Flexibilität zu erreichen. Dies wäre ein weiterer wichtiger Schritt hin zu einer dezentralen Energieversorgung.

Verdampferrohr für die Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten organischer Fluide (Foto: ZET).



FORSCHUNG & TECHNIK II

■ RUTH FREITAG

# Energie- gewinnung aus Biogas

EIN BEITRAG  
ZUR ENERGIEWENDE

■ Luftbild einer  
Biogasanlage (sst).

**B**iogas besteht zu etwa gleichen Teilen aus Methan (CH<sub>4</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Daneben können noch geringe Mengen an Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) oder Stickstoff (N<sub>2</sub>) enthalten sein. Biogas entsteht überall dort, wo sich biologisches Material unter Sauerstoffausschluss zersetzt, also in Mooren und Sümpfen, im Verdauungstrakt besonders von Wiederkäuern, aber auch in Reisfeldern, Kläranlagen oder sogar Komposthaufen. Produziert wird das Biogas von einer komplex zusammengesetzten Gemeinschaft von Mikroorganismen. Die eigentlichen Methanproduzenten sind dabei die Archäen. Dies sind Urmikroben, die sich darauf spezialisiert haben, Stoffwechselprodukte von Bakterien und anderen Mikroorganismen umzusetzen (Abb. 1).

### BIOGAS ALS KOMPONENTE IM MIX DER ERNEUERBAREN ENERGIEN

In den Fokus der Energietechnik gelangte dieser biologische Stoffwechselvorgang, weil sich das im Biogas enthaltene Methan vergleichsweise einfach, zum Beispiel in Blockheizkraftwerken, in Strom und Wärme umwandeln lässt. So galt die Biogasproduktion aus nachwachsender Biomasse als ein idealer Beitrag zu einem modernen Mix an regenerativ erzeugten Energien. Vorteilhaft schien auch die „Grundlastfähigkeit“ des Biogases. Während die Produktion von Solarstrom oder Windenergie je nach Wetterlage und Tageszeit stark schwankt, wird Biogas gleichmäßig 24 Stunden am Tag produziert. Daher wurden vor allem Anlagen subventioniert, die nachwachsende Rohstoffe (NaWaRos) und Gülle verarbeiten. Allein in Bayern entstanden im Laufe der vergangenen zehn Jahre weit über tausend landwirtschaftliche Biogasanlagen.

Inzwischen hat sich allerdings gezeigt, dass Biogas als Rohstoff für die Stromproduktion nur bedingt taugt. Im Gegensatz zu Sonne und Wind, die im Prinzip in beliebigen Mengen und umsonst zur Verfügung stehen, muss die Biomasse für die Biogasproduktion erst einmal produziert werden. Die Fläche, die dafür zur Verfügung steht, ist endlich – abgesehen von ethischen Fragen wie der Debatte, inwieweit der Anbau von Energiepflanzen die Nahrungsmittelproduktion zurückdrängt, oder der nicht unproblematischen „Vermaisung“ der Landschaft. Dem wurde in der jüngsten Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2014) Rechnung getragen. Boni für NaWaRo-Anlagen oder

Gasaufbereitung zu Biomethan wurden ersatzlos gestrichen. Bereits am Netz befindliche Anlagen genießen zwar Bestandsschutz, ihre maximale Stromerzeugungskapazität wurde aber begrenzt.

So ist davon auszugehen, dass die klassische landwirtschaftliche Biogasanlage zukünftig keine wesentliche Rolle in der Versorgung der Bevölkerung mit regenerativ erzeugtem Strom mehr spielen wird. Die Zukunft von Biogas liegt in anderen Bereichen – insbesondere wenn es gelingt, die Substratbasis zu erweitern: also weg von den Energiepflanzen, hin zu einer Nutzung von organischem Abfall.

### BIOGAS – WOHIN GEHT DIE REISE?

Unser Energiebedarf wird derzeit nur teilweise durch Strom gedeckt. Wir benötigen darüber hinaus auch Wärme und verbrauchen noch immer nicht unerhebliche Mengen an stofflicher Energie, um Motoren zu betreiben. Viele Szenarien zur Machbarkeit der Energiewende klammern zum Beispiel die Mobilität bewusst aus, da es hier noch an überzeugenden Lösungen fehlt. Zwar lässt sich auch mit elektrischer Energie heizen oder Auto fahren. Doch dafür muss der „Strom“ vorrätig gehalten, d.h. die elektrische Energie gespeichert werden: ein derzeit intensiv beforschtes, aber nur ansatzweise gelöstes Problem. Davon zeugen auch die vielen „Power-to-Gas“- und „Power-to-Liquid“- Projekte. Dabei wird die Wandlung von elektrischer Energie in stoffliche Energie, also in gasförmige oder flüssige Treibstoffe, erforscht. Auch der Stromtransport vom Produktionsort hin zu den Nutzern löst derzeit Kontroversen aus.

Biogas hat im Mix der regenerativen Energien Alleinstellungsmerkmale. Es wird bereits als stofflicher Energieträger produziert. Statt einer – immer möglichen – Verstromung ist auch die direkte

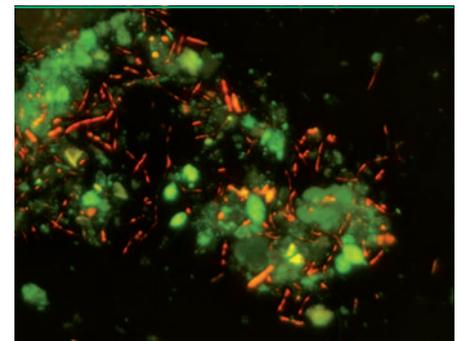
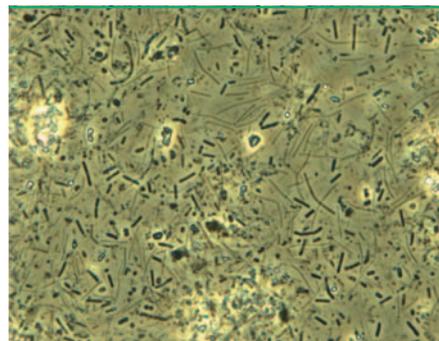


Abb. 1: Biogasbildende Gemeinschaft von Mikroorganismen. Links: lichtmikroskopisches, rechts: fluoreszenz-mikroskopisches Bild (Foto: Dr. A. Weiss).

### AUTORIN



Prof. Dr. Ruth Freitag ist Inhaberin des Lehrstuhls für Bioprozesstechnik an der Universität Bayreuth.

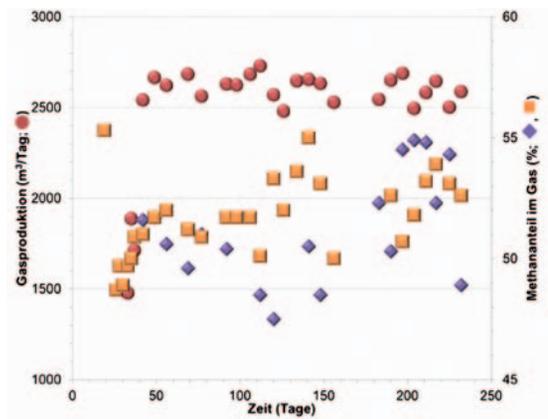
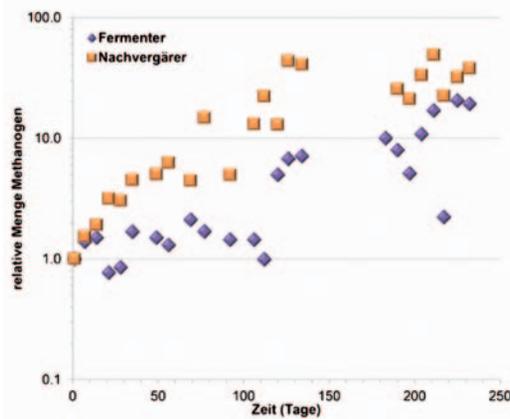


Abb. 2: Anlage der Firma MR Bioenergie Bayreuth (links), Konzentration an methanbildenden Mikroorganismen (Mitte) Biogasproduktion (rechts) (Foto: LS Bioprozesstechnik / Dr. Valérie Jérôme, Daten: MR Bioenergie Bayreuth, N. Weithmann, Doktorand am Lehrstuhl für Bioprozesstechnik).

stoffliche Nutzung eine Option. Insbesondere nach einer Aufbereitung zu Bio-Methan steht mit dem Erdgasnetz ein fast unbegrenzt aufnahmefähiger Speicher zur Verfügung.

flüssigen und als Treibstoff nutzen. Oder es wird bei Bedarf wieder verstromt, in diesem Fall fungiert es quasi als schneller, flexibler „Stromzwischenpeicher“. Denn ähnlich wie Gaskraftwerke könnten auch Biogaskraftwerke schnell ans Netz geschaltet werden, um Stromtäler auszugleichen.



Abb. 3: Biogasanlage der Firma Biokraftwerke Fürstenwalde GmbH (Fotos: Dr. A. Weiss).

Biogasanlagen eignen sich sogar für „Power-to-Gas“-Anwendungen. Überschüssiger Strom lässt sich dazu nutzen, Wasserstoff über eine Wasserelektrolyse zu produzieren. Wasserstoff selbst wird zwar auch immer wieder als stofflicher Energieträger diskutiert, etwa für Brennstoffzellen. Allerdings sind hier Fragen zu Lagerung und Transport noch weitgehend ungelöst. Bereits technisch ausgereift ist hingegen die – nach dem französischen Chemiker Paul Sabatier benannte – katalytische Reaktion, bei der Wasserstoff und CO<sub>2</sub> in Methan (und Wasser) umgewandelt werden. Es wurde nachgewiesen, dass dies sogar direkt mit Biogas funktioniert und sich so der Methangehalt des Roh-Biogases von 50 Prozent auf weit über 90 Prozent steigern lässt.<sup>1</sup> Nach einer weiteren Reinigungsstufe hat das so produzierte Bio-Methan praktisch Erdgasqualität. Es lässt sich ins Erdgasnetz einspeisen oder ver-

flüssigen und als Treibstoff nutzen. Oder es wird bei Bedarf wieder verstromt, in diesem Fall fungiert es quasi als schneller, flexibler „Stromzwischenpeicher“. Denn ähnlich wie Gaskraftwerke könnten auch Biogaskraftwerke schnell ans Netz geschaltet werden, um Stromtäler auszugleichen.

Damit die Biogasanlage der Zukunft diese Aufgaben übernehmen kann, muss sie „intelligenter“ werden. Statt einer konstanten Produktion werden in Zukunft ein hohes Maß an Flexibilität, Reaktions- und Kommunikationsfähigkeit gefordert sein. Biogasanlagen hierfür fit zu machen, ist eine Aufgabe der Bioverfahrenstechnik.

### BIOGASPRODUKTION UND ABFALLENTSORGUNG IN KOMBINATION

Leitthema der energietechnischen Forschungsvorhaben im ZET der Universität Bayreuth ist die „Verwertung ungenutzter Energieströme“. Im Fall von Biogas heißt das zunächst einmal, das Spektrum der zu verwertenden Rohstoffe in Richtung Abfallbiomasse zu erweitern. Vorbilder existieren in der industriellen Anaerobtechnik, bei der organisch belastete Abwässer biologisch unter Sauerstoffausschluss gereinigt werden. Auch wenn diese Verfahren in erster Linie der Abwasserreinigung dienen – die Biogas-/Stromproduktion ist nur ein angenehmer Nebeneffekt – belegen sie das Potenzial der Kombination von Biogasproduktion mit Abfallentsorgung. Beim leicht verderblichen Biomüll ist zudem ein Transport zu einigen wenigen Großabfallentsorgungsanlagen wenig praktikabel.

Im Gegensatz zum Energiepflanzenmix schwankt allerdings die Zusammensetzung des Biomülls stark, beispielsweise mit der Jahreszeit. Um unter

<sup>1</sup> Medieninformation des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) (idw, 16. Januar 2013).

diesen Bedingungen einen robusten Prozess sicherzustellen, ist eine verbesserte Steuerung und Regelung der Biogasanlage, vor allem aber ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden biologischen Vorgänge erforderlich. Am Lehrstuhl für Bioprozesstechnik unter der Leitung von Prof. Dr. Ruth Freitag werden komplexe „technische Ökosysteme“ wie Biogasanlagen bereits seit 2005 erforscht. Hier konnten im Rahmen von Industriekooperationen auch Erfahrungen mit kommunalen Abfall-Biogasanlagen gesammelt werden (Abb. 3). Es hat sich gezeigt, dass gerade solche Anlagen stark von Stoffwechsel-Redundanzen geprägt sind. Dies erhöht zwar die Stabilität der Biogas-Erzeugung, er-

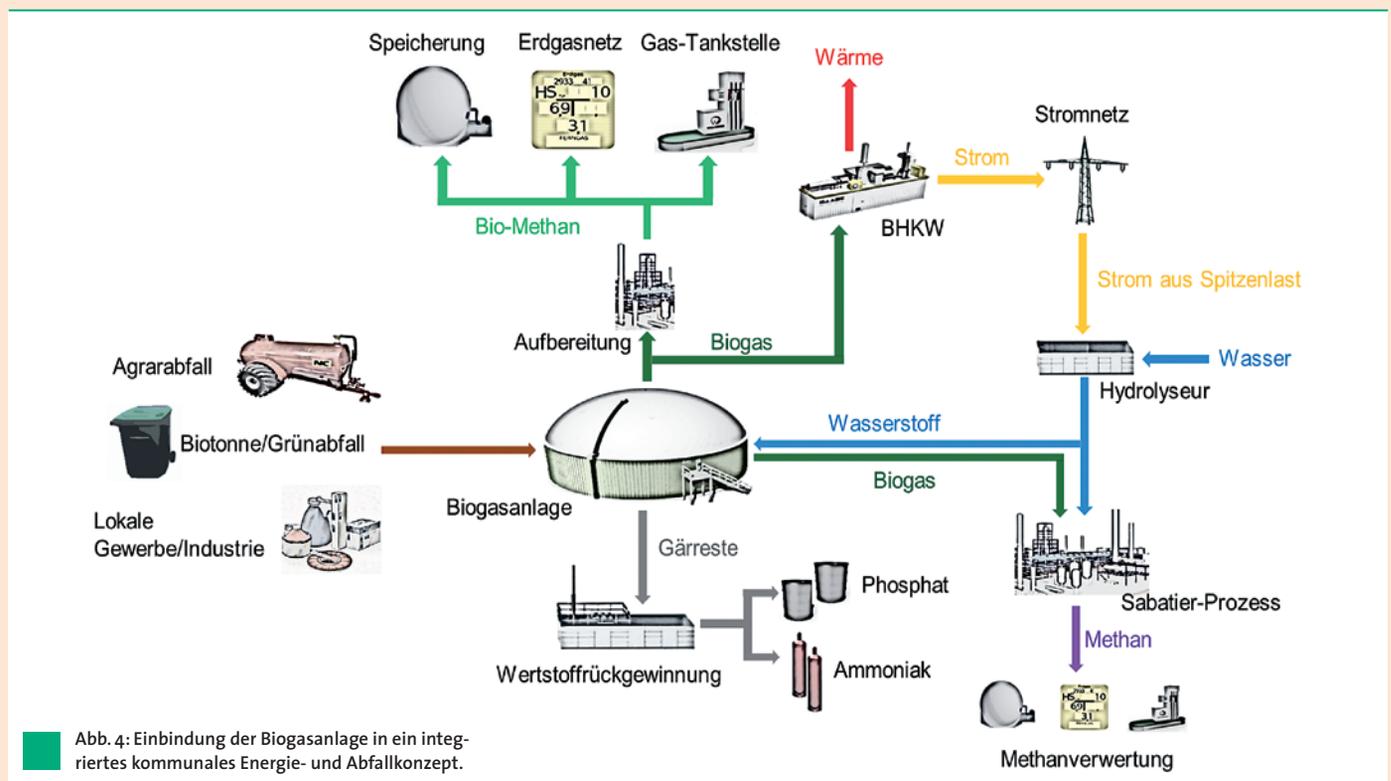
schwert aber auch die gezielte Beeinflussung und Steuerung der Anlage.

Möglicherweise sind die Mikroorganismen, die in einer Biogasanlage stabil etabliert sind, nicht immer ideal für eine effiziente Biogasproduktion. So kann es geschehen, dass zwei parallel betriebene Reaktoren unterschiedliche Mengen an Biogas produzieren. Daher richtet sich das Interesse am Lehrstuhl für Bioprozesstechnik derzeit auf die Anlaufphase von Biogasanlagen und auf die Art und Weise, wie sich die jeweiligen Mikroorganismen etablieren. Dies geschieht u.a. in Zusammenarbeit mit der Anlage der Firma MR Bioenergie Bayreuth UG & CoKG (Abb. 2).

## Das Kompetenznetzwerk Biogas Nordbayern

Mit dem Ziel, Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Biogas-Technologien voranzubringen, haben Fachleute aus Wissenschaft und Wirtschaft im Jahre 2012 an der Universität Bayreuth das Kompetenznetzwerk Biogas Nordbayern gegründet. Dieses Netzwerk war der Ausgangspunkt für eine Initiative, die auf innovative Lösungen für die jüngsten Herausforderungen in der Biogasbranche abzielt. Sie wird getragen von der Universität Bayreuth, den Hochschulen Coburg und Hof (im Rahmen der TechnologieAllianzOberfranken), der Technischen Hochschule Amberg-Weiden, der Bioenergieregion Bayreuth sowie von mittelständischen Unternehmen aus den Bereichen Anlagenplanung und Anlagenbau.

Gemeinsam wollen die Partner die Energiegewinnung aus Biogas dahingehend weiterentwickeln, dass ein möglichst breites Spektrum verwertbarer Rohstoffe genutzt wird. Vor allem arbeitet diese Initiative darauf hin, dass diese Energie ihren vollen Beitrag zur Energiewende leisten kann. Dafür werden beispielsweise Module entwickelt, die bei der Biogasveredlung an kleinen Anlagen oder der gewinnbringenden Nutzung der erzeugten Wärme zum Einsatz kommen. Aber auch Möglichkeiten zur Nutzung der Gär-Reste sollen untersucht werden. Denn die darin noch enthaltenen Wertstoffkomponenten wie Phosphat würden sich bei einer vollständigen Kreislaufwirtschaft rückgewinnen lassen (Abb. 4).





■ ROLF STEINHILPER  
STEFAN FREIBERGER  
JOHANNES BÖHNER  
KORBINIAN LOHR

## Energieeffiziente Fabriken

„GREEN FACTORY BAYREUTH“ –  
EIN BEISPIEL FÜR DIE KOOPERATION VON FORSCHUNG UND WIRTSCHAFT

■ Im Frühjahr 2013 besuchte Katja Hessel, Staatssekretärin im Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, die „Green Factory Bayreuth“ und übergab den Förderbescheid für dieses Teilprojekt. Links: Dipl.-Ing. Moritz Hamacher; rechts: Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper. (Foto: B. Kohlberg).

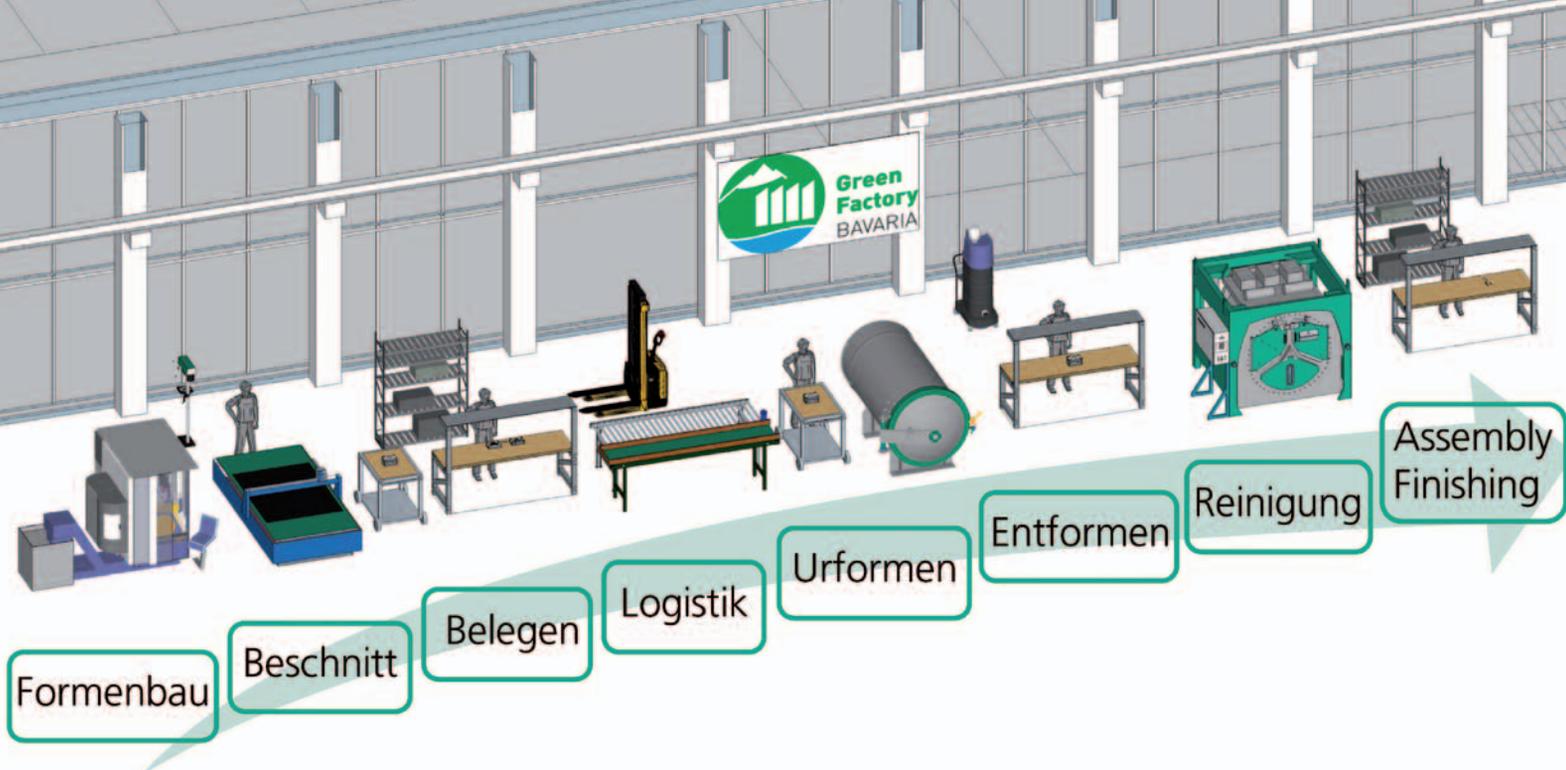


Abb. 1: Bearbeitungsschritte in der Green Factory Bayreuth.

**D**er von der Bundesregierung beschlossene Ausstieg aus der Kernenergie führt dazu, dass die verbleibenden bayerischen Kernkraftwerke schrittweise abgeschaltet werden. Weil die Kernenergie in Bayern bis heute einen hohen Anteil an der Stromerzeugung hat, ist es erforderlich, die resultierende Versorgungslücke an elektrischer Energie zu schließen. Da der Ausbau regenerativer oder alternativer Energien nicht ausreicht, um die Versorgungslücke kurzfristig zu schließen, gilt die Reduzierung des hohen Energiebedarfs produzierender Unternehmen als wichtiger Schritt. Studien kommen zu dem Ergebnis, dass hier Energieeinsparungen bis zu 30 Prozent möglich sind. Jedoch mangelt es in der Industrie oftmals an Wissen, um die Einsparpotenziale zu identifizieren und zu nutzen.

Im Forschungsprojekt „Green Factory Bavaria“ arbeiten die Fraunhofer-Projektgruppen in Bayreuth und Augsburg sowie die FAU Erlangen-Nürnberg und die TU München gemeinsam daran, Demonstrations-, Lehr- und Forschungsfabriken für Ressourceneffizienz in der Produktion aufzubauen. Das Teilprojekt „Green Factory Bayreuth“, das eine Laufzeit von fünf Jahren hat, wird voraussichtlich im Juni 2017 abgeschlossen sein. Mit dem Ziel einer ganzheitlichen Betrachtung der Ressourceneffizienz wird in Bayreuth ein durchgängiger Produktionsprozess am Beispiel der Produktion von CFK-Bauteilen aufgebaut. Schwerpunkte sind dabei die messtechnische Identifikation von Energieeinsparpotenzialen, Produktionslogistik und

Fördertechnik, Urformen sowie (De)Montage- und Reinigungsverfahren.

#### KNOW-HOW-TRANSFER IN DIE INDUSTRIE

Ein wichtiger Aspekt des Forschungsvorhabens ist es, aktuelle Erkenntnisse aus der Energieeffizienzforschung in produzierende Unternehmen am Standort Bayern zu bringen. Mit diesem Ziel wurden, in Kooperation mit den Industrie- und Handelskammern, die Bedarfe der Unternehmen erfasst und Kernkompetenzen spezifiziert. Diese Erhebung wurde durch eine Markt- und Wettbewerbsanalyse ergänzt.

Um den Know-how-Transfer zu optimieren, wurde ein Transferkonzept entwickelt, das Schulungen, Praxisseminare, Beratungsdienstleistungen sowie bilaterale Kooperationsprojekte mit Industrieunternehmen umfasst.

#### AUFBAU EINER SCHULUNGSFABRIK

Einen wichtigen Beitrag zum Know-how-Transfer in die Wirtschaft leisten die Demonstratoren, die während der Aufbauphase der Green Factory Bayreuth entwickelt wurden. Sie erleichtern es den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Schulungen, typische Potenziale zur Energieeinsparung am Beispiel der Fertigung von CFK-Bauteilen zu identifizieren und umzusetzen.

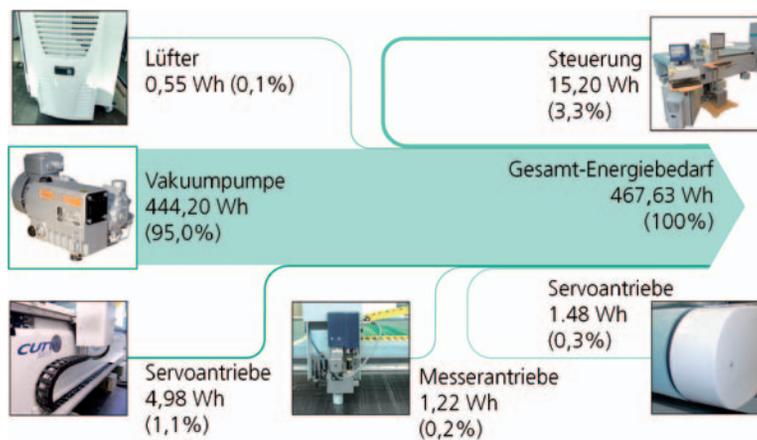
#### LINKTIPP

- [www.greenfactorybavaria.net](http://www.greenfactorybavaria.net)

*Materialzuschnitt*

Um das Ausgangsmaterial von CFK-Bauteilen (Prepegs) präzise zuzuschneiden, wird ein Zugschnittautomat (Cutter) eingesetzt. Im Zuge von Optimierungsmaßnahmen konnten hier bereits Energieeinsparpotenziale von 45 Prozent identifiziert werden. Die Vakuumpumpe ist bei dieser Anlage für den Großteil des Energiebedarfs verantwortlich (Abb. 2). Die Zuschnitte werden während der Green Factory-Schulungen aus einem Kernmaterial in Sandwichbauweise gefertigt, sodass ein breites Spektrum an Technologien in die Demonstration einbezogen wird.

Abb. 2: Energiefluss eines Cutters beim Zuschnitt von Prepegmaterial aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK).



*Reinigung*

Um die hohen Qualitätsanforderungen bei der CFK-Produktion zu gewährleisten, müssen die Bauteilformen nach dem Einsatz von den pro-

zessbedingten Verunreinigungen befreit werden. In vielen Unternehmen gehören solche Reinigungsprozesse zu den energie- und ressourcenintensivsten Prozessen. Um die Energieeffizienzpotenziale bei der Reinigung zu bewerten, werden verschiedene Reinigungsstrategien analysiert. Dabei werden der individuelle Energieverbrauch, die Wirtschaftlichkeit sowie das resultierende Reinigungsergebnis ermittelt.

*Produktionslogistik*

Ein weiteres Ziel ist es, die Energieeffizienz im Bereich der Produktionslogistik zu optimieren. Eingebettet in den Musterprozess, werden alternative fördertechnische Einrichtungen aufgebaut und energetisch bewertet. Hierfür stehen ein elektrisch betriebenes Förderband, eine schwerkraftgetriebene Rollschienenbahn, ein Hubwagen und ein fahrerloses Transportsystem zur Verfügung. Diese Fördermittel stellen eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse in den Unternehmensalltag sicher, da sie zum Standardrepertoire im Produktionsumfeld gehören. Zur Analyse der Energieverbräuche der Logistikdemonstratoren werden die relevanten energetischen Einflussparameter identifiziert und untersucht. Aufgrund von Verbrauchswerten aus unterschiedlichen Betriebszuständen lassen sich anschließend Einsparmaßnahmen ableiten.

*Druckluft*

Ein weiterer Demonstrator ist dem Querschnittsthema Druckluft gewidmet, das in den meisten Industrieunternehmen einen Teil der Fabrikinfrastruktur bildet. Das Hauptproblem sind die Druckluft-Leckagen im Leitungssystem, durch die ein großer Teil der erzeugten Druckluft ungenutzt verloren gehen kann. Die Verluste können bis zu 70 Prozent betragen. Zur Ortung und Charakterisierung von Leckagen wurde ein Demonstrator entwickelt, mit dem sich unterschiedliche Arten und Größen von Leckagen sowie deren Ortung demonstrieren lassen.

*Raumbeleuchtung*

Weiterhin sind in vielen Unternehmen große Energiesparpotenziale bei der Raumbeleuchtung vorhanden. Zur Darstellung energieeffizienter Beleuchtungstechnologien wurde ein Demonstrator entwickelt, der den Gesamtwirkungsgrad für unterschiedliche Beleuchtungstechnologien sichtbar macht. Dies geschieht in Abhängigkeit vom

**Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation**

Die Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation ist seit 2006 am Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth angesiedelt. Sie unterstützt produzierende Unternehmen, insbesondere im ostbayerischen Raum, bei allen Herausforderungen in den Bereichen Fabrikplanung, Fertigung und Montage sowie Supply Chain und Logistik. Das Leistungsangebot erstreckt sich von der Potenzialanalyse bis in die praktische Umsetzung. In über 150 Industrie-projekten – vor allem bei kleinen und mittelständischen Unternehmen, aber auch bei Großbetrieben – konnten wesentliche Beiträge zur Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung sowie zur Kosteneinsparung in Unternehmen geleistet werden, nicht zuletzt im Bereich der Energiekosten.

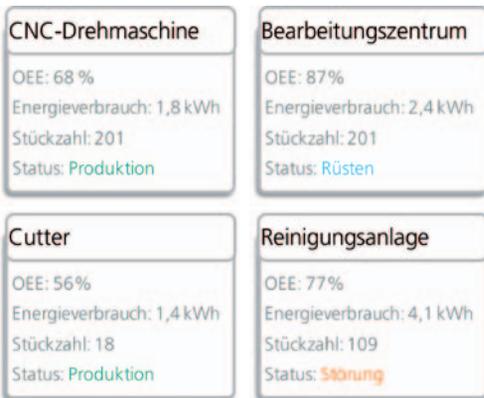
Derzeit entsteht für die Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation ein neues Gebäude in unmittelbarer Nähe des Bayreuther Universitätscampus. Es bietet Raum für 60 modernste Computerarbeitsplätze sowie eine großflächige Technikumshalle.

- [www.lup.uni-bayreuth.de/de/fhg](http://www.lup.uni-bayreuth.de/de/fhg)

Leuchtmittel, dem Vorschaltgerät und möglichen Reflektoren. Mit Hilfe des Demonstrators kann eine Energieeinsparung von bis zu 80 Prozent, verglichen mit einer konventionellen T8-Leuchtstofflampenbeleuchtung, erzielt werden.

### Integriertes Messsystem

Um die Energiedaten von Produktionsanlagen zu erfassen und zu visualisieren, wurde ein Messsystem entwickelt, das im laufenden Betrieb alle energierelevanten Parameter und Prozesszustände erfasst. Das wichtigste Entwicklungsziel des Messsystems ist es, flexibel verschiedene Produktionsanlagen unter realen Produktionsbedingungen sowohl in der Green Factory Bayreuth als auch in Unternehmen analysieren zu können. Eine Live-Anzeige informiert über die Zustände der Hauptenergieverbraucher der Green Factory Bayreuth und bewirkt eine hohe Prozesstransparenz (Abb. 3).



Im Projekt „Green Factory Bavaria“ werden am Standort Bayreuth umfangreiche Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung in die produzierende Industrie gebracht. Diese betreffen die Themenfelder Messtechnische Identifikation von Energieeinsparpotentials, Produktionslogistik, Urformen am Beispiel von CFK, Reinigungsverfahren und auch Querschnittsthemen wie Druckluft und Raumbeleuchtung. Die Anwendung der in der Green Factory Bayreuth erlernbaren Methoden führte in der industriellen Praxis bereits zu Energieeinsparungen von bis zu 42 Prozent (Abb. 4).

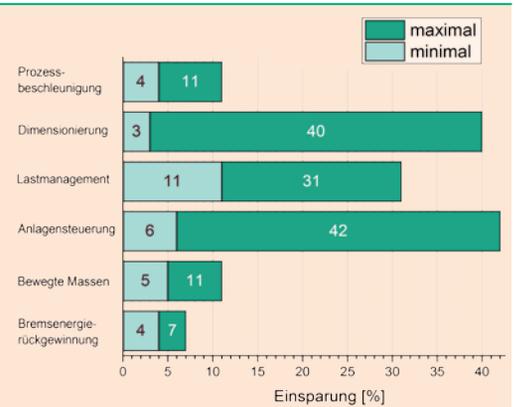


Abb. 4: Typische Einsparungen bei der Anwendung der in der Green Factory Bayreuth entwickelten Methoden.

### VORBILDPREIS „GREEN FACTORY BAVARIA“

Mit der Vergabe des Preises „Green Factory Bavaria“ werden bayerische Unternehmen mit besonderen Leistungen im Bereich Ressourceneffizienz prämiert, wobei kleine und mittlere Unternehmen (KMU) aus dem produzierenden Gewerbe im Fokus stehen. Bewertet werden Einzelmaßnahmen nach folgenden Bewertungskriterien: Amortisationsdauer, Innovationsgrad, Umsetzungszeitrahmen, Umsetzungsanfang, verursachter Produktionsausfall bzw. Maschinenstillstand, Know-how-Bedarf sowie Breitenwirkung der Maßnahme. Der Wettbewerb gliedert sich in fünf Phasen, die von der Einreichung von Projektsteckbriefen bis zur Preisverleihung führen.

Abb. 3 (links): Dash-Board der Green Factory Bayreuth.

### AUTOREN



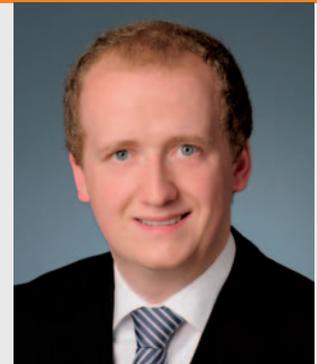
Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper ist Inhaber des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik an der Universität Bayreuth und leitet die Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation in Bayreuth.



Dr.-Ing. Stefan Freiberger gehört dem Leitungskreis des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik und der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation an und leitet im Projekt „Green Factory Bavaria“ die Forschungstätigkeiten.



Dr.-Ing. Johannes Böhner leitet das Kompetenzfeld Ressourceneffizienz und Leichtbau an der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation.



Korbinian Lohr, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzfeld Ressourceneffizienz und Leichtbau an der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation.

# Neue Werkstoffe steigern die Energieeffizienz

INNOVATIVE ENTWICKLUNGEN AUS DER MATERIALWISSENSCHAFT

■ Neue Verbundmaterialien für Fenster, wie sie beispielsweise im europäischen Verbundprojekt „HarWin“ entwickelt werden, können in Zukunft die Wärme- und Schalldämmung signifikant steigern (Fotomontage: A. Gaube, Fotos: sst).

THORSTEN GERDES

## „Intelligente“ Fenster für den Energiehaushalt von Gebäuden

Neuartige Fenster zu entwickeln, die den Energieverbrauch von Gebäuden signifikant senken und zugleich die Wohnqualität erhöhen – dies ist das Ziel eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts, das von der Europäischen Union mit rund 3,4 Mio. Euro gefördert wird. 10 europäische Partner – Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen – sind daran beteiligt. Die Koordination liegt bei Prof. Dr. Monika Willert-Porada am Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung der Universität Bayreuth.

Der Projektname „Harvesting solar energy with multifunctional glass-polymer windows“ (kurz: „HarWin“) verweist auf das anspruchsvolle Vorhaben, „intelligente“ Fenster aus laminierten Kunststoff-Glas-Verbundmaterialien zu entwickeln. Diese Materialien sollen mit Hilfe von Leichtbauverfahren zu Fenstern verarbeitet werden, die erheblich leichter sind als übliche Fenster und zudem die Energieeffizienz von Gebäuden erhöhen.

Wichtige Funktionen wie Wärmedämmung und Schallschutz werden durch diese Innovation nicht beeinträchtigt. Im Gegenteil, die neuartigen Kunststoff-Glas-Verbundstrukturen machen es möglich, die Energie des

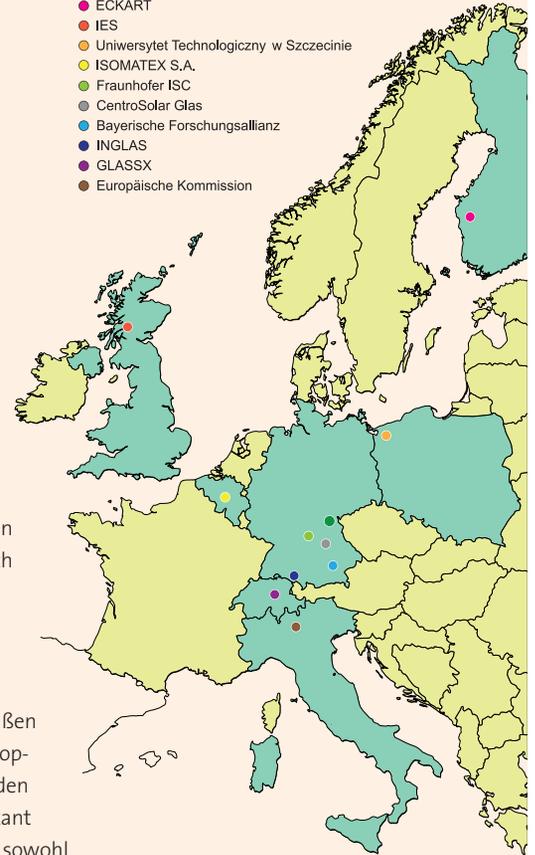
AUTOR



Dr.-Ing. Thorsten Gerdes ist Akademischer Oberrat am Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung der Universität Bayreuth.

Sonnenlichts optimal für den Energiehaushalt von Gebäuden zu nutzen. Antireflexionsschichten verhindern, dass Sonnenlicht nach außen zurückgespiegelt wird. Zugleich wird der Austausch von Energie verringert, so dass mehr Wärme in den Räumen verbleibt, statt über die Fenster nach außen abzufließen. Zusätzlich zu dieser optimierten Wärmedämmung werden die Verbundstrukturen signifikant zur Schalldämmung beitragen – sowohl in Wohn- als auch in Gewerbegebäuden.

- Universität Bayreuth
- ECKART
- IES
- Uniwersytet Techniczny w Szczecinie
- ISOMATEX S.A.
- Fraunhofer ISC
- CentroSolar Glas
- Bayerische Forschungsallianz
- INGLAS
- GLASSX
- Europäische Kommission

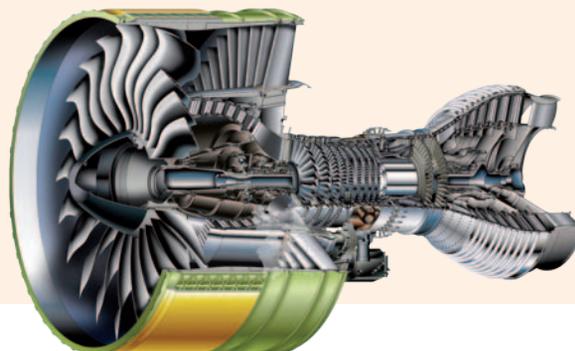


UWE GLATZEL

## Airbus 380: Eine metallische Legierung senkt den Kerosinverbrauch

Den Treibstoffverbrauch von Flugzeugen zu senken, dazu trägt ein Werkstoff bei, an dessen Entwicklung der Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe maßgeblich mitgearbeitet hat. Es handelt sich um die „Leichte Einkristall-Legierung LEK94“, die seit mehreren Jahren für die Turbinenschaufeln in Triebwerken für den Airbus 380 verwendet wird. Ein optimaler Anteil der Elemente Wolfram und Rhenium in der Legierung führte dazu, dass das Gewicht einer Turbinenschaufel im Vergleich zu früher verwendeten Werkstoffen um 7 Prozent gesenkt werden konnte. Dies ermöglichte pro Flugzeug eine Treibstoffersparnis von jährlich 1,2 Millionen Litern Kerosin (fast 1 Mio. Euro Kostenreduktion pro Jahr). Damit sank zugleich der Ausstoß von CO<sub>2</sub>. An den erforderlichen Hochtemperatureigenschaften der Turbinenschaufeln änderte sich durch die neue Legierung nichts: Sie wurden auf ihrem sehr hohen Niveau beibehalten.

Aufgrund des neuen, leichteren Werkstoffs sind die Turbinen insgesamt einer geringeren Belastung ausgesetzt. Beim Airbus 380 sind die Turbinenschaufeln mit bis zu 12.000 Umdrehungen pro Minute bei Temperaturen bis zu 1.100°C im Einsatz. Dabei verursachen das Eigengewicht der Schaufel und die damit verbundenen Fliehkräfte, die auf den Schaufelfuß wirken, sehr hohe Spannungen im Material. Weil LEK94 eine geringere Materialdichte als die früher verwendeten Werkstoffe aufweist, konnten auch diese Fliehkräfte deutlich reduziert werden.



AUTOR



Prof. Dr.-Ing. Uwe Glatzel leitet den Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe an der Universität Bayreuth. Er ist Mitinhaber des Patents der „Leichten Einkristall-Legierung LEK94“ für die USA, Kanada, Japan und Europa.

Schnittzeichnung durch das im Airbus 380 verwendete GP7000 Triebwerk (Abb. MTU).

AUTOR



Dr. Günter Motz ist Leiter der Arbeitsgruppe Precursorkeramik am Lehrstuhl für Keramische Werkstoffe an der Universität Bayreuth.

GÜNTER MOTZ

## Mit flexiblen Solarzellen ins Weltall – Eine neue Beschichtung sorgt für hohe Wärmeabstrahlung

Bei einer Vielzahl von Raumfahrzeugen werden photovoltaische Generatoren als Energiequelle eingesetzt. Dabei ist es besonders wichtig, eine der Weltraummission entsprechende Lebensdauer des Solargenerators sicherzustellen und die Zuverlässigkeit des Systems zu gewährleisten. Derzeit kommen in Raumfahrzeugen vorwiegend starre Solarzellen zum Einsatz. Flexible Dünnschicht-Solarzellen auf der Basis von  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  – kurz: CIGSe – sind jedoch eine vielversprechende Alternative: Sie haben eine geringere Masse, und wegen ihrer Flexibilität können sie beispielsweise in entrollbare oder entfaltbare Sonnensegel eingebaut werden. Zudem können sie auf leichten und flexiblen Kunststoffträgerfolien im „Roll to Roll“-Verfahren (R2R) hergestellt werden. Schließlich zeichnen sich CIGSe-Solarzellen durch eine hohe Strahlungsresistenz aus: eine wesentliche Voraussetzung für die Verwendung in der Raumfahrt.

Das Forschungsprojekt „PIPV2 – Flexible CIGSe-Dünnschicht-Solarzellen für die Raumfahrt“<sup>1</sup> befasst sich mit der Weiterentwicklung und umfassenden Charakterisierung dieser neuen Technologie. Dabei geht es nicht zuletzt auch um die kostengünstige Herstellung der flexiblen Solarzellen unter industriellen Bedingungen. Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Forschungspartner sind der Lehrstuhl für Keramische Werkstoffe an der Universität Bayreuth, das Helmholtz-Zentrum Berlin, das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Stuttgart, die Solarion AG Leipzig und die Hochtechnologiesysteme GmbH Coswig.

Trotz aller Vorzüge für den Einsatz in der Raumfahrt haben CIGSe-Solarzellen einen wesentlichen Nachteil: Sie haben eine vergleichsweise geringe Wärmeabstrahlung. Des-

halb erhitzen sie sich beim Einsatz im Weltraum auf über  $100^\circ\text{C}$ . Weil damit ein deutlicher Abfall des Wirkungsgrades einhergeht, ist es erforderlich, die Wärmeabstrahlung der Solarzellen zu erhöhen. Erfolgversprechend ist hierfür eine  $\text{SiO}_2$ - oder  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Antireflexionsbeschichtung, die dünner als 5 Mikrometer ist. Die Verfahren, mit denen solche Schichtsysteme bisher aufgebracht wurden, sind aber sehr aufwändig. Sie lassen sich nicht ohne weiteres auf flexible Folien übertragen.

Im Rahmen des neuen Forschungsprojektes wurde daher an der Universität Bayreuth eine Beschichtung entwickelt, die sich nicht allein durch eine hohe Wärmeabstrahlung auszeichnet. Hergestellt wird das neue Schichtsystem aus silizium- und aluminiumhaltigen Ausgangsmaterialien, sogenannten Präkursoren. Diese bilden infolge ihrer Luftempfindlichkeit bei relativ geringen Temperaturen bis  $200^\circ\text{C}$  oxidische Systeme; daher haften sie gut auf anderen Materialien. Zudem lassen sie sich über einfache Verfahren wie Tauchen oder Sprühen applizieren. Vor allem aber kann die neue Beschichtung über das wirtschaftlich vorteilhafte „Roll-to-Roll“-Verfahren (R2R) aufgebracht werden.

Mit silizium- und aluminiumhaltigen Präkursoren ist es der Bayreuther Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Keramische Werkstoffe gelungen, auf flexiblen CIGSe-Solarzellen eine neuartige, gut haftende Beschichtung aufzubringen. Diese ist gleichfalls flexibel, riss- und fehlerfrei, und sie hat eine Dicke von nur 1 bis 2 Mikrometern. Vor allem aber steigt die Wärmeabstrahlung der so beschichteten Solarzellen um mehr als das Doppelte (von 0,37 auf 0,8). Dies führt zu einer Senkung der Betriebstemperatur um  $40^\circ\text{C}$  und letztlich zur Steigerung des Wirkungsgrades. Darüber hinaus weist das neue Schichtsystem eine exzellente Thermoschockbeständigkeit auf: Es widersteht Temperaturwechseln von  $100^\circ\text{C}$  bis  $-196^\circ\text{C}$ . Auch eine mehrwöchige intensive UV-Bestrahlung schädigt die Beschichtung nicht, so dass sie hervorragend für Anwendungen im Weltraum geeignet ist.

1 „PIPV“ steht für „Polyimid-basierte Photovoltaik“. In einer geplanten Fortsetzung des Projekts wird es insbesondere darum gehen, die Beschichtungstechnologie industriell umzusetzen und die beschichteten, miteinander verschalteten CIGSe-Solarzellen im Rahmen einer Weltraummission zu testen.

Links: Unter dem Elektronenmikroskop wird der Aufbau einer flexiblen CIGSe-Solarzelle (Hersteller: Solarion AG) erkennbar. An der Oberfläche ist die Antireflexionsschicht aufgetragen, die eine hohe Wärmeabstrahlung hat (High- $\epsilon$  Beschichtung). Rechts: Satellit mit starren Sonnensegeln. Mit den neuen Beschichtungen werden sie flexibel sein (sst).



■ WALTER KRENKEL, NICO LANGHOF

## Druckrohre für Kraftwerke der Zukunft – Faserverstärkte Armierungen steigern die Effizienz von Dampfkraftwerken

In Kraftwerken wird mit Hilfe verschiedener Energiequellen aus Wasser Heißdampf erzeugt, der derzeit bei Drücken bis zu 250 bar und einer Temperatur von bis zu 650°C durch Stahlrohre zur Dampfturbine geleitet wird. In der Turbine findet die Umwandlung in elektrische Energie statt. Die Effizienz dieser Stromerzeugung lässt sich insbesondere dadurch verbessern, dass der Heißdampf mit signifikant höherem Druck und einer höheren Temperatur in die Turbine eintritt.



■ Im Großkraftwerk Mannheim wurde das in Bayreuth entwickelte Armierungskonzept erfolgreich demonstriert (Foto: 4028mdk09, CC-BY-SA-3.0).

Angestrebt werden mindestens 700°C, wodurch der Wirkungsgrad um mehr als 10 Prozent gesteigert würde. Ein zentrales Problem besteht allerdings darin, dass dann der Druck auf 350 bar ansteigt und sich die Stahlrohre unter diesem hohen konstanten Innendruck nicht verformen, d.h. nicht kriechen dürfen. Die derzeit verfügbaren Stahlrohre, die für 100.000 Stunden Lebensdauer ausgelegt sind, können diese Bedingung bei den angestrebten höheren Temperaturen nicht erfüllen.

Einen vielversprechenden Ansatz, die Turbineneintrittstemperatur in Richtung 700°C zu steigern, hat ein vom BMBF gefördertes Verbundprojekt unter der Beteiligung von Prof. Dr.-Ing. Walter Krenkel am Lehrstuhl für Keramische Werkstoffe an der Universität Bayreuth vorangetrieben. Kooperationspartner waren das Fraunhofer ISC - HTL Bayreuth, die Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, die Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart (MPA), das Technion - Israel Institute of Technology in Haifa, die EnBW Energie Baden-Württemberg AG sowie das Großkraftwerk Mannheim. Das Projekt beruhte auf der Idee, kostengünstige Stähle, die nur bis 600°C kriechbeständig sind, zu umwickeln – und zwar mit einer hochfesten, bis mindestens 700°C beständigen,

faserverstärkten keramischen Armierung, die den Stahl stützt und dessen Kriechversagen verhindert.

Das Konzept soll auch in bereits im Betrieb befindlichen Kraftwerken realisiert werden. Hier lässt sich die Betriebsdauer deutlich erhöhen und die Wirtschaftlichkeit erheblich verbessern. Allerdings ist es in diesem Fall nicht möglich, die Rohre zum Anbringen der keramischen Armierung zu demontieren. Deshalb ist die Entwicklung einer Wickeltechnik im Kraftwerk vor Ort notwendig. Hier dürfen alle Konsolidierungsprozesse – insbesondere das Aushärten bzw. Pyrolysieren der Keramik – höchstens bei 700°C stattfinden; andernfalls würde der Stahl geschädigt werden. Zudem muss die Keramik beständig gegen Sauerstoff sein, da an Luft gearbeitet wird.

Daher kommen für die Armierung der Rohre nur sehr temperaturstabile Verstärkungsfasern infrage, vorzugsweise nahezu reine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fasern (3M Nextel™-610). Diese werden in einer neuartigen keramischen Matrix eingebettet. Es handelt sich dabei um eine Si-C-O-Matrix, die auf Polysiloxanen basiert. Diese anorganischen Polymere bilden schon bei 700°C eine formstabile Keramik aus. Für konventionelle Keramiken hingegen würden Temperaturen von über 1.000°C benötigt, die der Stahl nicht ohne Schaden überstehen würde.



Im Rahmen dieses BMBF-Projekts hat der Lehrstuhl Keramische Werkstoffe in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau in Bayreuth die faserverstärkte keramische Armierung entwickelt. Prototypische Stahlrohre wurden im Labor dadurch verstärkt und in einem Ofen der Materialprüfanstalt in Stuttgart bei 350 bar Innendruck getestet. Ohne Armierung versagten die Stahlrohre unter dem hohen Druck nach kurzer Zeit. Doch mit Armierung erhöhte sich ihre Lebensdauer mindestens um den Faktor 4 – ein wichtiger Meilenstein war erreicht. Mittlerweile ist diese Innovation erfolgreich zum Patent angemeldet worden, ein Folgeprojekt ist geplant.

### AUTOREN



■ Prof. Dr.-Ing. Walter Krenkel ist Inhaber des Lehrstuhls für Keramische Werkstoffe an der Universität Bayreuth.



■ Dr. Nico Langhof leitet die Arbeitsgruppe Verbundkeramik am Lehrstuhl für Keramische Werkstoffe der Universität Bayreuth.

■ Stahlrohr mit und ohne Umwicklung, daneben die Mikrostruktur dieser Armierung (Bild: Fraunhofer ISC).

## AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann leitet den Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) und ist Direktor des Zentrums für Energietechnik (ZET) an der Universität Bayreuth.



Dipl.-Ing. Bernd Gassenfeit ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) der Universität Bayreuth.

Auf den Forschungsflächen des Ökologisch-Botanischen Gartens (ÖBG) der Universität Bayreuth wurde ein Demonstrationsgebäude errichtet, um die gefüllten Ziegel unter realistischen Bedingungen zu testen. Sensoren in den Wänden messen kontinuierlich die Temperatur. Dahinter, zum Vergleich der Messungen, ein mit herkömmlichen Ziegeln errichtetes Gebäude.

DIETER BRÜGGEMANN, BERND GASSENFEIT

## Hocheffiziente Wärmedämmung mit klassischen Baustoffen

Wohngebäude sollen im Winter möglichst wenig Heizenergie benötigen und im Sommer vor unangenehm hohen Außentemperaturen schützen. Um diese Forderungen zu erfüllen, sind bislang immer dickere Dämmschichten entwickelt worden. Solche Wärmedämmungsverbundsysteme (WDVS) entsprechen zwar den in Deutschland eingeführten gesetzlichen Vorschriften zur Energieeinsparung, sie haben jedoch auch Nachteile. So heizen sich die Wände schnell auf und kühlen ebenso rasch wieder ab. Zudem können sich Algen relativ leicht in den Dämmschichten festsetzen. Und je dicker die Dämmschichten werden, desto kleiner ist die Fläche, die für die Gebäudenutzung zur Verfügung steht.

Vor diesem Hintergrund erleben klassische Baustoffe derzeit eine Renaissance. Unternehmen der Ziegelbranche sehen erhebliche Chancen, sich mit neuen und effizienten Systemen zur Wärmedämmung am Markt positionieren zu können. Funktionalisierte Wände aus Ziegelsteinen sollen in Zukunft einen – verglichen mit den bisherigen WDVS – mindestens ebenso guten Wärmehaushalt in Gebäuden ermöglichen.



### VERBUNDPROJEKT MIT MITTELSTÄNDISCHEN UNTERNEHMEN

Hier setzt ein Verbundprojekt an, das der Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) der Universität Bayreuth jetzt gemeinsam mit vier mittelständischen Unternehmen auf den Weg gebracht hat. Dies sind die Leipfinger-Bader KG in Vatersdorf, die Ziegelwerk Freital Eder GmbH und die Franken Maxit GmbH in Kasendorf, die der Ziegelbranche angehören, sowie die rent a scientist GmbH in Regensburg. Das Vorhaben wird aus dem



Links: Prototyp eines Ziegels mit einem neuen Phasenwechselmaterial, das in kleinen silbernen Beuteln (Stickpacks) abgefüllt und in die Zwischenräume des Ziegels eingebracht wird. Rechts: Beutel mit einem anderen Phasenwechselmaterial, dem Graphit beigemischt wurde; darüber ein herkömmlicher Füllstoff.

Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert, die Koordination liegt bei Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann.

### KLASSISCHE BAUSTOFFE, ERGÄNZT DURCH PHASENWECHSELMATERIALIEN

Die Energieeffizienz von Gebäuden zu steigern, die zur Heizung benötigten Energieträger zu verringern und im Sommer einen optimalen Wärmeschutz zu ermöglichen, sind wesentliche Ziele des Projekts. Hierfür hat die ingenieurwissenschaftliche Forschung in Bayreuth entscheidende wissenschaftliche und technische Voraussetzungen entwickelt. Es geht speziell um die Optimierung von Hauswänden, die ohne zusätzliche Dämmstoffe allein aus Ziegelsteinen gefertigt sind. Sie werden daher auch als monolithische Wände bezeichnet.

Die Innovation besteht darin, dass Ziegel und Putze durch Phasenwechselmaterialien ergänzt werden, die als Füllstoffe eingesetzt werden. Diese besonderen Materialien zeichnen sich dadurch aus, dass die Übergänge zwischen festem und flüssigem Zustand mit der Speicherung bzw. Freisetzung erheblicher Energiemengen verbunden sind. Die Projektpartner wollen gemeinsam herausfinden, welche Phasenwechselmaterialien den Wärmehaushalt von Gebäuden entscheidend verbessern können und sich als Füllstoffe gut in die Ziegel einbringen lassen.

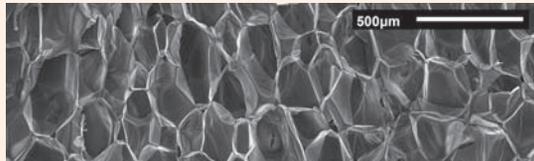
Alle wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsschritte des Projekts werden von Computersimulationen begleitet. Dadurch lässt sich mit hoher Genauigkeit feststellen, welche Fortschritte auf dem Weg zu einer optimalen Wärmespeicherung erreicht wurden und welche Schwachstellen noch beseitigt werden müssen.

■ VOLKER ALTSTÄDT, TOBIAS STANDAU

## Polymer-Schaum aus Pflanzen: ein nachhaltiges Material

Hinter den Buchstaben PLA verbirgt sich ein Kunststoff mit hohem Potenzial. Denn Polylactic acid (Polymilchsäure) ist sowohl biobasiert als auch biologisch abbaubar. Dies bedeutet:

- Durch die Verwendung dieses Materials werden die immer knapper werdenden fossilen Ressourcen geschont.
- Wenn die Lebenszeit der hergestellten Produkte abgelaufen ist, trägt die Verwertung nicht zusätzlich zum Treibhauseffekt bei.



Aber das Material ist nicht nur nachhaltig, sondern kann auf vielfältige Weise eingesetzt werden – angefangen vom Einweggeschirr bis hin zur Medizintechnik. Dennoch fällt die jährliche weltweite Produktion mit etwa 200.000 Tonnen im Vergleich zu den herkömmlichen Kunststoffen eher gering aus.

Ein von der DFG gefördertes Forschungsvorhaben will deshalb die Anwendungsmöglichkeiten dieses vielversprechenden Materials erweitern. Eine Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe an der Universität Bayreuth (Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt) und am Institut für Kunststofftechnik in Stuttgart (Prof. Dr. Christian Bonten) befasst sich damit, Polymilchsäure zu verschäumen. Dazu ist es erforderlich, die dem Material innewohnende geringe Schmelzfestigkeit zu verbessern. Die bisher entwickelten Ansätze zur Lösung dieses Problems haben sich aber als recht aufwändig oder teuer erwiesen. Ziel des neuen Projekts ist es daher, eine kostengünstige und effiziente Möglichkeit zur Steigerung der Schäumbarkeit zu finden. Die Erzeugung einer Schaumstruktur bringt viele Vorteile mit sich:

- Aufgrund seiner geringeren Dichte wird das Material leichter, so dass letztlich die Kosten seiner Verwendung sinken.
- Ebenso eignen sich Schäume in sehr vielen Bereichen, beispielsweise der Verpackung von Lebensmitteln oder der Wärmedämmung von Gebäuden, zur Isolierung. Dies geht einher mit einer Einsparung von Energie und daher auch mit einer Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Im Vergleich mit den herkömmlichen Kunststoffen, die bisher für derartige Isolationsaufgaben genutzt werden, liegt der große Pluspunkt der Polymilchsäure in den zur Herstellung verwendeten natürlichen Rohstoffen, wie beispielsweise Mais. Das Material kann daher in Kompostieranlagen abgebaut werden.

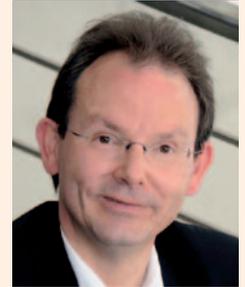
Bereits die ersten Schaumextrusionsversuche haben gezeigt, dass die PLA-Schäume haptische Eigenschaften besitzen, die dem aus der Gebäudedämmung bekannten Polystyrol ähnlich sind. Geringe Dichten von etwa 40 kg/m<sup>3</sup> und eine geschlossenzellige Struktur lassen geschäumtes PLA als Dämmmaterial geeignet erscheinen.

Mit den bisher untersuchten Modifikationen wurde ein erster Anfang gemacht – weitere werden folgen. Aber auch die Optimierung des Herstellungsprozesses stellt eine große Herausforderung dar, denn das Finden eines geeigneten Prozessfensters durch die Wahl der richtigen Verarbeitungsparameter entscheidet über den Erfolg oder Misserfolg bei der Schaumextrusion. Das Ziel der Forschungsarbeiten ist ein breites Verständnis für das Material und die Verarbeitungsschritte. Die bisher mit PLA gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse stimmen zuversichtlich, dass das Material in Zukunft den Mantel der Unscheinbarkeit ablegen und seinen Platz zwischen den heute bedeutenden Kunststoffen finden wird.

■ Links: Blick auf die Technikumsanlage des Lehrstuhls Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth. Das geschäumte PLA verlässt den Kalibrator, der dem im Hintergrund sichtbaren Schaumextruder nachgeschaltet ist. Rechts: Detailaufnahme des kalibrierten Schaums.



### AUTOREN



■ Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt ist Inhaber des Lehrstuhls für Polymere Werkstoffe an der Universität Bayreuth.



■ Tobias Standau M.Sc. ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe an der Universität Bayreuth.

■ Oben links: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von geschäumtem PLA mit einer Raumdicke von 37 kg/m<sup>3</sup>.

AUTORIN



Prof. Dr. Monika Willert-Porada ist Inhaberin des Lehrstuhls für Werkstoffverarbeitung an der Universität Bayreuth.

MONIKA WILLERT-PORADA

## Wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien – auf dem Weg zu neuen leistungsstarken Energiespeichern

Die Anforderungen an leistungsstarke und robuste elektrische Speicher der Zukunft – sowohl für stationäre als auch für mobile Anwendungen – können mit bestehenden Batterietypen noch nicht erfüllt werden. Das Prinzip einer Batterie beruht auf einer chemischen Reaktion, bei der ein Stoff Elektronen abgibt (oxidiert wird) und ein anderer Stoff diese Elektronen aufnimmt (reduziert wird). Dabei wird die chemisch gespeicherte Energie in elektrische Energie umgewandelt. Die Batterie sollte so aufgebaut sein, dass bei der chemischen Reaktion keine Wärme entsteht. Vielmehr sollte die gesamte chemische Energie, die in den Ausgangsstoffen enthalten ist, als elektrischer Strom genutzt werden können.

Idealerweise kann eine Batterie wieder aufgeladen werden. Dies bedeutet, dass die chemische Reaktion, aus der elektrischer Strom entsteht, vollständig umkehrbar – also reversibel – ist. Dabei wird Strom zugeführt und in Form chemischer Verbindungen oder Elemente in der Batterie gespeichert. Diese elektrische Energie kann jederzeit nach Bedarf zurückgewonnen werden, indem die chemische Reaktion erneut in Gang gesetzt wird. Batterien, die nicht wieder aufladbar sind, nennt man Primärbatterien; solche, die sich mit elektrischer Energie aufladen lassen, Sekundärbatterien.

Derzeit steigt das Interesse an preisgünstigen und ressourceneffizienten Sekundärbatterien, die als Stromspeicher für die Sicherung der Stromversorgung genutzt werden können. Dafür ist es wichtig, dass in den Batterien Stoffe eingesetzt werden, die sich bereits bewährt haben. Auch darf im Falle einer industriellen Massenproduktion nicht die Gefahr einer Verknappung dieser Stoffe bestehen. Zudem sollte gewährleistet sein, dass der Einsatz in Sekundärbatterien nicht mit bestehenden Nutzungsarten konkurriert. Ein Stoff, der alle diese Voraussetzungen erfüllt, ist Zink-Metall.

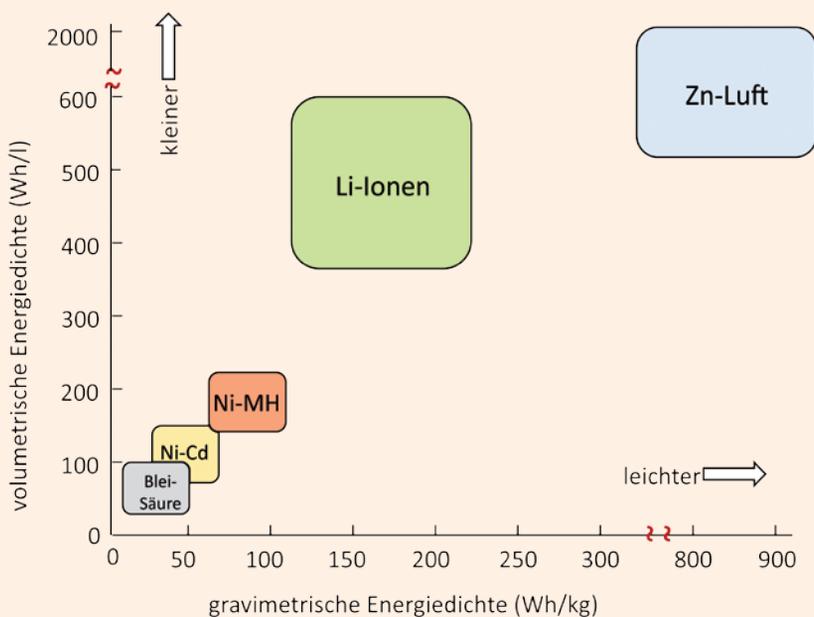
Historisch ist Zink bereits um das Jahr 1800 in der sogenannten Volta-Säule als Quelle für die Erzeugung von elektrischem Strom eingesetzt worden. Die Umkehrung der chemischen Reaktion war zwar nicht möglich. Doch die einfache Handhabung von Zink führte dazu, dass Zink-Primärbatterien bereits in den 1930er Jahren kommerziell hergestellt wurden. Diese Primärbatterien sind stetig verbessert worden. So konnte der zunächst noch übliche Zusatz von Quecksilber entfallen und die Nutzungsdauer der Batterie erheblich verlängert werden. Moderne Zink-Primärbatterien sind heutzutage als „Knopfzellen“ im Einsatz, beispielsweise in tragbaren Hörgeräten. Deren besonderer Vorteil ist die Kontrollierbarkeit der Oxidation von Zink mit Sauerstoff aus der Luft, der unbegrenzt zur Verfügung steht. Zudem sind die Ausgangsstoffe und die Produkte biologisch unbedenklich und können recycelt werden.

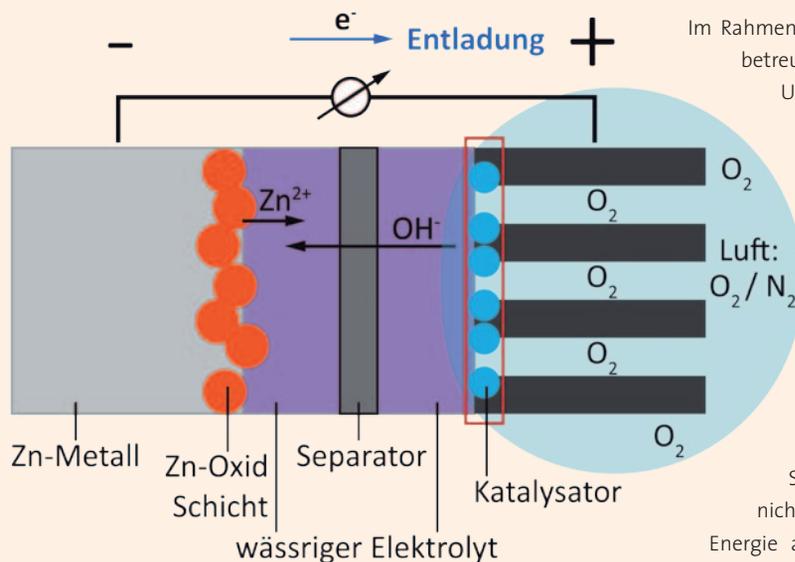
Wenn Zink-Luft-Batterien wiederaufladbar wären, hätten sie deutliche Vorteile gegenüber anderen Batterietypen. Bei gleichem Gewicht würden sie bis zu doppelt so viel elektrische Energie liefern wie Li-Ionenbatterien oder andere bekannte Sekundärbatterietypen (Abb. 1). Sie könnten zudem 4- bis 6-mal billiger sein als Li-Ionenbatterien – vorausgesetzt, dass es gelingt, die erheblichen physikalischen und technologischen Unzulänglichkeiten des Zink-Luft-Systems mithilfe neuer Materialien zu überwinden.

Wie aber kann eine Wiederaufladbarkeit von Zink-Luft-Batterien erreicht werden? Derzeit sind insbesondere die folgenden Probleme noch ungelöst:

- Die Batterie muss vollständig entladen und wieder aufgeladen werden können.
- Wenn eine Zink-Luft-Batterie Strom abgibt, wird Zinkmetall oxidiert; es entsteht Zinkoxid. Bei einer

Abb. 1: Vergleich der Energiedichte unterschiedlicher Batteriesysteme – das Zink-Luft System ist bisher nicht als Sekundärbatterie verfügbar. (Daten aus Linden's Handbook of Batteries, 4th ed., 2011).





Im Rahmen der TechnologieAllianzOberfranken betreuen Prof. Dr. Willert-Porada an der Universität Bayreuth und Prof. Dr. Michael Rossner an der Hochschule Coburg derzeit ein kooperatives Promotionsvorhaben, in dem es um einen bereits bekannten Sekundärbatterietyp – die Blei-Säure-Batterie – geht. Diese Batterie ist als Starterbatterie in Fahrzeugen weit verbreitet. Das neue Forschungsprojekt zielt darauf ab, Blei-Säure-Batterien für den Einsatz in großen Stromspeichern zu optimieren, um nicht unmittelbar benötigte elektrische Energie aus Photovoltaikanlagen zwischenspeichern zu können.

Abb. 2: Prinzip einer Zink-Luft-Batterie während der Entladung. Metallisches Zink (Zn) wird zu Zn<sup>2+</sup> oxidiert. Durch die Reaktion mit dem Sauerstoff der Luft entsteht Zn-Oxid.

Umkehrung dieser chemischen Reaktion, wie sie für die Wiederaufladung erforderlich ist, dürfen sich die Elektroden der Batterie nicht verformen. Zudem muss sichergestellt sein, dass kein Kurzschluss zwischen beiden Elektroden entsteht.

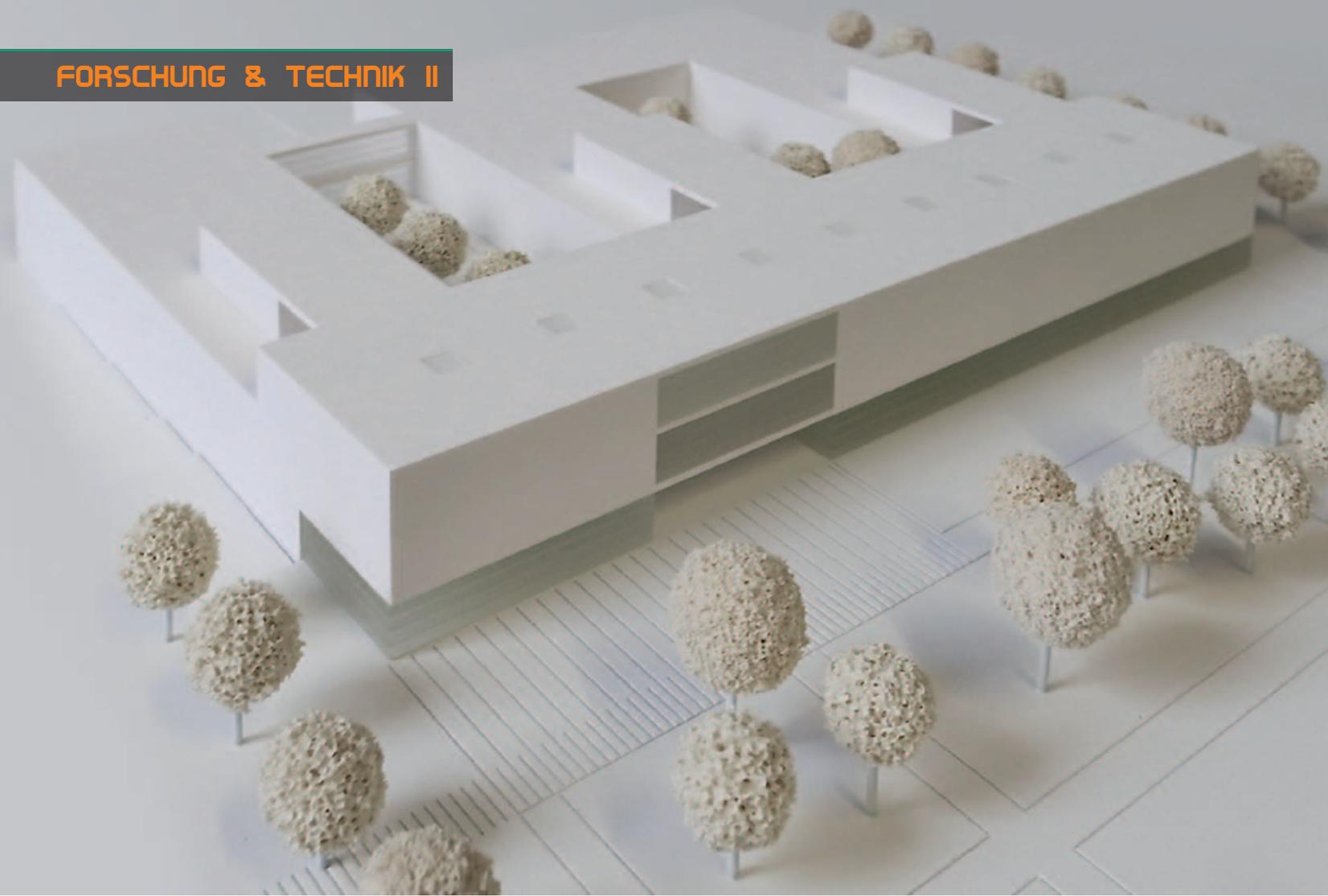
- Darüber hinaus darf es nicht vorkommen, dass Nebenreaktionen mit dem Elektrolyten zu einer Entwicklung von Wasserstoff und zum Verlust von Elektrolyt führen.
- Hinzu kommt, dass Katalysatoren erforderlich sind, um die Rückreaktion von Zinkoxid zu Zinkmetall und die Freisetzung von Sauerstoff bei der Wiederaufladung der Batterie zu beschleunigen. Diese Katalysatoren befinden sich derzeit noch in der Entwicklung.

Die zu bewältigenden Herausforderungen sind also erheblich. Doch sie sind nicht unüberwindbar. Im Jahr 2013 startete deshalb am Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung der Universität Bayreuth ein gemeinsames Forschungsvorhaben mit Industriepartnern und dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung in Würzburg. Das Projekt wird von der Bayerischen Forschungsstiftung gefördert. Im Mittelpunkt steht dabei die Entwicklung neuer Komponenten und Strukturen, die geeignet sind, Zink-Luft-Sekundärbatterien (Abb. 2) mit möglichst hoher Reversibilität und Lebensdauer herzustellen. Mit dem Ziel, wesentliche Voraussetzungen für eine industrielle Produktion dieser zukunftsweisenden Energiespeicher zu schaffen, bündeln die Projektpartner ihre Kompetenzen auf den Gebieten der Materialwissenschaft und der Prozesstechnik.

Die in beiden Projekten eingesetzten Untersuchungsmethoden sind ähnlich und fördern daher die Kooperation der beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Dies beschleunigt die Entstehung eines Kompetenzteams an der Universität Bayreuth, das möglicherweise die Keimzelle eines künftigen Keylabs auf dem Gebiet der Batteriefor-schung bilden wird.

Abb. 3: Bleibatterien zum Test der Alterungsmechanismen (Foto: M. Schmid).





■ ANDREAS JESS

# TechnologieAllianzOberfranken (TAO)

FORSCHUNGSKOOPERATIONEN  
IN DEN SCHWERPUNKTFELDERN ENERGIE UND MOBILITÄT

■ Modell des neuen TAO-Gebäudes auf dem Bayreuther Universitätscampus.

Um dem demografischen Wandel in Oberfranken gezielt entgegenzuwirken, haben die Universitäten Bamberg und Bayreuth sowie die Hochschulen für angewandte Wissenschaften Coburg und Hof im Jahre 2011 die TechnologieAllianzOberfranken (TAO) gegründet. Die Wissenschaftsstandorte kooperieren in den Schwerpunktfeldern Energie, Mobilität und Gesundheit, die durch die Querschnittsthemen „Mensch und Technik“, „Werkstoffe“ und „IT/Sensorik“ miteinander verbunden sind. In den Schwerpunktfeldern sichert TAO den Transfer von aktuellen Forschungsergebnissen in die regionale Wirtschaft, unterstützt die Unternehmen bei der Lösung technologischer Herausforderungen und berät im Hinblick auf die Forschungsförderung.

Für die Universität Bayreuth forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Zentrums für Energietechnik (ZET) im Bereich des TAO-Schwerpunktfeldes „Energie“. Das bereits zuvor etablierte Zentrum wird mit TAO-Mitteln ausgebaut und erhält im künftigen TAO-Gebäude neue Labore.

#### LEISTUNGSSTARKE STROMSPEICHER

Projekte des ZET zeigen, wie TAO mit Leben erfüllt wird: So sind für das Gelingen der Energiewende neue Techniken zur Stromspeicherung unerlässlich – man benötigt ja auch dann Strom, wenn die Sonne nicht scheint.

Im Bereich der elektrochemischen Energietechnik forschen deshalb Bayreuther und Coburger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gemeinsam an der Optimierung eines Batterietyps, der heute in Fahrzeugen weit verbreitet ist. Als Zwischenspeicher für elektrische Energie könnten sehr große Batterien diesen Typs, die derzeit nur für die Notstromversorgung eingesetzt werden, künftig eine wichtige Rolle spielen, um überschüssigen Solarstrom von den Mittags- in die Abendstunden zu verschieben. Die Alterungsprozesse, hervorgerufen durch das häufige Be- und Entladen dieser Speicher, stellen allerdings eine besondere Herausforderung dar. Die Prozesse werden in speziellen Laboranlagen untersucht und anschließend direkt in der Praxis an bestehenden Solaranlagen getestet.

#### ENERGIEEFFIZIENZ VON GEBÄUDEN

Auch Projekte für „Energieeffiziente Gebäude“ sind Teil des TAO-Schwerpunktfeldes „Energie“. Ein Team aus Bayreuther, Coburger und Hofer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern arbeitet gemeinsam am zukünftigen Energiesystem des „Green Hospital Lichtenfels“, einem Leuchtturmprojekt des Bayerischen Staatsministeriums für Gesundheit und Pflege, das neue Maßstäbe für ökologisch optimierte Energiesysteme setzen soll. Neuartige Beleuchtungskonzepte, eine auf Kraft-Wärme-Kopplung basierte Strom- und Wärmeversorgung sowie eine optimierte Gebäudehülle sollen ökologische und ökonomische Belange eines Krankenhauses mit den Bedürfnissen der Patientinnen und Patienten in Einklang bringen.

#### FORSCHUNGSGRUPPEN AUS BAYREUTH UND HOF „HEIZEN MIT EIS“

Im Rahmen der Forschungen für energieeffizientere Gebäude wird auch untersucht, wie man, vereinfacht ausgedrückt, mit Eis heizen kann. Bei diesem Konzept wird die Energie genutzt, die beim Erstarren von flüssigem Wasser zu festem Eis frei wird. Hocheffiziente Wärmepumpen sollen einen Teil der Wärmeversorgung eines Gebäudes übernehmen können. In kleineren Gebäuden wie einem Einfamilienhaus könnte damit überschüssige solare Energie aus den Sommertagen sogar bis in den Winter hinein gespeichert und dann erst genutzt werden.

Für das neue TAO-Gebäude, das bis 2017 auf dem Südcampus der Universität Bayreuth entstehen soll, haben sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zusätzlich noch etwas Besonderes ausgedacht: Neben der Nutzung solarer Energie soll auch die Abwärme der vielen Labor- und Technikanlagen über den Eisspeicher zurück in das Energiesystem gelangen, statt wie bisher ungenutzt an die Umgebung abgegeben zu werden. Die Forschungsgruppen aus Bayreuth und Hof sind schon gespannt, wie sich dieser Ansatz in der Praxis umsetzen lässt.



#### AUTOR

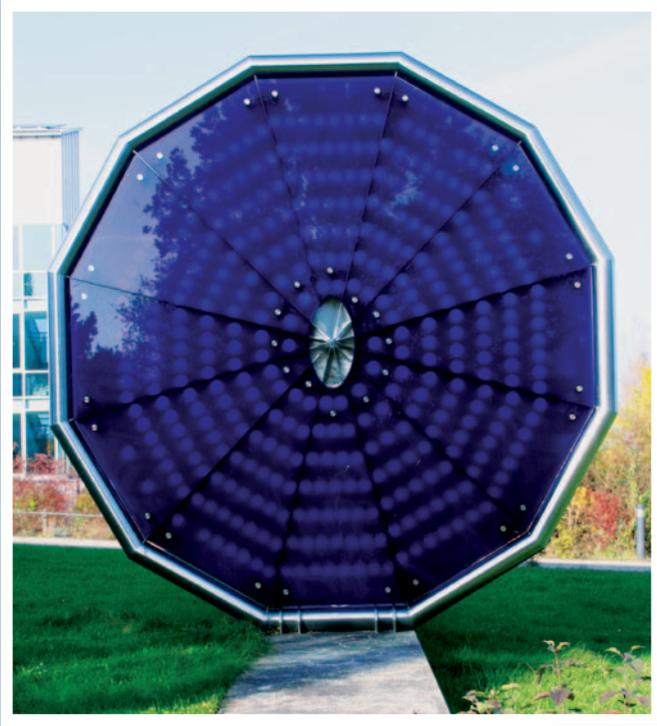


Prof. Dr.-Ing. Andreas Jess, Leiter des Lehrstuhls für Chemische Verfahrenstechnik, ist Wissenschaftlicher Koordinator der TechnologieAllianzOberfranken (TAO).

#### GESCHÄFTSFÜHRUNG



Dr. Melanie Beutin ist seit Oktober 2014 neue Geschäftsführerin der TechnologieAllianzOberfranken (TAO).



Die „Sonnenscheibe“ des mit zahlreichen Kunstpreisen ausgezeichneten Glaskünstlers Florian Lechner befindet sich vor dem Eingang zur Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät (Ing.). Die Vorderseite aus tiefblauem Glas stellt eine Verbindung her zu den Sonnentierchen (Heliozoen): einzelligen Lebewesen, die im Wasser zuhause sind und sich über ihre feinen Axiopodien ernähren. Einem Schnitt durch einen solchen „Fuß“ ist, in millionenfacher Vergrößerung, die Struktur der Vorderseite nachgebildet.

Die nach Süden ausgerichtete Rückseite besteht aus einer Edelstahlscheibe, in deren spiralförmig angeordneten Durchschüssen sich das auf blaues Glas treffende Sonnenlicht spiegelt. Der Anfangspunkt dieser Spirale lässt weißes Licht hindurch. An einer Edelstahlschleife im Boden lässt sich ablesen, wie das Licht im Verlauf eines Jahres jeweils um 12.00 Uhr MEZ auftrifft. So sind Himmel und Erde, Licht und Wasser, Raum und Zeit als Grundbedingungen allen Lebens in diesem Kunstwerk präsent.

