

# RWTH THEMEN

## Energy, Chemical & Process Engineering

BERICHTE  
AUS DER  
RHEINISCH-  
WESTFÄLISCHEN  
TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE  
AACHEN

AUSGABE 1/2015

ISSN-NR.  
0179-079X



*Typisch Licht:*  
**scheint voraus**



*Typisch Ford:*  
**schaut voraus**

## DER NEUE FORD MONDEO > Adaptive LED-Scheinwerfer

Die adaptiven LED-Scheinwerfer im neuen Ford Mondeo passen sich automatisch der jeweiligen Umgebung und Fahrsituation an. Ob Spielstraße, Autobahn oder Fahrten bei schlechten Witterungsverhältnissen: Die adaptiven Lichtkegel sorgen jederzeit für eine optimale Ausleuchtung der Fahrbahn. Und bessere Sicht bedeutet mehr Sicherheit.

Kraftstoffverbrauch (in l/100 km nach VO (EG) 715/2007 und VO (EG) 692/2008 in der jeweils geltenden Fassung): 7,5–3,6 (kombiniert). CO<sub>2</sub>-Emissionen: 174–94 g/km (kombiniert).



**Eine Idee weiter**

**Impressum**  
Herausgegeben im Auftrag des  
Rektors der RWTH Aachen  
Dezernat 3.0 - Presse  
und Kommunikation  
Templergraben 55  
52056 Aachen  
Telefon 0241/80-94327  
Telefax 0241/80-92324  
pressestelle@zhv.rwth-aachen.de  
www.rwth-aachen.de

## AUS DEM INHALT

**Redaktion:**  
Angelika Hamacher  
Melanie Kaesler

**Titelfoto/Rücktitel:**  
Peter Winandy, Aachen

**Anzeigen:**  
print'n'press, Aachen  
jh@p-n-p.de

**Anzeigenberatung:**  
Liz Rüster  
Telefon 06132/43 44 38  
liz.ruester@web.de

**Gestaltung:**  
Kerstin Lünenschloß,  
Aachen

**Druck:**  
Druckerei und  
Verlagsgruppe Mainz GmbH,  
Aachen

Gedruckt auf  
chlorfrei gebleichtem Papier

Das Wissenschaftsmagazin  
„RWTH-Themen“ erscheint  
einmal pro Semester.

Nachdruck einzelner Artikel,  
auch auszugsweise, nur mit Ge-  
nehmigung der Redaktion.  
Für den Inhalt der Beiträge  
sind die Autoren verantwortlich.

Sommersemester 2015

# Energy, Chemical & Process Engineering

<b>Konzepte für die Energieversorgung von morgen</b> Der Profilbereich „Energy, Chemical & Process Engineering“	<b>6</b>
<b>Energiespeicherung: Vom Problem zur Chance</b> Wasserstoffspeicherung für eine sichere Energieversorgung	<b>8</b>
<b>Abgasnachbehandlungssysteme der Zukunft</b> Center for Automotive Catalytic Systems Aachen	<b>10</b>
<b>Abgasfrei durch Aachen</b> CO <sub>2</sub> -neutrale Klimatisierung für Elektrobusse	<b>14</b>
<b>Flexible Elektrische Netze</b> Konsortium forscht zu Nieder-, Mittel- und Hochspannung	<b>18</b>
<b>Effizienz – Die unvergessene nachhaltige Energiequelle</b> Energieeinsparungen und ihre Rebound-Effekte	<b>22</b>
<b>Hochfeste Stähle für Transport und Lagerung von Gasen</b> Neue Bemessungskonzepte ermöglichen erdbebensicheres Design	<b>28</b>
<b>Energy on demand:</b> Förderung und Speicherung von Energie im Untergrund	<b>32</b>
<b>Bioraffinierte Verfahrenstechnik</b> Die Aachener Verfahrenstechnik verpflichtet sich der Herausforderung „Nachwachsende Rohstoffe“	<b>36</b>
<b>Energie in den Untergrund!</b> Alternative Technologien zu Pumpspeicherwerken	<b>40</b>
<b>Magisch magnetisch</b> Transportprozesse für Energiespeicher, Medizin- und Verfahrenstechnik	<b>46</b>
<b>Ammoniaksynthese 2.0 – Elektrochemie versus Haber Bosch</b> Ergebnisse einer Prozesssimulation	<b>52</b>
<b>SENSE – Smart Energy Services für Gebäude und Stadtquartiere</b> Neue Systeme zur Energieversorgung von Gebäuden	<b>56</b>
<b>Namen &amp; Nachrichten</b>	<b>62</b>

# Vorwort

4

Eine zuverlässige, ökonomische und umweltfreundliche Energieversorgung ist heute und in Zukunft Grundvoraussetzung für wirtschaftliche Entwicklung. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der RWTH Aachen stellen sich dieser Herausforderung und arbeiten in interdisziplinären Teams in der Grundlagenforschung und in Verknüpfung mit den Ingenieurwissenschaften. Die Beiträge dieser Ausgabe der „RWTH-THEMEN“ demonstrieren die Vielfalt der wissenschaftlichen Forschung, die im Rahmen des RWTH-Profilbereichs „Energy, Chemical & Process Engineering“ stattfindet: So reicht das Spektrum der Projekte von der Erzeugung und Speicherung über Infrastruktur bis hin zu Verbrauchsfragen.

Als ausgezeichnete Gründerhochschule im Rahmen des Wettbewerbs „EXIST Gründerkultur – Die Gründerhochschule“ möchte ich Sie zusätzlich auf ein neues Angebot im Bereich der Unternehmensgründungen aufmerksam machen: Das StartLab der RWTH bietet Jungunternehmern mit IT-Bezug ein optimales Arbeitsumfeld zur Entwicklung und Verwirklichung eigener Gründungsideen. Neben Beratung durch Coaches des RWTH-Gründerzentrums profitieren Studierende sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von einer optimalen Vernetzung. Damit setzt die RWTH nachhaltige Impulse für die Gründerkultur im Umfeld der Hochschule und die wirtschaftliche Entwicklung.

Ich wünsche ich Ihnen eine interessante Lektüre der „RWTH-Themen“.

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Ernst Schmachtenberg,  
Rektor der RWTH Aachen



Foto: Peter Winandy

# Konzepte für die Energie

## Der Profilbereich „Energy, Chemical &

Nachhaltige Energieversorgung ist eine der größten gesellschaftlichen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Steigende Energiepreise und die jüngste Klima- und Umweltdiskussion haben das Thema Energie und deren Endlichkeit stärker als je zuvor in das öffentliche Bewusstsein gerückt. Immer noch wird ein Großteil der von uns verbrauchten Energie aus fossilen Energieträgern sowie aus Kernkraftwerken bereitgestellt. Die negativen Auswirkungen fossiler Brennstoffnutzung sind schon seit längerem anhand steigender Konzentrationen an lokal und global wirksamen Schadstoffen in der Atmosphäre zu erkennen. Die Risiken der Kernenergie sind seit der Reaktorkatastrophe in Fukushima wieder in den Fokus von Politik und Gesellschaft gerückt. Die dadurch erforderliche Wende in der Energieversorgung muss seitens der Forschung auf unterschiedlichsten Ebenen adressiert werden.

6 Langfristig könnte nahezu vollständig auf erneuerbare Energiequellen umgestellt werden, wenn die momentan genutzten, fossilen Rohstoffquellen nicht nur in ihrer Funktion als Energielieferant ersetzt werden, sondern auch die durch fossile Rohstoffe geleistete Stoffversorgung – insbesondere des Kohlenstoffs – in Zukunft aus alternativen Quellen sichergestellt wird. Energie- und Stoffversorgung sind dabei eng miteinander verzahnt: Bereits verfügbare, nachhaltige Energieerzeugungsmöglichkeiten wie Windkraft- oder Solaranlagen können beispielsweise die notwendige Energie zu einer Stoffumwandlung von Biomasse bereitstellen. Jedoch unterliegt eine Kombination dieser Prozesse

den Masse- und Energieerhaltungsgesetzen und muss somit bedarfsgerecht und intelligent miteinander verzahnt werden. Diese notwendige Integration wird in Zukunft für nahezu alle Energie- und Stoffwandelungsprozesse gelten. Daraus ergibt sich in dreierlei Hinsicht ein erhöhter Forschungsbedarf: Sowohl die Energie- als auch die Stoffumwandelungsprozesse müssen an die veränderten Randbedingungen angepasst und optimiert werden. Zudem ist durch Integration der unterschiedlichen Prozesse eine ganzheitliche Systemoptimierung beider Welten unentbehrlich.

Forschungsaktivitäten an derart großen, gesellschaftlichen Herausforderungen erfordern aufgrund der vielseitigen Themenfelder sowie ihrer Komplexität zwingend eine Überwindung der Disziplin- und Fakultätsgrenzen. Diese Aufgabe hat die RWTH Aachen frühzeitig mit der in ihrem Zukunftskonzept verankerten Vision einer integrierten interdisziplinären technischen Hochschule aufgegriffen. Neben der weiteren Stärkung der Naturwissenschaften steht vor allem eine Erweiterung der Querverbindungen zwischen den Fakultäten im Fokus der Entwicklung.

Die Profilbereiche der RWTH unterstützen dieses Vorhaben strukturell und haben dabei zugleich die Aufgabe, dieses Ziel im Alltag umzusetzen und die Spitzenposition der RWTH mit hochkarätiger, themenbezogener, interdisziplinärer Forschung und Zusammenarbeit zu sichern und auszubauen.

Die Themen des Profilbereichs Energy, Chemical & Process Engineering (ECPE) betreffen da-

bei unterschiedliche Bereiche: von Energieressourcen, Energieumwandlung und Stromerzeugung über unterschiedliche Netz- und Speicherinfrastrukturen zur Energieverteilung bis hin zur Nutzung in Industrie, Haushalten und im Transportsektor. Auch das Prozessverständnis auf molekularer Skala über Einzel- und Teilkomponenten bis hin zu Fragestellungen der Systemintegration und Systemanalyse gehören zu den Forschungsgebieten im Profilbereich.

Die signifikante Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen innerhalb der nächsten 30 Jahre erfordert dabei auf jeder dieser Ebenen energieeffiziente und umweltverträgliche technologische Lösungen. Diese können nur durch die Kompetenzen der im Profilbereich vereinten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von 72 RWTH-Lehrstühlen systematisch und umfassend bearbeitet werden. Im Profilbereich ECPE wurden sechs interdisziplinäre Schlüsselthemen identifiziert, siehe Bild 1.

In den einzelnen Schlüsselthemen werden Forschungsthemen in folgenden Ausprägungen bearbeitet:

### System

Das Schlüsselthema „System“ umfasst das gesamtsystemische Zusammenspiel der Bereiche Energieressourcen, Energie- und Stoffumwandlung, Infrastrukturen einschließlich der Speicherung sowie der Energienutzung. Schwerpunkte der notwendigerweise interdisziplinär angelegten Analysen solcher Systeme bilden neben technischen und ökonomischen Kriterien auch sozialwissenschaftliche Betrachtungen.

### Energieressourcen

Neben fossilen Energieträgern werden im Schlüsselthema „Energieressourcen“ vor allem die Themen Geothermie, geologische Speicherstätten sowie die effiziente Erzeugung von Biomasse als Energieressource behandelt.

### Infrastruktur

Forschungsaktivitäten zum mit der Energiewende verbundenen erforderlichen Aus- und Umbau der Energienetze sowie deren Komponenten finden sich vor allem im Schlüsselthema „Infrastruktur“ wieder. Neben elektrischen Netzen werden ebenso Schnittstellen zu Gas- und Wärmenetzen betrachtet.

### Energieumwandlung

Die Aktivitäten zur Bereitstellung und Speicherung unterschiedlicher Energieformen – größtenteils mit dem Fokus auf elektrischer Energie – werden innerhalb des Schlüsselthemas „Energieumwandlung“ koordiniert und profiliert.

### Stoffumwandlung

Das Schlüsselthema „Stoffumwandlung“ umfasst insbesondere Aspekte der Stoffumwandlung, der chemischen Energiekonversion und -speicherung. Ebenfalls einbezogen sind Prozesse zu Transformationen von Energie in flüssige und gasförmige chemische Verbindungen unter Einbeziehung der Methoden zur Rückverstromung sowie zur Energiebereitstellung aus derartigen Speichermedien in Verbrennungskraftmaschinen.

# versorgung von morgen

## Process Engineering"

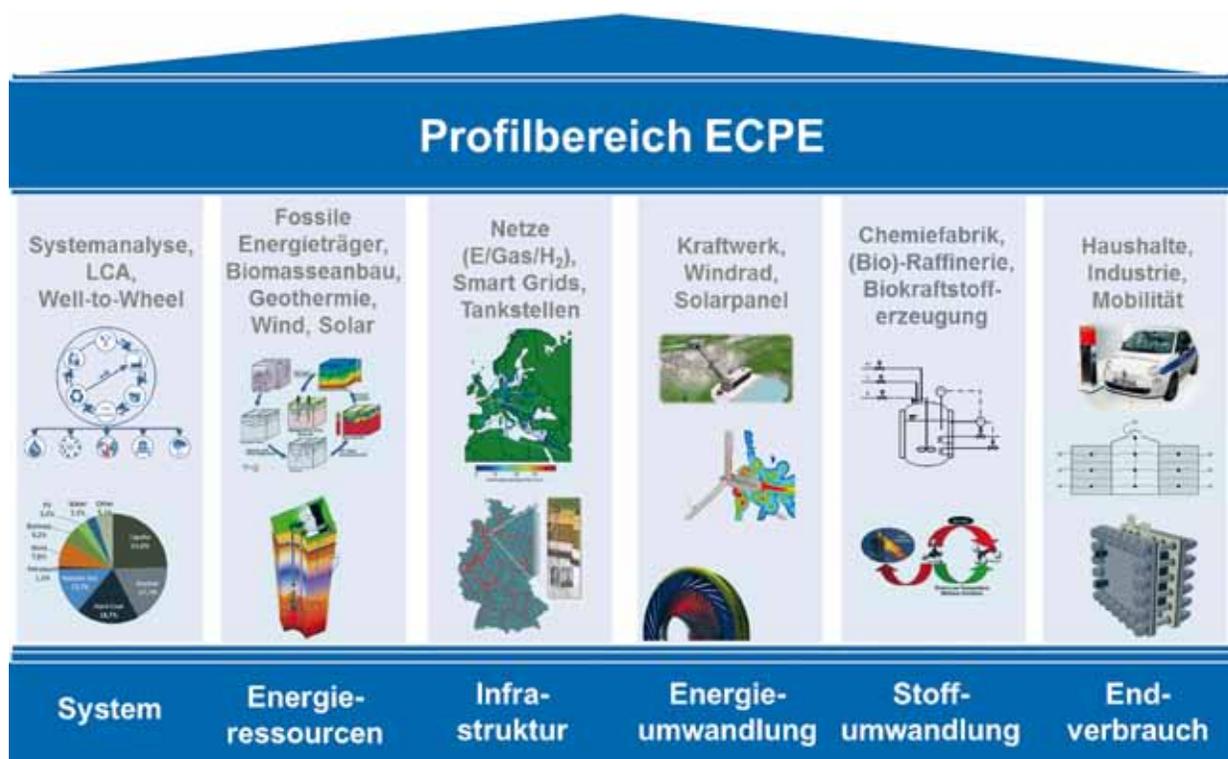


Bild 1: Schlüsselthemen des Profilbereichs Energy, Chemical and Process Engineering.

### Endverbrauch

Im Schlüsselthema „Endverbrauch“ sind alle Aktivitäten zur Nutzung der Endenergien in stationären und mobilen Anwendungen zusammengefasst. Hinsichtlich der stationären Anwendungen liegt der Schwerpunkt auf privaten Haushalten sowie der Industrie. Die mobilen Anwendungen betreffen überwiegend den Verkehrssektor.

Im Jahr 2014 konnte der Grundstein für vier Projekthäuser gelegt werden. Mit diesen wird auch das Ziel verfolgt, die Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich durch Einbeziehung der dort vorhandenen Kompetenzen zu stärken. Hierbei handelt es sich um

- Das Projekthaus **ACA** – Automotive Catalytic Systems Aachen, in welchem es der interdisziplinäre

Ansatz ermöglicht, sich allen Gesichtspunkten der Abgaskatalyse von der Materialentwicklung bis zur Systemintegration zu widmen.

- Das Projekthaus **Power-2-Fuel** verfolgt das Ziel aus überschüssiger elektrischer Energie, die regenerativ erzeugt worden ist, einen effizient herzustellenden, emissionsarmen und gut speicherbaren Kraftstoff herzustellen.

- Im Projekthaus **Technology-Based System Analysis** sollen auf dem Wege der Zusammenführung hochspezialisierter Kompetenzen in den naturwissenschaftlich/technischen sowie sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Bereichen der RWTH und des Forschungszentrums Jülich ganzheitliche, interdisziplinär angelegte Systemanalysen von Energiesystemen durchgeführt werden. Ziel ist es, Handlungs-

empfehlungen zur Umsetzung einer weitgehend treibhausgasfreien und auf den Einsatz erneuerbarer Energien ausgerichteten Energieversorgung und -nutzung zu erarbeiten.

- Das Projekthaus **KESS** – Kommunales Energieversorgungssystem der Zukunft – untersucht die Zusammenführung von verschiedenen Energiewandlern- und speichern auf regionaler Ebene mithilfe von Simulationsmodellen, welche über ein Demonstrations-System am Campus Melaten validiert werden.

Ziel des Profilbereichs ECPE ist die umwelt- und klimafreundliche Energie- und Stoffversorgung von morgen, die der Profilbereich von der Systemebene bis hin zur technischen Detail-ebene entwickelt und erforscht. Die hierzu in JARA (Jülich Aachen Research Alliance) bereits verfü-

baren Kompetenzen der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich werden, gebündelt im Profilbereich ECPE, dazu beitragen, die Vision einer nachhaltigen Energieversorgung Realität werden zu lassen.

### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger ist Inhaber des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen Aachen und Sprecher des Profilbereichs Energy, Chemical & Process Engineering. Dipl.-Ing. Daniel Henaux ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen und Referent des Profilbereichs Energy, Chemical & Process Engineering.

# Energiespeicherung:

## Wasserstoffspeicherung für eine sichere

Die effiziente Netzintegration und möglichst vollständige Nutzung der wetterabhängig fluktuierenden Stromproduktion aus den erneuerbaren Energiequellen Wind und Sonne erfordert neue Lösungen. Eine in wirtschaftlicher Hinsicht erstrebenswerte kontinuierliche Auslastung kann nur in einem Energiesystem mit entsprechenden Speicheroptionen für den tageszeitlichen und saisonalen Ausgleich erreicht werden. Für die notwendige Speicherung großer Energiemengen im Terawattstunden-Bereich eignen sich in Deutschland nur chemische Speicher. Hierbei ist es erforderlich, das Potenzial chemischer Energieträger vollständig zu nutzen und den Fokus vom Stromsektor auf die gesamte Energiewirtschaft zu erweitern. Chemische Energieträger bieten die Möglichkeit, den Stromsektor mit anderen Energiesektoren, wie Wärme, Gas, Verkehr und Industrie, zu verknüpfen und dadurch Synergieeffekte zu erzielen. Die Umwandlung von netzseitig nicht nutzbarem regenerativem Strom zu Wasserstoff mit anschließender Nutzung als Straßenverkehrskraftstoff in Fahrzeugen mit hocheffizienten Brennstoffzellenantrieben ermöglicht die Verdrängung von schwer zu erreichenden Kraftstoffen mit hohen Emissionsfaktoren und stellt zudem eine wirtschaftlich attraktive Lösung dar. Forschungen befassen sich mit der Auslegung eines Wasserstoffversorgungssystems, das den zukünftigen Anforderungen bezüglich der orts- und zeitversetzt

auf tretenden Produktions- und Bedarfsschwankungen gerecht wird. Dazu gehören sowohl ein kosteneffizientes Transportsystem, das zeitabhängig mit dem Bedarf wächst, als auch die betrieboptimierte Integration der benötigten Speichereinrichtungen. Für die Untertage-Speicherung von Wasserstoff eignen sich in technischer Hinsicht sowohl Salz- als auch Felskavernen, wobei letztere aufgrund ihrer höheren Investitionskosten eine nachrangige Rolle spielen.

### Anforderungen an zukünftige Stromspeicher

Zum August 2014 trat das reformierte Erneuerbare-Energien-Gesetz [1] in Kraft, worin verankert ist, den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bis 2025 auf 40 bis 45 Prozent und bis 2035 auf 55 bis 60 Prozent zu erhöhen. Diese Etappen sollen dem langfristigen Ziel dienen, einen Anteil von mindestens 80 Prozent bis 2050 zu erreichen. Unter den Sektoren in Deutschland verursacht die Energiewirtschaft gefolgt vom Industrie- und Verkehrssektor die meisten Treibhausgase [2]. Entsprechend trägt der verstärkte Ausbau der erneuerbaren Energien, vor allem der Windenergie, wesentlich dazu bei, die Emissionen zu senken [3]. Zielsetzung des Energiekonzeptes der Bundesregierung [4] ist die Reduktion der Treibhausgase in mehreren Etappen bis zu 80 bis 95 Prozent im Jahre 2050 gegenüber dem Basisjahr 1990.

Durch die Integration der erneuerbaren Energien ist die Stromerzeugung einem grundlegenden Wandel unterworfen. Insbesondere bei der Versorgungssicherheit bestehen große Herausforderungen. Konventionelle Kraftwerke, wie Kohle-, Gas- und Atomkraftwerke, können meist nahe Lastzentren errichtet werden und sind in der Lage, bedarfsabhängig Strom zu liefern. In Deutschland liegen die größten Potenziale zur erneuerbaren Stromerzeugung in der Wind- und Sonnenenergie. Diese unterliegen jedoch wetterbedingten Schwankungen und geeignete Standorte befinden sich meist fern der Lastzentren. Somit

können zukünftig Situationen auftreten, bei denen an einem Tag annähernd der gesamte Strombedarf über Windturbinen und Fotovoltaikanlagen gedeckt werden kann, während an einem anderen der Strombedarf nahezu vollständig über konventionelle Kraftwerke gedeckt werden muss. Bereits heute hat dies einen starken Einfluss auf den Einsatz konventioneller Kraftwerke, welche immer flexibler die Schwankungen ausgleichen müssen und gleichzeitig weniger Marktanteile an der gesamten Stromproduktion haben.

Soll der Strombedarf zu höheren Anteilen als bisher oder sogar vollständig aus erneuerbaren Energien gedeckt werden, erfordert dies eine intensivere Nutzung des Potenzials an Wind- und Sonnenenergie. Hierfür muss jedoch die installierte Leistung der erneuerbaren Anlagen ein Vielfaches des eigentlichen Verbrauchs betragen, damit der Strom zumindest bilanziell vollständig aus erneuerbaren Energien gedeckt wird. Ein weiterer Ausbau wird folglich zwangsläufig zu Situationen führen, in denen mehr Strom produziert als zum jeweiligen Zeitpunkt benötigt wird. Dieser kann – in kleinem Umfang – teilweise ins Ausland abgeführt oder durch eine zeitliche Verschiebung der Last kompensiert werden. Bei fortschreitendem Ausbau wird bereits zwischen 2030 und 2040 die netzseitig nicht mehr nutzbare Energiemenge zu groß sein, um sie mittels der genannten Maßnahmen zu puffern. Gleichzeitig sind erneuerbare Energien zu wertvoll, um sie bei Überangebot nicht weiter zu nutzen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von Energiespeichern, die in der Lage sind, diese Energiemengen aufzufangen und den zeitlichen Versatz von Angebot und Nachfrage auszugleichen. Allerdings werden bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien im Stromsystem die aktuellen Speicherkapazitäten nicht ausreichen, sodass ein massiver Ausbau für Kapazitäten in der Größenordnung von Terawattstunden notwendig sein wird. In Deutschland können solche Energiemengen nur in Form von chemischer Energie gespeichert werden.

### Kopplung von Strom- und Verkehrssektor durch Wasserstoff

Der Begriff „Power-to-Gas“ bezeichnet die Umwandlung von netzseitig nicht mehr nutzbarem regenerativem Strom in chemische Energie. Einen technisch bereits etablierten Prozess stellt die Wasserelektrolyse dar; hierbei wird elektrischer Strom eingesetzt, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Der Wasserstoff ist gut speicherbar und kann in verschiedenen Anwendungen genutzt werden. Eine Option ist der direkte Gebrauch von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrssektor, als Rohstoff für die chemische Industrie oder zur Rückverstromung. Eine Alternative ist die Verwendung von Wasserstoff als Teilersatz für Erdgas, das vorrangig zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt wird, wobei die bestehende Infrastruktur des Erdgasnetzes genutzt werden kann. Umgesetzt werden kann dies durch die Einspeisung kleiner Wasserstoffanteile von circa fünf Volumenprozent [5] in das vorhandene Erdgasnetz oder aber durch die Umwandlung von Wasserstoff mit Kohlendioxid zu Methan, welches unbegrenzt eingespeist werden kann. Die Nutzung des reinen Wasserstoffs als Kraftstoff für Autos mit Brennstoffzellenantrieb sowie die Rückverstromung entweder in Form von reinem Wasserstoff oder Wasserstoff/Methan-Erdgas-Gemischen stellen aus energietechnischer Sicht die relevantesten Optionen dar. Aus diesem Grund

*Bild 1: Kosten erneuerbarer Gase im Vergleich zu Konkurrenzprodukten (vor Steuern) [6].*

# Vom Problem zur Chance

## Energieversorgung

konzentrieren sich die folgenden Betrachtungen auf diese. Beide Alternativen können zur Lösung der zukünftig auftretenden Speicherproblematik beitragen und sind aus technischer Sicht möglich.

Bei einer wirtschaftlichen Beurteilung, siehe Bild 1, zeigt sich, dass die Rückverstromung von Wasserstoff/Methan-Erdgas-Gemischen erst bei deutlich gestiegenen Rohstoffpreisen rentabel wird. Der Grund hierfür liegt in den hohen Stromgestehungskosten des zurückgespeisten Stroms, die um mindestens Faktor vier oberhalb derer von erdgasbasierten Kraftwerken liegen, siehe Bild 1, rechte Seite. Dieses Ergebnis lässt sich auch auf die Rückverstromung von reinem Wasserstoff übertragen, wobei die hierfür erforderlichen Gasturbinen aufgrund der nicht vorhandenen Nachfrage bisher nicht entwickelt wurden. Die Brennstoffzelle in Kombination mit dem Elektromotor ist ungefähr doppelt so effizient wie ein vergleichbarer benzinangetriebener Verbrennungsmotor, sodass bei einem Verbrauch von 1,0 kg<sub>H2</sub>/100 km Kosten von 16 ct/kWh<sub>H2</sub> für den Wasserstoff anlegbar sind. Des Weiteren ist Benzin selbst bereits ein chemisches Produkt und hat mit

68 ct/l (8 ct/kWh) vor Steuern einen hohen Preis. Im Vergleich dazu kann Wasserstoff zu ungefähr 20 ct/kWh<sub>H2</sub> hergestellt werden, wenn der dafür verwendete regenerative Überschussstrom mit 6 ct/kWh<sub>e</sub> vergütet wird. Dies zeigt, dass der Wasserstoff bereits vor Steuern nahezu konkurrenzfähig zu Benzin ist. Werden die erwarteten Wirkungsgradsteigerungen im Bereich der Brennstoffzellenfahrzeuge erreicht, erhöhen sich bei einem Verbrauch von 0,7 kg<sub>H2</sub>/100 km die anlegbaren Kosten auf 22 ct/kWh<sub>H2</sub>. In diesem Fall sind die Fahrtkosten auf Basis von erneuerbarem Wasserstoff sogar niedriger als die auf Basis von Benzin. Diese Berechnung belegt eindeutig die vorrangige Nutzung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff im Straßenverkehrssektor gegenüber alternativer Nutzungsmöglichkeiten [6].

### Versorgungssicherheit durch Speicherung

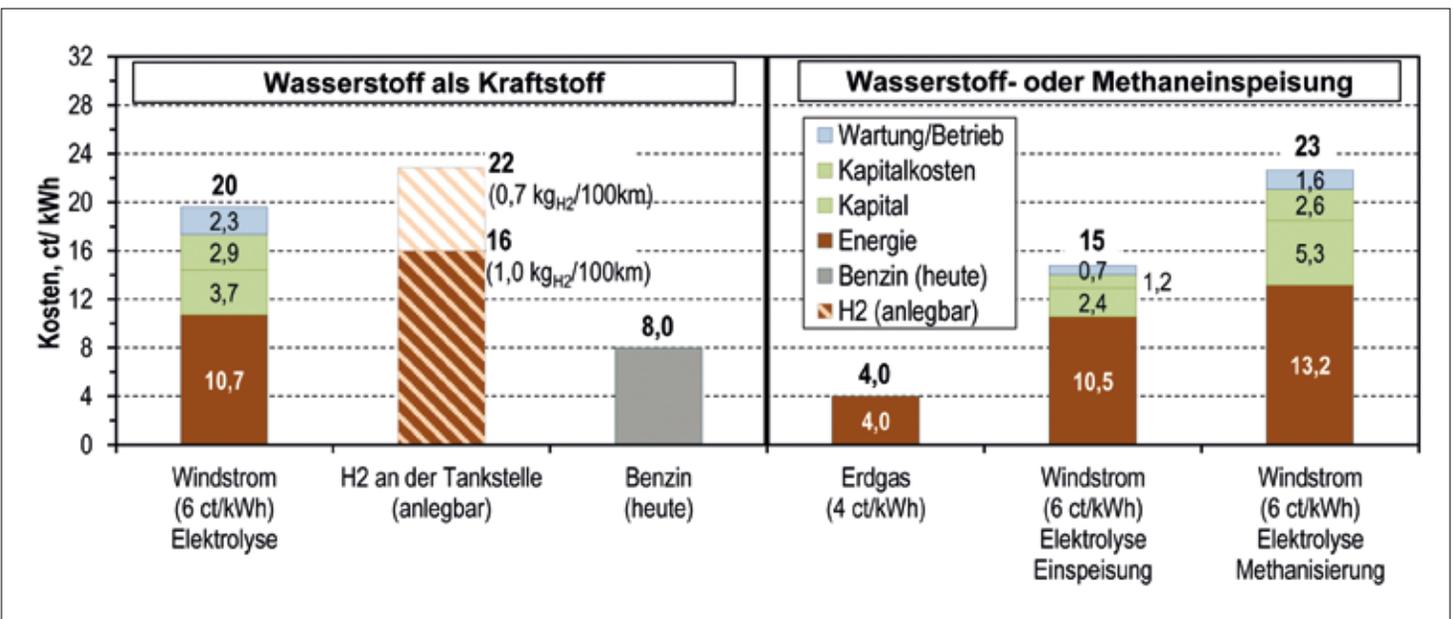
Beim Einsatz von regenerativem Wasserstoff als Kraftstoff unterliegen jedoch sowohl Produktion als auch Verbrauch des Wasserstoffs unkontrollierbaren zeitlichen Fluktuationen, sodass entsprechende Speichermöglichkeiten für die Versor-

gungssicherheit essenziell sind. Sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht ist die Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen besonders geeignet. Darüber hinaus verfügt Deutschland über ein großes Potenzial an geeigneten Salzstrukturen. Auch entsprechende Felskavernen und ehemalige Bergwerke in dichtem Gestein können geeignet sein, wobei die spezifischen Speicherkosten über denen von Salzkavernen liegen. Aquifere und ausgeförderte Öl- und Gaslagerstätten verfügen zwar über große Speicherkapazitäten, führen aber zu unerwünschten Verunreinigung des Wasserstoffs und sind zudem stark eingeschränkt in ihrer Flexibilität.

### Autoren:

Dr.-Ing. Sebastian Schiebahn und Dipl.-Ing. Vanessa Tietze sind Wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung Verfahrens- und Systemanalyse am Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) im Forschungszentrum Jülich. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten ist Inhaber des Lehrstuhls für Brennstoffzellen und Direktor des Instituts für Elektrochemische Verfahrenstechnik im Forschungszentrum Jülich.

[1] Gesetzesbeschluss des Deutschen Bundestages: Gesetz zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2014 Teil I Nr. 33, Bonn, 24. Juli 2014.  
 [2] Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren: 1990 bis 2012. Umweltbundesamt, 07.01.2014.  
 [3] Durch erneuerbare Energien vermiedene Treibhausgase: Strom. Umweltbundesamt, 21.08.2013.  
 [4] Deutsche Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 28. September 2010.  
 [5] DVGW, Technische Regel, Arbeitsblatt G 260 – Gasbeschaffenheit. 2008.  
 [6] Schiebahn, S., et al., Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. International Journal of Hydrogen Energy (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.123>



# Abgasnachbehandlung der Zukunft

Center for

*Bild 1: Laborgasprüfstand zur Untersuchung von Proben aus Abgaskatalysatoren.  
Foto: Peter Winandy*



Im Februar 2014 wurde das Projektthaus „Center for Automotive Catalytic Systems Aachen“, kurz ACA, zur interdisziplinären Forschung auf dem Gebiet der katalytischen Abgasnachbehandlung gegründet. Ermöglicht wird dies durch die Förderung des Exploratory Research Space (ERS) der RWTH aus den Mitteln des Zukunftskonzeptes II.

Unter dem Dach des Projektthauses sind Institute aus den Bereichen Maschinenbau, Physik und Chemie vereinigt. Zurzeit sind dies das Institut für Anorganische Chemie, das Institut für Technische und Makromolekulare Chemie, das Institut für Technische Verbrennung, der Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, der Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung sowie der Bereich Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren des Instituts für Energie- und Klimaforschung am Forschungszentrum Jülich. Der hohe Grad an Interdisziplinarität ermöglicht die integrierte Betrachtung der katalytischen Prozesse auf molekularer Ebene bis hin zum makroskopischen Gesamtsystem. Dadurch können alle Aspekte der Abgaskatalyse von der Materialsynthese über die Analyse bis zur Systemintegration zentral und fachübergreifend erforscht und ganzheitlich optimiert werden.

Die Notwendigkeit einer solchen Betrachtung lässt sich über die weltweiten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts

herleiten. Insbesondere die globale Erderwärmung sowie die fortschreitende Verknappung natürlicher Ressourcen sind dabei hervorzuheben. Zudem stellen zukünftige Emissionsgesetzgebungen für Verbrennungsmotoren nicht nur durch strenge Schadstoffgrenzwerte und anspruchsvolle Testzyklen sehr hohe Anforderungen an das Motor- und Abgasnachbehandlungskonzept, sondern auch durch die CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte beziehungsweise verbrennungsmotorischen Effizienzziele. Definierte Ziele des ACA sind die Reduktion beziehungsweise die vollständige Abschaffung des Edelmetallanteils im Katalysator und die gleichzeitige Optimierung der Leistungsfähigkeit. Besondere Herausforderungen ergeben sich durch die Aufweitung der Temperaturgrenzen, in denen zukünftige Katalysatoren effizient arbeiten müssen. Die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch effizienteren Motorbetrieb wird zwangsläufig mit einer verminderten Abgastemperatur einhergehen, während neue Testzyklen vermehrt den Motorbetrieb bei hoher Last und hohen Temperaturen fordern. Um diese Ziele zu erreichen, werden Materialien und Herstellungsmethoden sowie Methoden und angepasste Betriebsstrategien entwickelt, wobei das ACA zentraler Ansprechpartner für nationale und internationale Kooperationspartner aus Wissenschaft und Industrie ist.

Ein besonderes Merkmal des Projektthauses ist der interdisziplinäre und mehrskalige Lösungsansatz. Somit werden die Forschungsschwerpunkte Materialsynthese, Analytik, Stofftransport und Simulation sowie die Forschungsbereiche vom Material bis zum System betrachtet.

Im Bereich der Materialsynthese werden katalytisch aktive Komponenten entwickelt. Hierbei werden mit neuen Materialien und Materialkombinationen der

# ungssysteme

## Automotive Catalytic Systems Aachen



Edelmetallanteil bei gleichbleibender oder verbesserter Aktivität reduziert oder vollständig ersetzt sowie Lösungen für bisher nicht oder nur unzureichend behandelte Schadstoffe erarbeitet. Weiterhin wird die Gestaltung der katalytisch aktiven Komponente durch Kontrolle der Partikelgrößen und der Morphologie sowie deren Oberflächeneigenschaften gezielt eingestellt und damit deren katalytische Aktivität verbessert. In verschiedenen aufein-

ander aufbauenden Maßnahmen werden zudem die Trägerstrukturen, welche die katalytisch aktive Metallspezies führen, und deren Porendesign optimiert. Diese Optimierungen werden unterstützt durch die Entwicklung von Simulationsmethoden zur Abbildung und Vorhersage katalytischer Prozesse.

Die Standardanalytik des ACA umfasst die Analyse der Elementzusammensetzung und -verteilung sowie der Kristall-

struktur, der spezifischen Oberfläche, der Porosität und Porengrößenverteilung. Zudem finden Untersuchungen bezüglich der Beschichtungsstruktur und zur Bestimmung der aktiven Zentren statt.

Über diese Basisanalytik hinaus verfügt das Projekthaus über die Möglichkeit, Katalysatoren in verschiedenen Entwicklungsstufen unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen.

So werden auch die entwickelten Materialien unter realen Bedingungen analysiert, um die Stoffentwicklungen zu charakterisieren und für den späteren Einsatz am Motor Datenmaterial bereitzustellen.

Der Bereich Simulation soll ein detailliertes Verständnis über Adsorbat-Oberflächen-Wechselwirkungen mittels Berechnungen in Kombination mit Experimenten liefern. Zur detaillierten Charakterisierung des Stofftransportes in

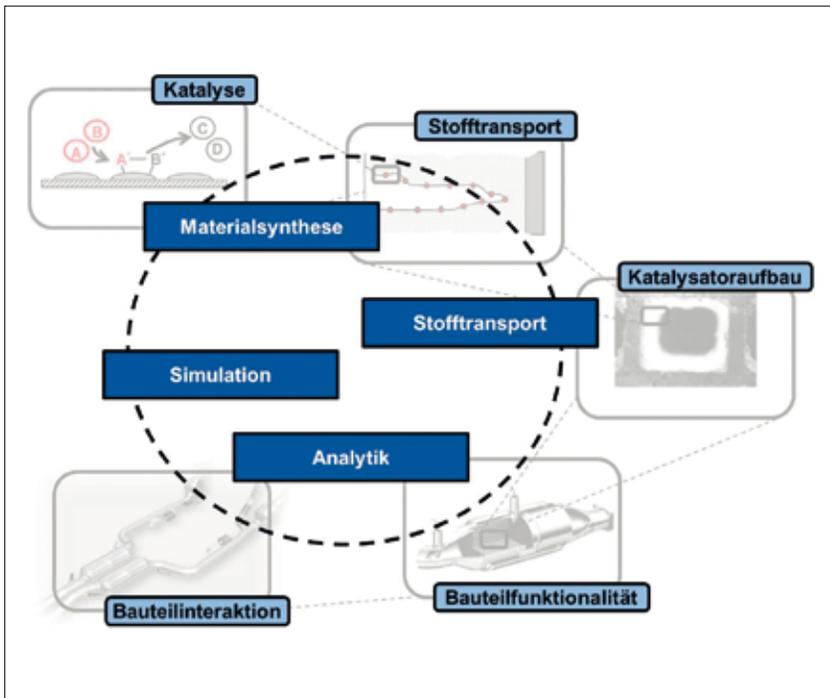


Bild 2:  
Forschungsschwerpunkte und  
Forschungsfelder des Center for  
Automotive Catalytic Systems  
Aachen, kurz ACA.

Bild 3:  
Versuchsreaktor zur Untersu-  
chung der katalytischen Aktivität.  
Foto: ACA

Bild 4:  
Versuchsaufbau zur parallelen  
elektrischen und Infrarotspektro-  
skopischen Analyse von Materi-  
alproben.  
Foto: ACA



der Grenzschicht zwischen dem Freistrom und der katalytischen Oberfläche werden Methoden zur in-situ Messung entwickelt. Auf Basis dieser experimentellen Ergebnisse können simulative Ansätze zur Abbildung und Optimierung dieser Prozesse erarbeitet werden. Ebenso werden Simulationen des Motorbetriebes inklusive des gesamten Abgasnachbehandlungssystems durchgeführt, um die Randbedingungen für die zu erwartenden Abgastemperaturen, -volumenströme und -zusammensetzungen an die Katalysatorentwicklung zu spezifizieren und neue Systemkonzepte zu entwickeln. Basierend auf den experimentell und simulativ gewonnen Erkenntnissen werden Katalysatoren gezielt aufeinander abgestimmt und neue Ansätze für die Systemgestaltung entwickelt. Moderne

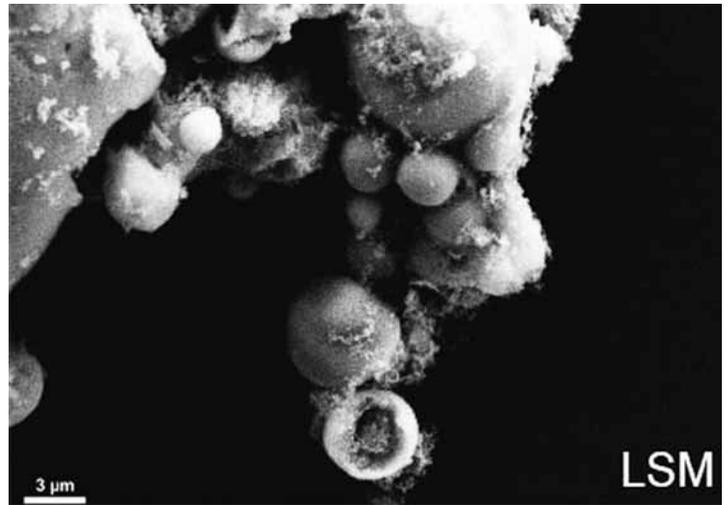
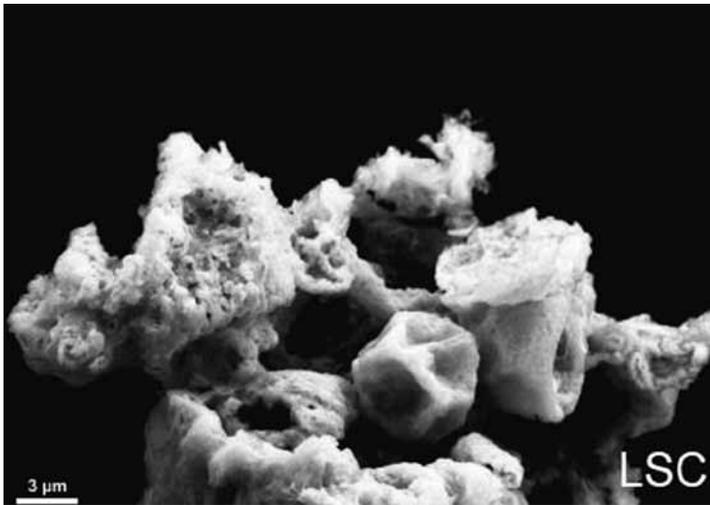
Testeinrichtungen für Motor, Antriebsstrang und Fahrzeug ermöglichen neben der Validierung der Systemstruktur auch die Abstimmung der Motorbetriebsparameter. Die gezielte Nutzung und Beeinflussung dieser Prozesse erfolgt im ACA bereits im Labormaßstab und kann bis ins Fahrzeug weiter verfolgt werden.

Ein Beispiel für die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Wissenschaftler ist die Fallstudie zum Einsatz verschiedener Lanthan-Perowskite als Stickstoffoxid ( $\text{NO}_x$ )-Speicher/Reduktionskatalysatoren (NSR). In diesem Zusammenhang werden die Materialien auch hinsichtlich ihrer  $\text{NO}$ -Oxidationsfähigkeit zu  $\text{NO}_2$  für Oxidationskatalysatoren untersucht. Die katalytisch aktiven Lanthan-Perowskite sollen die Edelmetallkomponente, wie Platin, im Katalysator ersetzen.

Vorteile sind zum einen die niedrigeren Herstellungskosten, zum anderen die größere Temperaturbeständigkeit. Da schon vorausgegangene Studien gezeigt haben, dass reine Lanthan-Perowskite deutlich weniger effizient als herkömmliche Katalysatoren sind, wurden Teile der Kristallstruktur durch die Elemente Strontium, Kobalt, Mangan und Eisen ausgetauscht, sodass sich folgende Varianten ergeben:

- LSM:  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$
- LSC:  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{CoO}_3$
- LSFC:  $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{Co}_{0,3}\text{Fe}_{0,7}\text{O}_3$

Diese Stoffe sind bisher im Wesentlichen aus der Brennstoffzellenforschung beziehungsweise als Ausgangsmaterialien für Membranen zur Gaseparati-



on bekannt. Im ACA wurden zunächst wichtige grundlegende Stoffeigenschaften der Proben in Pulverform vermessen.

Dazu zählt auch die spezifische Oberfläche des Materials, welche erhebliche Auswirkungen auf die katalytische Aktivität hat, da sie den Stofftransport maßgeblich beeinflusst. Hierbei zeigte sich bereits, dass diese Stoffe Optimierungspotenzial bieten, da sie nicht vornehmlich für den Einsatz als Katalysator entwickelt wurden. Durch Beaufschlagung der granulierten Proben mit synthetisch erzeugtem Abgas konnten ihre Potenziale als Speichermedium oder Oxidationskatalysator untersucht werden.

Diese Versuche am nicht optimierten Material dienen der Ermittlung der grundsätzlichen Eignung der verschiedenen Materialien für den angedachten Einsatzzweck sowie der Identifizierung der Wirkmechanismen. Mit Hilfe der Ergebnisse können die ablaufenden Prozesse gezielt und materialspezifisch analysiert werden. Nur diese detaillierte Kenntnis der Materialien und der an ihnen ablaufenden Reaktionen ermöglichen die anschließende, anwendungsorientierte Optimierung. So konnte für alle untersuchten Perowskite sowohl eine Speicherung der Stickoxide als auch eine Oxidationsreaktion nachgewiesen werden. Da die Größenordnung dieser Reaktionen noch weit hinter heute üblichen Materialien zurückliegt, ist zunächst der Vergleich untereinander von Interesse. Hierbei zeigen sich signifikante Unterschiede in den angestrebten Reaktionen, aber auch in weiteren parallel ab-

laufenden Prozessen. So konnte neben der Speicherung von Stickstoffoxiden die Einspeicherung weiterer Komponenten beobachtet werden. Zur gezielten Nutzung der Materialien müssen nun die Auswirkungen der Materialkombination auf die Wechselwirkung gewünschter und unerwünschter Reaktionen untersucht werden. Anschließend kann das vielversprechendste Material bezüglich seiner Eigenschaften gezielt auf die katalytische Anwendung eingestellt werden. Zu diesem Zweck werden insbesondere Herstellungsmethoden untersucht und angepasst. Das optimierte Material kann später in allen Skalen vom Pulver bis zur Beschichtung auf einem keramischen Träger hergestellt werden. Dies wiederum ermöglicht es, die Eignung als Katalysator auch im Motoren- oder Fahrzeugversuch nachzuweisen.

Neben diesem Thema beschäftigt sich das ACA in weiteren Projekten mit der Reduktion der Stickoxidemissionen durch selektive katalytische Reaktionen (SCR) oder der zukünftigen Ausrichtung des Gesamtkonzeptes der Abgasnachbehandlung. Letzteres ist von Bedeutung, da zunehmend Kombinationen bekannter Abgasnachbehandlungskomponenten in den Focus der Motorenhersteller rücken.

**Autor:**

Dipl.-Ing. Peter Dittmann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen.

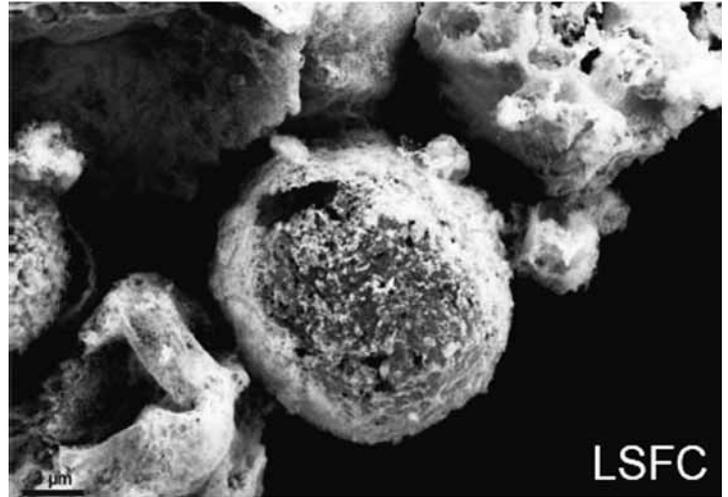
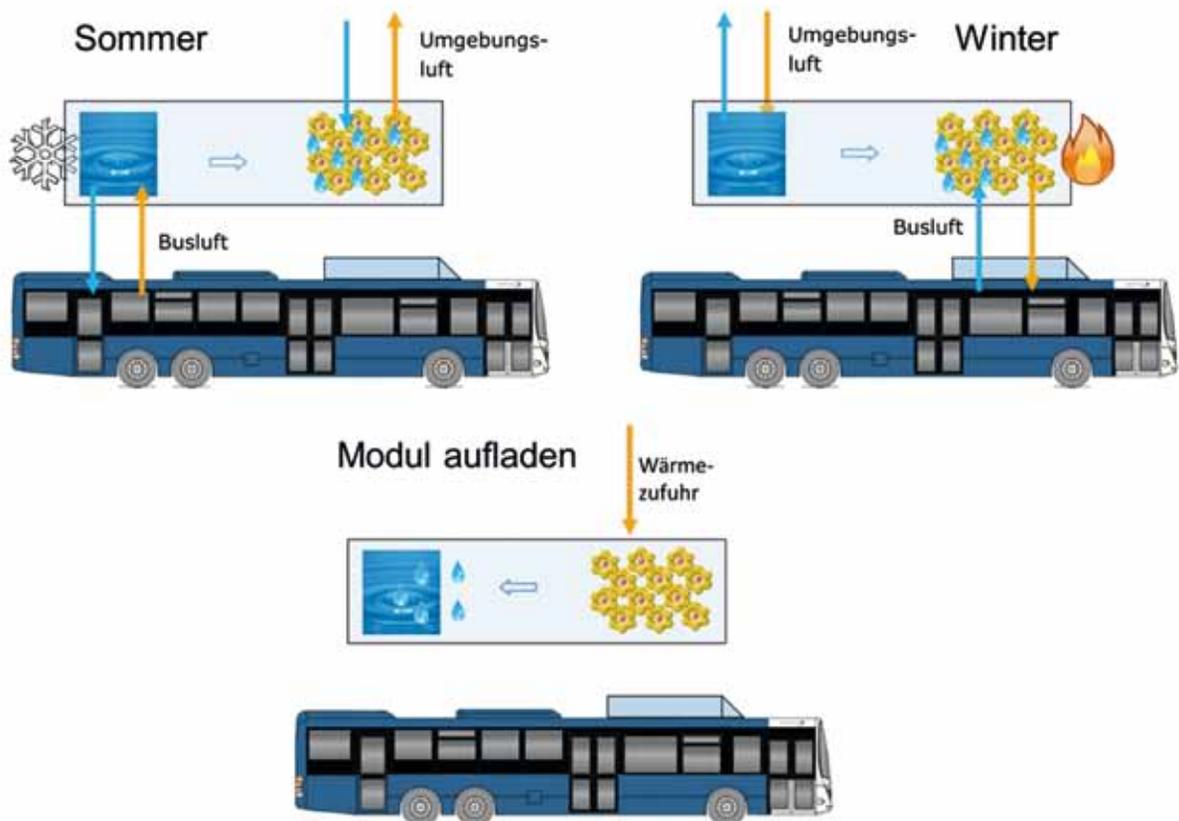


Bild 5: Mikroskop-Aufnahmen der granulierten Materialproben.

# Abgasfrei durch Aachen

CO<sub>2</sub>-neutrale



14

# E

Elektrobusse lösen viele Probleme des öffentlichen Nahverkehrs. Auch die hohen Anschaffungskosten der Batterie fallen bei ihnen weniger ins Gewicht, da ein Bus täglich bis zu vierzehn Stunden unterwegs ist und die Batterie so intensiv nutzt. Ein bisher ungelöstes Problem ist allerdings die Klimatisierung elektrisch an-

getriebener Busse, im Winter müssen die Busse geheizt und im Sommer gekühlt werden. Die Batterie muss diese Klimatisierungsenergie aufbringen, und dieser Energiebedarf kann in heißen oder kalten Monaten genauso groß sein wie der für die Traktion. Eine Alternative für die Klimatisierung von Elektrobusen ist daher das Ziel eines interdisziplinären Teams, in dem Chemiker, Bauingenieure, Maschinenbauer und Elektrotechniker gemeinsam arbeiten.

Die gewünschte Klimatisierung bringt ein Speichermodul auf Basis des physikalischen Prinzips der Adsorption. Wärme wird freigesetzt, wenn Wasserdampf an der Oberfläche eines porösen Feststoffes anlagert. Der Feststoff zieht das Wasser dabei regelrecht an. Dadurch verdampft Wasser aus einem Reservoir. Das Verdampfen von Wasser erzeugt

wiederm Kälte. Somit kann ein Speichermodul mit Adsorption auf einer Seite Heizen und auf der anderen Seite Kühlen. Zur Regeneration muss das Modul lediglich wieder getrocknet werden.

Wie funktioniert dieses Prinzip im Elektrobus? Im Sommer kühlt die kalte Seite des Moduls die warme Luft aus dem Bus. Die dem Bus entzogene Wärme verdampft dabei das Wasser im Modul. Die warme Seite des Moduls gibt Wärme an die Umgebungsluft ab, vergleichbar der Rückwand des heimischen Kühlschranks.

Im Winter heizt die warme Seite des Moduls die kalte Luft im Bus auf. Diese Wärme wird bei der Adsorption des Wasserdampfes am Feststoff freigesetzt. Hierzu muss Wasser verdampft werden, die dazu benötigte Energie entstammt der Umgebungs-

# Klimatisierung für Elektrobusse

Bild 1:  
Funktionsweise des  
Adsorptions-Klimamoduls.

luft. Die Luft über dem Dach des Busses wird dann zwar etwas kälter, der Innenraum allerdings geheizt.

Während der Batterieladephase wird das Modul für die nächste Busfahrt wieder aufgeladen. Hierzu wird jahreszeitenunabhängig Wärme zugeführt, um den porösen Feststoff zu trocknen. Das funktioniert beispielsweise über den Anschluss, über den auch die Batterie mit Strom beladen wird.

Während der Busfahrt wird für Heizen und Kühlen dann praktisch keine Energie aus der Batterie mehr benötigt, denn die nötige Energie ist bereits im Adsorptionsmodul gespeichert.

Ein weiterer Vorteil des Adsorptionsklimamoduls ist, dass es mit Wasser funktioniert. Es verzichtet somit auf konventionelle, häufig klimaschädliche Kältemittel. Auch die eingesetzten Feststoffe sind unschädlich. Ein häufig für Adsorptionsprozesse genutztes poröses Material ist Zeolith. Der Name kommt aus dem Altgriechischen und bedeutet „siedender Stein“, weil die Zeolith-Partikel gebundenes Wasser abgeben, wenn sie erhitzt werden und dabei so aufbrausen, als würden sie sieden. Zur Wasseraufnahme nutzen Zeolithe ihre sehr hohe innere Oberfläche: Ein Gramm hat eine innere Oberfläche von mehreren hundert Quadratmetern. Zeolithe kommen auch in der Natur vor, werden aber vor allem kommerziell hergestellt und sind günstig verfügbar. Die Materialpaarung Zeolith-Wasser speichert eine Menge Energie und ist somit wesentlich preiswerter als verfügbare Elektrobus-Batterien.

Man kann sich einen Zeolith als einen Schwamm vorstellen, der sehr gerne Wasser aufnimmt. Wenig Feststoffmasse soll hier möglichst viel Wasser aufnehmen, so wird das Adsorptionsmodul kompakt. Wenn der Schwamm vollgesogen ist, folgt die Trocknung. Dazu wird der voll beladene Zeolith erhitzt und so das Wasser aus den Poren entfernt. Für diesen Schritt ist es wichtig, dass das Material nicht zu Wasser-affin ist, denn je stärker das Wasser im Material gebunden ist, desto mehr Energie und desto höhere Temperaturen benötigt die Regeneration. Dieses Mehr an aufzuwendender Energie verschlechtert die Energiebilanz des Klimatisierungsmoduls.

Die Effizienz eines Adsorptionsklimamoduls berechnet sich über den Vergleich der gewonnenen Energie während der Adsorption zur eingesetzten Energie während der Regeneration. Um die Effizienz zu steigern, muss das Material also möglichst gerne Wasser aufnehmen, dieses aber nicht zu stark binden. An diesem Punkt kommt die Materialoptimierung ins Spiel. Die Adsorptionskapazität bestimmt, wie viel Wasser ein poröses Material unter bestimmten Bedingungen aufnehmen kann und hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen beeinflusst die Struktur des Materials die Adsorptionskapazität, wie viele Poren gibt es, welchen Durchmesser haben sie und wie sind sie miteinander verknüpft. Diese Größen sind physikalische Materialeigenschaften. Auf der anderen Seite ist eine genaue Betrachtung der Oberfläche des Materials in den Poren enorm wichtig. Diese kann aufgrund un-

terschiedlicher Zusammensetzung und Molekülgruppen eine höhere oder geringere Affinität zu Wasser aufweisen, was sich direkt in der Sorptionskapazität bemerkbar macht. Durch eine kontrollierte Einstellung der einzelnen Parameter sollen die Materialien für ihren Einsatzort optimiert werden und so die Effizienz einer Adsorptionsanlage verbessern.

Neben Materialeigenschaften, die sich eher auf der Nanometer-Skala abspielen, gibt es auch handfeste Herausforderungen für den Einsatz der porösen Materialien in einer mobilen Anlage. Der Feststoff wird für die bessere Handhabung zu kleinen Kugeln geformt, die einen Durchmesser von etwa zwei bis vier Millimeter haben. Für einen einwandfreien Ablauf ist es wichtig, dass die Kugeln nicht zerbrechen und während des Betriebs keinen Abrieb erleiden. Zerbrochene Kugeln oder Abriebmaterial blockieren den Wasserdampf im Modul. Aus diesem Grund wird die mechanische Stabilität der Zeolith-Kugeln untersucht. Dafür werden die Kugeln in kleinen Behältern auf einer Rüttelplatte mechanischen Belastungen ausgesetzt, wie sie während der Fahrt mit einem Bus auftreten würden. Das Rüttelprofil ist unter anderem abhängig von der Beschaffenheit der Straßen und zeichnet sich durch unterschiedlich starke Amplituden in x-, y- und z-Richtung aus. Nach den Rüttel-Tests wird das Material begutachtet. Außerdem wird die Sorptionskapazität vorher und nachher vermessen und verglichen, um den Einfluss auf die Effizienz des Adsorptionsmoduls zu quantifizieren.

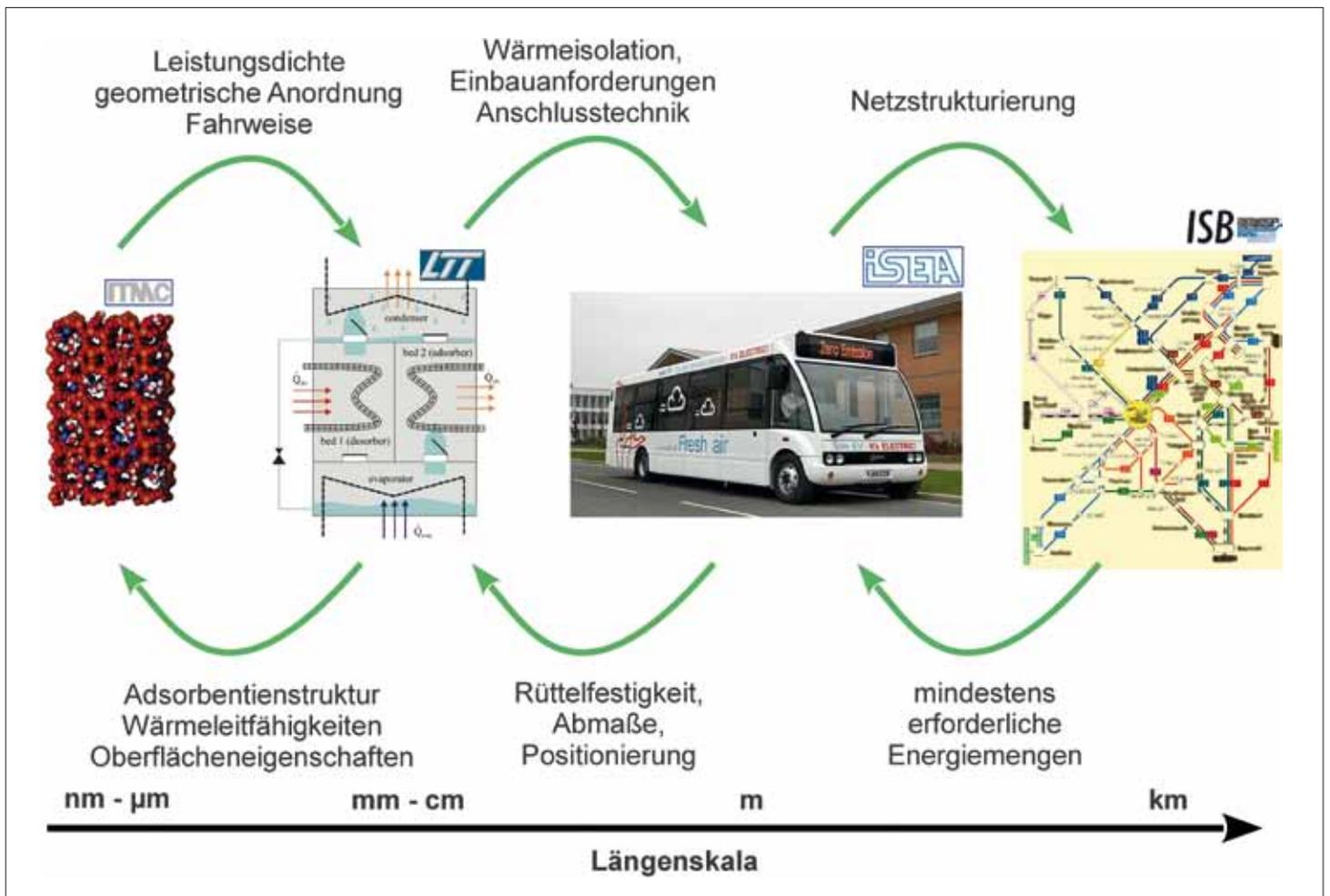


Bild 2: Klimatisierung eines Busses mit Elektromobilität: Forschung auf allen Skalen.

16

Ist ein gutes Material gefunden und wurde dessen Rüttelfestigkeit bestätigt, gilt es, dieses in einem Klimatisierungsmodul einsatzfähig zu machen. Dabei müssen die einzelnen Teilkomponenten gut aufeinander abgestimmt werden: Wie viel Zeolith wird benötigt? Wie groß müssen Wärmeübertrager sein? Welche Lüfter sind zu verwenden und wie viel Energie brauchen diese? Um diese Fragen zu beantworten, nutzen die Forscher dynamische Simulationen. Dadurch wird das Zusammenspiel der Komponenten untersucht und ein optimales Design entwickelt: Das Modul muss den Leistungsanforderungen entsprechen und gleichzeitig möglichst leicht und klein sein, sodass es in einem Bus eingesetzt werden kann. Dazu wird das entwickelte Klimamodul im Labormaßstab aufgebaut und vermessen. Im Experiment lassen sich zum einen die vorhergesagten Leistungen bestätigen, zum anderen können ganz praktische Probleme der Einbindung und Ankopplung an einen Elektrobus untersucht werden.

Nach der Integration des Klimamoduls in den Elektrobus, muss der Bus in ein bestehendes Verkehrsnetz integriert werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die Reichweite des Busses be-

grenzt ist und die Ladephase Zeit kostet. Die Ladung der Batterie kann entweder dezentral am Ende einer Linie oder in regelmäßigen Abständen während der Fahrt passieren. In jedem Fall bedarf es einer möglichst schnellen Ladung, um die Standzeiten des Busses so kurz wie möglich zu halten. Um die Schnellladung zu realisieren, haben Maschinenbauer und Elektrotechniker ein Stecksystem entwickelt, das sich vollautomatisch an den sich nähernden Bus ankoppelt. Diese Schnellladung überträgt in vier bis sechs Minuten so viel Energie, dass ein zwölf Meter langer Bus unter Nutzung der richtigen Batterietechnologie eine Linienfahrt von etwa 50 Minuten zur nächsten Ladestation mit Leichtigkeit bewältigen kann.

Ladestellen an zentralen Verkehrsknotenpunkten könnten von vielen Bussen genutzt werden und rechnen sich finanziell dadurch schneller. Allerdings ist das Laden in der Mitte einer Linie mit Wartezeiten für die Passagiere verbunden. Es stellt sich die Frage der Akzeptanz der ÖPNV-Nutzer, wenn sich eine Fahrtstrecke von zwanzig Minuten um fünf Minuten verlängert, weil der Bus unterwegs geladen wird. Zudem müsste in diesem Fall die Verkehrsnetzstruktur dem

erhöhten Verkehrsaufkommen an zentralen Punkten angepasst werden. Für die Integration des Elektrobusse müssen also weit aus mehr als nur technische Fragen geklärt werden.

Diesen Herausforderungen stellt sich ein interdisziplinäres Team der RWTH Aachen im Rahmen des Boost-Fund-Projektes „CO<sub>2</sub>-neutrale Klimatisierung für Elektrobusse“.

**Autoren:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Bardow ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik. Uwe Bau, M.Sc., ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik. Swaantje Maaz, M.Sc., ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Heterogene Katalyse und Technische Chemie. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Regina Palkovits ist Inhaberin des Lehrstuhls für Heterogene Katalyse und Technische Chemie. Dipl.-Ing. Heike Schreiber ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik.

# AUCH GROSSE ZIELE?

HEILBRONN – FÜR HELLE KÖPFE  
& ZUKUNFTSGESTALTER

*Heilbronn in 3 Minuten:*



Bei einem Weltmarktführer arbeiten?  
Die eigene Hightech-Firma gründen?  
Spannende Zukunftsprodukte entwickeln?

[www.regiojobs24.de](http://www.regiojobs24.de)  
[www.innovationsfabrik.de](http://www.innovationsfabrik.de)  
[www.wohlgelegen.de](http://www.wohlgelegen.de)

**Standort Heilbronn**  
*Create your Business!*

Kontakt:  
Stabsstelle Wirtschaftsförderung  
Tel.: 07131 / 56-2277  
[wirtschaftsfoerderung@stadt-heilbronn.de](mailto:wirtschaftsfoerderung@stadt-heilbronn.de)



# Flexible

## Konsortium forscht zu Nieder-, Mittel- und



Ende September 2014 erhielt der Forschungscampus „Elektrische Netze der Zukunft“ aus dem Bundesministerium für Bildung und Forschung eine Förderzusage über zehn Millionen Euro für die nächsten fünf Jahre. Mit einem Gesamtbudget von mindestens 20 Millionen Euro – das BMBF bewilligt die Fördermittel nur, wenn industrielle Partner und die RWTH Aachen, zum Beispiel über weitere Drittmittelprojekte, einen mindestens gleich hohen Betrag beisteuern – wird ein zu diesem Zweck gebildetes Forschungskonsortium untersuchen, wie die Gleichspannungstechnik beim Ausbau der Übertragungs- und Verteilnetze genutzt werden kann.

Das Ziel des FEN-Konsortiums ist die Erforschung der elektrischen Netze für eine zukünftige Energieversorgung mit einem hohen Anteil volatiler, regenerativer und dezentraler Energieerzeugung. Die Strukturen der elektrischen Netze sind in ihrer jetzigen Form der „Flaschenhals“ der Energiewende und müssen für die weitere Integration von erneuerbaren Energiequellen ertüchtigt werden. Die Entwicklung bezahlbarer und von der Bevölkerung akzeptierter Lösun-

gen für den Netzausbau ist entscheidend für das Gelingen der Energiewende. Dabei gilt es, mit möglichst wenig neuen Leitungen auszukommen. Im Fokus des FEN-Konsortiums stehen deshalb Erforschung und Weiterentwicklung von Gleichspannungsnetzen, die insbesondere eine hohe Flexibilität und einen gesteigerten Wirkungsgrad versprechen. Das Konsortium hat drei Gruppen definiert, die sich an den Spannungsebenen in der elektrischen Energieversorgung orientieren: Nieder-, Mittel- und Hochspannung. Damit können die spezifischen Fragestellungen jeweils im Verbund mit Industriepartnern erforscht sowie neue Technologien entwickelt und implementiert werden. Weitere Ausbauschritte wie die Einbindung der Netze für Gas und Wärme – deren hohe Speicherpotenziale haben für die Weiterentwicklung des Versorgungssystems große Bedeutung – sind geplant.

Unternehmen können einer oder mehreren Gruppen beitreten, um gemeinsam mit der RWTH vorwettbewerbliche Forschung zu neuen elektrischen Netzen durchzuführen. Zur Koordination der Zusammenarbeit wurde die FEN GmbH gegründet, die die Kooperationsverträge abschließt und Dienstleistungen anbietet.

15 RWTH-Lehrstühle und elf industrielle Partner arbeiten aktuell in diesem Konsortium. Die Unternehmen beteiligen sich an der Finanzierung, auch verpflichten sie sich, mindestens mit einem Mitarbeiter in Aachen zu sein. Da weitere Partner willkommen sind, ist damit zu rechnen, dass

der finanzielle Rahmen für die ersten fünf Jahre die 20-Millionen-Marke übersteigen wird. Solche Entwicklungen will das Bundesministerium für Bildung und Forschung mit dieser Art der Förderung anstoßen.

Das für den FEN gegründete Konsortium dürfte in seiner Form, Zielsetzung und Ausstattung einmalig sein in der europäischen Forschungslandschaft. So gehören zu den Partnern aus der Energietechnik und Energiewirtschaft General Electric ebenso wie Schaffner, Infineon, Siemens, die RWE-Tochter Westnetz und der Düsseldorfer Energieversorger E.ON, Hager Group, Maschinenfabrik Reinhausen, Fuji Electric, Hitachi und Hyosung. Zusätzlich bietet FEN Partnerschaften für kleine und mittlere Unternehmen an, hier konnte das Aachener Unternehmen AixControl gewonnen werden.

### Forschungsthemen im Mittelspannungsbereich

Wichtige Forschungsinhalte sind elektronische Verteilstationen – so genannte Substations – mit leistungselektronischen Gleichspannungswandlern, Schutz- und Messtechnik, Gleichspannungskabelverbindungen, technischen Lösungen zur Netzautomatisierung, -regelung und -stabilität sowie als komplementäre Forschungsthemen Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz in der Bevölkerung und räumliche Einbindung in das Stadt- und Landschaftsbild. Darüber hinaus wollen die Partner Normen und Richtlinien für DC-Mittelspannungsnetze und -komponenten entwickeln und international etablieren.

# Elektrische Netze

## Hochspannung

Die Fördergelder werden in der Mittelspannungsgruppe für vier Forschungsprojekte eingesetzt, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

Im Projekt P1, geleitet von Professor Albert Moser, werden Verfahren und Methoden zur Planung und zum Betrieb von reinen Gleichspannungs- beziehungsweise hybriden Gleich- und Drehstromnetzen erforscht. Neben der Ableitung von neuen Planungsgrundsätzen erfolgt eine Analyse der systemischen Rückwirkungen auf die über- und unterlagerten konventionellen Drehstromnetze sowie eine interdisziplinäre Bewertung der Technologie unter Gesichtspunkten wie Umweltverträglichkeit und gesellschaftlicher Akzeptanz.

Die elektrischen Komponenten und Systeme, die für den Aufbau und den Betrieb von Gleichspannungsnetzen erforderlich sind, werden im Projekt P2 erforscht und weiterentwickelt. Die einzelnen Komponenten wie Gleichspannungswandler, Gleichspannungsschalter und Kabel sowie leistungselektronische Halbleiterbauelemente und Transformatoren für den Mittelfrequenzbereich werden analysiert, optimiert, aufgebaut und getestet.

Ziel des Projekts P3, geleitet von Prof. Antonello Monti, ist, die Herausforderungen der Automatisierungstechnik für Mittelspannungs-Gleichspannungsnetze zu untersuchen und dafür Lösungsansätze auszuarbeiten. Daher werden neuartige Konzepte der Netzregelung in der neuen Netzinfrastruktur untersucht und entwickelt. Auch werden Energie-

und Lastmanagementsysteme konzipiert, wobei Rechenzentren mit internen Gleichspannungssystemen eine besondere Rolle spielen sollen. Auf dieser Basis entsteht ein Automatisierungs- und Netzleitsystem für zukünftige Netze. Weiterhin wird eine Testplattform, die der Validierung von Anlagen und Automatisierungssystemen dient, entwickelt.

Im Projekt P4 wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf dem Campus der RWTH Aachen ein Mittelspannungs-Gleichspannungsnetz auslegen, aufbauen und in den Testbetrieb überführen. An das Forschungsnetz werden unterschiedliche Prüfstände der RWTH in der Megawattklasse angeschlossen. Dabei wird der jeweils im Prüfstand vorhandene Gleichspannungszwischenkreis über einen Gleichspannungswandler mit dem Netz verbunden.

In allen vier Projekten sollen, soweit vorhanden, Standardkomponenten aus der aktuellen Produktion der Industriepartner eingesetzt werden, um möglichst schnell in den Testbetrieb zu gelangen; nur einzelne Teilkomponenten sollen neu entwickelt werden. Regelungsprozeduren für einen sicheren Betrieb des Netzes werden entwickelt und getestet. Aus dem Testbetrieb sollen vorrangig Erkenntnisse sowohl zum Betrieb von Gleichspannungsnetzen als auch zum Zusammenwirken der einzelnen Komponenten gewonnen werden. Letztlich arbeitet die Forschungsgruppe Mittelspannung auf eine Normung von Mittelspannungs-Gleichspannungsnetzen und deren Komponenten hin.

Deren Weiterentwicklung und Optimierung erfolgt im Rahmen des FEN-Konsortiums mit allen Industriepartnern oder in bilateralen Entwicklungsprojekten.

### Konsortium Niederspannung

Aktuell baut Professor Antonello Monti vom Institute for Automation of Complex Power Systems des E.ON ERC im Rahmen des FEN den Forschungsbereich Niederspannung auf. Im Vordergrund steht dabei die Nutzung der Gleichspannungstechnik für so genannte Smart Grids. Dabei spielt der automatisierte Informationsaustausch zwischen Verbrauchern und Anbietern eine zentrale Rolle. Dieser Forschungsbereich des FEN soll zum europäischen Kompetenzzentrum für die Automatisierung im Niederspannungsbereich entwickelt werden. Unter anderem soll ein Koordinierungsbüro zur Vermittlung und Betreuung entsprechender Forschungsmittel der EU eingerichtet werden.

Anfang Oktober 2014 wurden im Rahmen eines Workshops mögliche Partner für den Forschungsbereich Niederspannung angesprochen. Insgesamt waren 25 Unternehmen, vom KMU bis hin zum Global Player, auf dem RWTH-Campus vertreten, um sich über das Projekt selbst und die damit verbundenen Kooperationsmöglichkeiten zu informieren.

<http://www.fen.rwth-aachen.de/>

### Autor:

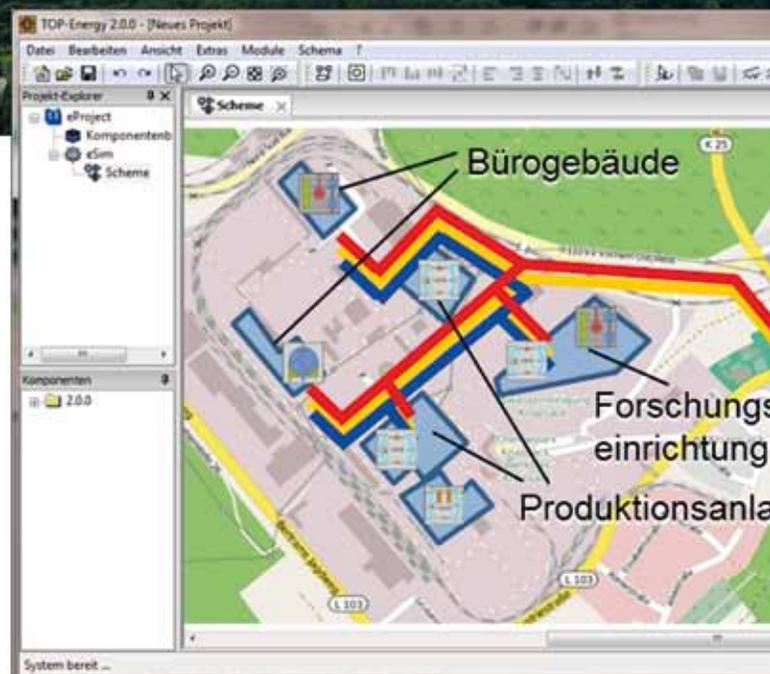
Univ.-Prof. Dr.ir. Dr. h.c. Rik W. De Doncker ist Direktor des CAMPUS Cluster Sustainable Energy, Direktor des E.ON Energy Research Centers (E.ON ERC), Inhaber des Lehrstuhls für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) und des Instituts Power Generation and Storage Systems (PGS) am E.ON ERC.





Foto: E.ON Eon Research Center Peter Winandy

# Effizienz – Die unvergessene Energieeinsparungen



22

Bild 1: Optimierung eines Chemie-  
parks mit Hilfe der Software TOP-  
Energy.  
Quellen: InfraServ GmbH & Co.  
Knapsack KG; openstreetmap.org.

# nachhaltige Energiequelle und ihre Rebound-Effekte

# A

Auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem stehen derzeit vor allem erneuerbare Energien im Fokus der öffentlichen Wahrnehmung. Gelingen kann die Energieeffizienz allerdings nur, wenn gleichzeitig die Energieeffizienz gesteigert wird. Mit der effizienten Erzeugung und Nutzung von Energie beschäftigen sich daher die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des E.ON Energy Research Centers und des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik. Im Mittelpunkt stehen dabei Industrie, Gewerbe und Kommunen. Das Potenzial der Energieeffizienz ist enorm: Bis zu 24 Prozent Energie können laut einer aktuellen Studie des Instituts für Energie und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) eingespart werden.

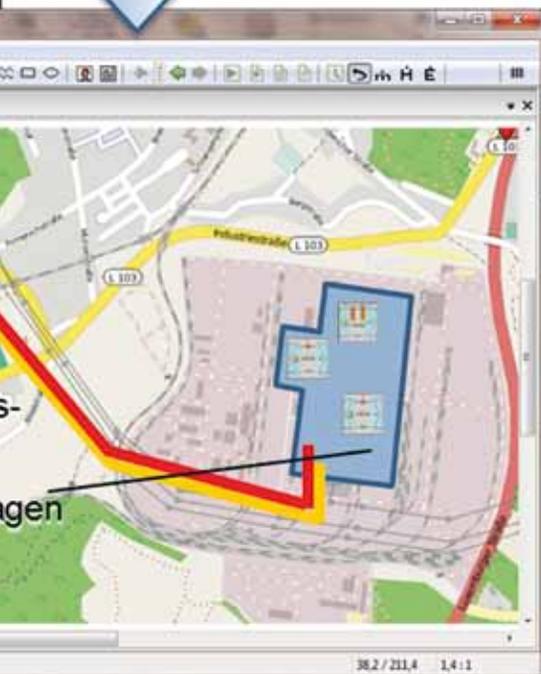
Wissenschaftler des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie. Die dabei entwickelte Software TOP-Energy unterstützt Betreiber und Planer von Industrieparks bei der Verbesserung vorhandener Energieversorgungsstrukturen und bei der Entwicklung neuer effizienter Systeme.

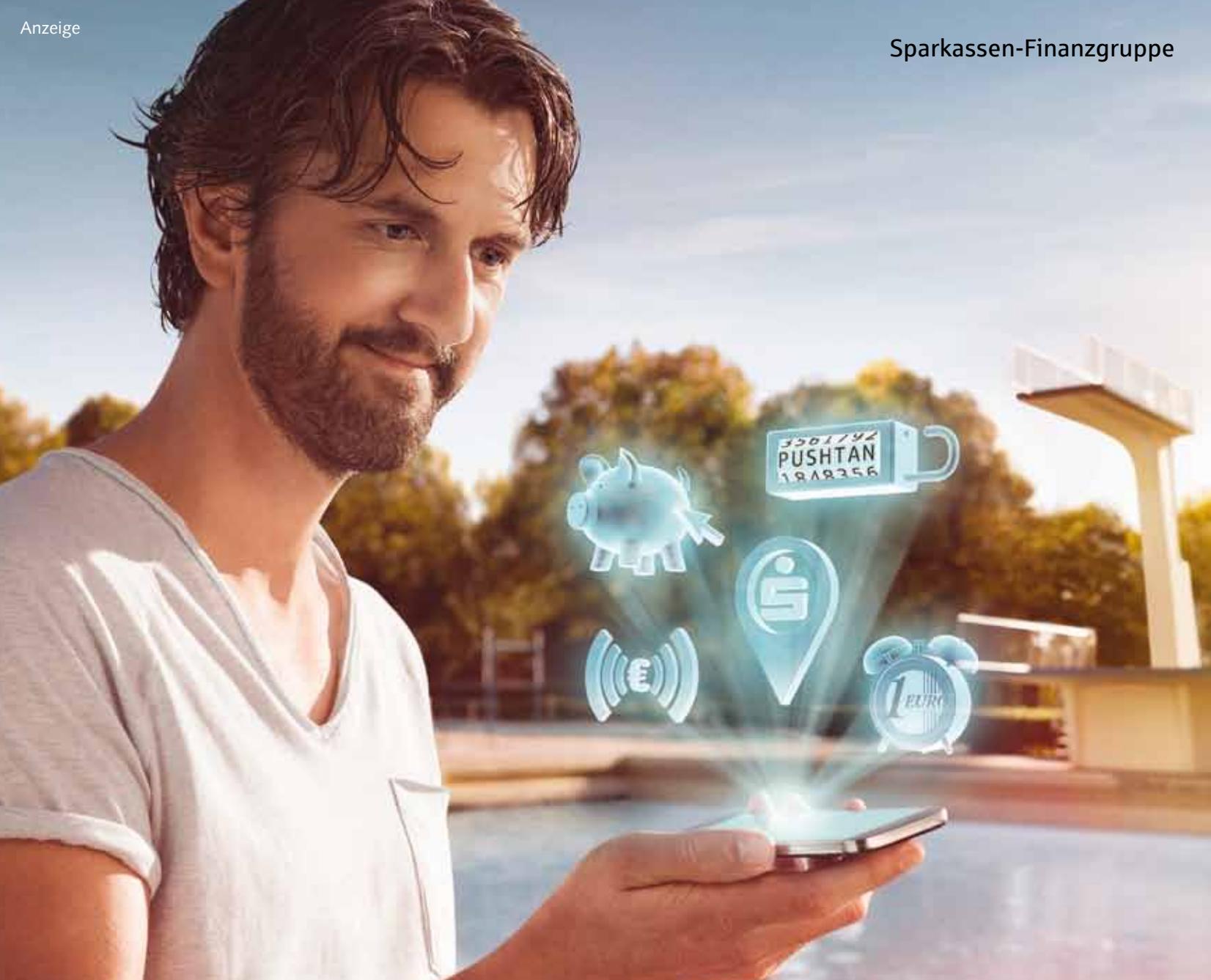
Die neue Software generiert automatisch das optimale Energiesystem: Der Nutzer spezifiziert seinen Energiebedarf und die vorhandene Infrastruktur. Das Programm bestimmt daraufhin die zu installierenden Komponenten, deren Größe und die optimale Betriebsweise über das Jahr. Dabei stehen verschiedene Anlagen zur Auswahl wie beispielsweise Blockheizkraftwerke, Kessel und Kältemaschinen sowie erneuerbare Energielieferanten. Die Optimierung berücksichtigt gleichzeitig Wärme, Kälte und Strom. So ergibt sich eine ganzheitliche Betrachtung und die Effizienz steigt dank gekoppelter Erzeugung und Nutzung. Als Zielgröße dienen Kosten, aber auch Umweltauswirkungen wie CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Für einen Pharma-Betrieb plante die Software bereits das Energiesystem. Input war das bisherige Energiesystem, das historisch gewachsen war. Das neue Energiesystem reduziert den Energieverbrauch und damit die Gesamtkosten um 40 Prozent. Durch die eng verzahnte Entwicklung der Methoden mit Industriepartnern ist die neu entwickelte Software TOP-Energy bereits heute ein Werkzeug, das kommerziell in der Praxis genutzt wird.

## Energieeinsparung in Gewerbe- und Industrieparks

Gerade Industrieparks brauchen viel Energie. Dabei führt die Vielfalt von Betrieben im Industriepark auch zu einem Mix der Energiebedarfe: Benötigt ein Metallbetrieb sehr hohe Temperaturen, so genügen in der Lebensmittelindustrie meist schon Temperaturen um die hundert Grad Celsius. Hierdurch ergeben sich Potenziale zur Kopplung von Energieerzeugung und -nutzung. Diese Kopplung steigert die Energieeffizienz und senkt den Energiebedarf des Industrieparks. Mit Hilfe mathematischer Methoden wird die Energieversorgung von Industrieparks optimiert. Im Projekt „Strukturoptimierung der Energieversorgung von Industrieparks – sOptimo“, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wurde, arbeiteten die Wissenschaftlerinnen und





# Das Konto, das mehr drauf hat als Geld. Das Sparkassen-Girokonto.

Neu mit pushTAN. Mobil überweisen ohne Zusatzgeräte.

Das Sparkassen-Girokonto bietet viele Vorteile\* wie das mobile Überweisen mit pushTAN, das praktische Klicksparen per Knopfdruck oder den intelligenten Kontowecker, der Sie aktiv über Umsätze informiert. Noch mehr Vorteile und Infos erfahren Sie in Ihrer Geschäftsstelle oder unter [www.sparkasse.de](http://www.sparkasse.de).



Gewinnt jetzt die 200 exklusiven „HIN und VIP“-Tickets!  
Nur auf: [www.sparkassenpark.de/hin-und-vip](http://www.sparkassenpark.de/hin-und-vip)

Wenn's um Geld geht



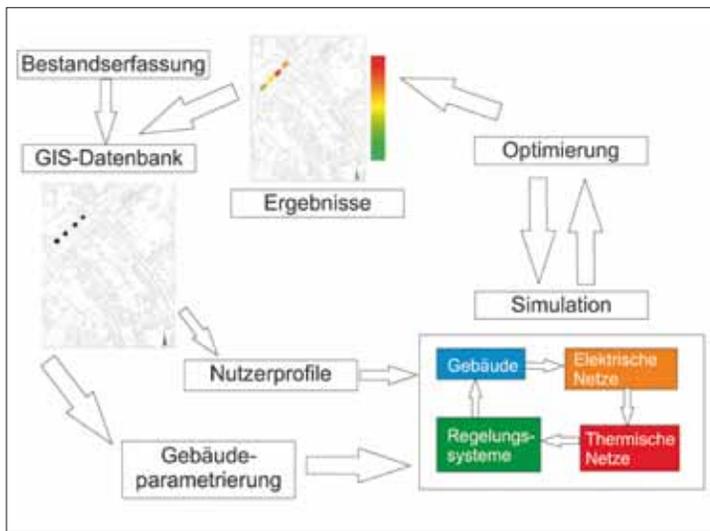


Bild 2: Entwicklung von Kommunikationsstandards für intelligentes Energie- und Lastmanagement unter Einsatz einer Mobilfunkbasisstation.

### Synergie

#### „Industriepark – Wohnviertel“

Weitere Potenziale für die effiziente Erzeugung und Nutzung von Energie ergeben sich durch die Kopplung von Industrieparks an Wohngebiete und öffentliche Einrichtungen wie Schulen, Schwimmbäder oder Krankenhäuser. Mit dieser ganzheitlichen Betrachtung eines Mischgebiets beschäftigt sich das ebenfalls vom BMWi geförderte Projekt „EnEff: Stadt – Bottrop, Welheimer Mark“, welches am E.ON Energy Research Center betreut wird. Das Quartier Welheimer Mark liegt in der Modellstadt Bottrop und ist Bestandteil des Innovation City Ruhr Projekts. Primäres Ziel ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50 Prozent bis zum Jahr 2020. Die Welheimer Mark ist ein Mischgebiet aus Industrie, Gewerbe und Wohnungen, das repräsentativ für Siedlungen im Ruhrgebiet ist. Zusammen mit Partnern aus der Industrie analysieren die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimotechnik sowie des Instituts für Automation of Complex Power Systems zunächst den Ist-Zustand des Energieverbrauchs. In einer ganzheitlichen Betrachtungsweise des Zusammenwirkens von Gebäuden, Anlagentechnik, Regelsystemen sowie elektrischen Netzen werden dann Ansätze entwickelt, die die Nutzung von Synergieeffekten zwischen Gewerbe, Industrie und Wohnen ausnutzen. Die Dynamik der Lastverläufe und die Zeitpunkte von Leistungspeaks spielen hierbei eine wichtige Rolle, sodass für die Konzeptentwicklung eine Simulationsplattform für dynamische Quartiersimulationen entwickelt wurde.

Die Simulationen integrieren eine gekoppelte Betrachtung von thermischer und elektrischer Seite. Betrachtet werden beispielsweise Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf das elektrische Netz sowie Optionen zum Energie- und Lastmanagement. Zur verbesserten Energieanlagenverteilung, -dimensionierung sowie der Betriebsweise kommen mathematische Optimierungsverfahren zum Einsatz.

Die Planungssoftware ist so aufgebaut, dass sie bereits mit wenigen Eingangsdaten nutzbar ist. Die Datensammlung erfolgt in einer auf die Anforderungen von heterogenen Stadtquartieren zugeschnittenen Datenbank. Neben Daten für physikalische Wohngebäudemodelle können unter anderem Datensätze für komplexe Industriebetriebe, für kleine und mittelständische Unternehmen sowie weitere Nichtwohngebäude hinterlegt werden. Geografische Objektkoordinaten von Gebäuden, aber auch Versorgungsleitungen, werden über eine Schnittstelle zu Geoinformationssystemen in die Datenbank geholt. Über eine Rückspeisung der simulierten Daten in das Geoinformationssystem erfolgt eine anschauliche grafische Ausgabe von Konzepten und Analysen.

Die Analyse der Ergebnisse soll zur Entwicklung von Konzepten beitragen, deren Umsetzung eine energetische Optimierung sowie gleichzeitig eine Aufwertung des Lebensraums in Mischgebieten zur Folge hat.

So groß das Einsparpotenzial auch sein mag – der Energieverbrauch lässt sich nur dauerhaft senken, wenn die durch die eingesparte Energie neu entstandenen Kapazitäten beziehungsweise eingesparten Kosten nicht an anderer Stelle für zusätzliche energieintensive Güter verwendet werden.



Feiert eure Stars. So live, so einmalig und so nah wie noch nie! Erlebt als VIPster unvergessliche Momente mit vielen Überraschungen. Gewinnt jetzt die 200 exklusiven „HIN und VIP“-Tickets für die Konzerte von:

Silbermond (20.6.2015),  
David Guetta (27.6.2015),  
Sting (7.7.2015),  
Santiano (11.7.2015),  
Fanta Vier (17.7.2015),  
Xavier Naidoo (24.7.2015),  
Jan Delay (1.8.2015),  
Andrea Berg (21.8.2015),  
Deichkind (28.8.2015)  
und Projekt Y (5.9.2015)  
im SparkassenPark in  
Mönchengladbach.

Also jetzt mitmachen und nichts wie „HIN und VIP“:  
[www.sparkassenpark.de/hin-und-vip](http://www.sparkassenpark.de/hin-und-vip)



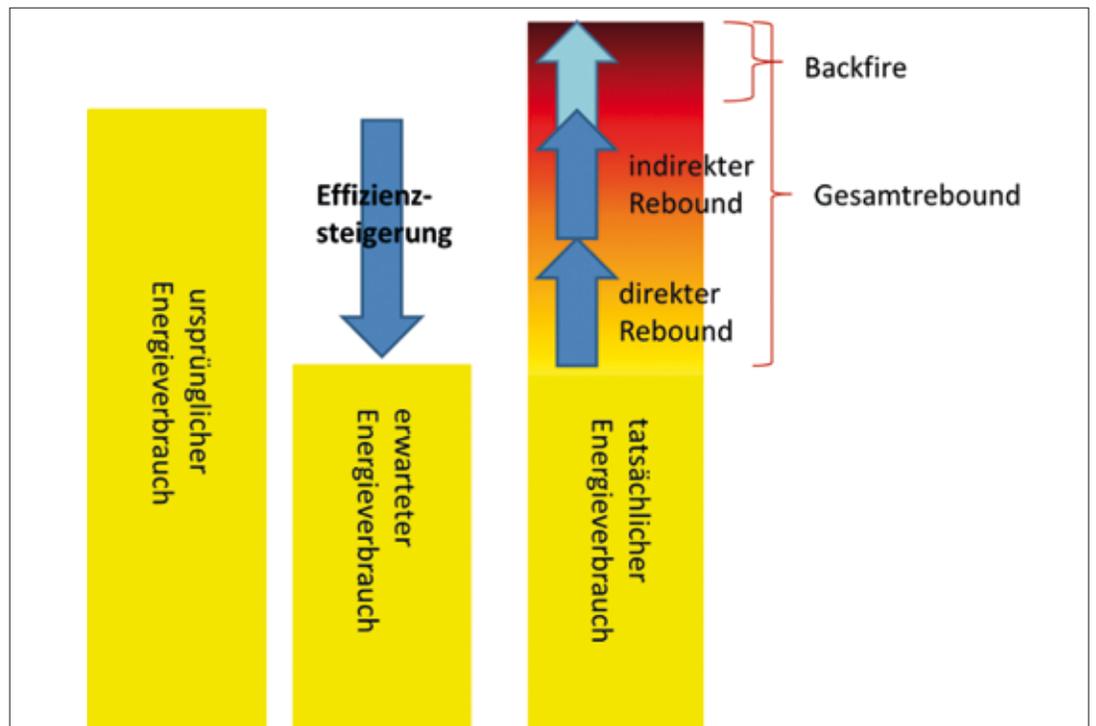


Bild 3: Wirkung von Rebound und Rebound-Begriffe.  
 Quelle: R. Madlener / B. Alcott (2011), Rebound-Studie im Auftrag der Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität“ des Deutschen Bundestages.

### Rebound-Effekte: Die Achillesferse der Effizienzrevolution

Die Wirksamkeit von Energieeffizienz-Steigerungen zur Einsparung von Energie wird durch die so genannten Rebound-Effekte geschmälert: Die erzielten Einsparungen setzen Anreize für zusätzliche Nachfrage und damit für Energieverbrauch. Energie-Rebound entsteht also durch Verhaltensänderungen, deren Auslöser Energieeffizienz-Verbesserungen und deren Wirkung geringere tatsächliche Energie-Einsparungen sind. Dies führt zu einem Dilemma: Die Energie- und Ressourceneffizienz pro Einheit Konsum hat sich durch Technologie und Politik enorm verbessert, der absolute Ressourcenverbrauch hat sich aber nicht sonderlich vermindert. Energieeffizienz-Politiken sind daher umso weniger wirksam, je höher die Rebound-Effekte ausfallen. Allerdings muss man genau untersuchen, ob es sich dabei um Rebound-Effekte der betrachteten Energieeffizienz-Steigerung handelt – und nicht beispielsweise um generelle Einkommens- oder Wachstumseffekte oder Änderungen der Präferenzen und Lebensstile.

Für die Industrie existieren – im Gegensatz zum Wohnbau und dem Individualverkehr – erst wenige belastbare energieökonomische Rebound-Studien. Diese und andere Lücken in der Rebound-Forschung adressieren aktuelle Arbeiten am Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior – derzeit etwa in dem vom NRW-Minis-

terium für Wissenschaft und Forschung finanzierten Projekt „Rebound-Effekte in NRW mit besonderer Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen in der Elektrizitätsnutzung sowie im Individualverkehr (Rebound-E. NRW)“. Hier werden Rebound-Effekte untersucht, die sich aus dem historischen und zukünftig erwarteten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wandel ergeben.

Unterschieden wird zwischen direkten, indirekten und makroökonomischen Rebound-Effekten: Der direkte Rebound misst, inwieweit durch eine effizienter bereitgestellte Energiedienstleistung diese stärker nachgefragt wird, zum Beispiel fährt man mit dem sparsameren Auto mit dem gleichen Benzin-Budget mehr Kilometer. Der indirekte Rebound misst, inwieweit durch eine effizienter bereitgestellte Energiedienstleistung eine andere Energiedienstleistung stärker nachgefragt wird, sodass sich Verbraucher beispielsweise aufgrund des sparsameren Autos eine zusätzliche Flugreise leisten können. Der makroökonomische Rebound schließlich ist ein Maß für die nicht realisierten Energieeinsparungen auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene – etwa einer Region, eines Landes, einer Ländergruppe oder auch weltweit. Diese stellen sich dadurch ein, dass die aufgrund der Effizienzsteigerung veränderten relativen Preise in allen möglichen Sektoren der Wirtschaft Anpassungsreaktionen induzieren. Darüber hinaus befassen

sich Studien mit dem Zeit-Rebound (Effizienzgewinne beschleunigen Lebensstile; diese weisen oft höhere Energieintensitäten auf) und mit so genannten Spillover-Effekten (der Einsatz effizienterer Technik in einem Lebensbereich führt bei manchen zum bewussten Einsatz effizienterer Technik auch in anderen Lebensbereichen) oder etwa „Greenwashing“ (man verhält sich in einem Lebensbereich ressourcenschonend und erlaubt sich deshalb in anderen – vielleicht sogar energieintensiveren – Lebensbereichen mehr zu konsumieren als zuvor).

Schätzungen zur Größe des Rebound-Effekts unterscheiden sich nach wie vor sehr stark, da häufig unterschiedliche Methodiken, Definitionen und Systemgrenzen verwendet werden. So wurden für PKWs direkte Rebound-Effekte von drei bis 87 Prozent ermittelt, indirekte Effekte von circa 20 bis 30 Prozent und globale Rebound-Effekte um 30 bis 50 Prozent. Aktuell werden am Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior gleich mehrere Rebound-Projekte bearbeitet, in denen mit Hauptfokus auf NRW unter anderem effiziente Beleuchtung in privaten Haushalten sowie Rebound in Industrie und bei Pendlern untersucht werden.

### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Bardow ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik und Leiter des Instituts für Technische Thermodynamik. Dinah Elena Majewski, M.Sc., ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik. Univ.-Prof. Dr. rer. soc.oec. Reinhard Madlener ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftswissenschaften, insbesondere Energieökonomik und Leiter des Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior. Univ.-Prof. Antonello Monti, Ph.D., ist Inhaber des Lehrstuhls für Automation of Complex Power Systems. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller ist Inhaber des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik. Dr.-Ing. Rita Streblov ist Oberingenieurin am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik.



Foto: Peter Winandy

# Hochfeste Stähle für und Lagerung

## Neue Bemessungskonzepte



Bild 1: Konfiguration der ULCF-Versuche an Pipelinebögen im Zentrum Metallische Bauweisen (ULCF – Ultra Low Cycle Fatigue). Foto: Institut für Stahlbau

28

Im Jahr 2013 hat Deutschland 22,3 Prozent seines Primärenergieverbrauchs mit Erdgas gedeckt. Diesem Bedarf steht jedoch nur eine geringe Eigenproduktion gegenüber. Im Jahr 2012 konnten nur knapp zwölf Prozent des Gasbedarfs mit heimischer Produktion gedeckt werden, zudem ist die Inlandsproduktion leicht rückläufig. Deutschland ist daher ganz erheblich von Erdgasimporten abhängig. Die wichtigsten Lieferanten sind Russland mit einem Anteil von etwa 38 Prozent, Norwegen mit fast 35 Prozent und die Niederlande mit gut 22 Prozent.

Die Diversifizierung der Gasversorgung ist ein wichtiges politisches Ziel nicht nur in Deutschland, sondern auch in der Europäischen Union. Aus diesem Grund finden Pläne zur Erschlie-

ßung von Erdgasvorkommen des kaspischen Raums für den europäischen Markt in den vergangenen Jahren immer mehr politische Unterstützung innerhalb der EU. Derzeit gibt es verschiedene, zum Teil konkurrierende, Projekte zum Bau von Pipelines, mit denen Erdgas aus dem kaspischen Raum, beispielsweise aus Aserbaidschan und Turkmenistan über die Türkei in das europäische Netz eingespeist werden soll. Die geplanten Großrohrleitungen werden allerdings Gebiete mit vergleichsweise hoher seismischer Aktivität durchqueren, sodass Erdbeben und damit einhergehend zyklisch aufgebrachte Verformungen mit großen plastischen Dehnungen und hohen Dehnraten im Rahmen einer Bauteilsicherheitsbewertung zu betrachten sind. Aufgrund der hohen Komplexität sowohl der Beanspruchungsrandbedingungen als auch der Verfestigungs- und Versagensmechanismen im Pipelinewerkstoff gibt es derzeit allerdings nur unzureichende Bemessungsansätze für Pipelines im Lastfall Erdbeben. Diese sind

vielfach über Erfahrungen mit herkömmlichen Pipelineestählen abgesichert. Deshalb wird auch immer wieder auf diese Werkstoffe zurückgegriffen, obwohl in den vergangenen Jahren hochbeanspruchbare Rohrleitungsstähle mit exzellenten mechanischen Eigenschaftenprofilen entwickelt wurden. Die mit dem Einsatz hochfester Stähle einhergehenden Möglichkeiten zum effizienten Werkstoffeinsatz durch Erhöhung des Betriebsdrucks oder durch Vergrößerung des Verhältnisses von Rohrdurchmesser zu Wanddicke können wegen der gängigen Bemessungspraxis nicht genutzt werden. Das Potenzial der hochfesten Stähle bleibt demnach ungenutzt.

Derzeit erforschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts für Eisenhüttenkunde sowie des Instituts für Stahlbau gemeinsam neue Möglichkeiten zur Bewertung von Pipelines bei einem Erdbeben. Dadurch soll die Möglichkeit geschaffen werden, zukünftig hochfeste Stähle für Transport

und Lagerung von Erdgas zu nutzen und das Leichtbaupotenzial dieser Werkstoffe zu erschließen. Im zugrundeliegenden europäisch geförderten Forschungsprojekt wird – mit Förderung durch die EU – ein Schädigungsmodell entwickelt, welches die werkstoffmechanischen Vorgänge einer für Erdbeben typischen, so genannten „ultra low cycle fatigue (ULCF)“-Beanspruchung auf phänomenologische Weise beschreibt. Dadurch weist das Modell eine ausreichende Recheneffizienz auf, um auch in der strukturmechanischen Bewertung ganzer Pipelineabschnitte eingesetzt werden zu können.

Die werkstoffmechanischen Vorgänge beim Versagen einer erdbebenbeanspruchten Pipeline lassen sich am Beispiel einer einfachen Büroklammer beschreiben, die solange hin- und her gebogen wird, bis sie bricht. Während dieses Prozesses treten große plastische Verformungen an der späteren Bruchstelle auf. Deshalb kann angenommen werden, dass in jedem Belastungszyklus ein

# Transport von Gasen

## ermöglichen erdbebensicheres Design



Bild 2: Versagen vom Pipelinebogen nach 37 Belastungszyklen.  
Foto: Institut für Stahlbau

Teil der Verformungskapazität des Werkstoffs verbraucht wird. Zu beachten ist dabei, dass man vom ersten bis zum letzten Zyklus die Büroklammer immer gleich weit hin- und herbiegen kann, damit es zum Bruch kommt. Es ist nicht zwingend erforderlich, die Amplituden zu vergrößern. Die Übertragung dieser Beobachtung in ein Schädigungsmodell erfolgt mit Hilfe eines so genannten Schädigungsevolutionsgesetzes. Mit seiner Hilfe wird berechnet, welcher Anteil der Verformungskapazität des Materials innerhalb eines Belastungszyklus verbraucht wurde. Bei dieser Berechnung wird unterschieden zwischen schädigungsrelevanten und schädigungsunrelevanten Verformungen. Dadurch werden Einflüsse berücksichtigt, die sich aus der Werkstoffverfestigung und dem lokalen Spannungszustand ergeben. Das Schädigungsevolutionsgesetz liefert als Ergebnis eine skalare Größe  $D$  – abgeleitet vom englischen „damage“ – den Betrag der Schädigung. Ist  $D=0$ , dann ist der Werkstoff ungeschä-

digt, bei  $D=1$  ist der Werkstoff vollständig geschädigt.

Die Implementierung dieses Materialmodells in ein Finite Elemente Programm erlaubt es, die Verteilung der Schädigung in einem erdbebenbeanspruchten Pipelineabschnitt zu analysieren. Dadurch können beispielsweise Aussagen bezüglich des Rissorts oder der Zyklenzahl beim Bruch getroffen werden. Um das Schädigungsmodell zu erproben, wurden Großexperimente am Zentrum Metallische Bauweisen durchgeführt, an dem beide RWTH-Institute beteiligt sind. Hier wurden Pipelinebögen an ihren beiden Enden an horizontal ausgerichteten hydraulischen Prüfzylindern befestigt. Diese bewegten sich während der Versuche in Zyklen aufeinander zu und entfernten sich wieder voneinander, sodass die Rohrbögen abwechselnd gestaucht und aufgeweitet wurden. Während der Versuche standen die Rohrbögen zudem unter einem Innendruck von 20 bar, der mit Hilfe von Wasser aufgebaut wurde. Die

### Schädigungsmechanik

Die Schädigungsmechanik basiert auf einer ortsauflösten Betrachtung von Beanspruchungszuständen und formuliert auf dieser Skala Kriterien für die Schädigung von Materialpunkten. Für die Bewertung großer Strukturen sind phänomenologische Ansätze aufgrund ihrer höheren Recheneffizienz den mikromechanischen Ansätzen in der Regel vorzuziehen. Solche Modelle verwenden in allgemeiner Form ein Fließpotenzial, in dem der Einfluss der Schädigung auf die Festigkeit des Materialpunkts erfasst wird. Dies geschieht beispielsweise in der folgenden Form:

$$\phi = \left| \sigma' - \beta(1 - D) \right| - \sigma_{yld}(\bar{\epsilon}^p)(1 - D) \leq 0.$$

Im hier gezeigten Beispiel werden die für ULCF-Vorgänge typischen kinematischen Verfestigungsanteile mit Hilfe des Rückspannungstensors  $\beta$  erfasst, wohingegen die isotrope Verfestigung durch  $\sigma_{yld}(\bar{\epsilon}^p)$  beschrieben wird. Die entfestigende Wirkung der Schädigung wird mit Hilfe der Schädigungsvariablen  $D$  quantifiziert.

Versuchskonfiguration ist in Bild 1 zu erkennen.

In den Experimenten wurden jeweils drei Zyklen bei gleichem Zylinderhub durchgeführt, bevor dieser um ein zuvor festgelegtes Maß vergrößert wurde. Anfangs wurden nur vergleichsweise geringe Verformungen aufgebracht. Aufgrund der sehr guten Beanspruchbarkeit des untersuchten Pipelinestahls wurde im Laufe des Versuchs sogar der maximal mögliche Kolbenweg erreicht, eine weitere Steigung der zyklisch aufbrachten Verformung war also nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurde der Versuch mit dem maximal möglichen Kolbenweg fortgesetzt. Nach 37 Belastungszyklen erfolgte der Probenbruch, und das im Rohr befindliche, unter 20 bar Druck stehende Wasser entwich mit hoher Geschwindigkeit und feinst zerstäubt dem gerissenen Rohr, siehe Bild 2.

Bei der Simulation der durchgeführten Versuche zeigte sich, dass das zuvor entwickelte Schädigungsmodell sehr gut das Bauteilverhalten beschreibt. So wurden, nach einer entsprechenden Kalibrierung der werkstoffabhängigen Parameter des Modells, die makroskopischen Kräfte und Verformungen sehr genau beschrieben. Darüber hinaus konnten der Ort der Rissentstehung und die Anzahl der

Zyklen bis zum Bruch mit guter Genauigkeit bestimmt werden. Auf Basis der Bauteilversuche konnte deshalb die Eignung des Modells für die Beschreibung des Versagens von Pipelines bei Erdbeben nachgewiesen werden.

Die Erkenntnisse sollen nun in die Bemessungsregeln des Pipelinebaus einfließen, sodass die Hindernisse für den Einsatz hochbeanspruchbarer Pipeline-stähle abgebaut werden. Darüber hinaus ist eine Übertragung der Ansätze auf verwandte Anwendungsgebiete wie den Stahl-, Anlagen- und Druckbehälterbau vorgesehen.

### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck ist Inhaber des Lehrstuhls für Eisenhüttenkunde und Leiter des Instituts für Eisenhüttenkunde.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann ist Inhaber des Lehrstuhls für Stahl- und Leichtmetallbau und Leiter des Instituts für Stahlbau.

Denis Novokshanov M.Sc. ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenhüttenkunde.

Dipl.-Ing. Simon Schaffrath ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau.

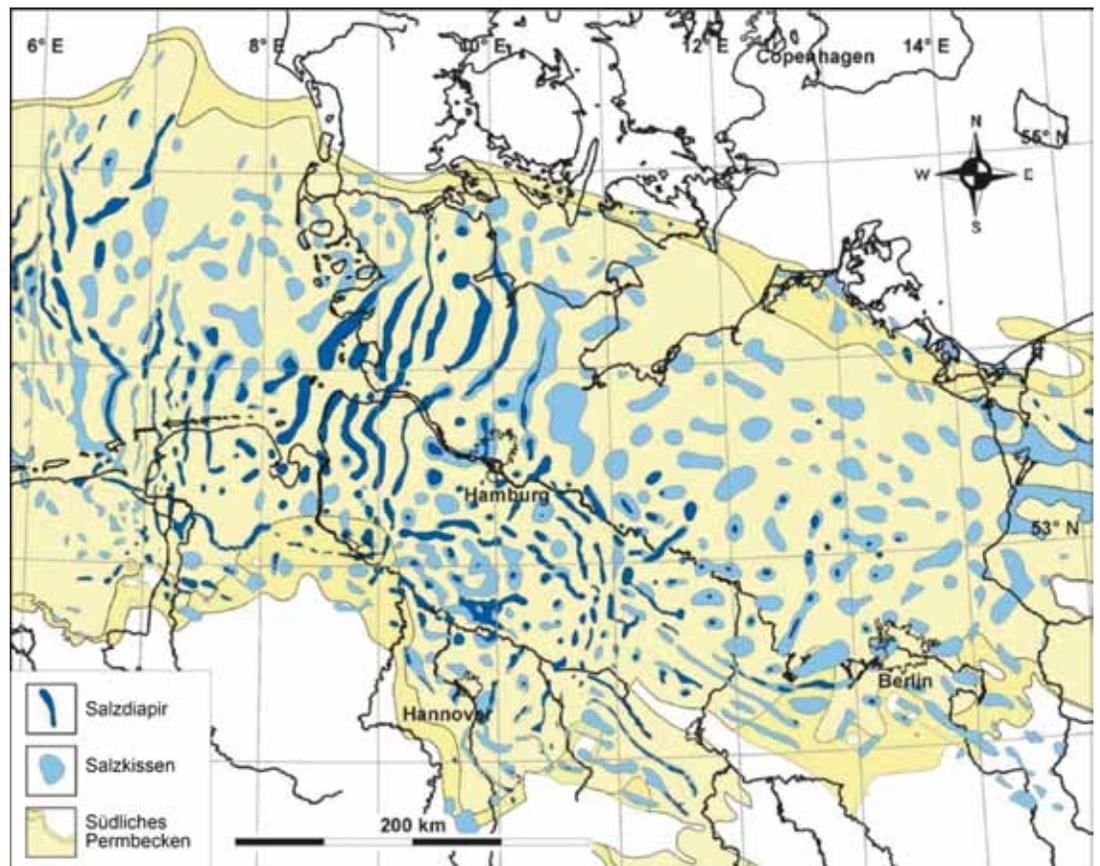


*Bild 3: Bruchflächenanalyse am Bauteil durch Simon Schaffrath (links) und Denis Novokshanov (rechts).  
Foto: Peter Winandy*



# Energy on demand

Bild 1: Salzvorkommen im Untergrund der Niederlande, Deutschlands und Polens. Verändert nach Lokhorst 1999, NW European Gas Atlas. CD-Rom. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.



32

Etwa 80 Prozent des derzeitigen Primärenergieverbrauchs in Deutschland werden durch die fossilen Energieträger Kohle, Öl und Gas abgedeckt. Deren hohe volumetrische Energiedichte erlaubt es, große Energiemengen zu speichern beziehungsweise zwischen zu speichern. Dies erfolgte bisher weitgehend aus strategischen Gründen. In Zukunft wird die Speicherung aber an Bedeutung gewinnen, insbesondere zum Ausgleich der fluktuierenden Produktion der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind. Diese haben Folgendes gemeinsam: kurzfristige und langfristige saisonale Schwankungen, keine verbrauchsorientierte Produktion und weitgehend fehlende Speichermöglichkeiten der Primärenergie und des erzeugten Stroms.

Die Speicherung von Energie spielt somit eine Schlüsselrolle in der gegenwärtigen Umstrukturierung der Energiesysteme. Energiespeicher und Stromspeicher im Speziellen dienen der zunehmenden zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch. Sie müssen große Energiemengen, teilweise über längere Zeiträume, flexibel aufnehmen und wieder abgeben können. Die Umwandlung von elektrischer Energie unter den Stichworten „Strom zu Gas“ („power to gas“) in Wasserstoff, Methan und Methanol dient zur Nutzung außerhalb des Stromsektors (Mobilität, Wärme, chemische Industrie) und kann ebenso die Rückumwandlung in elektrische Energie nach entsprechender Zwischenspeicherung beinhalten. Mit der Wandlung von Strom zu Wärme („power to heat“) und deren Speicherung

kann nicht benötigter Strom zur Deckung des Wärmebedarfs beitragen. Beide Stromwandlungen erfordern zyklisch zu beladende und zu entladende Speicher, für die im Untergrund attraktive Möglichkeiten bestehen.

Zukünftige Energieszenarien erfordern daher eine starke Erweiterung der „mechanischen“ Speicherkapazitäten im Untergrund Deutschlands. Prinzipiell kommen als Untergrundspeicher Salzkavernen, Porenspeicher, Felskavernen und ehemalige Bergwerke in Frage. Optionen für die großvolumige Speicherung von Strom und Netzeinspeisung von Strom bieten vor allem Wasserstoff- und Druckluftspeicher, angelegt in Salzkavernen. Das in den Niederlanden, Deutschland und Polen im Untergrund auftretende Salz, siehe Bild 1, zählt zu den weltweit großen Salzvorkommen.

# Förderung und Speicherung von Energie im Untergrund

Dort angelegte Kavernen bieten aufgrund der Abdichteigenschaften von Salz somit ein großes Speicherpotenzial.

Allgemein anerkannte Bewertungskriterien dafür, ob ein Speicher als Energiezwischenpeicher oder zur Endlagerung von beispielsweise CO<sub>2</sub> oder Abfall genutzt werden kann, existieren bisher nicht. Forschungsthemen behandeln deshalb vorrangig die Anforderungen an geologische Formationen im Hinblick auf die grundlegende Eignung als Speicher in Abhängigkeit von den jeweiligen Speichermedien (Wasserstoff, Methan, Wärme). Wichtige Parameter beinhalten vor allem die Geometrie, den physikalisch-chemischen Zustand des Speichers (Temperatur, mechanisches Spannungsfeld), die Dichtigkeit der Speicherformationen und der abdichtenden Formation (Porosität, Permeabilität) sowie die Dichtigkeit der Zugangsbohrungen, siehe Bild 2. Die chemischen Wechselwirkungen des Einlagerungsmediums mit dem Wirtsgestein und Fluiden im Speicher werden insbesondere im Hinblick auf die

Speichersicherheit untersucht. Wirtschaftswissenschaftliche Untersuchungen, obwohl nicht weniger wichtig für den Markterfolg, aber bislang noch relativ rar, konzentrieren sich vor allem auf die Rentabilität solcher langlebigen Investitionsvorhaben unter adäquater Berücksichtigung der finanziellen Risiken beziehungsweise Unsicherheiten.

Geologische Speicherformationen sind aber auch ein natürliches Energiereservoir in Form von im Untergrund natürlich vorkommender Wärme. Ein Teil dieser Wärme stammt noch aus der frühen Bildung der Erde, ein anderer Teil wird durch den Zerfall instabiler Isotope in den Gesteinen im tiefen Erdinneren freigesetzt. Diese Wärme ist unabhängig vom Wetter und von Klimazonen und deshalb eine grundlastfähige erneuerbare Energie, die sowohl direkt genutzt oder verstromt werden kann. Ähnlich wie die geologische Speicherung erfordert auch die Nutzung dieser tiefen Erdwärme eine anfängliche Erfassung und Bewertung des geologischen Reservoirs. Dies geschieht durch

verschiedene geophysikalische Erkundungsmethoden (seismische Durchschallung, Messungen der elektrischen Leitfähigkeit). Basierend auf diesen Messungen und geologischen Kartierungen ergibt sich ein Modell des Untergrundes, siehe Bild 3. Für die Erkundung zur späteren Speichernutzung ist insbesondere die Identifizierung von durchlässigen Speicherschichten und undurchlässigen Deckschichten wichtig, wofür oft auf vorhandene Bohrungen der Erdöl- und Erdgasförderung zurückgegriffen werden kann. Dagegen erfordert die tiefe Erdwärmennutzung zusätzlich genaue Kenntnisse über das Temperaturfeld und die Wärmetransportprozesse, um Bohrungen zur Förderung beziehungsweise zum Verpressen des Wärmeträgers Wasser optimal zu platzieren. Basierend auf Modellen des Untergrundes und (in der Regel wenigen) Temperaturmessungen in Bohrungen können Temperatur und Wärmetransport und ihre Unsicherheiten mit Hilfe numerischer Modellrechnungen berechnet werden, siehe Bild 4. Angepasst an die jeweiligen

geologischen Verhältnisse kann auf diese Weise die Nutzung des Untergrundes sowohl als Quelle als auch als Speicher optimiert werden.

Neben der Nutzung der Erdwärme in den oben beschriebenen, natürlich durchlässigen Speicherformationen werden auch für nahezu undurchlässige kristalline Gesteine Methoden zur Erdwärmennutzung erforscht und entwickelt. Hierfür muss das Gestein im tiefen Untergrund hydraulisch aufgebrochen und Wasser zum Wärmetausch in diesen technisch-angelegten Riss-Systemen zirkuliert werden. Zur Auslegung und Schaffung solcher Riss-Systeme arbeiten Mathematiker, Geotechniker und Geophysiker der RWTH Aachen zusammen. Es geht darum, neu entwickelte numerische Simulationswerkzeuge zur Vorhersage der Ausbreitung hydraulisch erzeugter Risse mit Daten aus Laborexperimenten zur Bruchbildung und -ausbreitung in kristallinem Gestein, siehe Bild 5, zu überprüfen. Weiter dienen diese Laborversuche dazu, die Ausbreitung von Rissen unter unterschiedlichen tektonischen

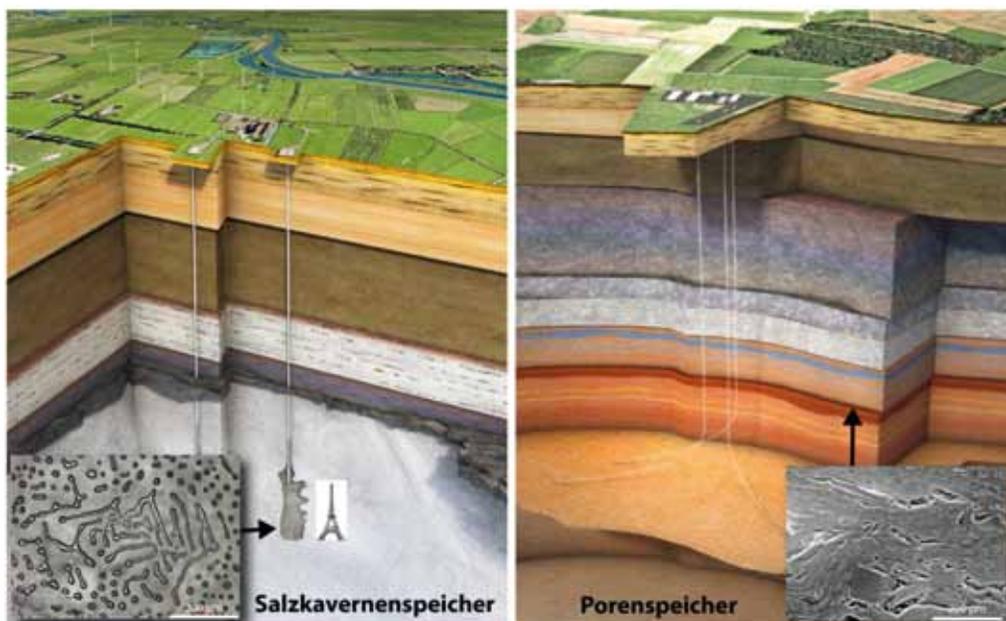


Bild 2: *Untergrundspeicher in Salzkavernen (links) und Porenspeichern (rechts). Zur Abschätzung der Dichtigkeit des Speichers wird die Mikroporenstruktur von Salz (Fluidfilm auf Korngrenzen, links unten) und Ton (Porenstruktur, rechts unten) mit einem BIB-Cryo-Rasterelektronenmikroskop untersucht. Speichermodelle (verändert) mit freundlicher Genehmigung und Copyright von KBB Underground Technologies GmbH.*

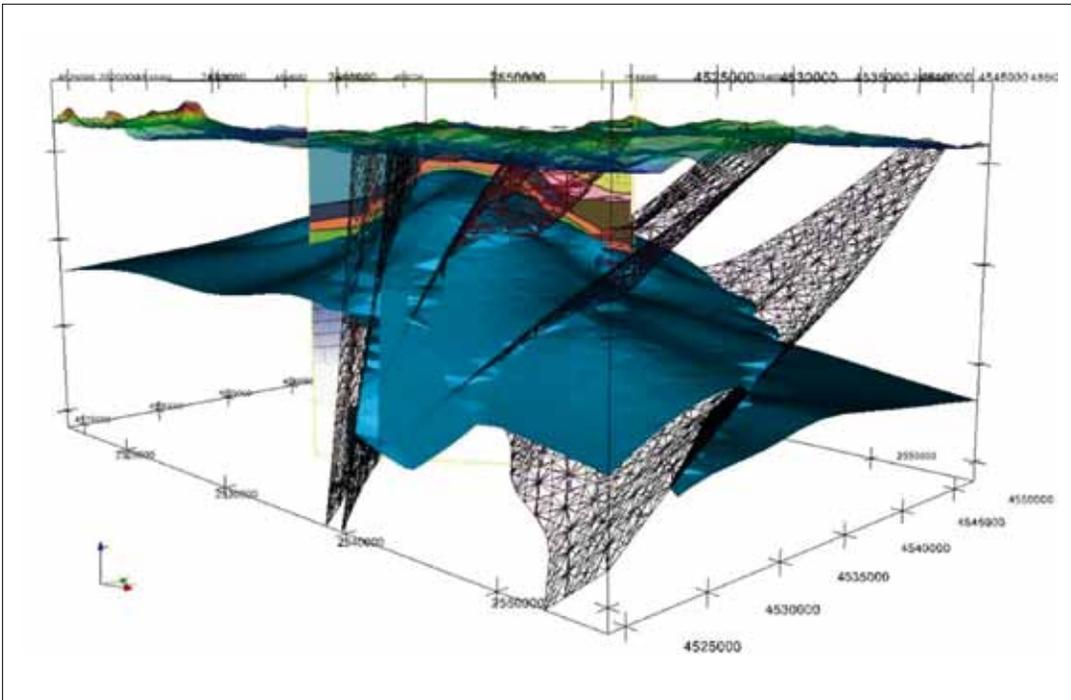


Bild 3: Geologisches Modell des Untergrundes mit einem geothermischen Reservoir (blau) und geologischen Verwerfungszonen (triangulierte Flächen).

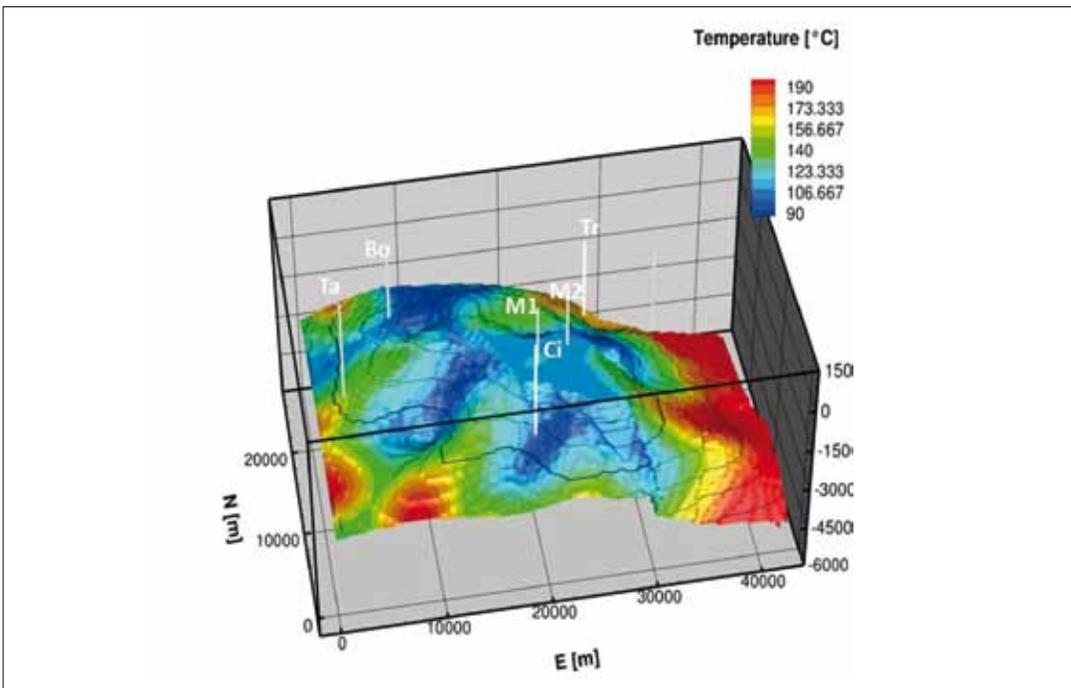


Bild 4: Temperaturverteilung im numerischen Simulationsmodell des geothermischen Reservoirs.

Spannungszuständen im Detail in einem realen – und dennoch möglichst homogenen – Gesteinsblock von 30×30×40 Kubikzentimeter Größe zu verstehen. Wenn beide Ziele erreicht sein werden, ist in einem Folgeprojekt die Übertragung der im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf einen größeren Maßstab geplant. In diesem wird ein durch Flachbohrungen erschlossenes Gesteinsvolumen von 100×100×100 Kubikmeter an die Stelle des Gesteinsblocks treten. Können auch die in diesem Experimentierfeld durchgeführten Versuche zur Erzeugung technisch angelegter Riss-Systeme hinreichend genau durch numerische Simulationsrechnungen vorhergesagt werden, könnte ein Pilotprojekt in einer kommerziellen Größenordnung und mit entsprechender wirtschaftswissenschaftlicher Begleitforschung folgen. Im Erfolgsfall wären damit ein numerisches Auslegungswerkzeug und eine

Vorgehensweise für das technische Anlegen von Untergrundwärmetauschern mit vorhersagbaren Eigenschaften geschaffen und somit die Voraussetzungen für das letztendlich angestrebte Ziel gegeben: der kontrollierten Erzeugung einer wirtschaftlich und langfristig nutzbaren Wärmeaustauschfläche im tiefen Untergrund zur Verstromung von heimischer Erdwärme.

Zu den wichtigsten Parametern für die Einrichtung von Untergrundspeichern gehören, neben dem regulatorischen Rahmen, Angaben über die Verfügbarkeit, Raumplanung, Flächenverbrauch, Energiedichte, Leistungsdichte, Ansprechzeit, (Ent-)Ladezeit, Lebensdauer sowie Sicherheit, Umwelt und nicht zuletzt marktwirtschaftliche Relevanz sowie öffentliche Akzeptanz. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit müssen untertägige geologische Speicher hinsichtlich des Energievolumens, der zeit-

lichen Änderung der Reservoirqualität, der Investitionskosten, der Marktbedingungen sowie der vorzuhaltenden Infrastruktur analysiert werden.

Investitionen in geothermische Anlagen oder geologische Speicher sind naturgemäß sehr kapitalintensiv, ökonomisch betrachtet weitgehend irreversibel und unterliegen verschiedenen finanziellen Risiken. Kommt es im Laufe des Investitionsprozesses zu Änderungen in den Rahmenbedingungen (neue geologische Erkenntnisse, Verfügbarkeit neuer Bohrtechniken, politische Entscheidungen), so möchte das Management eines Unternehmens möglichst flexibel darauf reagieren. Daher sollten geeignete dynamische Investitionsmodelle zum Einsatz kommen, mit denen der monetäre Wert der mit solchen Langfrist-Investitionen verbundenen Handlungsoptionen adäquat bewertet und der optimale Investitionszeitpunkt

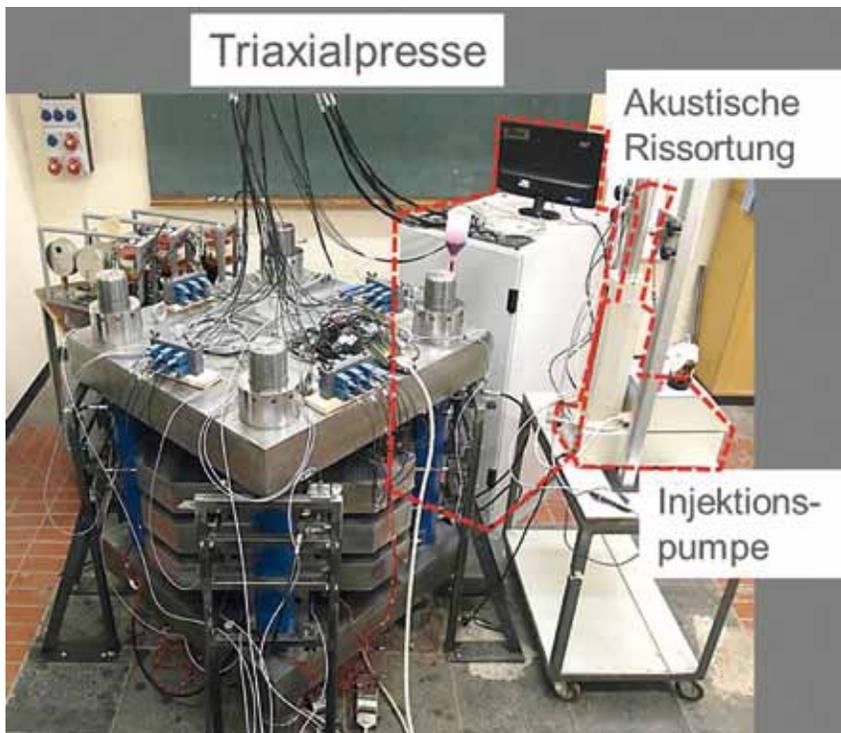
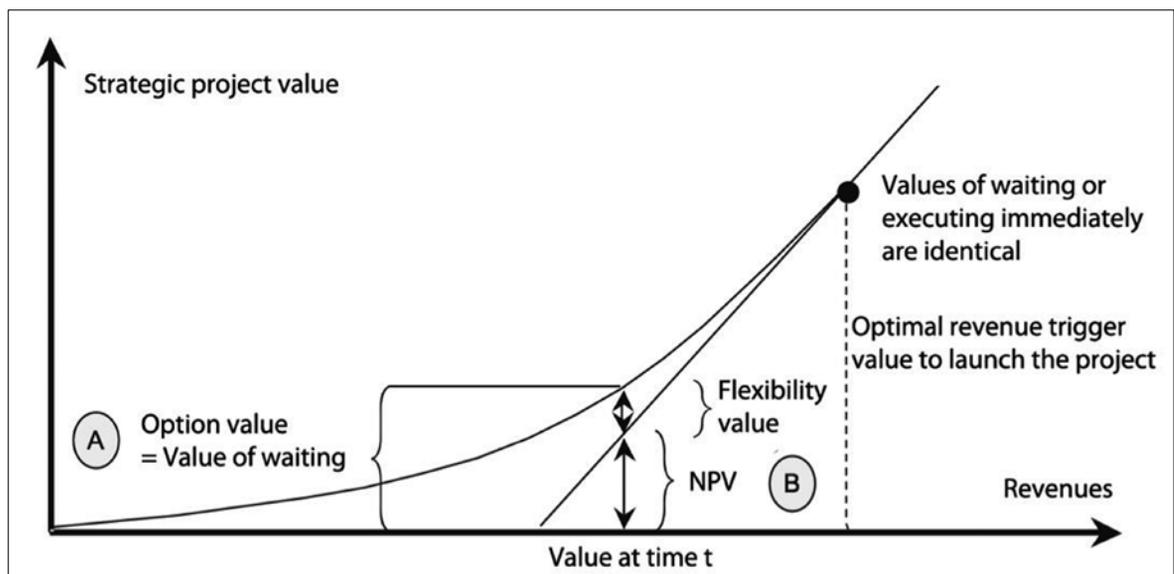


Bild 5: Triaxialpresse zur kontrollierten Erzeugung von Brüchen als Wärmeaustauschflächen in impermeablen kristallinen Gesteinen.  
Foto: Institut für Geotechnik im Bauwesen

Bild 6: Realloption und Wert des Wartens im Vergleich zur einfachen Kapitalwertrechnung (NPV).  
Quelle: Angepasst nach Mun J. (2006), *Real options analysis – tools and techniques for valuing strategic investment and decisions*. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006, S. 261.



bestimmt werden kann. Die Realloptionen-Analyse ist ein solcher, gegenüber der simplen Kapitalwertmethode, deutlich überlegener Ansatz, insbesondere bei hohen Risiken und bei (gänzlich oder zumindest teilweise) irreversiblen Investitionen. Dabei wird der „Wert des Wartens“ quantifiziert, der dadurch entsteht, dass man eine reale Option noch offenlässt – das heißt noch nicht investiert – und im Zeitablauf mehr Informationen erhält. Würde man sofort investieren, ist die Option verloren und dem Investor entstehen versunkene Kosten. Eine sofortige Investition muss daher zusätzlich mindestens den Optionswert erwirtschaften (im Sinne von Opportunitätskosten), wodurch die Schwelle für das Tätigen der Investition höher wird als bei der sehr einfachen Investitionsregel eines positiven Kapitalwertes, siehe Bild 6. Darüber hinaus wird geprüft, ob die Investition heute wahrscheinlich

auch wirtschaftlicher sein wird als eine erst später getätigte Investition. Diese bietet den Vorteil der besseren Informationslage, aber den Nachteil der bis zum zukünftigen Investitionszeitpunkt entgangenen Netto-Erlöse aus dem Projekt. Hier erweisen sich also sowohl Investitionszeitpunkt als auch die Höhe des finanziellen Risikos (beispielsweise die Volatilität einer zugrunde gelegten Preisvariable) als wichtig für eine optimale Investitionsentscheidung.

Eine interessante Spielart der Realloptionen-Analyse ist jene, die für sequenzielle beziehungsweise modulare Investitionsvorhaben angewandt werden kann. Deren Anwendung ist besonders dann attraktiv, wenn entweder die Investitionsmöglichkeit zeitlich befristet ist oder aber kostenintensive Vorarbeiten erforderlich sind, um das eigentliche, gewinnbringende Projekt später überhaupt realisieren zu können.

Hier kann es Fälle geben, bei denen die Kapitalwertmethode Projekte zur Ablehnung empfehlen würde. Dagegen kann eine Realloptionen-Analyse einen höheren Projektwert ergeben. Dieser entsteht dadurch, dass das Projekt nur umgesetzt wird, wenn die Voraussetzungen nach Beendigung der Vorarbeiten günstig sind.

Ohne Zweifel erfordern die vielen Dimensionen des Forschungsfeldes „Förderung und Speicherung von Energie im Untergrund“ eine interdisziplinäre und integrierte Kooperation zwischen Geowissenschaften, Mathematik, Informatik und Wirtschaftswissenschaften. Letztlich handelt es sich dabei um einen Schlüsselbereich für den erfolgreichen Übergang von einem fossil und nuklear dominierten Energiesystem in Richtung eines auf erneuerbare Energieressourcen, Speichertechnologien und auf energetische und ökonomi-

sche Effizienz fokussierten nachhaltigen Energiesystems der Zukunft.

#### Autoren:

Univ.-Prof. Peter Kukla, Ph.D., ist Inhaber des Lehrstuhls für Geologie und Paläontologie und Leiter des Geologischen Instituts. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Christoph Clauser ist Inhaber des Lehrstuhls für Applied Geophysics and Geothermal Energy am E.ON Energy Research Center. Univ.-Prof. Dr. rer. soc. oec. Reinhard Madlener ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftswissenschaften insbesondere Energieökonomik und Leiter des Institute for Future Energy Consumer Needs And Behavior (E.ON Energy Research Center).

# Bioraffinierte Verfa

## Die Aachener Verfahrenstechnik der Herausforderung

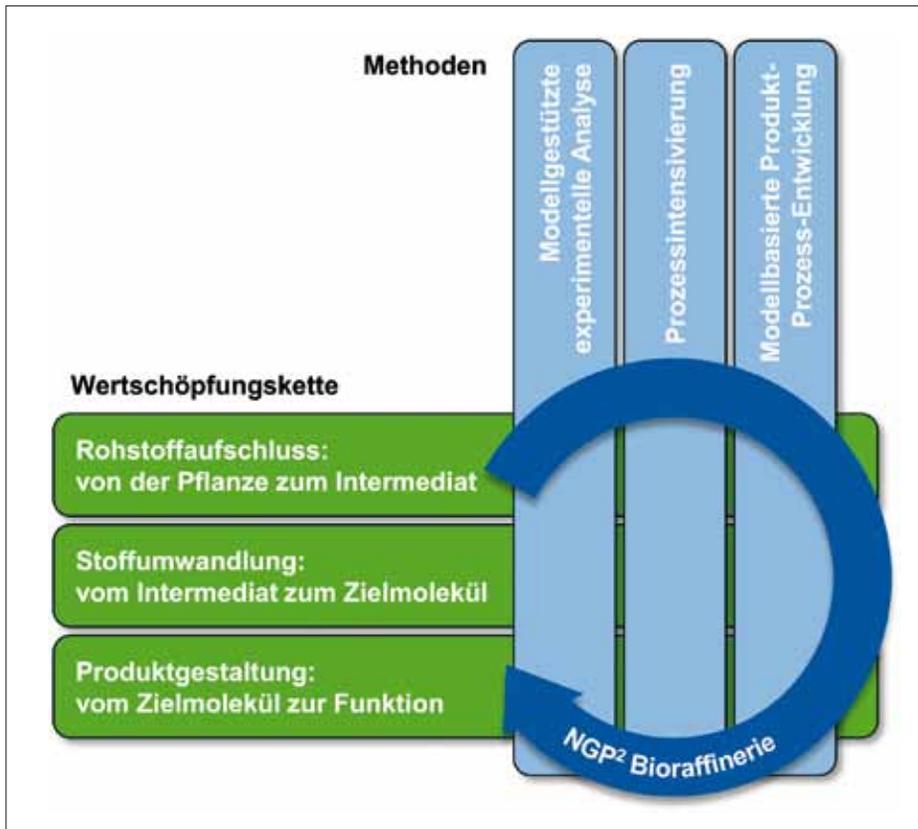


Bild 1: Entlang der Wertschöpfungskette (vertikal) ergeben sich Forschungsschwerpunkte, die mit den verfahrenstechnischen Methoden (horizontal) über die NGP<sup>2</sup>-Bioraffinerie gekoppelt werden können.



Die schwankenden Öl- und Gaspreise und eine unübersichtliche globalpolitische Richtung provozieren die Frage, ob Biokraftstoffe, biobasierte Materialien und die Nutzung nachwachsender Rohstoffe noch Erfolg versprechen. Vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung, einer knappen Rohstoffbasis in Europa und steigender CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Quellen können nachwachsende Rohstoffe einen entscheidenden Beitrag zu Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit leisten. Dies ist das Ziel der Bioökonomie. Es bleibt

also zu klären, welche Gründe es für das schleppende Tempo dieses Wandels gibt und welche Lösungsmöglichkeiten existieren.

Die Gründe für die stockende Umgestaltung liegen sowohl im akademischen wie auch im technischen Bereich. Die technische Stoffumwandlung ist das Kerngebiet der Verfahrenstechnik, die noch stark petrochemisch geprägt ist und auf einen sehr kohlenstoffhaltigen, energiereichen und kostengünstigen Rohstoff fokussiert ist. Dies betrifft die Herstellungswege und die Eigenschaften der Produkte. Die Produkte werden überwiegend in Gasphasenreaktionen oder mit organischen Lösungsmitteln unter Nutzung fossiler Energiequellen hergestellt. Eine Verfahrenstechnik zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe muss dagegen den deutlich höheren Wasser- und Sauerstoffgehalt der Stoffströme in neuen Syntheserouten mit komplexen Lösungsmittel- und Reaktionssystemen und Produk-

ten berücksichtigen. Das fundamentale Verständnis dieser molekularen Eigenschaften bis hin zur makroskopischen Prozessskala muss also in der Wissenschaft neu aufgebaut werden. Es müssen insbesondere Strategien für die Verarbeitung einer neuen Rohstoffbasis mit großer Variabilität und letztlich ökonomische Perspektiven aufgezeigt werden, was nur mit hohen Ausbeuten auch im technischen Maßstab erreichbar sein wird.

Auch die technische Exploration dieser Zusammenhänge steckt in einem Dilemma. Die etablierten industriellen Anlagen sind üblicherweise durch große Massenströme, eine geringe messtechnische Ausstattung und eine hohe Spezialisierung auf einen Rohstoff gekennzeichnet. Insbesondere die Trenn- und Aufarbeitungstechnologien sind stark auf die molekularen Eigenschaften der üblicherweise flüchtigen Zwischenprodukte zugeschnitten. Dazu kommt, dass durch stetigen

# hrentstechnik

## verpflichtet sich „Nachwachsende Rohstoffe“

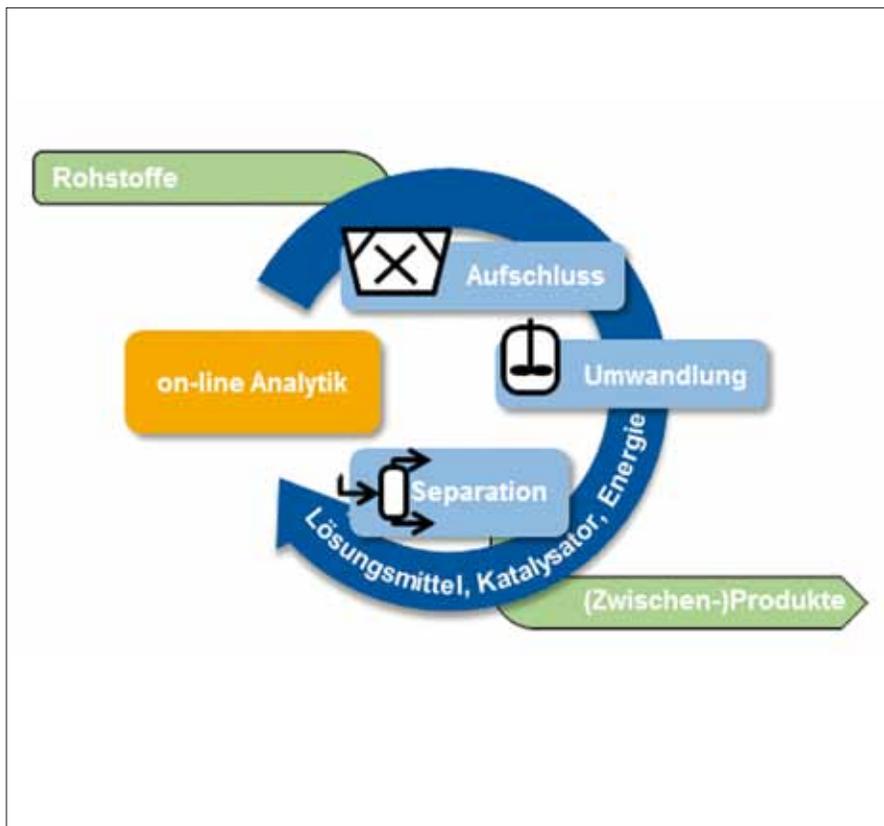


Bild 2: Das Konzept der NGP<sup>2</sup>-Bioraffinerie zur Konversion von biogenen Rohstoffen zu (Zwischen-)Produkten – also Chemikalien, Polymeren und Kraftstoffen – beinhaltet die Verfahrensschritte „Aufschluss“, „Umwandlung“ und „Separation“ als modulare Teilanlagen. Während on-line Analytik direktes Verständnis ermöglicht, werden Lösungsmittel, Katalysatoren und Energie wie im technischen Maßstab rezykliert beziehungsweise integriert.

Wettbewerb die etablierten Anlagen zu immer größeren Kapazitäten optimiert wurden. Eine Änderung dieser etablierten, oft milliardenschweren Investitionen zur Realisierung der Bioökonomie ist verständlicherweise ein hohes Risiko, selbst wenn die Nutzung nachwachsender Rohstoffe aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist.

Dieser Zustand erschwert den gewünschten Wandel zu einer regionalen, stofflichen und möglichst klimaneutralen Wertschöpfung in einer Bioökonomie. Die üblichen schrittweisen Verbesserungen bestehender Wertschöpfungsketten bieten dafür nicht die Möglichkeit. Die neu entwickelten wissenschaftlichen Konzepte und Methoden werden daher selten im technisch relevanten Maßstab validiert und können nur schwierig hinsichtlich des Gesamtverfahrens weiterentwickelt werden. Die Bioökonomie erfordert infolgedessen eine Kombination aus technischer Umsetzung und wissenschaftlicher

Forschung zur Entwicklung innovativer Produkte und Prozesse.

Diesen Herausforderungen wird sich das in Bau befindliche „Center for Next Generation Processes and Products“ (NGP<sup>2</sup>) der Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, widmen. Diese hatte sich in einer bundesweiten Evaluierung durch den Wissenschaftsrat mit einer neuen Forschungsprogrammatik zu den Fragestellungen der Erschließung und Wertschöpfung regenerativer Rohstoffe in der Bioökonomie durchsetzen können. Entlang der Wertschöpfung vom biogenen Rohstoff bis zu einem neuen funktionalen Produkt verpflichtet sich die AVT damit den Herausforderungen der Bioökonomie, siehe Bild 1. Der Aufschluss der Pflanze ermöglicht den Zugang zu deren Inhaltsstoffen und ist der erste wichtige, aber auch komplexe, Schritt in der Verarbeitung. Eine hohe Effizienz und Ausbeute in den nachgeschalteten Umwandlungen sind Grundvoraussetzun-

gen, die mit günstigen – und damit vielfältigen – und meist saisonalen Rohstoffen zu leisten sind. Erfolgversprechend sind dezentrale und flexible Produktionssysteme, die unter milden Bedingungen in Flüssigkeiten unter 200 Grad Celsius die Entstehung von Abbauprodukten möglichst vollständig vermeiden. Im Vergleich zu den klassischen Vergasungs- oder Pyrolyseverfahren können damit prinzipiell höhere Ausbeuten an Zwischenprodukten in kleineren Anlagen erzielt werden.

Die eigentliche Wertschöpfung geschieht indessen erst durch die stoffliche Umwandlung der Zwischenprodukte. Eine hohe Selektivität ist mittels biotechnologischer Konversion des aufgeschlossenen Materials möglich. Da Nebenprodukte aus dem Aufschluss und auch das eigentliche Produkt zur Hemmung der Konversion führen, ist die zentrale Herausforderung eine gleichbleibend hohe Ausbeute

# Center for Next Generation Processes an

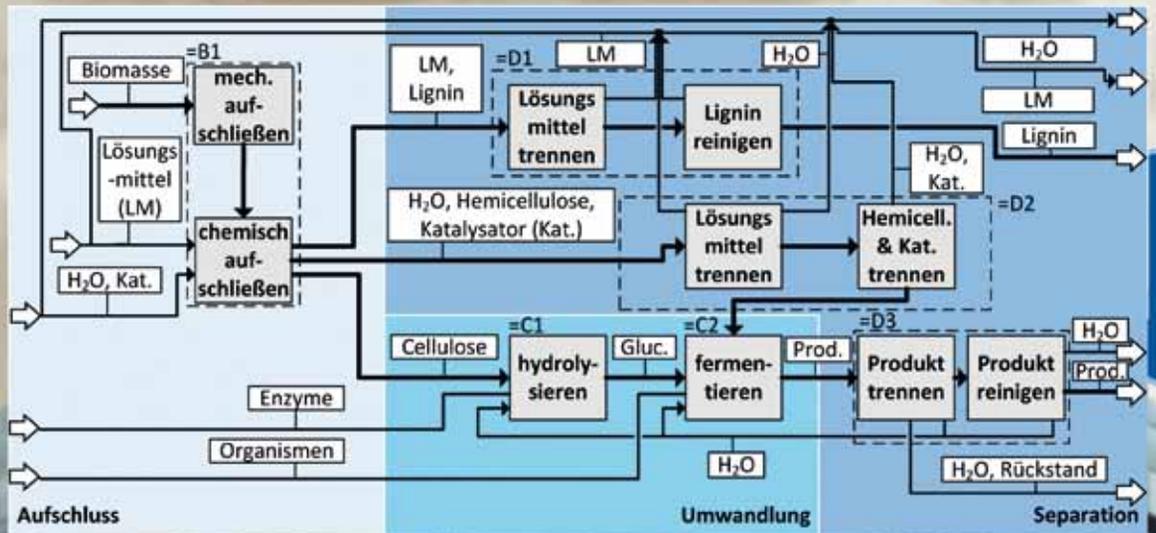
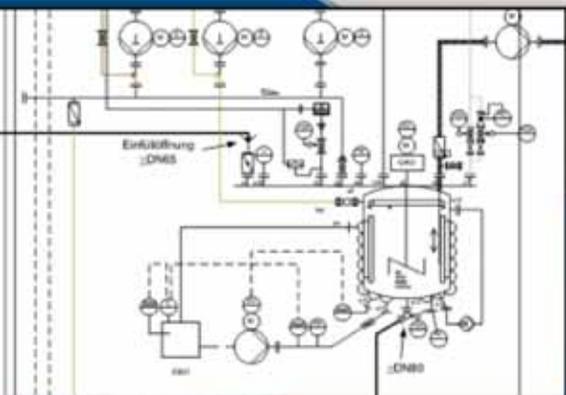


Bild 3: Illustration des NGP<sup>2</sup> und Visualisierung der Planungsleistung der AVT vom Blockfließbild bis zum schlüsselfertigen Apparat in der NGP<sup>2</sup>-Bioraffinerie.

pro Zeit und Apparatevolumen. Potenzial ergibt sich hier nur durch Integration der Biotechnologie mit dem Aufschluss und der Techniken zur Separation der eingesetzten Stoffe. Dieser letzte Schritt ist immer der entscheidende Schritt zum Produkt, weshalb er gleichbedeutend mit der (bio-)katalytischen Konversion im Rahmen der Stoffumwandlung untersucht werden muss. Das Ergebnis des Forschungsschwerpunktes „Stoffumwandlung“ muss insofern nicht nur ein Produkt in Form neuer Chemikalien, Wirkstoffe, Polymere oder Kraftstoffe sein, sondern sollte auch innovative Apparate und neue Techniken zu deren Separation beinhalten. Neben dieser stofflichen Sicht sind somit auch die Apparate und die Methoden als „Werkzeuge“

der Bioökonomie von Bedeutung. Der Stellenwert der methodischen Unterstützung zeigt sich bei der Betrachtung der Komplexität eines maßgeschneiderten Produkts. Die makroskopischen Produkteigenschaften ergeben sich direkt aus der molekularen Struktur der Rohstoffe und den angewandten Verfahren. Die Entwicklung neuer funktionaler Produkte als Forschungsschwerpunkt erfordert daher die Beherrschung dieser Komplexität. Dazu bietet sich die Anwendung und Weiterentwicklung modellgestützter Methoden an. Die Methoden der modellgestützten experimentellen Analyse, der Prozessintensivierung zur Produktabtrennung im Konversionsapparat und des modellgestützten Produkt-Prozess-Entwurfs bilden dabei in der AVT



Chemical & Process Engineering“ (ECPE) und „Molecular Science and Engineering (MSE)“ sowie der Jülich Aachen Research Alliance, kurz JARA, geschaffen.

Die NGP<sup>2</sup>-Bioraffinerie soll die Forschung aus dem Labor in den Technikumsmaßstab übertragen. Das allgemeine Konzept der NGP<sup>2</sup>-Bioraffinerie ist in Bild 2 dargestellt. Die Biomasse wird dazu aufgeschlossen, umgewandelt und die (Zwischen-)Produkte separat. Dies schließt die verlustfreie Rückführung der eingesetzten Hilfsstoffe wie Lösungsmittel, Katalysatoren und Energie ein („zero discharge“). Weiterhin wird die stoffliche Zusammensetzung durch die eingesetzte online Analytik direkt im Apparat bestimmt, was ein sofortiges Verständnis der Mechanismen und Optimierung ermöglicht. Besonders wichtig sind hier die Mechanismen, die unter laborüblichen Bedingungen ohne Betrachtung von zurückgeführten Stoffströmen und Energie nicht nachvollzogen werden können. Die Volumina der modularen Teilanlagen sind zwischen 25 und 100 Liter geplant, wodurch auch an einer Universität der Transfer vom Labor in den technischen Maßstab mit flexiblen, modularen Grundoperationen machbar ist.

Die technische Herausforderung besteht darin, dass solche Forschungsanlagen nicht von einem einzigen Hersteller erhältlich sind, sondern üblicherweise eine individuelle Generalplanung und -ausführung voraussetzen. Um diese nicht finanzierbare Dienstleistung zu erbringen, wurde das an der RWTH Aachen vorhandene interdisziplinäre Moment schon zur Planung genutzt. Basierend auf der Forschung im Exzellenzcluster wurde die Expertise der AVT-Lehrstühle in den Teilprozessen Zerkleinerung (AVT.MVT), Aufschluss (AVT.SVT), enzymatische Hydrolyse (AVT.EPT), Fermentation (AVT.BioVT), Membranverfahren (AVT.CVT) und Trenntechnik (AVT.FVT) genutzt, um die Teilanlagen nach AVT-Vorgabe schlüsselfertig durch verschiedene Anlagenbauer anbieten zu lassen. Dadurch kann die nötige Modularität und Flexibilität am besten sichergestellt werden, um die Forschungsfragen der Bioökonomie nach variabler Rohstoffnutzung, einer hohen Raum-Zeit-Ausbeute und geeigneten Trenntechnologien zu lösen. NGP<sup>2</sup> bietet daher mit Fertigstellung in 2016 eine exzellente Infrastruktur für nachhaltige und wettbewerbsfähige Bioökonomie.

die Grundlage zum Verständnis der komplexen mechanistischen Zusammenhänge in der Wertschöpfungskette, siehe Bild 1. In der Perspektive ergibt sich daraus das systematische Verständnis der Prozessschritte und ihres Zusammenwirkens und – daraus resultierend – der Entwurf intelligenter und möglichst optimaler Prozesskonzepte.

Diese Vision eines umfassenden Verständnisses erfordert ein interdisziplinäres Team mit der entsprechenden apparativen Ausstattung. Als zentrale Forschungsplattform soll daher im NGP<sup>2</sup> die Expertise der AVT-Lehrstühle und der Kooperationspartner in der NGP<sup>2</sup>-Bioraffinerie zur technischen Realisierung der Wertschöpfungskette mit integrierter wissenschaftlicher Methoden-

entwicklung gebündelt werden. Grundlegendes, verfahrenstechnisches Verständnis ist in der AVT durch Grundlagenforschung und Anwendung im Bereich Biotechnologie, Trennoperationen, Messtechnik und der Methoden und Modelle auf Systemebene vorhanden. Hier bietet NGP<sup>2</sup> daher eine ideale Infrastruktur zur Prozessentwicklung vom Mikroliter- bis zum Liter-Maßstab. Darüber hinaus sind viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler direkt an der RWTH oder im regionalen Verbund im Bereich der Bioökonomie tätig. Der Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ und das Projekthaus „Center for Molecular Transformations“ bringen die RWTH-Kompetenzen unter anderem im Bereich der Chemo-

katalyse und Hochdrucksynthese durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Makromolekulare Chemie (ITMC) ein. Das DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien – bietet die Kooperation für maßgeschneiderte, funktionale Produkte. Überregional wird über das „Bioeconomy Science Center“ eine einzigartige Komplementarität mit Pflanzenwissenschaften (Forschungszentrum Jülich, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn) und Biotechnologie (Forschungszentrum Jülich, RWTH Aachen) zur Aachener Verfahrenstechnik erreicht. Schließlich werden mit der NGP<sup>2</sup>-Bioraffinerie auch weitere Kooperationsmöglichkeiten in den Profildbereichen „Energy,

#### Autoren:

Univ.-Prof. Alexander Mitsos, Ph.D., ist Inhaber des Lehrstuhls für Systemverfahrenstechnik. Dr.-Ing. Jörn Viell ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik.

# Energie in den Untergrund!

## Alternative Technologien

Eine der größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts für die Bundesrepublik Deutschland stellt die zuverlässige, wirtschaftliche und vor allem umweltverträgliche Energieversorgung dar. Ausgelöst durch die Nuklearkatastrophe von Fukushima wurde von der Bundesregierung der Atomausstieg bis zum Jahr 2022 beschlossen. Zeitgleich soll die Nutzung fossiler Energieträger aus Gründen des Klimaschutzes ebenfalls deutlich reduziert werden. Um diese Herausforderungen bei gleichzeitiger Gewährleistung der Versorgungssicherheit zu ermöglichen, ist ein erheblicher Ausbau der erneuerbaren Energien von mindestens 40 Prozent der Stromerzeugung

bis zum Jahr 2025 geplant. Eine besondere Herausforderung in diesem Zusammenhang stellt die so genannte Volatilität erneuerbarer Energien dar, das heißt die natürliche Variabilität in der Energieerzeugung aufgrund von Windschwankungen (Windenergie), Tag-Nacht-Zyklen (Photovoltaik) oder Abflussschwankungen (Wasserkraft). Diese zeitlichen Schwankungen führen zu einem Ungleichgewicht zwischen Energienachfrage und Energieerzeugung.

Der notwendige Ausgleich von Energieerzeugung und -nachfrage führt durch die schwankende Energieeinspeisung erneuerbarer Energien zu neuen Heraus-

forderungen an zukünftige Technologien der Energieerzeugung, an das Lastmanagement, die Stromnetze und die Stromspeicher. Dies erfordert die Entwicklung leistungsstarker Energiespeicher im Kurz-, Mittel-, und Langzeitspeicherbereich. Energiespeicher werden somit neben den anderen Komponenten einen zentralen Bestandteil des zukünftigen Stromversorgungssystems einnehmen.

Pumpspeicherwerke stellen heutzutage die einzige langjährig erprobte und wirtschaftlich nutzbare kurz- bis mittelfristige Speichertechnologie dar. Pumpspeicherwerke nutzen die potenzielle Energie des Wassers zur

40

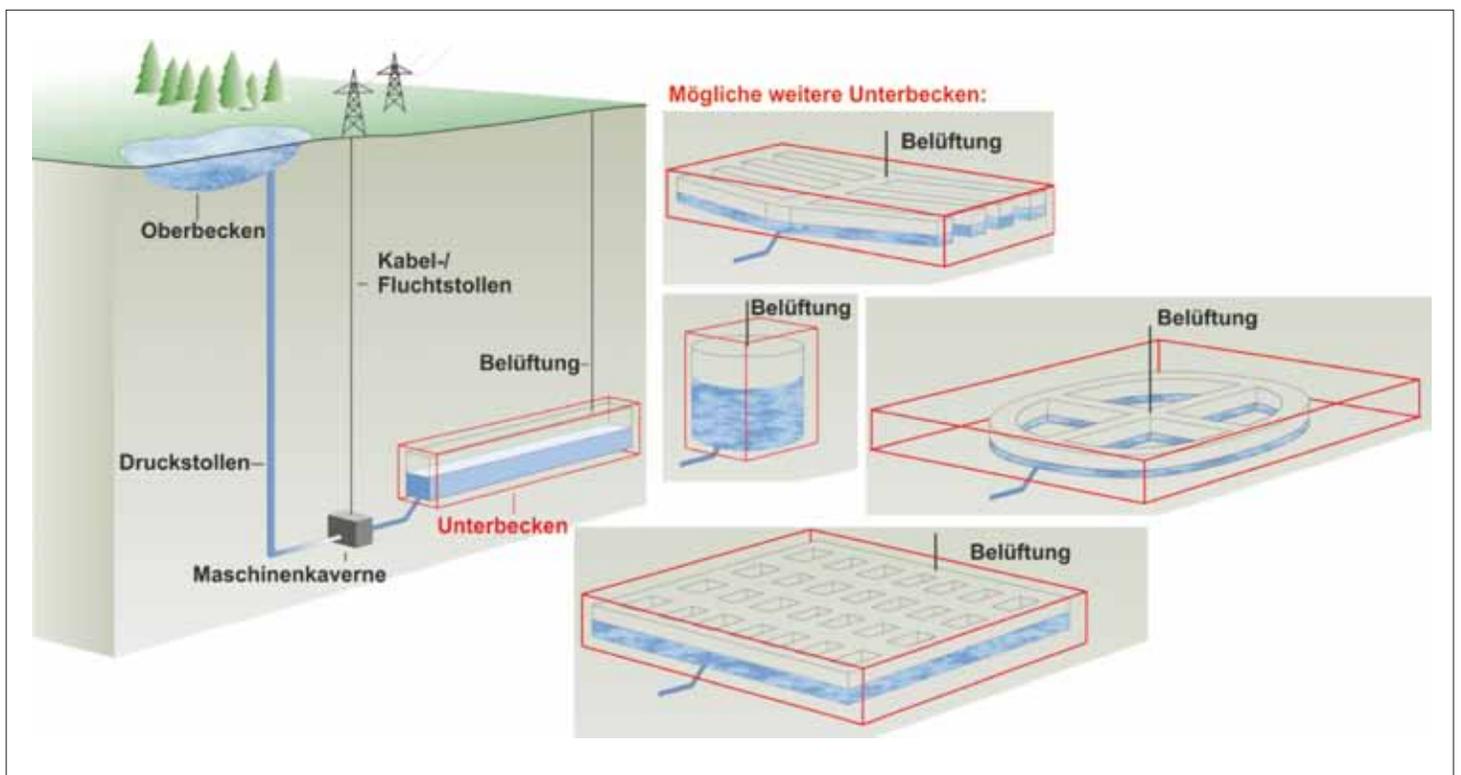


Bild 1: Aufbau unterirdischer Pumpspeicher.  
Quelle: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

# zu Pumpspeicherwerken

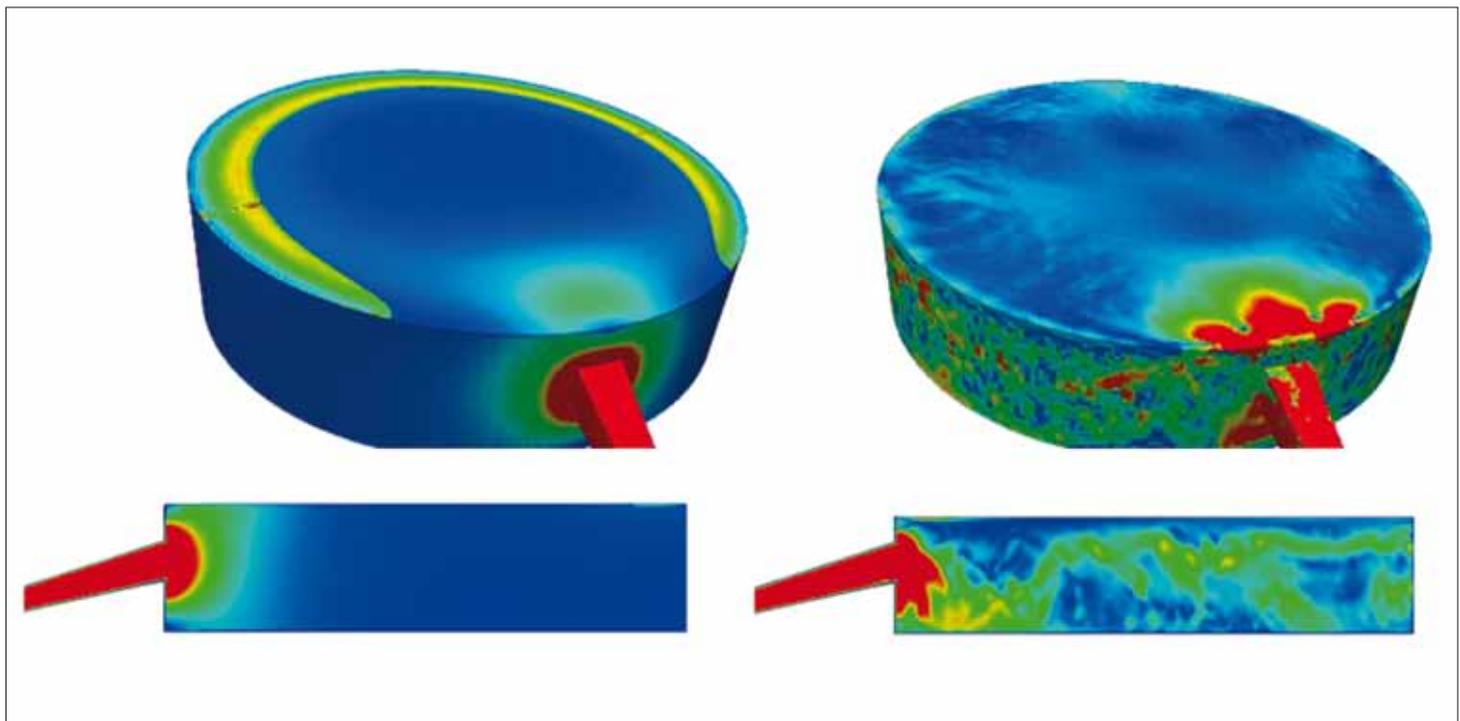


Bild 2: Strömungsprozesse beim Füllvorgang eines unterirdischen Speichers in Zylinderbauweise.  
Quelle: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Energiespeicherung. Dazu wird aus einem niedriger gelegenen Speicherbecken (Unterbecken) Wasser über Rohrleitungen in ein höher gelegenes Speicherbecken (Oberbecken) gepumpt und dort solange gespeichert, bis Energie benötigt wird. In diesem Fall wird das Wasser aus dem Oberbecken abgelassen, um Energie über Turbinen und Generatoren zu erzeugen. Die Leistungsfähigkeit von Pumpspeicherwerken hängt von der nutzbaren Höhendifferenz und der Größe der Speicherbecken ab. Je größer die Höhenunterschiede und je größer die Speicherbecken sind, umso mehr Energie kann gespeichert werden. Dies bedeutet aber auch, dass die Topografie einen der begrenzenden Faktoren für den Neubau klassischer Pumpspeicherwerke darstellt. Daher findet man die 33 Pumpspeicherwerke in Deutschland fast ausschließlich in

den Mittelgebirgsregionen beziehungsweise in den Alpen. Einen weiteren begrenzenden Faktor für klassische Pumpspeicherwerke stellt die Akzeptanz der Bevölkerung dar. Ein Beispiel hierfür ist der Widerstand der Bevölkerung und der einer Bürgerinitiative gegen das geplante Trianel-Pumpspeicherwerk an der Rurtalsperre in der Eifel.

Aus diesen Gründen ist die Suche nach Alternativen zu klassischen Pumpspeicherwerken erforderlich. Eine Alternative stellen unterirdische Pumpspeicherwerke dar. Diese funktionieren prinzipiell wie die klassischen Pumpspeicherwerke, jedoch wird mindestens ein Speicherbecken unter Tage errichtet, was erhebliche Vorteile bezüglich Landnutzung, Flächenbedarf, Höhendifferenzen und Akzeptanz erwarten lässt. In Ländern oder Regionen, in denen keine natürlichen Hö-

henunterschiede vorliegen, wie zum Beispiel in den Niederlanden, in Dänemark oder in Ungarn, würde die unterirdische Bauweise den Bau von Pumpspeicherwerken überhaupt erst ermöglichen. Die große Herausforderung besteht darin, die seit über 100 Jahren technisch bewährte Technologie der klassischen Pumpspeicherwerke an die zukünftigen betrieblichen Anforderungen und die speziellen geometrischen, technischen, geologischen, ökonomischen, ökologischen, rechtlichen und sonstigen Randbedingungen eines unterirdischen Pumpspeicherwerks anzupassen. Die Funktion der Energiespeicherung der klassischen Pumpspeicherwerke soll bei unterirdischen Pumpspeicherwerken erhalten bleiben, weshalb sich deren Elemente – ausgenommen Speicherbecken – nicht maßgeblich von denen klassischer

oberirdischer Pumpspeicherwerke unterscheiden. Als Speicherbecken sollen allerdings untertägige, geschlossene und belüftete Hohlräume in Kavernen- oder Stollenform genutzt werden. Ihre geometrische Form und ihre Dimensionen können entweder an die Form bestehender Hohlräume angepasst werden, zum Beispiel stillgelegte Bergwerke für den Abbau von Salz, Kohle oder Erz, oder im Falle einer Neuaufbauung von Hohlräumen, zum Beispiel im Festgestein, auch direkt an die spezifischen Anforderungen an Energiespeicher, zum Beispiel Betrieb und Dimensionierung, angepasst werden. Bild 1 zeigt einen möglichen Aufbau unterirdischer Pumpspeicherwerke.

Als Grundlage für eine zukünftige konstruktive und funktionale Bemessung unterirdischer Pumpspeicherwerke sind entspre-



*Bild 3: Hochbehälter im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft mit einem Fassungsvermögen von 45 m<sup>3</sup>. Der Hochbehälter ist Bestandteil des instituts-eigenen Wasserkreislaufs und wird für den Betrieb wasserbaulicher Modellversuche verwendet.  
Foto: Peter Winandy*



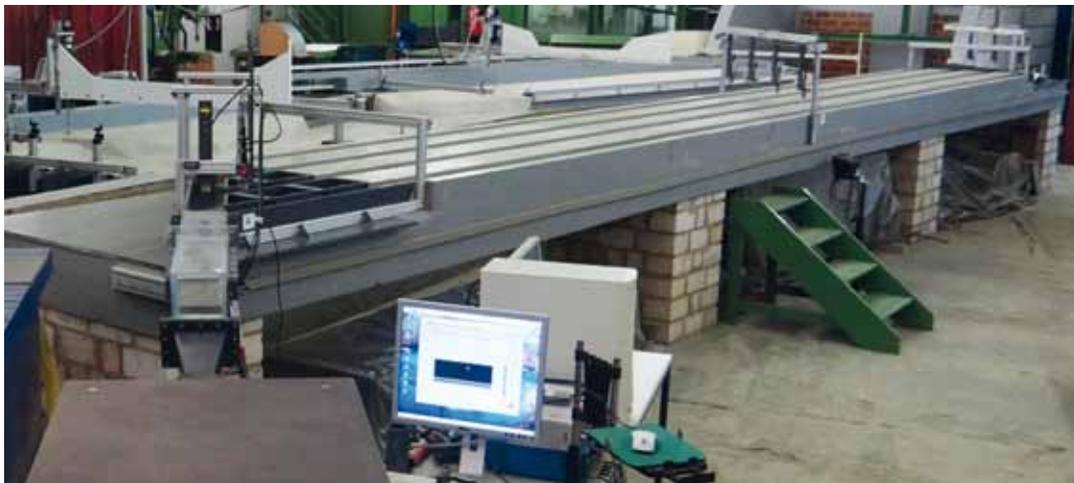


Bild 4: Physikalisches Modell in der Versuchshalle des IWW zur Untersuchung eines unterirdischen Speichers in Kavernenbauweise.  
Quelle: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

chende Grundlagen bezüglich des Einflusses der maßgebenden geometrischen und betrieblichen Randbedingungen auf den Füll- und Entleervorgang während des Pumpen- beziehungsweise Turbinenbetriebs erforderlich.

Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft untersucht in diesem Zusammenhang experimentell wie numerisch die Strömungsprozesse beim Füll- und Entleervorgang in unterirdischen Pumpspeicherwerken. Ziel ist es einerseits, die Nutzbarkeit vorhandener unterirdischer Kavernen und Stollen im Steinkohlebergbau, Erzbergbau und Salzbergbau für unterirdische Pumpspeicherwerke zu überprüfen und andererseits, die hydrodynamisch optimale Form zu finden.

Das Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior untersucht in diesem Kontext die zu erwartende Wirtschaftlichkeit von unterirdischen Pumpspeicherwerken unter Unsicherheit. Dabei wird zunächst von techno-ökonomischen Parametern der in Kavernen angelegten Kraftwerke in Österreich und der Schweiz ausgegangen, um modellgestützt realistische Kostenschätzungen für den Bau durchzuführen. Der Unsicherheit und der Vielfalt an denkbaren Varianten bei der Realisierung von unterirdischen Pumpspei-

cherwerken in aufgelassenen (Steinkohle-) Bergwerken wird mit umfangreichen Sensitivitätsanalysen Rechnung getragen, um die Bandbreite und Robustheit der Resultate besser beurteilen zu können. Mittels stochastischer Analysen werden darüber hinaus die Verteilungen der zu erwartenden Zahlungsströme der laufenden Kosten und Erlöse sowie die risikoabhängigen optimalen Investitionszeitpunkte berechnet, siehe Bild 5.

Die Einflüsse der Geometrie bestehender Hohlräume auf die Füll- und Entleervorgänge unterirdischer Speicherbecken im Pumpspeicherbetrieb sind derzeit nicht bekannt. Es wird erwartet, dass im ungünstigsten Fall Einschränkungen im Betrieb, erhöhte Energieverluste, geologische Instabilitäten und damit ein Verlust der Leistungsfähigkeit gegebenenfalls aber auch Betriebsausfälle auftreten können. Dies liegt daran, dass bei der Nutzung bestehender Hohlräume diese aus Gründen des Abbaus einer Lagerstätte erstellt und optimiert wurden und damit hydrodynamisch nicht optimiert sind. Eine hydrodynamisch optimierte Form würde sich neben den betrieblichen Vorteilen bei geeigneter Planung positiv auf die Akzeptanz, die Umweltverträglichkeit, die Stabilität, die erwartete technische

und wirtschaftliche Lebensdauer, die Geologie und die Bau- und Betriebskosten auswirken. Dazu ist es erforderlich, die Strömungsprozesse beim Füll- und Entleervorgang zu kennen. Während des Füll- und Entleervorgangs unterirdischer Pumpspeicherwerke kommt es zu lokalen Strömungsprozessen wie solitären Wellen, Reflexionen, Lufteintrag und Wechselsprüngen. Diese lokalen Strömungsprozesse müssen vermieden werden, um einerseits Energieverluste zu reduzieren und andererseits, um keine unerwünschten Wechselwirkungen mit dem anstehenden Gestein zu haben.

Außer unterirdischen Pumpspeicherwerken werden aber auch noch andere Alternativen zu klassischen Pumpspeicherwerken am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft untersucht. Eine Alternative mit hoher Bedeutung für die Aachener Region ist die Nachnutzung der Tagebaue als Pumpspeicherwerk. Hier gibt es aufgrund der vorhandenen Höhenunterschiede sowie der Verfügbarkeit von Wasser und Stromnetzen zahlreiche Optionen, die derzeit in der Region diskutiert und am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft untersucht werden. Am Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior werden sowohl alter-

native Speicherkonzepte für die Nachnutzung von Braunkohle-Tagebau-Stätten als auch die Optimierung der Energiekosten der Brunnenwasserhaltung – unter Berücksichtigung der aktuellen Marktbedingungen für elektrische Energie und Einbindung einer Wärmepumpe für ein Nahwärmenetz – aus energieökonomischer Perspektive untersucht.

#### Autoren:

Univ.-Prof. Dr. rer. soc. oec Reinhard Madlener ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftswissenschaften, insbesondere Energieökonomik, Leiter des Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior und Sprecher des Forschungsgebietes „Energie, Mobilität und Umwelt“. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Elena Pummer ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf ist Inhaber des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft und Leiter des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Bild 5: Jährlich erwartete Erlöse von einem auf acht Stunden Vollastbetrieb ausgelegten UPSW in Abhängigkeit von der Höhendifferenz zwischen Ober- und Unterbecken.  
Anmerkungen: Berechnet für Erlösszenarien (10/50/100 €/MWh) und zwei Speichergrößen („klein“ = 0,5 Mm<sup>3</sup>, „groß“ = 1 Mm<sup>3</sup>), y-Achse logarithmiert.

Quelle: Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior

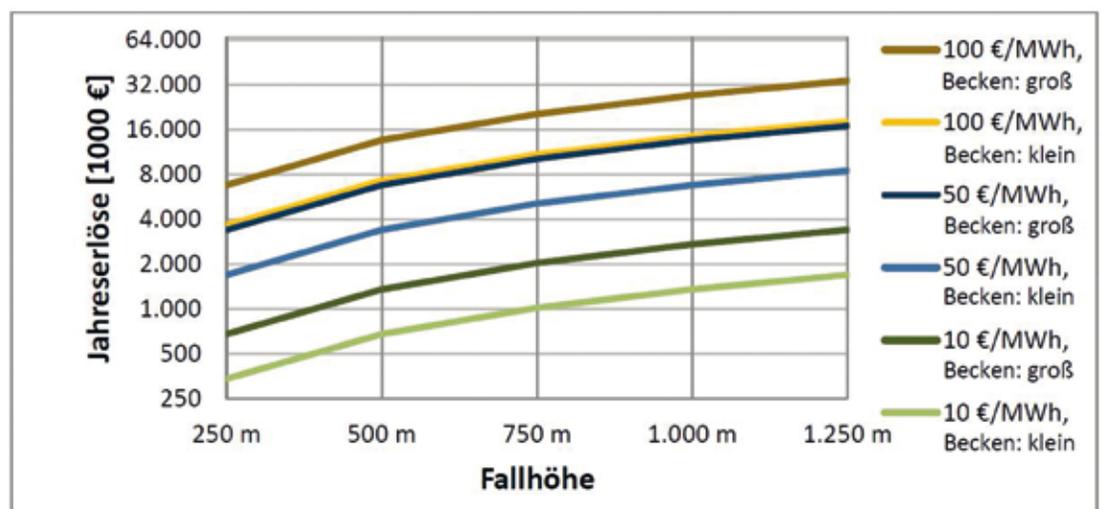




Foto: Peter Winandy

Bernhard Blümich, Ernesto Danieli, Markus Küppers,  
Josefina Perlo, Kawarpal Singh, Jochen Vieß

# Magisch magnetisch

## Transportprozesse für Energie



# speicher, Medizin- und Verfahrenstechnik



*Bild 1: High-Tech aus Aachen: die Magnete für die kompakten NMR-Spektrometer werden von der Magritek GmbH, einer Ausgliederung der RWTH Aachen gebaut.  
Foto: Peter Winandy*

Kernmagnetresonanz (NMR; Nuclear Magnetic Resonance) ist eine Form von resonanter Radiofrequenz-Spektroskopie, welche die Präzession von Kernspins in magnetischen Feldern misst. Dieses Phänomen bildet die Basis für eine der leistungsfähigsten und nützlichsten Analysemethoden in der Chemie, der Katalyse, den Materialwissenschaften, der chemischen Verfahrenstechnik, der Biologie und der Medizin. Indem man sich Substanzen aus der Sicht der Kerne von Atomen anschaut, die in Molekülen eingebettet sind, kann eine Vielzahl von chemischen und physikalischen Eigenschaften auf verschiedenen strukturellen Ebenen zerstörungsfrei abgefragt werden: von zwischenatomaren Bindungen über die Morphologie von Polymeren auf der Nanometerskala bis hin zur physikalischen Struktur und Funktion auf mikro- und makroskopischer Ebene. Mit NMR-Spektroskopie können bestimmte Moleküle in komplexen Mischungen identifiziert werden. Ihre Mobilität in verschiedenen Umgebungen ist über NMR-Relaxations- und Diffusionsmessungen erreichbar. Die Kinetik von chemischen Reaktionen kann mittels NMR ebenfalls in Echtzeit verfolgt werden. Die populärste Anwendung des NMR-Phänomens ist die Bildgebung (Magnetresonanztomografie, MRT). Seit ihrer Entdeckung vor über 40 Jahren hat sich diese Technik zu einem der wichtigsten Werkzeuge in der medizinischen Diagnostik von weichem Gewebe und dessen Funktion entwickelt. Die Möglichkeit, die räumliche Verteilung einer großen Vielzahl chemischer und physikalischer

Eigenschaften darzustellen, macht diese Methode ebenfalls attraktiv, um Zusammensetzung und Eigenschaften von Materialien vor und nach deren Verarbeitung zu untersuchen. Beispielsweise sind NMR und MRT sehr gut geeignet, um Flussgeschwindigkeiten von Systemen, die aus mehreren Komponenten bestehen, zerstörungsfrei in Medien zu messen, die optisch nicht transparent sind. So können einzigartige Einsichten erhalten werden, die mit anderen Methoden nicht zugänglich wären.

Die Arbeitsgruppe von Prof. Bernhard Blümich vom Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (ITMC) ist eine der weltweit führenden Gruppen im Bereich der Untersuchung von fließenden Systemen mit NMR Flußbildgebung. Sie hat in der Entwicklung von kompakten Geräten für den mobilen Einsatz von NMR und MRT außerhalb des Labors, beispielsweise an archäologischen Ausgrabungsorten sowie in Museen, Pionierarbeit geleistet. Während konventionelle NMR Spektrometer supraleitende Hochleistungsmagnete benötigen, die viel Platz, Wartung und Sicherheitsvorkehrungen erfordern, sind kompakte NMR Geräte mit wesentlich kleineren Permanentmagneten ausgestattet, sodass sie viel leichter im klinischen Alltag verwendet werden können, aber auch in Produktionslinien zur Prozesskontrolle und im Chemielabor unter dem Abzug zur Kontrolle chemischer Synthesen. Die Arbeitsgruppe am ITMC hat umfangreiche Erfahrungen sowohl mit konventionellen Hochfeld Spektrometern als auch mit der

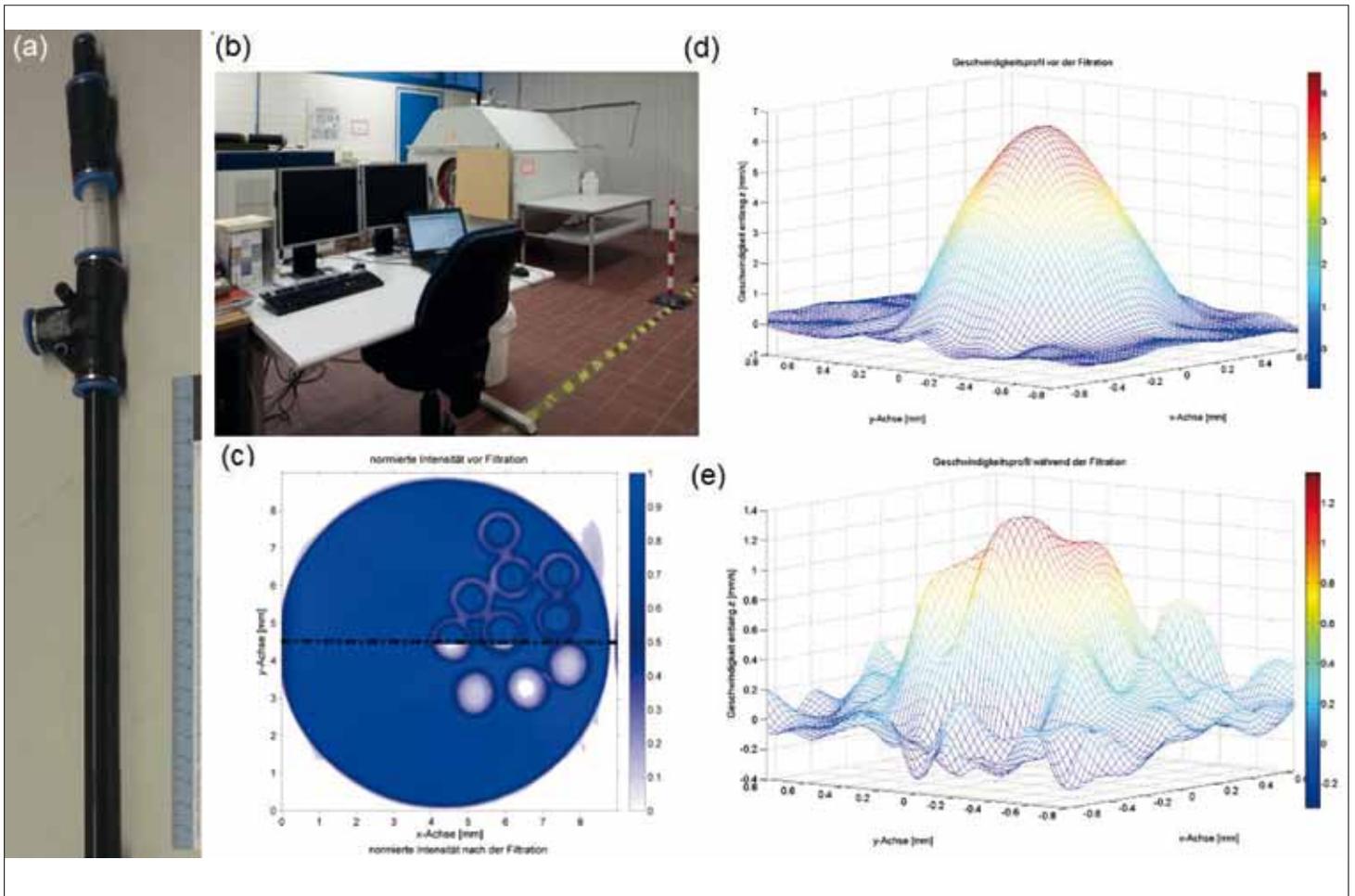


Bild 2: Untersuchung von Membranfiltrationsprozessen mit MRT. a) Hohlfasermembranmodul für Sackfiltrationen. b) Fotografie des NMR-Tomografen samt Messrechner c) Querschnitt durch ein Membranmodul vor (oben) und nach (unten) der Filtration. Erkennbar sind die zehn Hohlfasermembranen, welche vor der Filtration durchlässig und nach dem Filtrationsprozess nahezu vollständig verstopft sind. d) Flussprofil in einer Hohlfaser vor der Filtration. e) Flussprofil in einer Hohlfaser zum Zeitpunkt bei Verstopfung.

Niederfeld NMR-Technologie gesammelt. Im Folgenden werden drei ausgewählte Anwendungen der NMR aus der Verfahrenstechnik, der medizinischen Diagnostik und der chemischen Analytik unter dem Abzug im Chemielabor vorgestellt. Die ersten beiden Beispiele betreffen die Darstellung von Fließgeschwindigkeiten in Hohlfasermembranen und in Modellaneurysmen. Letzteres zeigt den Einfluss von Stent-ähnlichen Flow-Divertern (FD) auf die Fluidodynamik im Innern des Aneurysmas. Das dritte Beispiel betrifft die Überwachung chemischer Reaktionen in Echtzeit mit kompakter NMR zur Optimierung der Reaktionsausbeute.

**Messung der Fließgeschwindigkeit in Filtern und Membranen**  
 Unser aller Tagesablauf ist ohne Filtrationen kaum vorstellbar. Beginnend mit der allmorgentlichen Zubereitung von Kaffee und Tee nutzen wir im weiteren Verlauf des Tages mit unserem Kraftfahrzeug auf dem Weg zur Arbeit Luft- und Abgasfilter. Auch das abendliche Glas Bier oder Wein wurde vor dem Genuss gefiltert. Weder Mensch noch Tiere oder Pflanzen sind ohne semipermeable Zellmembranen lebensfähig.

Ohne die Lunge, die größte biologisch relevante Membran, wäre unser Leben nach etwa fünf Minuten zu Ende.

Die in unserer Studie verwendeten Hohlfasermembranen sind für Mikro- und Ultrafiltration geeignet. Ein so genanntes Membranmodul beinhaltet zehn solcher Hohlfasern mit einer aktiven Membranlänge von je 33 Zentimetern, siehe Bild 2. Die Filtration kann bei solchen Membranen in zwei Modi mit jeweils zwei Richtungen durchgeführt werden. Man kann sie mit offenen Enden im Kreuzfluss oder mit einem geschlossenen Ende im Sackfluss betreiben. Im zweiten Fall wird alles, was in die Membran eingeleitet wird, entweder durch die Membran filtriert oder im Filterkuchen gesammelt. Im ersten Fall hingegen ist die Filtration unvollständig. Der nicht filtrierte Teil wird in den Behälter zurückgeführt, in welchem sich die Ausgangslösung stetig aufkonzentriert. Beide Modi können entweder als inside out Filtration mit der zugeführten Lösung innerhalb, oder als outside in Filtration außerhalb der Membran durchgeführt werden. Bei Filtrationen im inside out Sackmodus bildet sich innerhalb

der Hohlfasern ein Filterkuchen, der die Faser schließlich verstopft. Bei outside in Filtrationen bildet sich dieser Filterkuchen hingegen außen, wobei der Durchmesser der Membran stetig wächst. Der Filterkuchen sollte sich laut Theorie gleichmäßig ausbilden, da an Stellen mit größerer Filterkuchendicke der Widerstand für die Permeation höher ist als an Stellen mit dünnerem Filterkuchen. Dies führt zu einem höheren Durchfluss bei dünnem Filterkuchen, wodurch der Filterkuchen wiederum schneller wächst. Somit sollte sich der effektive Durchmesser der Membran gleichmäßig verändern.

Für den industriellen Einsatz von Membranfiltern ist es essenziell, den Verstopfungsprozess, siehe Bild 2 oben und unten, zu verstehen, um ihn zu verlangsamen beziehungsweise gänzlich zu unterbinden. Als Untersuchungsmethode eignet sich hierzu die Magnetresonanztomografie, da mit diesem Verfahren neben der Abbildung der Dicke des Filterkuchens auch die Fließgeschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt visualisiert werden kann. Die Bilder 2d und 2e zeigen beispielsweise die Verteilung der axialen Fließgeschwindigkeiten von Was-

ser innerhalb einer Hohlfaser vor und während einer Filtration von Silikapartikeln. Vor der Filtration ist das Fließprofil laminar und ungestört. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Hohlfasern durch einen Filterkuchen fast vollständig verstopft sind, weicht das Fließprofil hingegen stark von seiner ursprünglichen Form ab.

#### Bestimmung der Fluidbewegung im Innern eines Aneurysmas mit kompakter MRT

Aneurysmen sind Ausstülpungen in der Wand von Blutgefäßen. Ihre Veränderungen und letztlich ihr Versagen hängen von der Fluidodynamik in den Ausstülpungen ab. Dies hat gravierende Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Patienten. Flow Diverter sind Implantate, welche in der minimalinvasiven Behandlung von Aneurysmen verwendet werden. Ihr Zweck ist die Ausbildung von Thromben im Aneurysmasack durch Unterdrückung der Blutbewegung. Die Geometrie des Aneurysmas, dessen Lage und Größe sowie hämodynamische Variablen und der spezifische Typ des FDs beeinflussen den Grad und die Zeit bis zur Heilung. Die für den Flow-Diverter relevanten

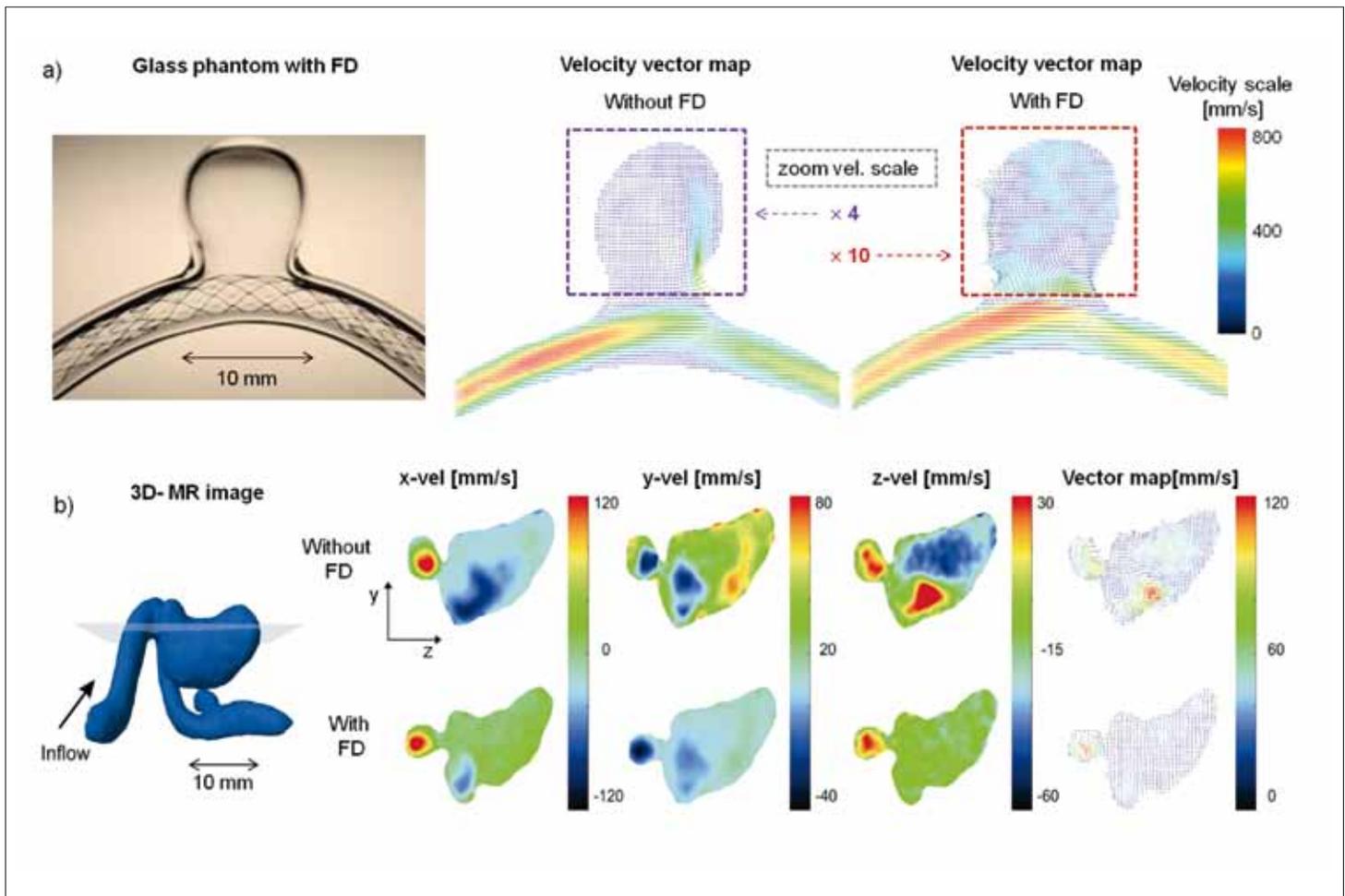


Bild 3: Flussprofile in Modellaneurysmen. Jedes Profil wurde mit einem kompakten Tisch-Tomografen in weniger als einer Minute gemessen. a) Kugelförmiges Glasphantom eines Aneurysmas mit einem Flow-Diverter im Innern. Die Geschwindigkeitsvektoren vor und nach Einführen des FDs zeigen den extremen Einfluss des FDs auf das intra-aneurysmale Flussmuster. Genehmigung: Acandis GmbH. b) 3D MRT Struktur eines Silikonmodells eines Patienten (blau). Die Maps der Geschwindigkeitsvektoren der Komponenten entlang der drei Achsen und das Vektorfeld der Flussgeschwindigkeit zeigen deutlich die Dämpfung der Geschwindigkeit innerhalb des Aneurysmasacks durch den Einsatz des FDs.

Parameter sind von Patient zu Patient unterschiedlich, können aber bei bekannten physiologischen Bedingungen für jeden optimiert werden. Hierzu ist eine Replik des Aneurysmas erforderlich, an welcher der Blutfluss in-vitro untersucht werden kann. Eine solche Replik kann nach den Daten einer Angiografieaufnahme angefertigt werden, um als Modell für Untersuchungen der Fließgeschwindigkeiten und Richtungen zu dienen. Die Methode der Wahl zur zerstörungsfreien Messung von Geschwindigkeitsvektorfeldern in drei Raumrichtungen ist das MRT, da dieses auch bei opaken Proben eingesetzt werden kann. Derartige Studien erfordern keine teuren klinischen MRT-Geräte, sondern können mit kompakten Tischgeräten durchgeführt werden.

Der intra-aneurysmale Fluss wurde an zwei unterschiedlichen Modellaneurysmen für verschiedene Fluss-Parameter mit und ohne FD gemessen. In einem Tischtomografen mit 0.2 Tesla Magnetfeldstärke wurden 3D Geschwindigkeitskarten einer Flüssigkeit, die ähnliche rheologische Eigenschaften wie Blut aufweist, bei kontinuierlichem Fluss aufgezeichnet. Glasphanto-

me, die ein rundes Aneurysma in einem Blutgefäß emulieren, wurden für die systematische Analyse der Effekte unterschiedlicher Parameter auf den Fluss im Aneurysma verwendet. Hierbei zeigte sich, dass die Geometrie des Blutgefäßes einen starken Einfluss auf das Fließmuster im Aneurysmasack hat. Ein gekrümmtes Gefäß führt zu einem stärkeren Einströmen von Flüssigkeit in das Aneurysma, als dies bei einem geraden Blutgefäß der Fall ist. Die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten ist weiterhin abhängig von der Pumprate und der Viskosität des Mediums. Der Betrag der Geschwindigkeit wächst, wenn die Pumprate erhöht beziehungsweise die Viskosität des Mediums verringert wird. Letzteres beeinflusst nicht nur den Betrag der Geschwindigkeit, sondern die Ausbildung von Wirbeln. Ein typisches Muster ist ein einfacher Wirbel, der nach Einführung des FDs abgeschwächt wird, siehe Bild 3a. Das Fließmuster im Sack eines Modellaneurysmas aus Silikon mit einer bei einem Patienten gefundenen Geometrie zeigt in Abwesenheit eines FDs ein komplexes Muster, siehe Bild 2b. In x-Richtung beträgt die mittlere Geschwindigkeit im Blutgefäß

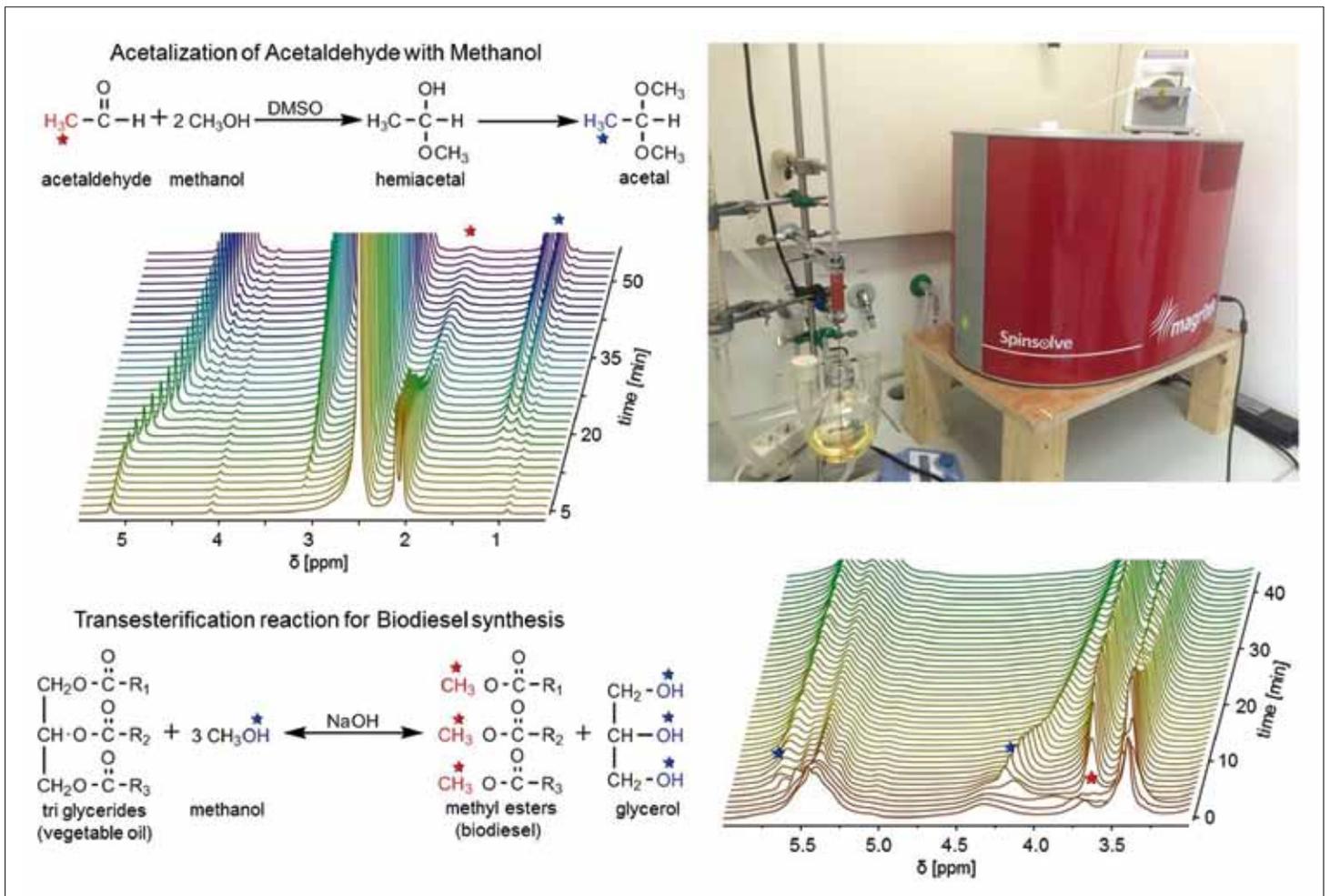
140 Millimeter pro Sekunde.

Nach Einführung des FDs hat sich die Geschwindigkeit des einströmenden Mediums nicht sonderlich verändert. Allerdings hat sich der rotierende Wirbel innerhalb des Aneurysmasacks, der ohne FD in der yz-Ebene Geschwindigkeiten der z-Komponente von bis zu 80 Millimeter pro Sekunde aufwies, durch den Einsatz des FDs stark verlangsamt, da die Geschwindigkeiten dort auf maximal 20 Millimeter pro Sekunde zurückgingen.

#### NMR-Spektroskopie unter dem Abzug

Die Echtzeitüberwachung chemischer Reaktionen spielt eine wichtige Rolle bei chemischen Prozessen und im Reaktionsdesign. Der Ablauf einer Reaktion und ihre Effizienz hängen stark von den Reaktionsbedingungen und den stöchiometrischen Verhältnissen der beteiligten chemischen Spezies ab. Obwohl sich die NMR Spektroskopie für die Analytik chemischer Strukturen und Reaktionen außergewöhnlich gut eignet, wurde das Verfahren bisher wegen der Komplexität der Apparatur und Messung wenig für die Reaktionsüberwachung eingesetzt. Vielmehr werden in

der Praxis Lösungen der Reaktionsprodukte gesammelt und zum NMR-Labor gebracht, um dann innerhalb des nächsten halben oder ganzen Tages vermessen zu werden. Dadurch ergeben sich erhebliche Verzögerungen im Ablauf, die aber in vielen Fällen bei unmittelbarem Zugang zu einem NMR-Spektrometer im chemischen Labor auf wenige Minuten verkürzt werden können. Die Entwicklung solcher kompakter NMR-Spektrometer an der RWTH Aachen hat dies nun möglich gemacht. Anstatt den Fortgang der Reaktion mit Dünnschichtchromatografie im Syntheselabor abzuschätzen, kann nun die NMR Spektroskopie verwendet werden, bei der die Reaktionsmischung durch den Magneten geleitet wird. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im einfachsten Fall können in bestimmten Zeitintervallen Proben genommen und sofort gemessen werden, um die Reaktion zu verfolgen. Andererseits kann die Reaktionslösung durch den Magneten gepumpt werden, wobei zu bestimmten Zeiten der Fluss für eine Messung gestoppt wird. Letztlich kann die Messung auch im kontinuierlichen Fluss erfolgen, sofern die Sensitivität



4: a) Kompaktes NMR-Spektrometer in einem chemischen Abzug mit integrierter Flusszelle zur Überwachung chemischer Reaktionen im kontinuierlichen Fluss. b) Gestapelte  $^1\text{H}$  NMR Spektren gegen die Zeit, beobachtet zwischen fünf und 55 Minuten Reaktionszeit bei einer Acetylierungsreaktion. c) Gestapelte  $^1\text{H}$  NMR Spektren gegen die Zeit bei einer Umesterung in der Zeit zwischen null und 45 Minuten. Jedes Spektrum wurde mit einem einzigen Scan innerhalb von zehn Sekunden gemessen. Die wichtigsten Peaks sind durch Sternchen markiert, deren Farbe der funktionellen Gruppen in den chemischen Formeln entspricht.

50

hoch und die Messung schnell genug ist. Mit unseren kompakten NMR Spektrometern messen wir den kontinuierlichen Fluss, siehe Bild 4a, um chemische Reaktionen bei verschiedenen Temperaturen, Drücken und anderen Reaktionsparametern zu verfolgen. Diese Möglichkeiten bieten sich nicht, wenn die Reaktion in einem konventionellen NMR Röhrrchen als Reaktionsgefäß stattfindet. Im verwendeten Modus ist es möglich, die Kinetik der Reaktion, die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten, den kinetischen Isotopeneffekt, die Bildung von Neben- und Zwischenprodukten, die Reinheit, den Enantiomerenüberschuss und die Ausbeute der Reaktion direkt unter dem Abzug auch bei Reaktionen mit gefährlichen Chemikalien zu ermitteln.

Diverse homogen und heterogen katalysierte, ein- oder zweiphasige Reaktionen lassen sich mit kompakten NMR Spektrometern verfolgen. Eine Umesterung von Fettsäuren zur Bildung von Biodiesel und Glycerin ist ein Beispiel, siehe Bild 4c, die Acetylierung von Acetaldehyd zur Herstellung von Acetal mit dem Einfluss des kinetischen Isotopeneffekts auf die Reaktionskinetik

ein anderes. Der Einfluss des Verhältnisses verschiedener Isotope ist von praktischer Bedeutung für die Authentizität von Wein und Olivenöl. Darüber hinaus bietet er auch Einsicht in die Geschichte der Erde auf einer Zeitskala von 100 Millionen Jahren und mehr, sobald die Herkunft der Verteilung des Deuteriums in verschiedenen chemischen Gruppen von Rohöl verstanden ist.

**Autoren:**

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Bernhard Blümich ist Inhaber des Lehrstuhls für Makromolekulare Chemie.  
 Dr. rer. nat. Markus Küppers ist Akademischer Oberrat am Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie.  
 Dr. rer. nat. Ernesto Danieli, Dr. rer. nat. Josefina Perlo, Kawarpal Singh, M.Sc., und Jochen Vieß, M.Sc., sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie.



Foto: Peter Winandy

# Ammoniaksynthese Elektrochemie

## Ergebnisse einer

Erst kürzlich wurde die direkte Umsetzung von Stickstoff  $N_2$  und Wasserstoff  $H_2$  zu Ammoniak  $NH_3$  als eine der wichtigsten technischen Erfindungen des 20. Jahrhunderts eingestuft. Die Bedeutung von  $NH_3$  ist offensichtlich: Mit einem Anteil von einem bis drei Prozent am weltweiten Energiebedarf ist die Ammoniaksynthese einer der größten industriellen Energieverbraucher. Rund 80 Prozent des hergestellten  $NH_3$  werden als Düngemittel eingesetzt. Ohne  $NH_3$  wäre es nicht möglich, die stetig wachsende Bevölkerung mit ausreichend Nahrung zu versorgen. Parallel zur Düngemittelindustrie spielt  $NH_3$  auch als Grundstoff für zahlreiche Feinchemikalien und als Zwischenstoff zur Energie- und Wasserstoffspeicherung eine wichtige Rolle.

**Die klassische Haber Bosch Synthese**  
Großtechnisch wird  $NH_3$  heutzutage nach dem Haber Bosch

Verfahren hergestellt, das 2013 sein 100-jähriges Jubiläum feierte. Stickstoff und  $H_2$  werden bei Temperaturen von 400 bis 500 Grad Celsius und Drücken von 150 bis 250 bar über einen Eisenkatalysator geleitet. Diese Prozessparameter sind ein Kompromiss zwischen der thermischen Stabilität von  $NH_3$ , der Reaktionsrate und der Katalysatoraktivität. Unter Gleichgewichtsbedingungen wird ein Umsatz von 15 Prozent erreicht. Der benötigte  $N_2$  wird durch kryogene Luftzerlegung gewonnen, wohingegen  $H_2$  durch Dampfreformierung von Methan  $CH_4$  erzeugt wird. Pro Tonne produziertem  $NH_3$  werden zwei Tonnen klimaschädliches Kohlenstoffdioxid  $CO_2$  freigesetzt. Die wertvollen Kohlenwasserstoffe werden also nicht in das Endprodukt  $NH_3$  umgewandelt, sondern lediglich in das derzeit noch nicht großtechnisch verwertbare  $CO_2$ . Moderne Haber Bosch Anlagen produzieren bis zu 1500 Tonnen  $NH_3$  pro Tag und verbrauchen

ungefähr acht Megawattstunden Energie pro Tonne  $NH_3$  basierend auf  $CH_4$  und 13,5 Megawattstunden Energie, basierend auf Kohle als Wasserstoffquelle. Aus umweltfreundlicher Sicht birgt das Haber Bosch Verfahren Verbesserungspotenzial und ein Alternativverfahren, das nicht auf wertvollen fossilen Energieträgern aufbaut, ist wünschenswert.

**Die elektrochemische Ammoniaksynthese**  
Ammoniak ist gegenwärtig eine der wichtigsten Chemikalien überhaupt. Es kann leicht in flüssiger Form bei Drücken von  $\sim 10$  bar transportiert werden. Flüssiger  $NH_3$  hat einen Wassergehalt von 17,6 Gewichtsprozent und ist damit ein idealer Energie- und Wasserstoffspeicher. Um alle Vorteile von Ammoniak als Chemikalie der Zukunft nutzen zu können, ist ein umweltfreundliches und nachhaltiges Syntheseverfahren notwendig. Dieses Verfahren soll  $CO_2$  frei sein, das heißt, es sollen keine

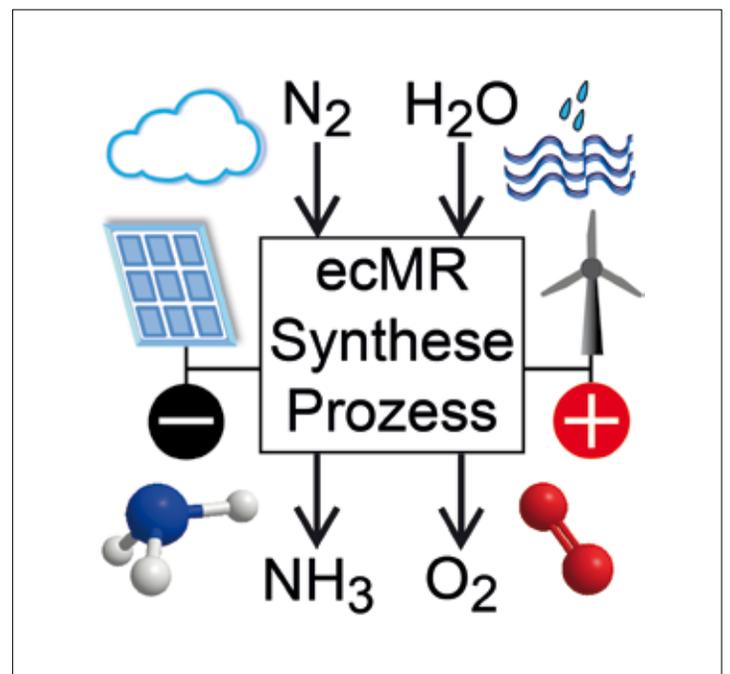


Bild 1: Schematische Darstellung eines umweltfreundlichen und nachhaltigen  $NH_3$  Syntheseprozesses ausgehend von  $N_2$  und  $H_2O$  als  $H_2$  Quelle. Der Prozess kann durch erneuerbare Energiequellen wie Solar- und Windenergie betrieben werden.

# 2.0 – versus Haber Bosch

## Prozesssimulation

fossilen Brennstoffe verbraucht werden und CO<sub>2</sub> Emissionen sollen vermieden werden. Des Weiteren soll eine im Überschuss vorhandene Wasserstoffquelle oder Stromquelle verwendet und erneuerbare Energien eingesetzt werden. Ein neuartiger Prozess, der diese Kriterien erfüllt, ist die elektrochemische Ammoniaksynthese in einem elektro-chemischen Membranreaktor (ecMR), siehe Bild 1.

Der ecMR besteht im Wesentlichen aus zwei Metall-elektroden, der Anode und der Kathode, die durch eine Polymermembran separiert werden. Der neue elektrochemische Syntheseprozess basiert auf N<sub>2</sub>, gewonnen durch kryogene Luftzerlegung, und Wasser H<sub>2</sub>O als Wasserstoffquelle. Der Einsatz von billigem vorgeheiztem Prozessdampf ist eine umweltfreundliche und wirtschaftlich sinnvolle Möglichkeit, um die Machbarkeit des neuen NH<sub>3</sub> Syntheseprozesses zu erhöhen. Indem der Prozess durch erneuerbare Energien wie Solar-

oder Windenergie betrieben wird, werden CO<sub>2</sub> Emissionen vermieden und der „Carbon-Footprint“ wird reduziert.

### Die neuartige Membranelektroden-einheit

Der Kern des ecMR Syntheseprozesses ist die so genannte Membranelektroden-einheit (MEA). An der Anode findet die Sauerstoffentwicklung statt, und an der Kathode die Reduktion von N<sub>2</sub> zu NH<sub>3</sub>. Die Hauptnebenreaktion an der Kathode ist die Freisetzung von molekularem H<sub>2</sub> durch die Reduktion von Protonen H<sup>+</sup>. Die hier verwendete MEA besteht aus drei Elementen (a) einer Iridium Mischmetalloxid (IrMMO) Anode, (b) einer Polymerkationenaustauschermembran (CEM) und (c) einer Titan Kathode für die N<sub>2</sub> Reduktion, siehe Bild 2.

Die MEA wird durch heißes Verpressen der Metallelektroden mit der Polymermembran hergestellt. Dabei wird eine möglichst große Dreiphasengrenze zwischen Reaktionsgas, Elektrode

und Membran erzeugt. Der Einsatz der MEA ermöglicht es, zwei eigentlich unabhängige Reaktionen miteinander zu koppeln. Durch Anlegen eines Potentials zwischen Anode und Kathode wird ein elektrisches Feld erzeugt, in dem die Protonen von der Anode zur Kathode wandern. Die zugeführte elektrische Energie wird als Triebkraft für zwei ansonsten spontan nicht stattfindende Reaktionen genutzt. Durch die räumliche Trennung von Anode und Kathode können gezielt zwei selektive Katalysatoren – hier IrMMO und Titan – eingesetzt werden, um die Gesamteffizienz zu maximieren. Die Vorteile der MEA sind ihre mechanische und chemische Stabilität sowie das einfache Herstellungsverfahren.

### Der gesamte elektrochemische Syntheseprozess

Für die Validierung des NH<sub>3</sub> Syntheseprozesses unter Einsatz eines ecMR wurde ein Simulationsmodell erarbeitet, das zwei

Modelle miteinander kombiniert: (a) ein mikroskopisches Modell des ecMR, in dem Massen- und Wärmetransportgleichungen und Stoff- und Energiebilanzen gelöst werden und (b) ein makroskopisches Modell des Gesamtprozesses, in das Modell (a) integriert wird. In Modell (b) werden außerdem alle weiteren benötigten Grundoperationen miteinander vereint. Der Gesamtprozess lässt sich in die drei Bereiche Feed-Vorbereitung, den ecMR und die Produktauftrennung untergliedern, siehe Bild 3.

Der erste Bereich ist die Feed-Vorbereitung. Auf der Kathodenseite erfolgt eine kryogene Luftzerlegung. Sauerstoff wird aus dem Gasstrom entfernt, da sonst die ungewollte Nebenreaktion mit Protonen zur Bildung von H<sub>2</sub>O führen könnte. Um Kosten einzusparen, wird auf der Anodenseite günstiger Prozessdampf verwendet. Je nach verfügbarem Druckniveau wird ein Druckventil eingesetzt und der Dampf abgekühlt.

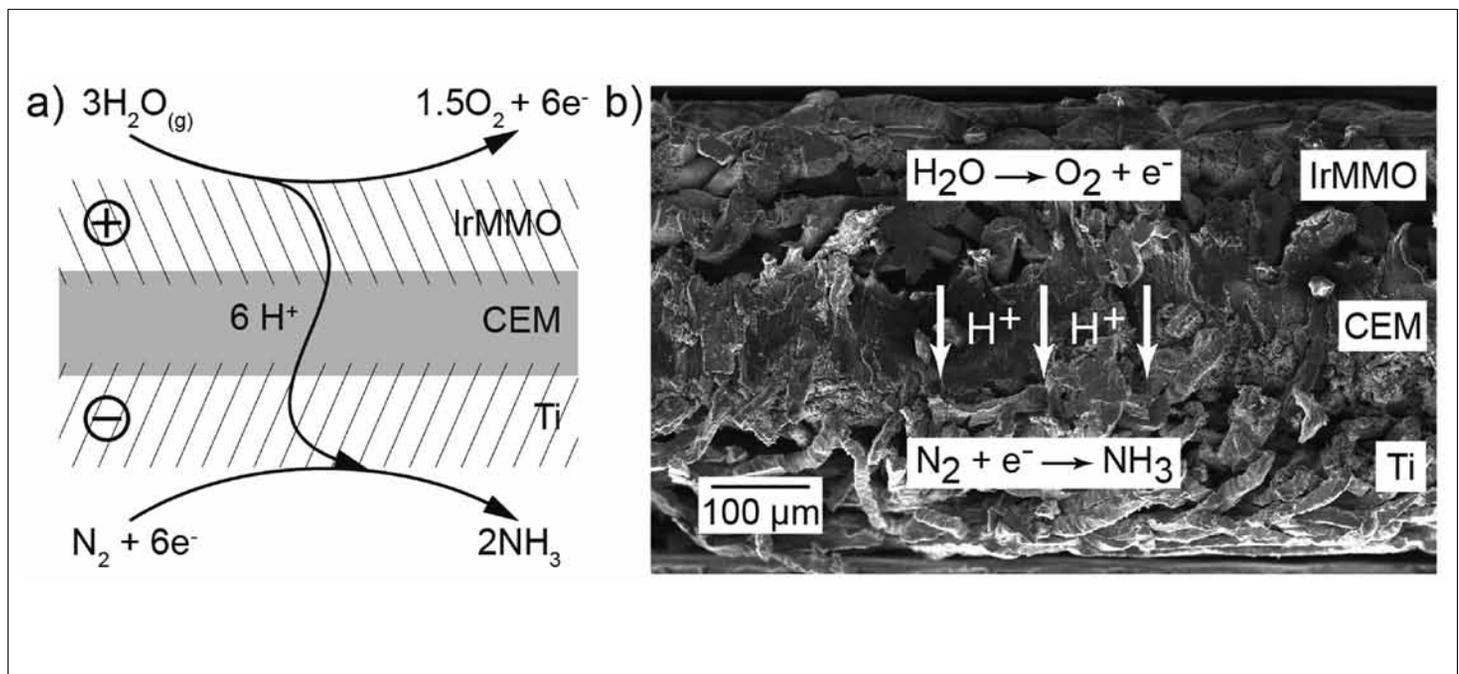


Bild 2: Stattfindende Reaktionen an der MEA: An der Anode wird H<sub>2</sub>O zu O<sub>2</sub> und Protonen oxidiert; Protonen migrieren durch die Ionenaustauschermembran zur Kathode, wo N<sub>2</sub> mit den Protonen zu NH<sub>3</sub> reduziert wird.

Der zweite Bereich ist der ecMR mit der MEA als Kernstück. Die Polymermembran dient als Gasdiffusions- und Elektronenbarriere und trennt die anodische von der kathodischen Halbzelle. In jeder Halbzelle des Reaktors ist ein serpentin­förmiger Kanal eingefräst, der zur gleichmäßigen Verteilung der Reaktionsgase auf der Katalysatoroberfläche beiträgt, siehe Bild 4. Eine externe Spannungsquelle versorgt den Reaktor mit elektrischer Energie.

Der dritte Bereich ist die Auftrennung der Produktströme, um eine Reinheit von 99,5 Prozent für jedes Produkt zu erzielen. Anodenseitig wird  $O_2$  als Nebenprodukt erzeugt, das zur Kostenoptimierung verkauft werden kann. Kathodenseitig besteht der Produktstrom aus nicht reagiertem  $N_2$ , dem eigentlichen Zielprodukt  $NH_3$  und dem Nebenprodukt  $H_2$ . Bei einer Produkteffizienz kleiner 100 Prozent muss  $H_2$  von  $NH_3$  abgetrennt

werden. Beispielhaft wurde hier eine Auftrennung in einer zwei­stufigen Destillation betrachtet. Die hier gewonnenen Resultate können zunächst als Benchmark für eine weitere Optimierung dienen.

#### Ein Vergleich mit dem Haber Bosch Prozess

Um die konzeptionelle Idee des elektrochemischen Membranreaktors für die Ammoniaksynthese mit dem Haber Bosch Verfahren vergleichen zu können, wurden verschiedene Szenarien betrachtet. Variiert wurden das angelegte Zellpotential im Bereich 2,15 bis 2,25 Volt und die Stromeffizienz zwischen 80 und 100 Prozent. Der Referenzfall umfasst hierbei ein Zellpotential des ecMR von 2,20 Volt und eine Stromeffizienz von 100 Prozent. Anhand dieser Fälle kann der Einfluss von verschiedenen Prozessparametern auf den Energiebedarf des Gesamtprozesses evaluiert werden.

Für alle fünf Fälle zeigt sich, dass der ecMR den größten Energiebedarf hat. Der insgesamt niedrigste Energiebedarf von 11,4 Megawattstunden pro Tonne  $NH_3$  wird bei einem Zellpotential von 2,25 Volt und einer Stromeffizienz von 100 Prozent erzielt. Im Vergleich zu zwei Fällen mit niedrigerem Zellpotential bei 100 Prozent Stromeffizienz fällt der Energiebedarf für die Produkt­auftrennung deutlich niedriger aus. Bei niedrigerem Zellpotential und konstanten Flussraten ist der Umsatzgrad geringer und deutlich mehr Produktgasvolumen muss pro Tonne  $NH_3$  aufgetrennt werden.

Im Vergleich zum konventionellen Haber Bosch Verfahren basierend auf  $CH_4$  fällt der Energiebedarf um 3,4 Megawattstunden pro Tonne  $NH_3$  höher aus. Wenn jedoch anstatt  $CH_4$  Kohle als  $H_2$  Quelle herangezogen wird, steigt der Energiebedarf des Haber Bosch Verfahrens auf 13,5

Megawattstunden pro Tonne  $NH_3$  an. Unter diesen Umständen wäre der neuartige elektrochemische Syntheseprozess wettbewerbsfähig und unabhängig von fossilen Energiequellen. Neben der Vermeidung von  $CO_2$  Emissionen weist der ecMR Syntheseprozess aufgrund der niedrigen Betriebstemperaturen und -drücke deutlich geringe Investitionskosten auf. Wenn in Zukunft Kohlereserven leichter zugänglich sein werden als Erdgasvorkommen, könnte die elektrochemische Ammoniaksynthese die Methode der Wahl sein.

#### Ammoniak als Energieträger der Zukunft

Mit steigendem Ausbau der erneuerbaren Energiequellen weltweit wird es mehr und mehr notwendig, elektrische Energie großtechnisch speichern zu können. Eine Möglichkeit ist die Umwandlung von elektrischer in chemische Energie und diese

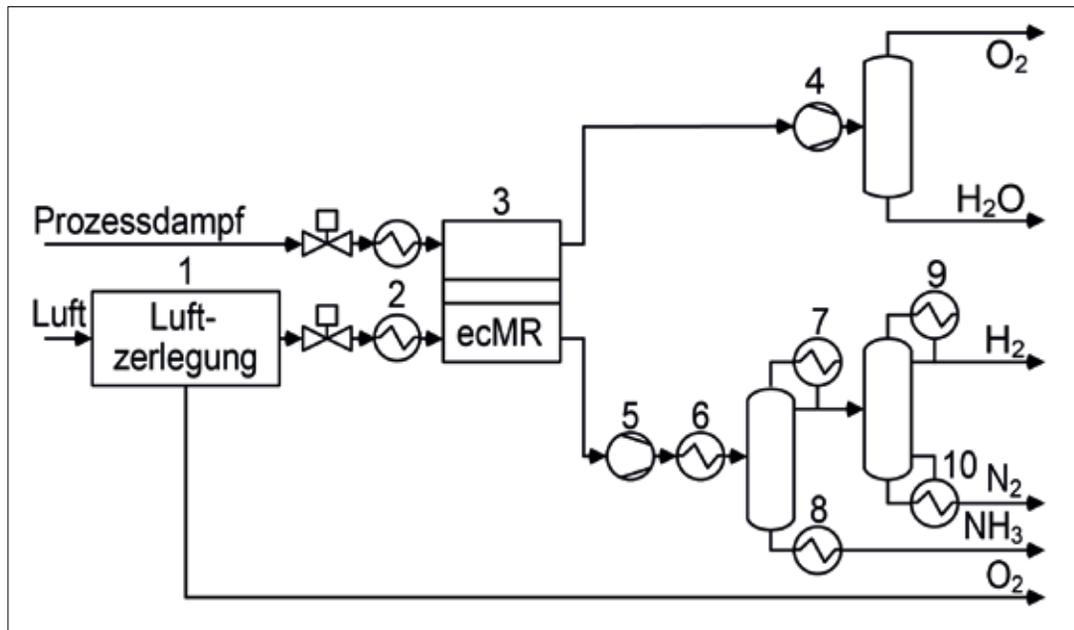


Bild 3: Fließbild des gesamten Syntheseprozesses modelliert in Aspen Plus. Stickstoff wird durch kryogene Luftzerlegung hergestellt, und die Produktströme werden nach dem ecMR aufgetrennt.

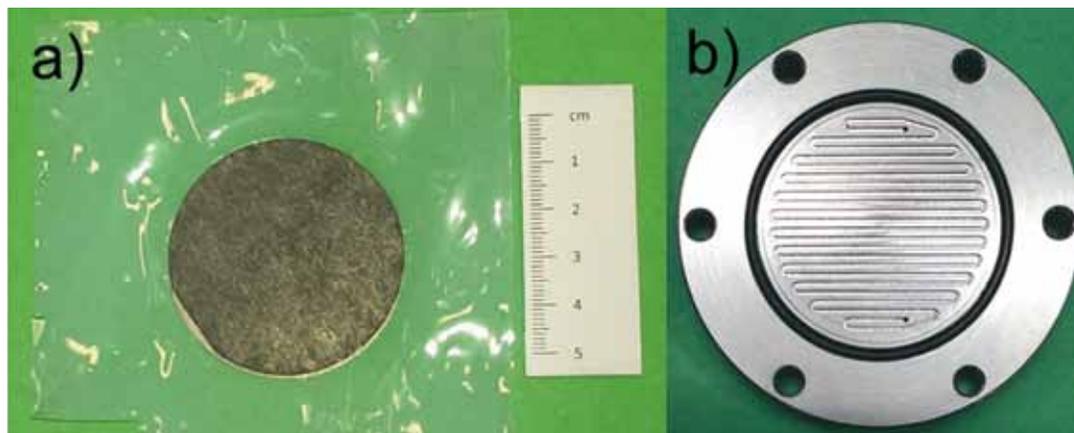


Bild 4: a) Membranelektroden­einheit bestehend aus einer Titan Kathode (Rückseite), Polymerkationenaustauschermembran (milchiges Material) und Iridium Mischmetalloxid Anode (Vorderseite sichtbar) b) Eine Halbzelle des ecMR mit serpentin­förmigem Kanal.

in Chemikalien zu speichern. Vorteilhaft sind die Möglichkeit der Langzeitspeicherung und die Tatsache, dass die Speicherkapazitäten kostengünstig erweitert werden können. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Energiespeicherung sind eine hohe Effizienz der Energieumwandlung, Einsatz von Energie aus vornehmlich erneuerbaren Quellen und möglichst geringe Verlustströme, die entweder recycelt werden können oder umweltverträglich sind. Eine Möglichkeit ist die Kopplung einer Wasserelektrolyse mit einer Brennstoffzelle. Die für die Elektrolyse benötigte Energie und Wärme, um  $\text{H}_2\text{O}$  in  $\text{H}_2$  und  $\text{O}_2$  aufzuspalten, kann durch erneuerbare Energien wie Wind und Solarenergie bereitgestellt werden. Die nun in  $\text{H}_2$  gespeicherte Energie kann in einer Brennstoffzelle wieder freigesetzt werden. Die Round-Trip-Effizienz der oben beschriebenen Prozesse von bis zu 45 Prozent wurde in vielen Studien bewiesen. Die Lagerung und der Transport von  $\text{H}_2$  sind technisch aufwändig und stellen hohe Ansprüche an die verwendeten Materialien. Daher ist eine weitere Chemikalie als Zwischenspeichermedium der in  $\text{H}_2$  vorhandenen Energie notwendig.

Ammoniak ist hierfür sehr gut geeignet, da es großtechnisch leicht gelagert und reversibel in  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2$  zersetzt werden kann. Bei Einsatz in einer Brennstoffzelle entstehen lediglich  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Die auftretenden Verlustströme sind umweltverträglich und leicht auszugleichen. In einem Verbundsystem bestehend aus einer Wasserelektrolyseeinheit, einer

Ammoniaksyntheseeinheit – bevorzugt elektrochemisch, einem Reaktor zur Dissoziation von  $\text{NH}_3$  in  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2$  und einer Wasserstoffbrennstoffzelle können sämtliche Vorteile miteinander kombiniert werden. Um das Potenzial zu identifizieren, wurde ein konzeptioneller Prozessentwurf vorgeschlagen. Zwar wurde in diesem Entwurf eine konventionelle Ammoniaksyntheseeinheit eingesetzt, aber das Konzept ist leicht übertragbar auf die ecMR Technologie. Das Entwurfsprinzip ist die Ausnutzung der Bildungsenthalpie von Ammoniak zum Unterstützen des Betriebs der Elektrolyse und der Brennstoffzelle, damit der gesamte Energieverbrauch reduziert wird. Die Skizze des Entwurfs wird in Bild 5 dargestellt. Zur Untersuchung der erreichbaren Effizienz wurden die ausgewählten Entwurfsparameter anhand eines rigorosen mathematischen Modells optimiert. Das Ergebnis zeigt, dass eine Round-Trip-Effizienz von 60 Prozent erreicht werden kann. Eine weitere Erhöhung des Effizienzwerts ist durch Einsatz globaler Optimierungssoftware möglich. Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass Ammoniak ein aussichtsvoller Energieträger sein kann. Allerdings kann der Erfolg nur dadurch gesichert werden, dass weitere Forschungsaktivitäten in diesem Bereich vorangetrieben werden. Parallel ist es durch die Weiterentwicklung der Schlüsseltechnologien und den Einsatz der Systemmethoden möglich, erneuerbare Energien langfristig und kosteneffizient zu speichern und zu verwerten.

#### Autoren :

Dipl.-Ing. Kurt Kugler war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik.

Univ.-Prof. Alexander Mitsos, Ph.D., ist Inhaber des Lehrstuhls für Systemverfahrenstechnik.

Dipl.-Ing. Ganzhou Wang ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Wessling ist Inhaber des Lehrstuhls für Chemische Verfahrenstechnik und stellvertretender Direktor des DWI Leibniz-Instituts für Interaktive Materialien

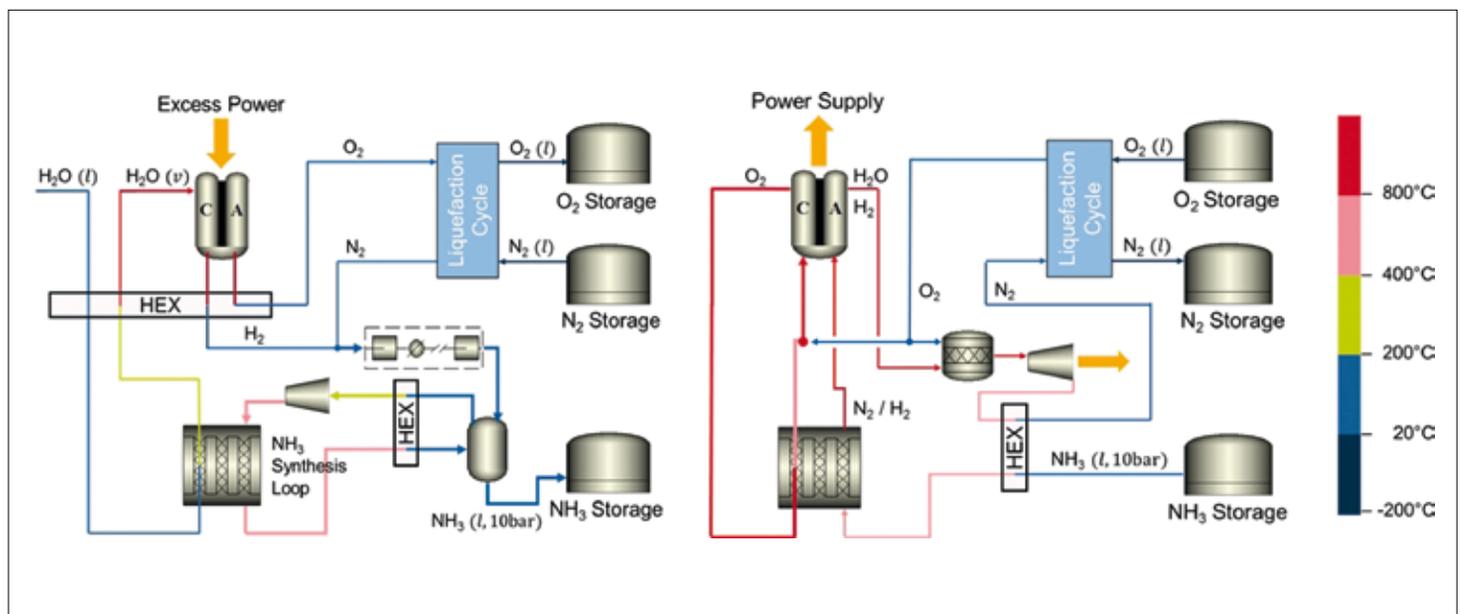
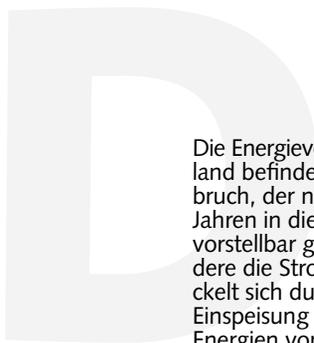


Bild 5: Skizze der Fließbilder des  $\text{NH}_3$ -basierten Energiespeicherungskonzepts. Links: Überschüssiger Strom wird über  $\text{H}_2$  in  $\text{NH}_3$  umgewandelt. Die freigesetzte Bildungsenthalpie während der Ammoniaksynthese unterstützt den Betrieb der Elektrolyse. Rechts: Strom wird in der Brennstoffzelle erzeugt. Die dadurch entstandene Abwärme ermöglicht die  $\text{NH}_3$ -Dissoziation.

# SENSE – Smart Energy und Stadtquartiere



Die Energieversorgung in Deutschland befindet sich in einem Umbruch, der noch vor wenigen Jahren in dieser Intensität nicht vorstellbar gewesen ist. Insbesondere die Stromversorgung entwickelt sich durch die zunehmende Einspeisung von erneuerbaren Energien von einem zentral organisierten, durch Großkraftwerke dominierten System zu einer dezentral ausgerichteten, durch viele kleine Stromerzeuger charakterisierten Versorgungsstruktur.

In dieser neuen Welt der Energietechnik spielen Gebäude und Stadtquartiere eine entscheidende Rolle. Sie sind Teil der dezentralen Stromerzeugung, die durch Photovoltaikanlagen und die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung geprägt ist, und sie können Energie durch ihre Gebäudemassen, Wärme- und Kältespeicher sowie integrierte Batterien speichern. Gleichzeitig verbringen wir über 90 Prozent unseres Lebens in Innenräumen. Damit sind Gebäude unser wichtigster Lebensraum. Unser Komfort sowie unsere Gesundheit stehen in direktem Zusammenhang mit der Qualität des Innenraumklimas. Deshalb müssen neue Techniken für Gebäude entwickelt werden, die den Spagat zwischen den Anforderungen

des Menschen und mehr Energieeffizienz schaffen.

Seit vielen Jahren organisiert das E.ON Energy Research Center (ERC) der RWTH Aachen interdisziplinäre Projekte, in denen mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Forschungsgebieten an intelligenteren Energiesystemen für Gebäude gearbeitet wird. Dabei spielt zunehmend die Daten- und Kommunikationstechnik eine entscheidende Rolle, da nur durch eine Vernetzung unterschiedlicher Komponenten und Informationen mehr Behaglichkeit mit weniger Energie erreicht werden kann. Informationstechnische Lösungen erlauben zudem die bessere Nutzung von Strom aus eigener Erzeugung sowie ein netzdienliches Verhalten eines Gebäudes, bei dem Strom dann verbraucht wird, wenn viel Wind- und Solarenergie zur Verfügung steht. Strom wird nur dann lokal erzeugt, wenn die erneuerbaren Energien im Netz nicht in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

Unter dem Begriff SENSE – Smart Energy Services – werden alle diese Aktivitäten am E.ON ERC und weiteren Instituten der RWTH zusammengefasst. Die Projekte umfassen Studien an Probanden, die uns mehr über

das Empfinden des Menschen verraten sollen. Wann bewerten wir unsere Umgebung als behaglich, wie schnell dürfen sich Temperaturen in einem Raum ändern und wie stark darf es zu Hause, auf der Arbeit oder in einem Shoppingcenter riechen.

Es werden neue Thermostatventile und Wärmepumpen entwickelt, die wissen, wann wir welche Temperatur in einem beliebigen Raum haben möchten. Neue Steckdosen erkennen, welche Spannung für welchen Verbraucher nötig ist. Und das Gebäude versucht ohne unser Zutun, den günstigsten Preis für Strom, Wärme und Kälte zu bekommen.

Alle diese neuen Lösungen basieren auf einer engen Verknüpfung von Energie- und Informationssystemen. Im Rahmen von mehreren, durch die Europäische Gemeinschaft geförderten, Forschungsprojekten wird seit einigen Jahren am „Internet der Dinge“ gearbeitet. Über eine europaweit vernetzte Informationstechnik (Cloud-Computing) sollen netzbasierte Dienstleistungen überall auf Basis allgemeiner verfügbarer Softwaremodule angeboten werden. So können unter Einhaltung aller datenschutzrechtlichen Anforderungen

# Services für Gebäude

## Neue Systeme zur Energieversorgung von Gebäuden

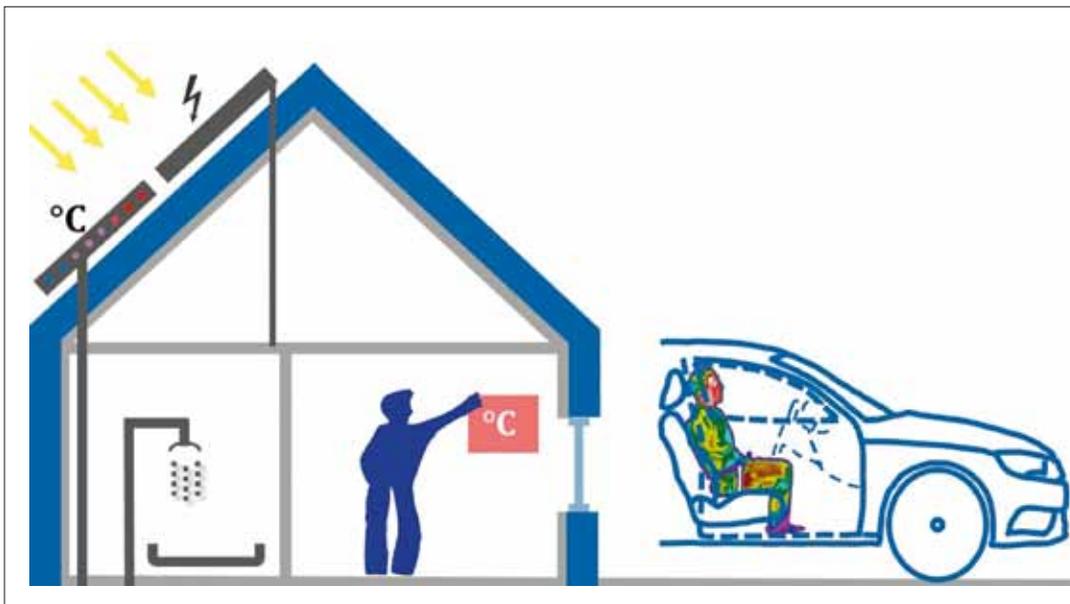


Bild 1: Interaktion zwischen Nutzer und System in Innenräumen.

neue Dienstleistungen für mehr Komfort und Energieeffizienz angeboten werden: SENSE – Smart Energy Services.

Die Informationstechnik darf den Nutzer in der Handhabung der Anlagentechnik jedoch nicht überfordern und muss in der Lage sein, in einfacher Form mit ihm zu kommunizieren und weiterhin Eingriffsmöglichkeiten oder Rückmeldemöglichkeiten zu erlauben. So haben die Forscher das Bedürfnis des Nutzers, am Thermostatventil zu drehen, aufgegriffen und nutzen dieses Signal, um das System besser an die individuellen Nutzerbedürfnisse anzupassen. Aus der Rückmeldung kann die gewünschte Raumsolltemperatur abgeleitet werden und auf Phasen von Nichtanwesenheit rückgeschlossen werden. Ist der Nutzer nicht zu Hause, wird die Raumtemperatur abgesenkt und Energie eingespart. Vor der Rückkehr des Nutzers wird die Temperatur rechtzeitig wieder auf die vorher erlernte Raumsolltemperatur angehoben und damit der Nutzerkomfort erhöht.

Da Energieeinsparungen nicht zu Einschränkungen des Nutzerkomforts führen dürfen, ist die Arbeit mit Probanden ein wichtiger Teil der Forschung. Nutzerverhalten und Komfort-

empfinden sind interdisziplinäre Themengebiete, die die Zusammenarbeit mit Experten weiterer Fachdisziplinen, wie beispielsweise aus dem Bereich der Medizin oder Psychologie, erfordern. So wurde in einem Projekt untersucht, in welchem Maße die menschliche Leistungsfähigkeit durch moderaten Hitzestress beeinflusst wird. Gleichzeitig werden in anderen Projekten ähnliche Fragestellungen im Bereich der Luftqualität untersucht. Da wir Menschen viel Zeit in Innenräumen verbringen, sind diese Erkenntnisse wichtig, um ein gesundes und leistungsförderndes Innenraumklima anbieten zu können.

Arbeiten zur thermischen Behaglichkeit umfassen jedoch nicht nur den Gebäudebereich, sondern beschäftigen sich auch mit Fragestellungen aus der Automobil- und Flugzeugbranche. Auch hier müssen effiziente Fahrzeuge beziehungsweise Flugzeuge der Zukunft mit innovativer Heiz- und Klimatechnik ausgestattet werden, um ökologischen Anforderungen gerecht zu werden. So führt beispielsweise die Verwendung konventioneller Heiz- und Kühlsysteme in Elektrofahrzeugen zu sehr empfindlichen Einbußen in der Reichweite, so-

dass mehr Batterien als notwendig mitgeführt werden müssen. Aus der Gebäudetechnik stammende Forschungsansätze zur thermischen Ergonomie werden weiterentwickelt, um Modelle zur Bewertung körpernah und lokal wirkender Konditionierungsmethoden bewerten zu können. Mit diesen Methoden können künftige Heiz- und Klimatisierungssysteme ausgelegt werden, die Qualitätseinbußen bei der Behaglichkeit – und damit hinsichtlich der Nutzerakzeptanz – vermeiden. So wurden beispielsweise in mehreren Forschungsprojekten mit der deutschen Automobilindustrie Probandenstudien zur Kompensation kalter Umgebungsbedingungen durch lokal wirkende und deutlich energieeffizientere Heizsysteme einschließlich der Kontaktwärmeübertragung durchgeführt. Ziel der Entwicklungen ist es zudem, eine neuartige, energieeffiziente und auf einem Behaglichkeitsmodell basierende Klimaregelung umzusetzen.

Für Gebäudeenergiesysteme kommen neben dem Nutzer noch weitere individuelle Randbedingungen, wie beispielsweise das Wetter oder Gebäudeeigenschaften, im Betrieb hinzu. Um neue Energieversorgungskonzepte rea-



*Bild 2: Wer hat Recht, Mensch oder Technik?  
Prüfstand zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit  
in Innenräumen der Zukunft.  
Foto: E.ON Eon Research Center Peter Winandy*



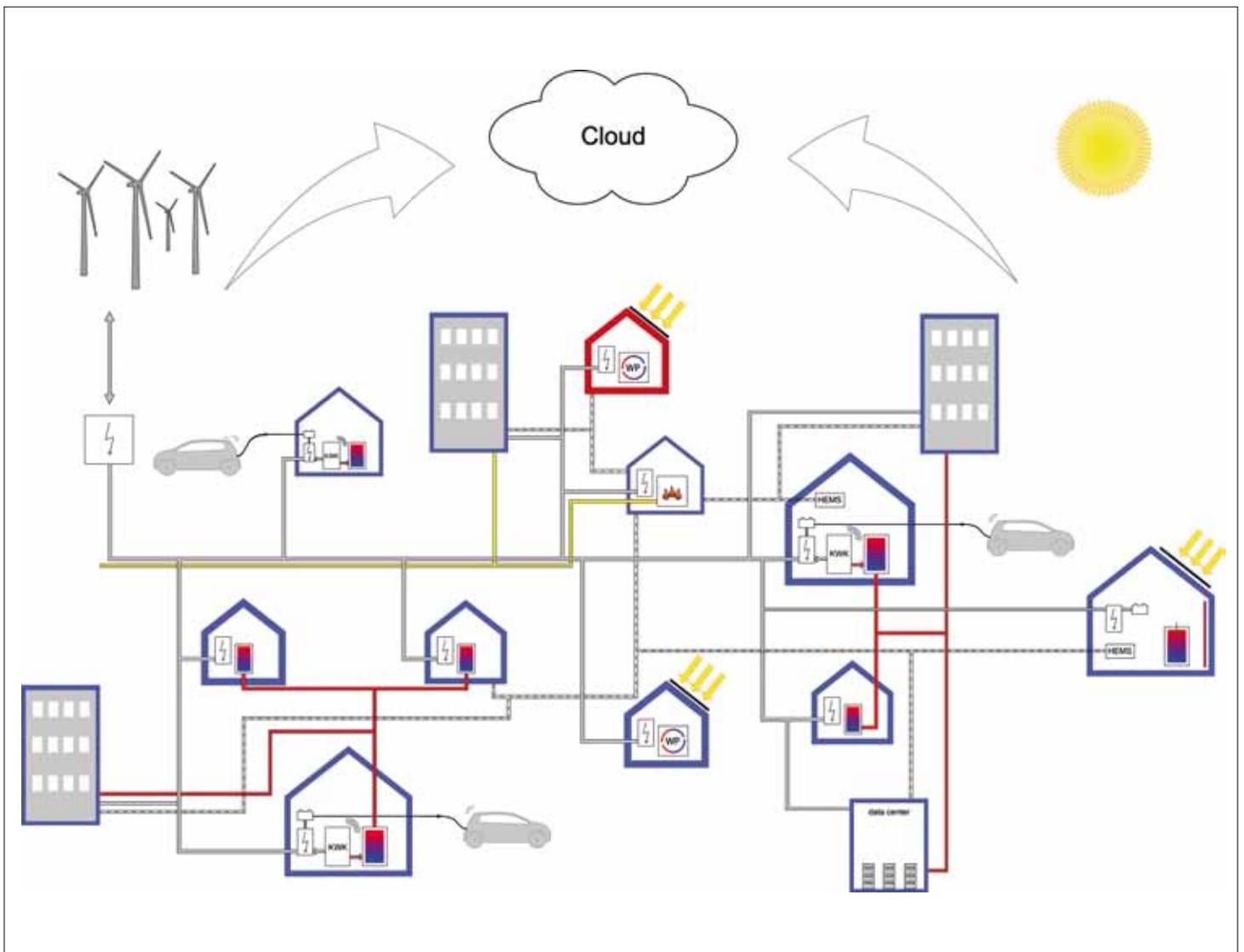


Bild 3: Die Stadt als Teil einer dezentralen regenerativen Energieversorgung.

60

litätsnah und dennoch unter kontrollierbaren Randbedingungen entwickeln und testen zu können, holen sich die Wissenschaftler Teile der Energieversorgungskette ins Labor und ergänzen die fehlenden Elemente über Simulationen. So kann in den Laborräumen des E.ON Energy Research Centers eine Wärmepumpe zusammen mit einem Trinkwarmwasserspeicher in einer virtuellen Umgebung betrieben werden. Die Steuerung der Wärmepumpe übernimmt ein intelligenter Regler, dem die Ingenieure mögliche Signale eines „smarten“ Versorgungsnetzes, wie flexibler Strompreis oder ein Signal der Netzüberlastung, vorgeben. Der Regler passt den Betrieb der Wärmepumpe netzdienlich an und muss dabei den Komfort des Nutzers sicherstellen.

Die Vorlauftemperatur für die Heizung muss zu jedem Zeitpunkt ausreichend hoch sein und der Speicher muss den prognostizierten Trinkwarmwasserbedarf abdecken können. Die Wärmepumpe und der Speicher sind an

ein hydraulisches System angeschlossen, das Massenströme und Temperaturen so variiert, als müsse ein reales Haus als Verbraucher versorgt werden. Tatsächlich werden die Parameter aber über eine Simulation des Gebäudes mit einem bestimmten Nutzerverhalten und Wetterrandbedingungen bestimmt. Die Vorgaben in der Simulation sind dabei beliebig. Heute kann es sich um ein kleines Haus in Aachen mit drei Nutzern handeln, morgen wird der gleiche Aufbau mit einem virtuellen Haus in Südfrankreich betrieben. So entsteht ein flexibler Baukasten, in dem verschiedene Systemkombinationen auf Effizienz und Stabilität unter unterschiedlichen Randbedingungen im Labor getestet werden können.

Einen Schritt weiter gehen Simulationen, in denen ganze Stadtquartiere abgebildet werden können. Stadtquartiere zeichnen sich durch eine Mischung aus unterschiedlichen dezentralen Energiewandlern, wie Wärmepumpen und Systemen der Kraft-Wärme-Kopplung, aus. Zusätzlich

gibt es in den einzelnen Gebäuden Warmwasser- und Pufferspeicher sowie die Speicherkapazität der Gebäudemassen. Mit dieser gewaltigen Speicherkapazität eines Stadtquartiers kann sich das energietechnische System flexibel an die Bedürfnisse einer regenerativen Stromerzeugung anpassen.

Wenn die Sonne scheint und der Wind weht, wird Strom über den Betrieb von Wärmepumpen in Wärme umgewandelt. Überschüssige Wärme wird gespeichert. Bei geringen Beiträgen von Wind- und Solarenergie unterstützt eine Stromerzeugung aus der Kraft-Wärme-Kopplung das Netz. Über Kenntnisse des Wärmebedarfs und des Nutzerverhaltens kann jedes Gebäude seine Kapazitäten abschätzen und am Angebot von Dienstleistungen für die Sicherstellung einer stabilen Stromversorgung teilnehmen.

In einer interdisziplinären Gruppe arbeitet das SENSE-Team an einer neuen Kombination von realer Hardware mit Gebäude-, Anlagen- und Netzsimulatio-

nen, um über das „Internet der Dinge“ Energiedienstleistungen in einem Stadtquartier steuern und optimieren zu können. Eine dezentrale Energieversorgung erfordert eine gute Vernetzung aller Erzeuger und Verbraucher in einem Versorgungsgebiet. Durch diese geänderte Organisation unserer Energienetze entstehen gleichzeitig viele neue Möglichkeiten, die allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern spannende Aufgabenfelder liefern werden.

#### Autoren:

Univ.-Prof. Antonello Monti, Ph.D., ist Inhaber des Lehrstuhls für Automation of Complex Power Systems. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller ist Inhaber des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck ist Inhaber des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen.



Hochmodularer Aufbau für Untersuchungen zum thermischen Komfort: Aachen Comfort Cube (ACCu).  
Foto: E.ON Eon Research Center Peter Winandy

### Neuer Pavillon aus Textilbeton

Ein neuer Pavillon aus Textilbeton demonstriert in der Mies-van-der-Rohe-Straße die Leistungsfähigkeit des innovativen Kompositwerkstoffs Textilbeton: Vier Textilbetonschalen mit Abmessungen von sieben mal sieben Metern und einer Dicke von lediglich sechs Zentimetern bilden das Dach des allseitig verglasten Pavillons. Als Bewehrungsmaterial kamen technische Textilien aus hochfesten Carbonfasern zum Einsatz. In ihrer Mitte lagern die filigranen Betonschalen jeweils auf einer einzelnen Stahlbetonstütze auf und überspannen eine Nutzfläche von etwa 200 Quadratmetern. Der Pavillon steht primär den Studierenden der Fakultät für Bauingenieurwesen als Lernraum zur Verfügung.

Im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich (SFB) 532 „Textilbewehrter Beton – Entwicklung einer neuartigen Technologie“, wurde in den letzten zwölf Jahren interdisziplinär geforscht. An dem SFB beteiligten sich unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger vom Institut für Massivbau zehn weitere RWTH-Institute aus den Fachbereichen Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Naturwissenschaften und Architektur.

### Rektor ist „President-Elect“ von CESAER

Der europäische Verbund Technischer Universitäten, kurz CESAER (Conference of European Schools for Advanced Engineering and Research), wählte Rektor Ernst Schmachtenberg in sein Management Committee. CESAER bündelt die Interessen der europäischen technischen Universitäten. Über 50 europäische Universitäten und Hochschulen mit technischem Schwerpunkt sind hier vertreten. Mit dem Verbund werden exzellente Lehre und Forschung in den Ingenieurwissenschaften und Innovationen gefördert. Das Management Committee leitet den Verbund.

### Mit Bundeskanzler-Stipendium an die RWTH Aachen

Liudmila Prisiazhnaia aus Russland erhielt ein Bundeskanzler-Stipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung und entschied sich für einen Aufenthalt an der RWTH Aachen. Das Stipendium unter Schirmherrschaft der Bundeskanzlerin der Bundesrepublik Deutschland wird vom Auswärtigen Amt finanziert. Es wird an jeweils bis zu zehn angehende Führungskräfte aus Brasilien, China, Indien, Russland und den USA vergeben. Die Kandidaten müssen zuvor in den Bereichen Politik, Wirtschaft, Medien, Verwaltung, Gesellschaft oder Kultur tätig gewesen sein. Während des einjährigen Aufenthalts in Deutschland können die Stipendiaten ein eigenständig konzipiertes Projekt bei einem selbst gewählten Gastgeber durchführen. Zusätzlich sollen sie sich vernetzen und nach Antworten auf die globalen Fragen unserer Zeit suchen. Prisiazhnaia wird am Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik unter Leitung von Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uwe Sauer die Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland analysieren. Neben der Dynamik in Forschung und Entwicklung interessiert sie sich für die Wirkungen von Feldversuchen, die zum Beispiel im Rahmen des Förderprogramms „Schaufenster Elektromobilität“ der Bundesregierung durchgeführt werden. Abschließend will sie mögliche Ansätze zur Förderung der Entwicklung von Elektromobilität in Russland ableiten.

### Gustav-Hertz-Preis für Thomas Bretz

Thomas Bretz, Juniorprofessor für Experimentelle Astroteilchenphysik, erhielt den Gustav-Hertz-Preis 2015 der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Dieser ist mit 7.500 Euro dotiert und zeichnet eine hervorragende Arbeit der experimentellen oder theoretischen Physik aus. Bretz bekommt den Preis gemeinsam mit Daniela Dorner, beide haben als Mitarbeiter der Universität Würzburg im Rahmen eines deutsch-schweizerischen Projekts gearbeitet. Darüber hinaus waren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der TU Dortmund, der ETH Zürich und der Universität Genf beteiligt.

Bretz und Dorner haben zur Verbesserung der Tscherenkow-Teleskope beigetragen: Mit einer neuartigen Kameratechnologie ist die lückenlose Beobachtung von Quellen kosmischer Gammastrahlung jetzt auch bei hellem Mondlicht möglich. Auf der Kanareninsel La Palma wird die Technologie bereits in einem Observatorium, dem „First G-APD Cherenkov Telescope“ (FACT) eingesetzt.

### ERC Starting Grants für drei RWTH-Wissenschaftler

Die RWTH-Wissenschaftler Martin Salinga, Franziska Schoenebeck und Norbert Schuch erhielten einen Starting Grant des Europäischen Forschungsrates (ERC). In einem zweistufigen Verfahren haben sich die drei im Wettbewerb der europäischen Nachwuchselite erfolgreich behauptet. Sie erhalten für ihre Projekte jeweils eine Förderung von bis zu 1,5 Millionen Euro, verteilt auf fünf Jahre. Mit den Starting Grants für exzellenten Wissenschaftsnachwuchs in Europa bietet der Europäische Forschungsrat lukrative Möglichkeiten Grundlagenforschung zu betreiben und ein eigenes Forschungsteam auszubauen. Der ERC fördert bahnbrechende Forschung, bei der die Grenzen zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung, zwischen klassischen Disziplinen und zwischen Forschung und Technologie aufgehoben werden. Die Attraktivität des europäischen Forschungsraums soll so gesteigert werden. Dr. Martin Salinga vom Institut für Physik neuer Materialien forscht zur Dynamik amorpher Halbleiter in neuromorpher Elektronik. Professorin Dr. Franziska Schoenebeck vom Lehr- und Forschungsgebiet Synthetische Organische Chemie entwickelt Konzepte für die Katalyse. Professor Dr. Norbert Schuch, Juniorprofessor für Theoretische Physik (kondensierte Materie), will komplexe Quantensysteme verstehen.

### **RWTH nutzt Software der TU Graz**

Rektor Ernst Schmachtenberg und sein Amtskollege Prof. Dr. Dr. Harald Kainz von der TU Graz unterzeichneten im Rahmen eines Besuchs einen Vertrag, in dem die Nutzung der in Graz entwickelten Software CAMPUSonline durch die RWTH Aachen bis zum Jahr 2032 festgeschrieben wurde. Im Rahmen eines zweistufigen Auswahlverfahrens fiel die Entscheidung zu Gunsten des integrierten Campus-Management-Systems aus Graz. Dieses wird bereits von weiteren Universitäten wie der TU München und den Universitäten Köln und Stuttgart eingesetzt. Mit Hilfe von CAMPUSonline sollen künftig alle wichtigen Bereiche rund um die Organisation von Studium und Lehre unterstützt werden. Dazu zählen beispielsweise die Prozesse rund um Bewerbung, Zulassung und Prüfungen sowie das Studierenden-, Veranstaltungs- und Lehrraummanagement. Die Einführung der Software erfolgt ab sofort und soll zum Dezember 2018 abgeschlossen sein. Bis dahin wird die Software schrittweise an RWTH-Bedürfnisse angepasst und weiterentwickelt.

### **Auszeichnung für drei Wissenschaftler**

Die RWTH-Wissenschaftler Dr.rer.nat. John Kettler, Dr. Alexander J. C. Kühne und Dr.-Ing. Jaan-Willem Simon wurden in das Junge Kolleg der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften und der Künste aufgenommen. Dieses wurde 2006 zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses mit finanzieller Unterstützung der Stiftung Mercator gegründet. Seit 2014 hat das Land Nordrhein-Westfalen die Finanzierung übernommen. Die Aufnahme in das Junge Kolleg gehört zu den bedeutendsten Auszeichnungen für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Nordrhein-Westfalen. Bis zu 30 Vertreter und Vertreterinnen aller Fachrichtungen können für die Dauer von maximal vier Jahren berufen werden. Sie erhalten ein jährliches Stipendium in Höhe von 10.000 Euro und nehmen am Akademie-Leben teil. Voraussetzung für die Mitgliedschaft sind neben der Promotion herausragende wissenschaftliche Leistungen an einer Hochschule oder Forschungseinrichtung in Nordrhein-Westfalen. Zum Zeitpunkt der Aufnahme dürfen die Mitglieder nicht älter als 36 Jahre sein. Im Jungen Kolleg haben sie die Möglichkeit, ihre Projekte in interdisziplinären Arbeitsgruppen zu diskutieren.

John Kettler ist seit 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Nukleare Entsorgung und Techniktransfer. Er arbeitet in der Kernstrahlungsmesstechnik, hier insbesondere an der Entwicklung von zerstörungsfreien Technologien für die Charakterisierung von radioaktiven Reststoffen. Alexander J. C. Kühne ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am DWI - Leibniz-Institut für Interaktive Materialien. Kühne erforscht die Herstellung von Opalen aus künstlichen Materialien. Jaan-Willem Simon ist Oberingenieur am Institut für Angewandte Mechanik. Schwerpunkt seiner Forschung sind hochbelastbare Faserverbundbauteile, erforscht werden Materialverhalten und Versagensmechanismen.

### **Zwei Projekte zur Mensch-Technik-Interaktion erhalten Förderung des BMBF**

Die Wissenschaftler Yves-Simon Gloy, Institut für Textiltechnik, und Alexander Mertens, Institut für Arbeitswissenschaft, sind Gewinner im Wettbewerb „Interdisziplinärer Kompetenzaufbau – Mensch-Technik-Interaktion für den demografischen Wandel“. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hatte diesen für Postdoktorandinnen und Postdoktoranden ausgeschrieben. Gloy sowie Mertens können nun mit Fördermitteln des BMBF für die nächsten fünf Jahre jeweils eine eigene universitäre Nachwuchsgruppe aufbauen. Voraussetzung ist, dass die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler interdisziplinär arbeiten und die alternde Gesellschaft thematisch im Mittelpunkt steht. Die Forschungsgruppe von Dr.-Ing. Yves-Simon Gloy, Adjunct Professor der Clemson University in South Carolina, arbeitet zum Thema „Neue soziotechnische Systeme in der Textilbranche (SozioTex)“. Das BMBF finanziert diese Forschung mit 2,5 Millionen Euro. Dr.-Ing. Dr.rer.med. Dipl.-Inform. Alexander Mertens und seine Kollegen entwickeln Lösungen für eine „Alters- und altersgerechte Mensch-Technik-Interaktion mit telemedizinischen Systemen und Dienstleistungen (TECH4AGE)“. Sie erhalten 2,63 Millionen Euro Förderung durch das BMBF.

# Namen & Nachrichten

#### **Code Week Award für RWTH-Feriencamp**

Das „Informatik-Feriencamp für Weltverbesserer“ der RWTH wurde mit dem Code Week Award ausgezeichnet. Das Feriencamp ist eines der Projekte von InfoSphere, dem Schülerlabor Informatik der RWTH Aachen. Der Code Week Award wurde 2014 von der Technologiestiftung Berlin in Kooperation mit dem Design Research Lab Berlin ausgeschrieben und wird an Initiativen für Workshop-Reihen oder andere Formate vergeben. Unter den Gesichtspunkten pädagogisches Konzept, Gleichberechtigung, Vielfältigkeit, Nachhaltigkeit und Methodik entscheidet eine Jury über die Vergabe. Das Team von InfoSphere erhielt 10.000 Euro und kann damit zwei „Informatik-Feriencamps für Weltverbesserer“ mit Übernachtung anbieten. Hieran können Schülerinnen und Schüler ab Klasse 8 kostenfrei teilnehmen.

#### **HICAST - Exzellenz für nachhaltige Technologien**

Bruno Piacenza vom Henkel-Vorstand und Rektor Ernst Schmachtenberg eröffneten in Aachen gemeinsam den „Henkel Innovation Campus für Advanced Sustainable Technologie“, kurz HICAST. Henkel stellt bis zu fünf Millionen Euro für die Kooperation im Bereich Wasch- und Reinigungsmittel zur Verfügung. Dort arbeitet Henkel künftig mit den vier Professorinnen und Professoren Alexander Böker, Regina Palkovits, Walter Richtering und Ulrich Schwaneberg aus dem Bereich Chemie und Biotechnologie der RWTH und dem DWI-Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in einem grundlagenorientierten Forschungscluster zusammen. „Innovationen sind ein wesentlicher Wachstumstreiber. Und wir wissen um das Talent und die Kreativität von Experten außerhalb des Unternehmens“, so Bruno Piacenza. „Deshalb setzen wir auf ‚Open Innovation‘, das heißt die Einbindung von externen Partnern wie Universitäten und Studenten, Forschungsinstituten, Lieferanten oder Kunden.“

„Wir schätzen es sehr, dass ein internationaler Konzern wie Henkel die RWTH als Kooperationspartner für angewandte Grundlagenforschung in einem Forschungscluster ausgewählt hat“, betonte Ernst Schmachtenberg.

Der Schwerpunkt des HICAST liegt in der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Verfahrenstechnik, Chemie und Biotechnologie. So werden im Bereich Molecular Science und Engineering biobasierte, innovative Rohstoffe entwickelt. Die Arbeitsgruppen aus Chemie und Biotechnologie erforschen auf dieser Basis fundamental neue, leistungsstarke und zugleich ressourcenschonende Inhaltsstoffe für die Wasch- und Reinigungsmittel der Zukunft.

#### **Adolf-von-Baeyer-Denkmünze geht an Carsten Bolm**

Dieses Jahr geht die Adolf-von-Baeyer-Denkmünze an Professor Dr. rer. nat. Carsten Bolm vom Institut für Organische Chemie für seine „großartigen Beiträge zur asymmetrischen Katalyse mit Übergangsmetallen“.

Die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) verleiht die Denkmünze alle zwei Jahre an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für ihre hervorragenden Arbeiten auf dem Gebiet der organischen Chemie. Carsten Bolms Hauptarbeitsgebiet ist die Katalyseforschung sowie die Suche nach neuen Reaktionswegen zur gezielten Herstellung bioaktiver Wirkstoffe. Darüber hinaus forscht er im Rahmen des Exzellenzclusters „Tailor-Made Fuels from Biomass“ an der Verwertung von Lignin. Er wurde mehrfach ausgezeichnet, unter anderem mit dem Otto-Bayer-Preis, Otto-Klung-Preis und Heinz Maier-Leibnitz-Preis. 2014 gehörte er zu den Thomson Reuters Highly Cited Researchers, Anfang 2015 wurde er in der britischen Royal Society of Chemistry zum „Fellow“ ernannt. Bolm ist Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirats des Leibniz-Instituts für Organische Katalyse in Rostock.

# Namen & Nachrichten

### **Liudmyla Goncharenko erhält DAAD-Preis**

Mit dem DAAD-Preis vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) wurde Liudmyla Goncharenko für „hervorragende Leistungen und außerordentliches ehrenamtliches Engagement ausländischer Studierender“ ausgezeichnet. Die Preisträgerin aus der Ukraine engagiert sich sozial und interkulturell in verschiedenen Bereichen. Sie war Mitglied des Seniorats des Europastudiengangs und beteiligte sich an der Gremienarbeit. Sie beriet Studierende bei der Organisation ihres Studiums und vermittelte als Mitglied des Seniorats zwischen den Studierenden und Lehrenden ihres Fachbereiches. Im November 2012 gründete sie mit einigen russischen Kommilitoninnen und Kommilitonen den Verein VerSA, der sich für die interkulturelle Verständigung und Integration von russischen Studierenden einsetzt. Darüber hinaus engagierte sich Goncharenko im Allgemeinen Studierendenausschuss (AStA) und in der studentischen Vereinigung INCAS (Interkulturelles Centrum Aachener Studierender). Der DAAD-Preis ist mit 1.000 Euro dotiert.

### **RWTH und TU München koordinieren DFG-Schwerpunktprogramm**

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat das Schwerpunktprogramm „Cyber-Physical Networking“ bewilligt, dieses wurde gemeinsam von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Universität des Saarlandes, den Technischen Universitäten München, Dortmund und Berlin sowie der RWTH Aachen beantragt. Professor Dr.-Ing. Klaus Wehrle vom RWTH-Lehrstuhl für Informatik 4 (Kommunikation und verteilte Systeme) und Professorin Dr.-Ing. Sandra Hirche von der TU München koordinieren das neue DFG-Schwerpunktprogramm. Ab Beginn des Jahres 2016 wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Informatik, der Elektro- sowie der Regelungstechnik interdisziplinär zusammenarbeiten, um den Forschungs- und IT-Standort Deutschland nachhaltig zu stärken. In einem cyber-physischen System interagieren informatische, softwaretechnische Komponenten mit mechanischen oder elektrotechnischen. Innerhalb des Systems kommunizieren die Komponenten über eine Dateninfrastruktur, zum Beispiel über das Internet. Der Betrieb der cyber-physischen Systeme erfordert enge und zuverlässige Kommunikations- und Rechenmethoden. Diese Regelungsprozesse funktionieren ohne menschliche Beteiligung und werden geografisch verteilt koordiniert. Daher müssen künftig Kommunikationstechnologie, Betriebssystem und Regelkreise eng und mit möglichst niedrigen Verzögerungen, den so genannten Latenzen, gekoppelt werden, um zuverlässig zu arbeiten. Die Forscher wollen die bislang weitgehend getrennten Methodiken ihrer Disziplinen integrieren, um so eine zuverlässige Optimierung zu erreichen.

### **Europäische Union zeichnet Klaus Wehrle aus**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Wehrle, Inhaber des Lehrstuhls für Informatik 4 (Kommunikation und verteilte Systeme), erhielt für ein Forschungsprojekt zu zuverlässig vernetzten Systemen einen ERC Consolidator Grant. Diese Auszeichnung der Europäischen Kommission geht an herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, deren Promotion sieben bis zwölf Jahre zurückliegt. Wehrle wird jetzt für seine Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts SYMBIOSYS mit insgesamt zwei Millionen Euro gefördert.

Die Vernetzung von Menschen, Maschinen und alltäglichen Abläufen über das Internet ist Bestandteil unserer heutigen Informationsgesellschaft. Smartphones und Apps erlauben Koordinations- und Kooperationsmöglichkeiten, sie beeinflussen viele Aspekte des Alltags. Entwicklungen wie Cloud Computing, Cyber-Physical Systems (CPS) und das Internet der Dinge (IoT) werden diese Möglichkeiten deutlich erhöhen. Damit einhergehend wird nicht nur die Anzahl, sondern auch der Grad der Vernetzung, die gegenseitige Abhängigkeit und die Komplexität der vernetzten Systeme um viele Größenordnungen steigen. Software- und Designfehler können hierbei in Form von Systemausfällen, Inkompatibilitäten oder Sicherheitslücken zu massiven Kosten und Problemen führen.

Im Rahmen des Projekts SYMBIOSYS wollen Wehrle und sein Team die Verlässlichkeit und Interoperabilität vernetzter Systeme sicherstellen. SYMBIOSYS wird hierfür das Konzept der symbolischen Programmanalyse erstmals für vernetzte Systeme erforschen. Die Innovation besteht darin, verteilte und zeitlich unbestimmte Ausführungspfade mit gleichem Programmverhalten in Klassen gleichen Verhaltens zusammenzufassen. Durch diese Reduktion der immensen Anzahl möglicher Ausführungspfade wird eine umfassende Analyse ermöglicht. Wehrle studierte und promovierte an der Universität Karlsruhe (heute KIT). Nach Stationen in Berkeley (Postdoc) und Tübingen (DFG Emmy Noether Nachwuchsgruppe) wurde er 2006 an die RWTH Aachen berufen. Seit 2010 ist er Inhaber des RWTH-Lehrstuhls für Informatik 4 (Kommunikation und verteilte Systeme). Darüber hinaus ist Wehrle ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (ACATECH) sowie Sprecher der Fachgruppe Kommunikation und Verteilte Systeme der Gesellschaft für Informatik (GI) und der Informationstechnischen Gesellschaft im VDE.

# BAUINGENIEUR WESEN



## IN DER NÄCHSTEN AUSGABE

Hochwasserrisikomanagement mit Serious Games

Fahrplankonstruktion und Disposition im Eisenbahnwesen

Die Leichtigkeit des Betons

Generationsprojekt Emscherkanal

Gender and Diversity: Auf zu neuen Ufern

# Gute Aussichten für Absolventen



**Werfen Sie einen Blick in die Zukunft – im neuen Zentrum für Forschung und Vorausbildung in Renningen.** Hier entwickeln wir Spitzentechnologien von morgen, zum Beispiel in den Themenfeldern Robotik, Internet der Dinge, Batterie- und Sensortechnik und Industrie 4.0. Ein innovatives Raum- und Architekturkonzept ermöglicht vollkommen neue, flexible Formen interdisziplinärer Zusammenarbeit. International vernetzt, mit viel kreativem Freiraum mitten im Grünen – ideale Aussichten für Ihre Karriere!



**BOSCH**  
Technik fürs Leben



[www.bosch-renningen.de](http://www.bosch-renningen.de)  
[www.bosch-career.de](http://www.bosch-career.de)



# Energy, Chemical & Process Engineering

**RWTHAACHEN  
UNIVERSITY**