



# RWTH THEMEN

Forschungsmagazin

1/2023

Energieversorgung und Energiesicherheit



Foto: Peter Winandy

# Inhalt

- 6 **Automatisierung der Verteilnetze**  
Versorgungssicherheit in einer regenerativen Stromwelt  
von Antonello Monti
- 12 **Leistungselektronik und Gleichspannungstechnik**  
Schlüsselkomponenten für einen verlustarmen  
und ressourcenschonenden Stromtransport  
von Rik W. De Doncker
- 20 **Unsicherheiten in Stromnetzen**  
Robuste Optimierung für eine robuste Stromversorgung  
von Alexander Mitsos, Aron Zingler
- 24 **Dem Blackout zuvorkommen**  
Algorithmen berechnen die Netzsicherheit  
von Katharina Kollenda, Jonas Mehlem, Albert Moser,  
Felix Preuschoff, Robert Schmidt, Tobias Sous,  
Marten Simon Thams
- 28 **Geothermie – ein wichtiger Baustein für die Wärmewende**  
von Florian Wellmann, Nobert Klitzsch
- 36 **Wärmepumpen und kalte Wärmenetze sind  
Schlüsseltechnologien für die Wärmewende**  
von Dirk Müller
- 44 **Batterien als Baustein für eine sichere und  
zukunftsfähige Energieversorgung**  
Verschiedene Akteure können zur Versorgungssicherheit  
beitragen  
von Christian Bußar, Dirk Uwe Sauer, Jonas van Ouwerkerk
- 48 **Regenerative Brennstoffe**  
Optimale Umwandlung komplexer Brennstoffe  
von Joachim Beeckmann, Lukas Berger, Raik Hesse,  
Heinz Pitsch
- 54 **The Fuel Science Center**  
Fuel Design für eine nachhaltige Mobilität  
von Bastian Lehrheuer, Walter Leitner, Stefan Pischinger
- 60 **Energieeffizientes Bauen**  
Digitale Planung für Neubau- und Bestandsgebäude  
von Christoph van Treeck
- 68 **Auswirkungen der Energiekrise auf Privatverbraucher**  
Energiepreise belasten soziale Gerechtigkeit und stabilisieren  
die Versorgung  
von Aaron Praktijnjo, Jan Priesmann
- 72 **Energieversorgungssicherheit und Energieautarkie**  
Handlungsmöglichkeiten privater Haushalte und  
auf der Energiesystemebene  
von Peter Letmathe
- 78 Namen & Nachrichten
- 82 Impressum



Foto: Peter Winandy

# Editorial

Dear Readers,

Russia's war of aggression on the territory of Ukraine has led to a great deal of suffering on the part of those affected. Millions of people have been displaced inside and outside the country. In addition, the Russian invasion has triggered a global supply and energy crisis. The accompanying shortages and price increases are having an extensive impact on economic conditions and personal living situations.

We urgently need to develop solutions to these challenges in the face of worsening climate change: As a technical university of excellence, RWTH provides outstanding opportunities to test concepts and ideas. Researchers from the nine RWTH faculties take advantage of this, conducting interdisciplinary research on topics related to energy supply and security.

This issue of the research magazine RWTH THEMEN provides you with insights into what our researchers are doing. For example, the power grid is becoming increasingly important for supply and it is also burdened with more flow due to power generation from renewable energies. Therefore, one of the things we are focusing on is the optimized use and expansion of the power grid. In the Flexible Electrical Networks (FEN) research campus, work on the integration and development of DC voltage technology is being accelerated. By using batteries, various players want to stabilize the grids and provide emergency power supplies. In order to avoid cascades of failures, algorithms calculate the grid security and thus anticipate a blackout.

Other projects are investigating geothermal energy as a building block for new heating technologies. Key ideas here include using heat pumps and cold heat grids. Optimization potential for combustion processes is provided by new fuels such as e-fuels and, in particular, hydrogen-based fuels. In the field of energy-efficient construction, the focus is on digital planning for new and existing buildings.

This publication can only highlight some of the current projects in the complex field of energy research. RWTH Aachen University wants to play a decisive role in ensuring that the conditions for a future that is as worth living as it is sustainable can be created on a scientific basis.

The Editorial Team

Liebe Leserinnen und Leser,

der Angriffskrieg Russlands auf das Territorium der Ukraine führt zu einem furchtbaren Leid der Betroffenen. Millionen Menschen sind innerhalb und außerhalb des Landes auf der Flucht. Zudem löste die russische Invasion eine globale Versorgungs- und Energiekrise aus. Die einhergehenden Verknappungen und Verteuerungen erschweren weitreichend die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und private Lebenssituationen.

Dringlich sind Lösungen für diese Herausforderungen bei gleichzeitig sich verschärfendem Klimawandel zu entwickeln: Als technische Exzellenzuniversität bietet die RWTH herausragende Möglichkeiten, um Konzepte und Ideen zu testen. Das nutzen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den neun RWTH-Fakultäten, interdisziplinär forschen sie zu Themen der Energieversorgung und -sicherheit.

Diese Ausgabe des Forschungsmagazins RWTH THEMEN gibt hierzu Einblicke. Beispielsweise wird das Stromnetz immer wichtiger für die Versorgung, dass auch durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit mehr Durchfluss belastet ist. Daher steht unter anderem die optimierte Nutzung und der Ausbau des Übertragungsnetzes im Fokus. Im Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN) wird die Arbeit zur Integration und Entwicklung der Gleichspannungstechnologie forciert betrieben. Durch den Einsatz von Batterien wollen verschiedene Akteure die Netze stabilisieren und Notstromversorgungen ermöglichen. Um Ausfallkaskaden zu vermeiden, berechnen Algorithmen die Netzsicherheit und kommen somit einem Blackout zuvor.

Weitere Vorhaben untersuchen die Geothermie als Baustein für die Wärmewende, die auch mit Wärmepumpen und kalten Wärmenetzen als Schlüsseltechnologien umgesetzt werden soll. Optimierungspotenzial für Verbrennungsverfahren bieten neue Brennstoffe wie die E-Fuels und insbesondere wasserstoffbasierte Brennstoffe. Beim energieeffizienten Bauen steht die digitale Planung für Neubau- und Bestandsgebäude im Vordergrund.

Diese Publikation kann nur Schlaglichter auf einige derzeitige Projekte im komplexen Bereich der Energieforschung setzen. Die RWTH Aachen will sich entschieden daran beteiligen, dass mit wissenschaftlicher Grundlage die Voraussetzungen für eine ebenso lebenswerte wie nachhaltige Zukunft geschaffen werden können.

Die Redaktion

# Automatisierung der Verteilnetze

## Versorgungssicherheit in einer regenerativen Stromwelt

The energy system is radically changing because of the growing role of renewable energy sources. Changes are mostly happening at the distribution level where most of the installations are happening. This transformation is calling for significant innovation mostly enabled by the parallel process of digitalization. The Institute for Automation of Complex Power Systems at RWTH Aachen has developed in a set of European projects a full architecture to enable grid operators to use the infrastructure at the best while at the same time increase the resiliency and quality of delivery of the infrastructure. Key element of this architecture is the SOGNO platform, a micro-service-based software solution that enables a modular approach to grid operation. This platform is currently under test in several locations, including Twisting in Germany in cooperation with the grid operator Avacon. The experiments in this test are showing how digital solutions such as SOGNO creates new ways for local energy communities and distribution grid operators to work together. These approaches are also fundamentals to understand how to increase the

resiliency of the energy infrastructure thanks to local generation. The SOGNO platform is not only changing the way grids are operating but also bringing in the energy sector new ways of working thanks to the adoption of open-source software solutions. Open Source is revolutionizing how software is developed and how industry cooperate. Thanks to foundations such as the Linux Foundation Energy, companies from all around the world cooperate at software development creating advanced solutions in a faster, more efficient, and more secure way. All this is speeding up the energy transition while increasing the overall level of trust in the software solutions. Open source is the key strategy also of the European project OneNet. Under the leadership of the Fraunhofer FIT in cooperation with RWTH Aachen University, researchers are building the big picture that combining regional networks creates a single infrastructure for Europe.

Die Energiewende verändert die Art und Weise, wie wir die elektrische Infrastruktur nutzen, grundlegend. Traditionell sind die Stromnetze in die zwei Bereiche Übertragung und Verteilung zu unterscheiden. Die Übertragung diente der Verwaltung großer Strommengen, indem sie die Kraftwerke miteinander verband und die Energie an die Lastzentren lieferte. Die Verteilung hatte lediglich die Aufgabe, die Energie zu den Endverbrauchern zu bringen. Infolgedessen benötigte nur die Übertragung fortschrittliche Automatisierungslösungen, während die Verteilung im Grunde eine passive Infrastruktur war.

Die erneuerbaren Energiequellen haben die Spielregeln geändert: sie werden in der Regel als kleine Einheiten installiert, meist in den Verteilungssystemen. Infolgedessen wurden die Verteilernetze zu aktiven Netzen, die die Erzeugung einbinden. Gleichzeitig führten die erneuerbaren Energien zu einer Volatilität des Stromerzeugungsprofils. Um das Netz im Gleichgewicht zu halten, muss nun die Flexibilität des Verbrauchs ermittelt werden, und zwar auf der Ebene des Kunden. Diese Faktoren verändern den Betrieb von Stromnetzen

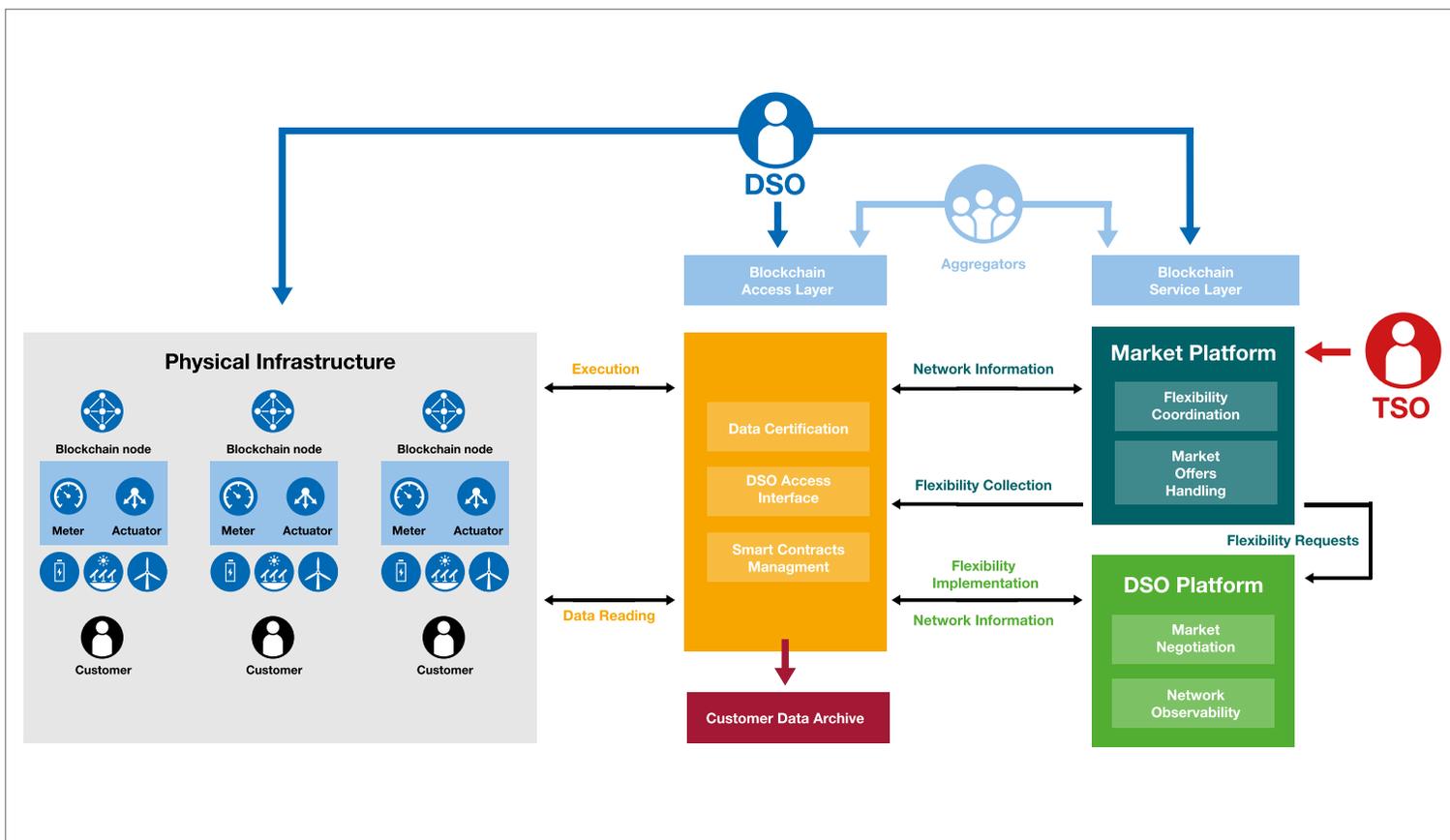


Bild 1: Die im Rahmen des H2020-Projekts Platone entwickelte Plattformarchitektur

radikal, sie geben den Verteilernetzen eine strategische Rolle, die eine aktive Regelung der Infrastruktur erforderlich macht. Obwohl diese Entwicklung in erster Linie als Herausforderung erscheint, so ist sie auch eine Chance, welche die Schaffung einer flexibleren und widerstandsfähigeren Infrastruktur vorantreibt. Die Schlüsseltechnologie ist die Digitalisierung. Diese verwandelt das Stromnetz in ein rekonfigurierbares, anpassungsfähiges System, das neue Aufgaben erfüllt und neue Herausforderungen bewältigt.

#### Aufbau einer Platone-Architektur

Aktive Verteilernetze benötigen intelligente Lösungen, um die Infrastruktur optimal zu nutzen. Die Digitalisierung gestattet es, diese Lösungen in flexible, offene und anpassungsfähige Datenplattformen zu integrieren. Diese ermöglichen es den Netzbetreibern, mit den Kunden zu interagieren und gleichzeitig einen sicheren und optimalen Betrieb der Infrastruktur zu gewährleisten.

Im Rahmen des Horizont 2020-Projektes „Platone – Platform for Operation of Distribution Networks“ hat das Institute for Automa-

tion of Complex Power Systems in Zusammenarbeit mit Partnern begonnen, eine ganzheitliche Lösung für die Gestaltung des Verteilernetzes zu entwickeln. Die komplexen IT-Architekturen müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Der Netzbetreiber auf der Verteilerebene befindet sich in der Mitte zwischen einer Reihe von wichtigen Stakeholdern:

- dem Übertragungsnetzbetreiber, der für den übergeordneten Teil des Netzes verantwortlich ist;
- den Energiemärkten, sowohl im klassischen Sinne der Großhandelsmärkte als auch im Sinne modernerer Konzepte von Flexibilitätsmärkten, welche die Volatilität der erneuerbaren Energiequellen ausgleichen sollen;
- den Aggregatoren, das heißt einer neuen Art von Marktbetreibern, die eine Reihe kleiner Akteure in einem größeren Akteur bündeln und
- den Endkunden, möglicherweise als aktive Kunden, auch bekannt als Prosumenten.

Während der Netzbetreiber zwischen diesen Akteuren agiert, hat er die Aufgabe, die Kon-

tinuität der Dienstleistung zu gewährleisten. Diese Rolle gewinnt zunehmend an Bedeutung. Je weiter verbreitet dezentrale Energieressourcen eingespeist werden, desto mehr muss der Verteilernetzbetreiber die Verantwortung für eine Region übernehmen. Im Rahmen des Projekts Platone wurde eine Architektur definiert, die in Bild 1 dargestellt ist. Im Mittelpunkt steht die DSO (Distribution System Operator) Technical Platform. Diese ist eine Open-Source-Software namens SOGNO, die vom Institute for Automation of Complex Power Systems in einem früheren Horizont 2020-Projekt entwickelt wurde. Die auf Mikrodiensten basierende Architektur wird innerhalb der Linux Foundation Energy (LFE) verwaltet und kann als disruptiver Ansatz angesehen werden. Traditionell basierten Softwarelösungen für Energienetze auf monolithischen, komplexen Softwarepaketen, die von einem Unternehmen entwickelt wurden. Die Einführung einer auf Open-Source-Mikrodiensten basierenden Architektur bedeutet mehrere Änderungen:

- Netzbetreiber können ohne große Investitionen einsteigen, da sie sich auf zertifizierte





Bild 2: Neue Messgeräte in der Entwicklung am Institute for Automation of Complex Power Systems  
Foto: Peter Winandy



Bild 3: Twistringern, ein Feldversuch für das Projekt Platone  
 Foto: Lehrstuhl für Automation of Complex Power Systems

- Open-Source-Lösungen verlassen können.
- Netzbetreiber vermeiden die Bindung an einen Anbieter und können ihre Lösung im Laufe der Zeit mit der Unterstützung einer Vielzahl von Partnern weiterentwickeln.
- Grundlegende Entwicklungen wurden gemeinschaftlich erstellt, dadurch werden Kosten reduziert und der Prozess der Digitalisierung beschleunigt.
- Funktionalitäten können jederzeit hinzugefügt werden, ohne dass die Software-Architektur komplett neu gestaltet werden muss.

Die technische Plattform wird dann durch eine Reihe von Schnittstellen ergänzt, mittels derer der Netzbetreiber auch Daten mit anderen Systemen und Beteiligten austauschen kann:

- eine Ad-hoc-Schnittstelle für den Datenaustausch mit vorhandenen Systemen vor Ort;
- eine Schnittstelle zu den Energiemärkten, um Daten zwischen Kunden und anderen Marktteilnehmern auszutauschen;
- eine Schnittstelle zu den Kunden für einen bidirektionalen Datenaustausch für Messungen und das Management von Flexibilitätsangeboten. Diese Schnittstelle kann auch als Blockchain-Lösung implementiert werden, um das Sicherheitsniveau zu erhöhen.

### Feldversuch in Twistringern

Das Prinzip wurde in einem Feldversuch in der norddeutschen Stadt Twistringern umgesetzt. Twistringern ist eine Gemeinde mit einer großen Anzahl von erneuerbaren Energiequellen, deren Gesamtkapazität den Energiebedarf des Ortes decken kann. In Zusammenarbeit mit dem Netzbetreiber Avacon wurde die Platone-Plattform für das Management des Netzes und die Interaktion mit den Kunden in der Region eingesetzt. Twistringern verfügt nun über ein fortschrittliches Netzmanagement, welches die Energieversorgung der Gemeinde verbessert. Auch der Netzbetreiber profitiert, da er einen besseren Überblick über die Nutzung seiner Anlagen hat. Dank der engen Zusammenarbeit zwischen Gemeinde und Netzbetreiber kann das lokale Energiesystem nun in einer Vielzahl von Betriebsmodi betrieben werden. Das lokale Netz kann in virtueller Inselanlage arbeiten, wodurch die Bürger Autarkie erlangen, oder es kann als aggregiertes Energiesystem im Falle eines Energieüberschusses diese auf den Energiemärkten anbieten. Je nach Netzbedingungen oder Marktlage kommt immer der beste Anwendungsfall zum Tragen. Gleichzeitig wird durch die Möglichkeit des Inselbetriebs (sowohl real als auch virtuell) die Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit des lokalen Netzes weiter erhöht.

### Die Rolle von Open Source

Wie erwähnt, wurde die Arbeit, die hinter dem Prozess der Digitalisierung der Energieinfrastruktur steckt, in die Implementierung von Open-Source-Programmen überführt. Open-Source wird zu einem industriellen Prozess, wenn es mit „Governance“ kombiniert wird. Genau das ist die Rolle von Stiftungen wie der Linux Foundation Energy, kurz LFE. Die LFE wurde von den Netzbetreibern Réseau de Transport d'Electricité (RTE) in Frankreich und Alliander in den Niederlanden gegründet und ist heute eine internationale Organisation, die mehr als 20 Softwareprojekte über die gesamte Wertschöpfungskette der Energie verwaltet. Da die Software-Entwicklungen von der Gemeinschaft getragen werden, senkt dies die Kosten drastisch, schafft ein Modell der Nachhaltigkeit für Forschungsprojekte und ermöglicht De-facto-Standards, die von der Industrie sofort anerkannt werden. Dieser Prozess des Übergangs von der Forschung zur Anwendung gibt Auftrieb, da Forschungsergebnisse viel schneller als in der Vergangenheit in die Praxis umgesetzt werden. Das SOGNO-Projekt wurde innerhalb von zwei Jahren aus dem Institute for Automation of Complex Power Systems in eine Anwendung überführt. Der Netzbetreiber der Stadt Rom, arreti, hat diese Architektur als Standard für seine neue Ge-



Bild 4: Visualisierung der Digitalisierung von Energiesystemen durch eine modulare Bildungsplattform für Schülerinnen und Schüler  
Foto: Peter Winandy

neration des Verteilungsmanagementsystems übernommen. In einer Ausschreibung stellte areti kürzlich klar, dass sich Unternehmen nur dann für die Entwicklung des neuen Projekts bewerben können, wenn sie sich bereit erklären, dem Open-Source-Paradigma für die Architektur zu folgen und den vom SOGNO-Projekt in LFE definierten De-facto-Standard zu übernehmen. Diese Entscheidung markiert einen drasti-

schen Wandel in einer als extrem konservativ geltenden Branche. In Zukunft wird areti in der Lage sein, seine betriebliche Infrastruktur auf der Grundlage einer offenen und weltweit anerkannten Standardlösung zu erweitern, zu verändern und zu modernisieren. So wird das Unternehmen große Investitionen in den Ausbau der Infrastruktur vermeiden und gleichzeitig einen moderneren und zuverlässigeren Betrieb schaffen.

### OneNet für Europa

Um eine solide und zuverlässige Infrastruktur für die Zukunft Europas zu schaffen, ist eine übergreifende Lösung erforderlich, die die nationale Ebene einbezieht und auf den europäischen Kontext hochskaliert. Das Institute for Automation of Complex Power Systems leitet derzeit in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik das Horizon 2020-Projekt „OneNet“, in dem die Datenschnittstellen zwischen den Netzbetreibern auf jeder Ebene und den Kunden standardisiert und in Form einer Open-Source-Lösung formalisiert werden. Ziel ist ein einheitliches Netz für Europa, das alle Akteure unabhängig von ihrem Standort integriert. Die Digitalisierung wird dafür sorgen, dass die Versorgungsqualität gegeben ist, auch wenn wir größtenteils von volatilen Energieressourcen abhängig sind.

---

### Autor

Univ.-Prof. Antonello Monti, Ph.D., ist Inhaber des Lehrstuhls für Automation of Complex Power Systems und Leiter des Institute for Automation of Complex Power Systems am E.ON Energy Research Center.

---

# Leistungselektronik und Gleichspannungstechnik

Schlüsselkomponenten für einen verlustarmen und ressourcenschonenden Stromtransport



The “European Green Deal” calls for a CO<sub>2</sub>-neutral energy supply by 2050. To achieve this goal, all primary energy must be obtained from renewable sources such as wind, solar, hydropower and biomass. Furthermore, storage capacities of all kinds – electrochemical, heat, cold, chemical – and flexible distribution networks are necessary to coordinate the generation and consumption of electrical energy. From a technical and economic point of view, 100% electrification of all sectors will become indispensable. A sustainable, safe and affordable energy supply – that is the vision of the E.ON Energy Research Center of RWTH Aachen University (E.ON ERC) and the BMBF research campus “Flexible Electrical Networks” (FEN). Here scientists work on innovative technologies for electrical networks with a high proportion of decentralized and renewable energy sources. Power electronics and DC technology play a key enabling role in implementing the Energy Transition.

Der „European Green Deal“ der Europäischen Union fordert eine CO<sub>2</sub>-neutrale Energieversorgung bis 2050. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die gesamte Primärenergie aus regenerativen Quellen wie Wind, Sonne, Wasserkraft und Biomasse gewonnen werden. Weiterhin sind Speicherkapazitäten aller Art – elektrochemisch, Wärme, Kälte, chemisch – und flexible Verteilnetze notwendig, um Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie aufeinander abzustimmen. Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht wird eine hundertprozentige Elektrifizierung aller Sektoren unverzichtbar. Eine nachhaltige, sichere und bezahlbare Energieversorgung – das ist die Vision des E.ON Energy Research Centers, kurz E.ON ERC, der RWTH Aachen und des BMBF-Forschungscampus „Flexible Elektrische Netze“, kurz FEN. Hier arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an innovativen Technologien für elektrische Netze mit einem hohen Anteil an dezentralen und erneuerbaren Energiequellen. In diesen Technologien spielen die Leistungselektronik und



Bild 1: DC-DC-Leistungswandler, entwickelt am Institute for Power Generation and Storage Systems des E.ON Energy Research Centers, werden in Betrieb genommen. Sie erlauben flexible Betriebsstrategien für vielfältige Anwendungsfälle in DC-Netzen.

Foto: Peter Winandy

die Gleichspannungstechnik eine Schlüsselrolle. Gleichspannungstechnik wird DC abgekürzt vom englischen „Direct Current“. Warum sind neue Netztechnologien erforderlich? Die Veränderung des elektrischen Versorgungssystems hin zu umweltschonenden Energiequellen erfordert eine neue Netzinfrastruktur. Viele dezentrale Energiequellen wie Solarzellen auf Dächern, produzieren Strom, der verteilt werden muss. Der ehemalige Verbraucher ist nun selbst Erzeuger. Gleichzeitig müssen Energieerzeuger wie Offshore-Windparks teilweise über große Distanzen verbunden werden. Das heißt, die Übertragung, Verteilung und Speicherung von Energie muss effizienter und flexibler werden, als dies im bestehenden Drei-Phasen-Wechselstromversorgungssystem möglich ist. Dieses „Drehstrom-Versorgungssystem“ wurde als „Top-down-Verteilung“ mit wenigen zentralen Großkraftwerken aufgebaut. Insbesondere das Verteilnetz mit seiner radialen Struktur ist nicht für eine dezentrale Einspeisung und Verteilung erneuerbarer Energiequellen aus-

gelegt. Während dieses Versorgungssystem eine geeignete Lösung für die Sicherheitsanforderungen und Stromversorgungsqualität auf der Basis verfügbarer Technologien war, hat sich die Situation nun grundlegend geändert. Nachhaltige Energiequellen und neue elektronische Leistungswandler sind heute technisch und wirtschaftlich einsetzbar, die Beschränkung auf Wechselstrom ist nicht mehr erforderlich, sondern vielmehr ein Hindernis.

Die Vorteile der Gleichstromübertragung sind nach mehr als fünfzig Jahren im Hochspannungsbereich akzeptiert; die Hochspannungs-Gleichstromübertragungen gehören zum Stand der Technik. Die Vorteile können jedoch nicht nur auf der Hochspannungsebene, also im Übertragungsnetz genutzt werden. Durch den Einsatz von hocheffizienten DC-DC-Leistungswandlern werden sie auch für den Mittelspannungsbereich, also im Verteilnetz, interessant. In den bestehenden Wechselstromnetzen wird die Stromversorgungsqualität unter anderem durch die



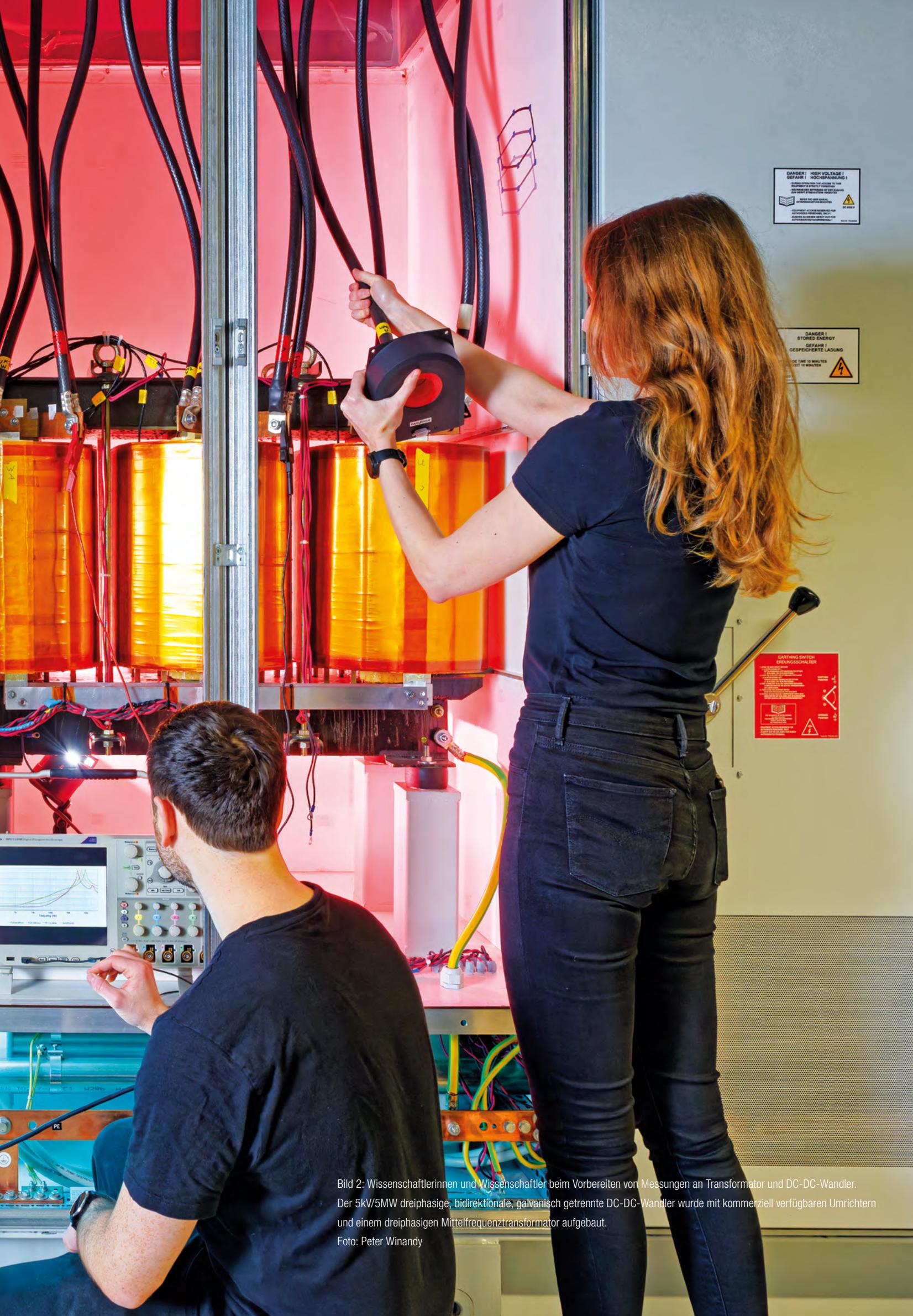


Bild 2: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beim Vorbereiten von Messungen an Transformator und DC-DC-Wandler. Der 5kV/5MW dreiphasige, bidirektionale, galvanisch getrennte DC-DC-Wandler wurde mit kommerziell verfügbaren Umrichtern und einem dreiphasigen Mittelfrequenztransformator aufgebaut.  
Foto: Peter Winandy



Bild 3: Trassenverlauf (in blau) des 5kV/5MW-DC-Mittelspannungsnetzes (MVDC) am Campus Melaten in Aachen. Ein flexibler Austausch der elektrischen Energie zwischen dem Center for Wind Power Drives (CWD) und dem Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS) am E.ON ERC wurde realisiert.

Regelung der Blindleistung gewährleistet. Blindleistung ist jedoch unerwünscht, da sie zu erheblichen Verlusten in den Netzen führt und zusätzliche Kompensationsanlagen benötigt. Hier liegt ein weiterer Vorteil der Gleichspannungsnetze.

Im Forschungscampus Flexible Elektrische Netze stehen diese Themen im Mittelpunkt. Dazu gehört auch der Aufbau eines 5.000 Volt-Mittelspannungsnetzes, kurz MVDC, welches 2019 nach einer fünfjährigen Planungs- und Bauphase in Betrieb genommen wurde. Der Verlauf des Netzes auf dem Campus Melaten in Aachen ist in Bild 3 gezeigt. Es verbindet das Center for Wind Power Drives, kurz CWD, mit der Testhalle des Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS) des E.ON ERC. Der Anschluss zu den Prüfständen und der 100 Kilowatt Fotovoltaikanlage des Centers for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems, wird vorbereitet. Da die beiden Erstgenannten aus unterschiedlichen Drehstromunterwerken versorgt werden, wurde erstmalig in Europa eine 5 MW-MVDC-Verbindung zwischen zwei Unterwerken realisiert. Hierdurch kann Energie flexibel und effizient umverteilt werden, unter anderem um Spitzenlasten an den

Unterwerken zu vermeiden. Weiterhin wird die elektrische Energie aus Fotovoltaikanlagen und die Energie, die bei Bremsvorgängen zurückgeführt wird, vollständig für den Eigenverbrauch eingesetzt. Diese neuen Funktionen der DC-DC-Leistungswandler ermöglichen erhebliche Kosteneinsparungen sowohl bei der Infrastruktur als auch beim Energieverbrauch.

Eine Schlüsselkomponente für zukünftige Mittelspannungsgleichspannungsnetze (MVDC) sind hocheffiziente, bidirektionale Gleichspannungswandler. Der dreiphasige Transformator, der eine Betriebsfrequenz von 1.000 Hertz hat, konnte um den Faktor 15 gegenüber konventionellen 50 Hertz-Transformatoren verkleinert werden. Durch die enorme Materialersparung reduzieren sich nicht nur die Kosten, sondern auch der ökologische Fußabdruck des Wandlers im Vergleich zu klassischen 50 Hertz-Netztransformatoren. Darüber hinaus werden Schutzkomponenten und Anlagen für Gleichspannungsanlagen, die Netzplanung und der Betrieb, die Digitalisierung, Automatisierung und Regelung, sowie die Normen für MVDC-Netze, erforscht und gefördert.

### **Technologieorientierung**

Das größte Forschungspotenzial liegt in der Weiterentwicklung des „Dual-Active Bridge (DAB)“-DC-DC-Wandlers, der das Kernelement künftiger DC-Unterwerke in Gleichstrommittelspannungsnetzen bildet. Dieser wurde von Rik De Doncker an der University of Wisconsin für Raumstationen der NASA bereits 1988 entwickelt und durch die Wisconsin Alumni Foundation zusammen mit der NASA patentiert und veröffentlicht. Über 20 Patente sind in den letzten Jahren aus verschiedenen Forschungsprojekten am Institute for Power Generation and Storage Systems am E.ON ERC und am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe entstanden, die das dynamische Verhalten des DC-Wandlers optimieren, die Stabilität garantieren und zugleich einen weichschaltenden Betrieb ermöglichen, durch den die Effizienz auf bis zu 99 Prozent gesteigert wird. Weiterhin wurden Steuerverfahren entwickelt, um den Wandler kurzschlussfest betreiben zu können, wodurch Gleichspannungsnetze elektronisch geschützt werden können. Auch wurden Methoden erforscht und patentiert, um unerwünschte Effekte, wie Sättigung des dreiphasigen Transformators des DC-Wandlers, zu kompensieren, ein Problem, das bei vielen hocheffizienten Wandlern hoher Leistung auftreten kann. Die DAB-Topologie wurde zu einem Multi-Port-Konzept, das über mehrere, unabhängig geregelte Ausgänge verfügt, erweitert. Letzteres findet

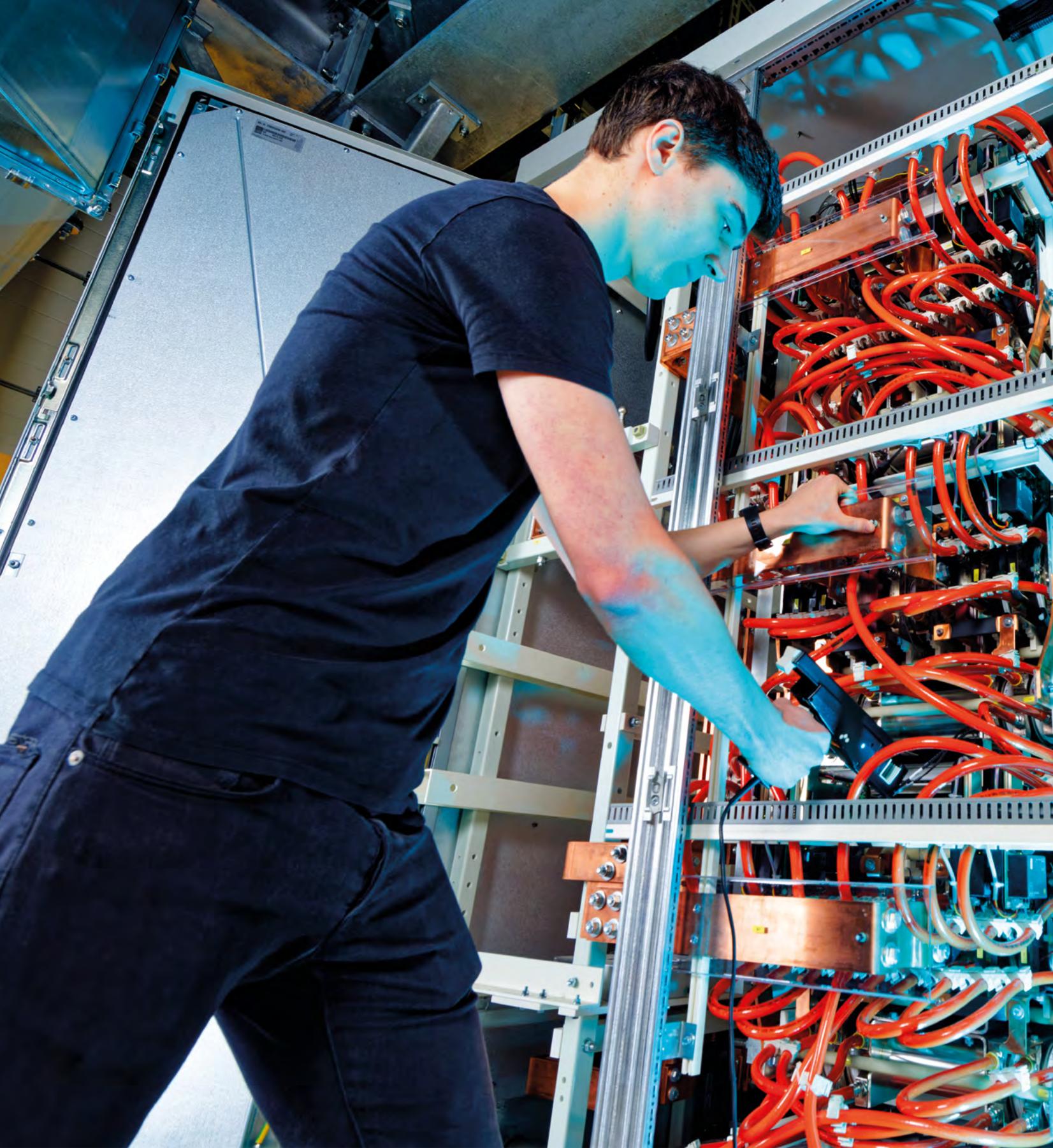
Anwendung in der Sektorenkopplung, also dem Anschluss von Schnellladesäulen an Mittelspannungsnetze, der Energieversorgung von Gebäuden mit Fotovoltaik und Wärmepumpen, etc. Die Infrastruktur am Campus Melaten in Aachen erlaubt die Erweiterung des Netzes mit Prüfständen in der Megawattklasse. Durch die Erweiterung mit dem Gebäude des Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems und dem 1 MW-Prüfstand des Instituts für Maschinenelemente und Systementwicklung entsteht so ein „Multi-Terminal-DC-Netz“. Der Einsatz des MVDC-Netzes ist für die Forschung für den Ausbau regenerativer Energien interessant. Aus dem Testbetrieb sollen Erkenntnisse sowohl zum Betrieb von Gleichspannungsnetzen als auch zum Zusammenwirken der einzelnen Komponenten gewonnen werden. Gleichzeitig ist es ein Testlabor, mit dem der Nachweis der Einsatzfähigkeit der DC-Technologie für Verteilnetze und deren Elemente erbracht wird.

Besonders Offshore-Windparks können ganz entscheidend von neuen DC-Kollektornetzen profitieren. Üblicherweise wird die Generatorspannung erst gleichgerichtet und im Anschluss wieder in eine Wechselspannung umgeformt. Diese heute noch erforderliche Umwandlung entfällt mit der Verwendung von DC-Technologien. Daraus resultieren eine höhere Effizienz und eine höhere Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

### **Innovationspotenzial**

Das Innovationspotenzial für DC-Anwendungen ist nicht auf Verteilnetze begrenzt. Die Themengebiete reichen von Netzplanung, Automatisierung und Regelung, Komponenten und Leistungselektronik, über Hochleistungstraktionsanwendungen, elektrische Energieversorgung auf Schiffen, intelligente Energiedienstleistungen mit Einsatz von Cloud-Plattformen bis hin zu sozialen, ökologischen, städtebaulichen und ökonomischen Aspekten, wie Ladesäuleninfrastruktur für die zukünftige E-Mobilität.

Das hohe Industrieinteresse an DC-DC-Wandlern rührt von der hohen Effizienz und Zuverlässigkeit durch die inhärente galvanische Entkopplung. Die Leistungsdichte konnte bereits in der Vergangenheit entscheidend gesteigert werden. Das Aufkommen neuartiger Leistungshalbleiter auf Silizium-Carbid-Basis ermöglicht den nächsten Schritt bei der Verringerung des Verbrauchs an technischen Materialien. Die Weiterentwicklung von neuen Umrichtertopologien führt zu weiteren Verringerungen von Umwandlungsverlusten und damit höheren Leistungsdichten. Zusammen mit neuen Materialien, insbesondere für das Transformatorblechpaket, das mit Industriepartnern entwickelt wurde, konnte mit der Erhöhung der Schaltfrequenz die Baugröße von Mittelfrequenztransformatoren in einem 2013 auf 1/7 und schließlich 2019 auf 1/15 gegenüber der konventionellen 50 Hertz-Technik reduziert werden.



Neben der Weiterentwicklung der Wandler sind weitere Komponenten für den Betrieb eines MVDC-Netzes relevant. Hierzu zählen mechanische, elektronische oder hybride DC-Schütze und DC-Schutzschalter, die auch im Fall von Netzfehlern den sicheren Betrieb des Netzes gewährleisten.

#### **Kundennutzen**

Die extrem hohen Wirkungsgrade durch die Verwendung der Gleichstromtechnik werden bei Hochspannungs-Gleichstrom-Übertra-

gungsnetzen schon lange eingesetzt. Das Forschungsnetz ist ein wichtiges Instrument bei der Übertragung dieser Vorteile auf den Nieder- und Mittelspannungsbereich. Neben dem Effizienzgewinn einer Energieübertragung auf DC-Basis, welcher eins zu eins an den Endverbraucher weitergegeben wird, werden auch massiv Kosten durch die geringeren Materialmengen für Transformatoren reduziert. Dieser Vorteil wird inzwischen schon nicht mehr durch den Einsatz eigentlich teurer Halbleitertechnologie aufgezehrt.

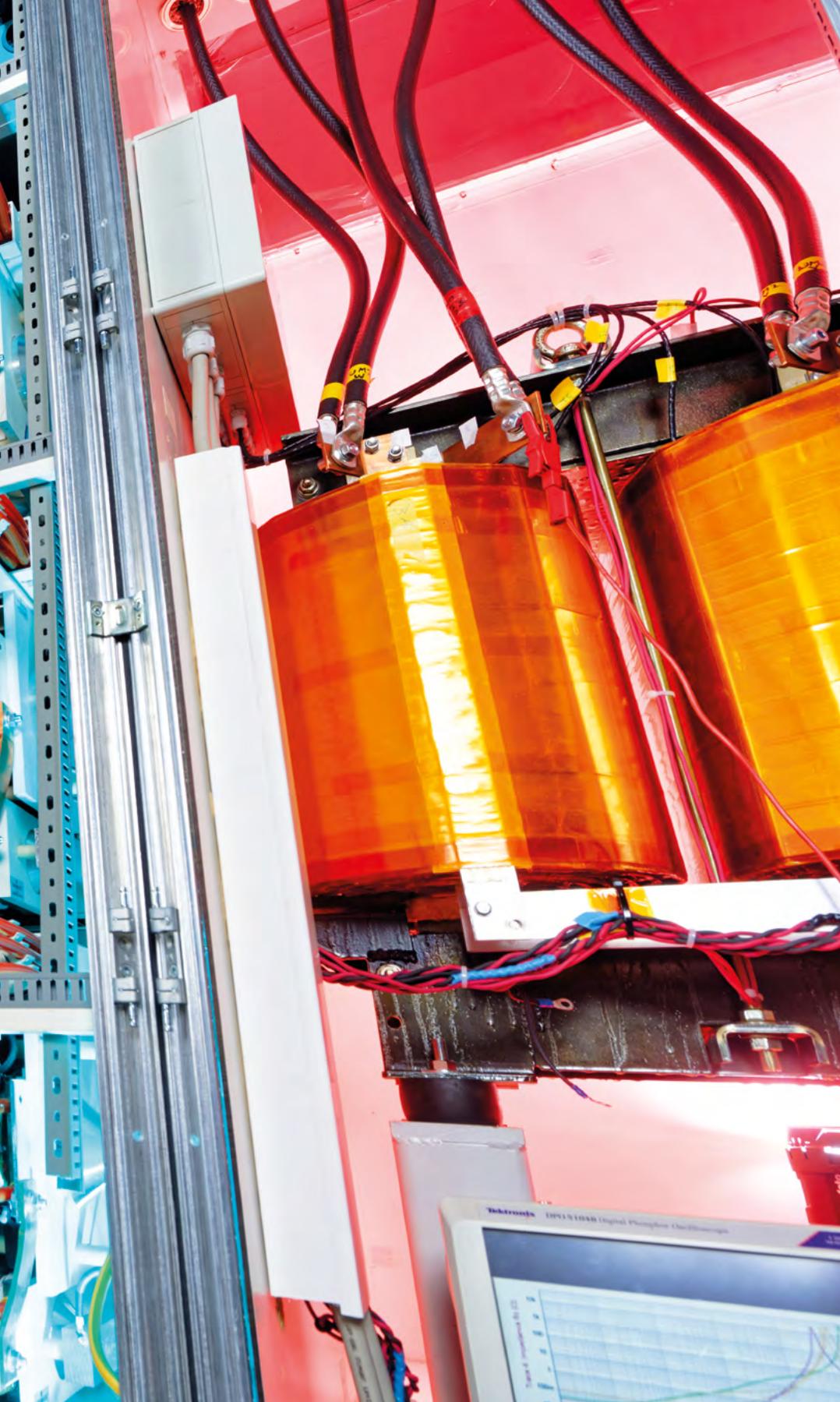


Bild 4: Am Institute for Power Generation and Storage Systems des E.ON Energy Research Centers werden in Kooperation mit den Industriepartnern des Forschungscampus Flexible Elektrische Netze neuartige Topologien von leistungselektronischen Wandlern für MVDC-Netze erprobt und vermessen. Foto: Peter Winandy

### Verwertungsstrategien

Der Forschungscampus Flexible Elektrische Netze (FEN) ist ein Zusammenschluss von RWTH-Instituten und Partnern aus der Industrie. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten dort zur Integration und Entwicklung der Gleichspannungstechnologie in fünf Forschungsfeldern: Netzplanung, leistungselektronische Komponenten und Converter, Digitalisierung, soziale und ökonomische Aspekte und Standardisierung. Aktuell sind hier 16 Industriepartner und 16 RWTH-Professuren aktiv.

Das E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) ist in Europa eine der größten Forschungsk Kooperationen zwischen einem Unternehmen und einer Universität. Forschungsschwerpunkt der sieben Professuren ist die Energietechnik. Diese beschäftigen sich mit den Themen Digitalisierung, Gebäudetechnik, Konsumentenverhalten, elektrische Energieerzeugung und -speicherung sowie automatisierte Netzleittechnik.



[www.fen-aachen.de](http://www.fen-aachen.de)  
[www.eonerc.rwth-aachen.de](http://www.eonerc.rwth-aachen.de)

Während die Kosten für Halbleiter je Kilowatt installierter Leistung seit Jahren kontinuierlich fallen, werden für die Materialien von 50 Hertz-Transformatoren kontinuierlich steigende Kosten erwartet. Darüber hinaus werden neue Schaltungstopologien erforscht, welche 40 Prozent weniger Leistungselektronik benötigen. Der ökologische Fußabdruck kann so massiv reduziert werden.

Schließlich ist die Flexibilität und Materialeffizienz der DC-Technologie in Mittel- und Niederspannungs-Verteilnetzen besonders vor-

teilhaft für die erneuerbare Energieerzeugung, die in diesen Spannungsebenen die meiste erneuerbare Energie ins Netz einspeist. Durch die Kombination von Windenergieanlagen mit DC-Kollektornetzen kann beispielsweise pro Windturbine ein Umrichter eingespart werden, was sich sehr günstig sowohl auf die Effizienz als auch auf die Zuverlässigkeit auswirkt.

### Autor

Univ.-Prof. Dr.ir. Dr.h.c. Rik W. De Doncker ist Inhaber des Lehrstuhls für Stromrichter-technik und Elektrische Antriebe, Leiter des Institute for Power Generation and Storage Systems am E.ON Energy Research Center, Direktor des Sustainable Energy Cluster sowie Direktor des E.ON Energy Research Centers.

# Unsicherheiten in Stromnetzen

Robuste Optimierung für eine robuste Stromversorgung

Electrical power is becoming more and more essential. At the same time, both demand and uncertainty are increasing, making it harder for transmission system operators to ensure the stability of the electrical grid. To account for this uncertainty, transmission system operators need help identifying critical scenarios that put maximal stress on the system. They also need tools to come up with good strategic decisions, for example related to grid extensions. Methods for robust optimization and their application to solve operational issues support transmission system operators in making the grid reliable, not only today, but also in the future.

Wie sicher ist die Stromversorgung? Wie lassen sich Stromausfälle vermeiden? Wie können Schwachstellen in der Infrastruktur der Stromversorgung erkannt und verbessert werden? Diese Fragen sind hochaktuell, denn eine zuverlässige Stromversorgung ist essenziell im alltäglichen Leben. In der Industrie würde der Ausfall der Stromversorgung weitreichende Probleme nach sich ziehen. Bisher können Industrie und Verbraucher in Deutschland mit einer stabilen Stromversorgung rechnen: Im Jahr 2020 lag die durchschnittliche Versorgungsunterbrechung pro Endverbraucher unter elf Minuten.<sup>[1]</sup> Die Verlässlichkeit sicherzustellen wird jedoch schwieriger, unter anderem aufgrund der Unsicherheit in der durch erneuerbare Energiequellen produzierten Strommenge. Mathematische Analyse- und Optimierungsmethoden, die Unsicherheiten berücksichtigen, können dazu beitragen, dieser Herausforderung zu begegnen.

## **Herausforderungen für die Stromversorgung**

Circa 21 Prozent der Energie wird in Deutschland in Form von Strom genutzt.<sup>[2]</sup> Es ist zu erwarten, dass die Bedeutung von Strom als Energieträger weiter zunehmen wird, beispielsweise bedingt durch die Trends E-Mobilität und elektrifiziertes Heizen. Damit wird das Stromnetz künftig wichtiger für die Energieversorgung und gleichzeitig mit mehr Durchfluss belastet werden.

Eine weitere Schwierigkeit für den robusten Betrieb des Stromnetzes liegt im wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung.<sup>[3]</sup> Die Stromerzeugung mittels Fotovoltaikanlagen oder Windturbinen ist von Umweltfaktoren abhängig, dies führt zu Unsicherheiten in der erzeugten Strommenge. Aufgrund der aktuell unzureichenden Möglichkeiten für die Speicherung von elektrischer Energie im großen Maßstab sorgt dies auch für Unsicherheiten im Stromnetz.

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien führt noch zu einer weiteren Belastung: Die Voraussetzungen für die Energieerzeugung sind stark ortsabhängig, daher liegen Erzeugung und Verbrauch teils örtlich weit auseinander.

Auch die Übertragungsleitungen selbst sind verstärkt Belastungen wie atmosphärischen Störungen durch gehäufte Gewitteraktivität oder Überhitzung der Leitungen infolge des Klimawandels ausgesetzt. Zu guter Letzt sollten bei einer kritischen Beurteilung der Stabilität des gesamteuropäischen Netzes auch unerwartete, aber in letzter Zeit mit erhöhter Sorge betrachtete Ereignisse wie Kriege, energiepolitische Auseinandersetzungen oder Naturkatastrophen berücksichtigt werden. Zusammengefasst ist das Stromnetz zunehmend Belastungen und Unsicherheiten ausgesetzt, die ohne geeignete Gegenmaßnahmen zu Instabilität führen.

### **Optimierte Nutzung und Ausbau des Übertragungsnetzes als Lösungsansatz**

Verschiedene Lösungsansätze können zur Stabilisierung des Stromnetzes herangezogen werden. Netzbetreiber federn beispielsweise Schwankungen in der Stromerzeugung durch eine dynamische Steuerung des Stromverbrauches ab. Für diese sogenannte Laststeuerung, Demand-Side-Management genannt, wird der Verbraucher finanziell belohnt. Im Rahmen des Kopernikus-Projekts „SynErgie“ wird bereits an der optimalen Umsetzung und Nutzung dieser Synergie in Industrieprozessen geforscht. Ein anderer Ansatz besteht darin, eine Lösung für die effiziente Speicherung von großen Strommengen zu finden, um die Unsicherheit in der Einspeisung des durch Wind- und Solarkraft erzeugten Stromes zu reduzieren.

In jedem Fall muss die Stabilität und Kapazität des Stromnetzes selbst verbessert werden. Dies kann zum einen durch den Ausbau der Infrastruktur geschehen. Für eine erhöhte Ausfallsicherheit müssten dabei kritische Komponenten des Stromnetzes, wie essen-

zielle Stromleitungen, erkannt und redundant ausgelegt werden. Dafür sind Methoden erforderlich, die Szenarien identifizieren, welche zu Engpässen und Überlastungen führen, vorhersagen wo Problem auftreten werden und konkrete Änderungsvorschläge bereitstellen.

Zum anderen kann die Nutzung der bestehenden Infrastruktur unter Berücksichtigung von Unsicherheiten verbessert werden. Eine Analyse ist hier wichtig, sie ermöglicht es, Reserven an kritischen Stellen vorzuhalten und an anderen Stellen freizugeben.

Eine große Herausforderung für eine solche Analyse besteht darin, dass das europäische Stromnetz zwar in sogenannte Regelzonen aufgeteilt ist, diese aber eng gekoppelt sind. Daher können Zonen nicht ohne weiteres getrennt voneinander betrachtet werden. Zusätzlich ist im Betrieb eine Berücksichtigung der aktuellen Datenlage gewünscht. Folglich müssen Netzwerke mit vielen Komponenten in begrenzter Zeit analysiert werden.

### **Optimierung des Übertragungsnetzes unter Unsicherheiten**

Robuste Optimierung beschäftigt sich mit dem Auffinden von Worst-Case-Szenarien und deren Berücksichtigung bei der optimalen Entscheidungsfindung. Anders ausgedrückt: Es wird angenommen, dass unter den gegebenen Unsicherheiten die schlimmste realisiert wird und dann die beste Entscheidung gefunden. Selbst unwahrscheinliche Ausfälle dürfen nicht zu einem Zusammenbruch der Stromnetze führen. Eine händische Analyse ist jedoch aufgrund der hohen Problemkomplexität schwierig. Die rechnergestützte robuste Optimierung ist hingegen sehr gut geeignet, um Fragestellungen zur optimalen Nutzung oder dem Ausbau des Übertragungsnetzes zu beantworten. Dafür wird das Verhalten des Netzwerkes in einem passenden mathematischen Modell abgebildet. Grundlegend hierfür ist die Interpretation des Netzwerkes als Graph, wobei zum Beispiel Umspannwerke als Knoten und

Stromleitungen als Kanten modelliert werden. Schließlich wird die Güte einer Entscheidung in einer Zielfunktion festgelegt. Zudem können Bedingungen an die gewünschte Lösung formuliert werden. Zum Beispiel können die modellierten Investitionskosten für einen Netzausbau minimiert werden, unter der Bedingung, dass unter allen zu berücksichtigenden Szenarien die Netzstabilität sichergestellt ist. Am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik der Aachener Verfahrenstechnik (AVT.SVT) werden zu diesem Zweck Algorithmen für die robuste Optimierung weiterentwickelt und auf Übertragungsnetzwerke angewendet, beispielsweise in einer Kooperation mit dem französischen Übertragungsnetzbetreiber Réseau de Transport d'Electricité, kurz RTE. Ziel ist, diese Algorithmen in die industrielle Anwendung zu bringen.

Im Rahmen der Kooperation wurden 2019 selbst für große Netzwerke mit über 6.000 Netzknoten kritische Übertragungslinien ermittelt.<sup>[4]</sup> Das sind in diesem Zusammenhang Leitungen, bei deren Ausfall, zum Beispiel durch Baumbruch, die Stabilität des Netzes gefährdet ist. Die kritischen Übertragungslinien sind in der Praxis von großer Bedeutung, da die Netzbetreiber verpflichtet sind, die sogenannte N-1 Sicherheit zu gewährleisten.<sup>[5]</sup> Diese besagt, dass selbst bei einem kompletten Ausfall einer einzelnen Komponente von einer Liste von Komponenten der Betrieb des Übertragungsnetzes stabil und innerhalb gegebener Sicherheitsgrenzwerte möglich sein muss.<sup>[5]</sup> Der Einsatz von robuster Optimierung für diese Analyse der kritischen Linien wird derzeit im Betrieb erprobt.

Als Teil der Kooperation wird auch an der Weiterentwicklung der bisher verwendeten Modelle und Methoden mit dem Ziel geforscht, Netzwerkparameter so anzupassen, dass nicht wie bisher nur vorgegebene, sondern stattdessen möglichst große Unsicherheiten im laufenden Betrieb mit Hilfe von Stabilisierungsmaßnahmen verkräftet werden. Konkret wird optimiert, wie viel Kapazität für den Austausch von Strom mit benachbarten



Bild 1: Analyse der Netzstabilität an einem vereinfachten Modell für Deutschland

Foto: Peter Winandy

Regelzonen selbst in ungünstigsten Szenarien garantiert werden kann. Nur mit dieser Betrachtung wird beim Zukauf aus Nachbarländern der Transport zum Verbraucher gewährleistet. Der Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik arbeitet mit den Firmen Haulogy und RTE daran, diese Berechnungen als einfach zu verwendendes Werkzeug in bestehende Analyseschritte einzugliedern. Das Ziel ist, die Eingabedaten automatisch zu generie-

ren und die Ergebnisse auszuwerten oder in weiteren Simulationen zu verwenden. Die Lösungen der genannten Problemstellungen unterstützen die Betreiber bei der Bewertung ihres Netzes und liefern Verbesserungsvorschläge. Neben der Verwendung der entwickelten Ansätze für weitere Fragestellungen ist die Genauigkeit der Modelle ein weiteres vielversprechendes Forschungsthema. Die benötigte Rechenzeit muss durch



Verbesserungen in den Algorithmen weiter gesenkt werden, um auch mit den komplizierteren Modellen weiterhin realistische Probleminstanzen betrachten zu können. Die Genauigkeit der Analyse und damit die Anwendbarkeit der Vorschläge ließe sich mit einer genaueren und damit weniger unsicheren Vorhersage des Netzverhaltens erhöhen. Zusammengefasst ist die robuste Optimierung schon jetzt für Netzbetreiber ein nütz-

liches Werkzeug, um die Stabilität der Übertragungsnetze zu verbessern und Stromausfälle trotz wachsender Hürden zu verhindern. Jedoch ist weitere Forschung in Zusammenarbeit mit der Industrie nötig, um das Potenzial der robusten Optimierung in diesem Bereich auszunutzen.

## Quellen

- [1] Bundesnetzagentur, 2021, Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom, [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung\\_Strom/start.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/start.html), Zugriff 16 September 2022
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Energieeffizienz in Zahlen Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.html>
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022, Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html)
- [4] Djelassi, H., Fliscounakis, S., Mitsos, A. und Panciatici, P., 2018. Hierarchical Programming for Worst-Case Analysis of Power Grids. 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)
- [5] Amtsblatt der Europäischen Union, L 220, 25. August 2017, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=OJ:L:2017:220:TOC>

---

## Autoren

Univ.-Prof. Alexander Mitsos, Ph.D., ist Inhaber des RWTH-Lehrstuhls für Systemverfahrenstechnik und Direktor des Institutsbereichs IEK-10 Energiesystemtechnik am Forschungszentrum Jülich.

Aron Zingler, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik.

---

# Dem Blackout zuvorkommen

## Algorithmen berechnen die Netzsicherheit

The outage of an electrical transmission line, e.g., triggered by a short circuit, involves the risk that the electrical current is re-distributed to neighbouring transmission lines. In the worst case, these lines become overloaded as well and fail seconds later. Since even more power is now re-distributed to fewer remaining lines, a cascade of line outages can occur. Such a cascade can be the cause of large-scale blackouts. Just last year, two blackouts caused by cascading outages occurred, one in Spain and one in southeast Europe, leaving many consumers without power supply.

To avoid such cascading outages, the European transmission network is operated according to the (n-1) criterion. This criterion states that the outage of any line must not be followed by subsequent outages of other lines.

Increasing power generation from renewable energy sources could lead to overloaded lines in certain circumstances, even without a line outage. The grid operator resolves such congestions by lowering the generation of power plants or wind turbines upstream of the congestion and ramping up power plants downstream of the bottleneck.

For years, methods for redispatch analysis have been developed at RWTH Aachen University. Innovations include the consideration of cascading outages, load flow controlling network devices, weather dependencies between feed-in from wind turbines and the

cooling effect of wind on overhead lines, and stochastic behaviour of feed-in from renewable energy sources within the redispatch analysis. Recent research focuses on curative congestion management measures, which exploit the thermal inertia of overhead lines by an activation only and immediately after occurrence of a line outage. A number of innovations in redispatch analysis from RWTH Aachen University have found their way into planning and operation of grid operators.

Das elektrische Übertragungsnetz in Europa wird mit Höchstspannungen von 220.000 oder 380.000 Volt betrieben, weist eine hohe Leistungsfähigkeit auf und erlaubt weiträumige Stromtransporte. Bei einem Ausfall einzelner Leitungen, beispielsweise ausgelöst durch einen Kurzschluss, verteilt sich der Strom nach den Kirchhoffschen Gesetzen auf benachbarte Leitungen. Im ungünstigen Falle werden diese dann überlastet und fallen ebenfalls Sekunden später aus. Da nun noch mehr Strom durch immer weniger verbleibende Leitungen fließt, kann eine Kaskade von Leitungsausfällen und schließlich ein großräumiger Blackout entstehen.

So führte ein Kurzschluss in Südfrankreich am 24. Juli 2021 dazu, dass nach einer solchen Kaskade das Netz der iberischen Halbinsel vom europäischen Netz getrennt wurde. Kunden mit einem Bedarf von 2.300 Megawatt konnten nicht mehr versorgt werden, dies entspricht in erster Näherung dem Bedarf von 2,3 Millionen Einwohnern. Ein halbes Jahr zuvor, am 8. Januar 2021, lösten Ausfälle im kroatischen Umspannwerk Ernestinovo eine Kaskade aus, die das südosteuropäische Netz vom europäischen trennte. Der Blackout war mit einem Umfang von 250 Megawatt noch glimpflich.

Um derartige Ausfallkaskaden und einhergehende Blackouts zu vermeiden, wird das europäische Übertragungsnetz nach dem (n-1)-Kriterium betrieben. Dies besagt, dass nach dem Ausfall einer Leitung keine weitere

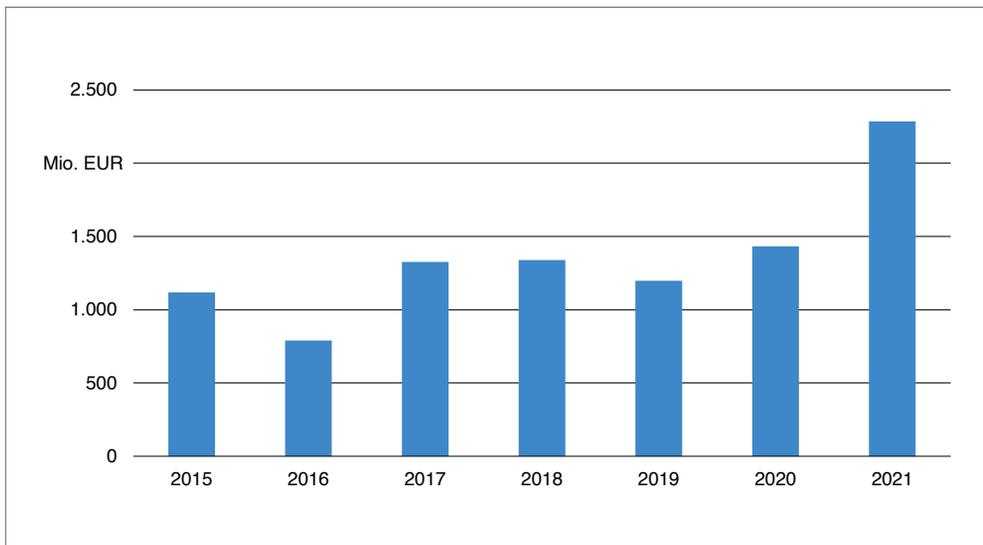


Bild 1: Kosten des Engpassmanagements in Deutschland  
Quelle: Bundesnetzagentur, eigene Darstellung

Leitung überlastet wird. Der Betrieb des europäischen Übertragungsnetzes ist so sichergestellt.

Zur Versorgung der Verbrauchszentren im Westen und Süden Deutschlands werden heute verstärkt Windenergieanlagen in Norddeutschland gebaut. Damit verbunden sind wachsende Stromtransporte von Nord- nach Süddeutschland. Diese können zu Leitungsüberlastungen auch ohne Ausfall einer Leitung führen. Netzbetreiber senken daher im Norden die Einspeisung der Kraftwerke oder Windenergieanlagen und fahren Erzeugungsanlagen hinter dem Engpass im Süden gleichzeitig hoch. Dieses sogenannte Redispatch erfolgt soweit, dass das (n-1)-Kriterium eingehalten bleibt.

Um dem steigenden Transporterfordernis zu begegnen, sind mehrere leistungsstarke Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen, kurz HGÜ, im Bau beziehungsweise geplant. HGÜ bestehen aus Konverterstationen an den beiden Enden der Übertragungsstrecke, die mit Hilfe von Leistungselektronik den Strom von Wechsel- in Gleichstrom oder umgekehrt wandeln. HGÜ können zudem den Stromfluss steuern. Auch lange Übertragungsstrecken sind akzeptanzfördernd in der Ausführung als Erdkabel möglich. Die Netzbetreiber nutzen Phasenschiebertransformatoren, um auch bei Wechselstromleitungen den Stromfluss zu regeln. Die Phasenschiebertransformatoren verändern die Phasenwindkeldifferenz zwischen den Spannungen auf

der Primär- und Sekundärseite des Transformators und führen zu einer Modifikation des Stromflusses.

Daher nutzen Netzbetreiber neben dem Redispatch mit HGÜ-Verbindungen und Phasenschiebertransformatoren auch stromflusssteuernde Maßnahmen zur Behebung eines Engpasses. Diese erlauben es, den Strom von hoch ausgelasteten Leitungen auf benachbarte, weniger ausgelastete Leitungen umzuleiten. Nur die dann noch verbleibenden Engpässe müssen über Redispatch der Erzeugungsanlagen aufgelöst werden.

Redispatch ist mit hohem finanziellem Aufwand verbunden, da das Hoch- und Runterfahren der Kraftwerke und Windenergieanlagen mit Kosten in Milliardenhöhe verbunden ist, siehe Bild 1. Beim Abregeln von Windenergieanlagen kommt hinzu, dass erneuerbare Energien ungenutzt bleiben und durch fossile Kraftwerke ersetzt werden. Redispatch erhöht dadurch klimaschädliche CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Einstellungen der HGÜ, Phasenschiebertransformatoren sowie Redispatch der Erzeugungsanlagen sind geeignet auszuwählen. Ziel ist dabei, die Vermeidung kaskadierender Ausfälle und gleichzeitig die Engpassbehebung nicht unnötig zu verteuern.

Am Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft werden seit Jahren Methoden und Algorithmen zur optimierten Engpassbehebung der Übertragungsnetze entwickelt. Diese wurden bereits

in Planungs- und Betriebsführungssysteme der Netzbetreiber übernommen.

Die Herausforderung liegt in der Komplexität der Fragestellung: In der zeitlichen Dimension wird bei Planungsfragen ein typisches Jahr der Einspeisung aus erneuerbaren Energien in stündlicher Auflösung, also 8.760 einzelne Situationen, betrachtet. Bei betrieblichen Fragestellungen sind es dagegen nur erwartete Engpässe des nächsten Tages in stündlicher Auflösung.

Da die Einspeisung erneuerbarer Energien und damit mögliche Engpässe vom Wetter abhängen, sind entsprechend zeitlich und räumlich aufgelöste Wettermodelle Teil der Gesamtmodellierung. Engpässe treten erfahrungsgemäß zu Zeiten hoher Einspeisung aus Windenergieanlagen auf. Windige Zeiten führen aber nicht nur zu einem hohen Transportbedarf, bei hohen Windgeschwindigkeiten werden die Leiterseile auch gekühlt. Windiges Wetter lässt daher höhere Ströme zu. Auch diese Zusammenhänge werden bei der Bestimmung von Engpassbehebungsmaßnahmen berücksichtigt. Dadurch wird vermieden, die Stromtragfähigkeit der Freileitungen zur sicheren Seite abschätzen und mehr als erforderlich auf Redispatch-Maßnahmen zurückgreifen zu müssen.

Die räumliche Auflösung der Modelle muss knoten- und zweigscharf sein, das heißt jede Leitung, jeder Transformator und jede Sammelschiene des europäischen Übertragungsnetzes sind in einem digitalen Zwilling

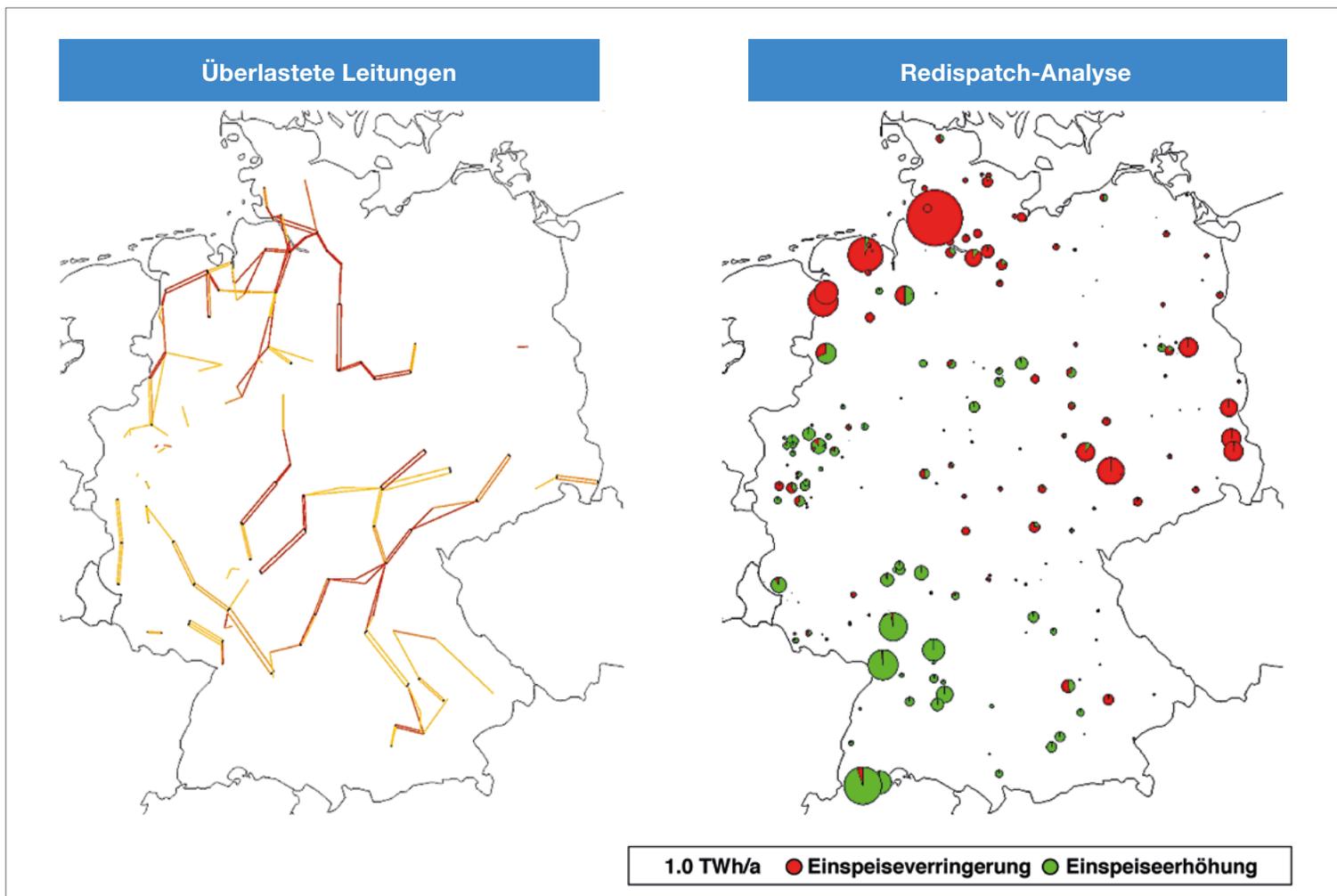


Bild 2: Berechnung von Engpässen und Redispatch-Maßnahmen

abgebildet. Dieser digitale Zwilling enthält so leicht mehrere Tausend Knoten und Zweige und beinhaltet auch Modelle der Phasenschiebertransformatoren, HGÜ-Verbindungen und Erzeugungsanlagen. Der digitale Zwilling ist in der Lage, die Auswirkungen der verschiedenen Engpassbehebungsmaßnahmen auf die Belastung aller Leitungen abzubilden. Aus mathematischer Sicht sind diese Zusammenhänge nicht linear und ganzzahlig, was die Anwendung fortschrittlichster Optimierungsalgorithmen erfordert.

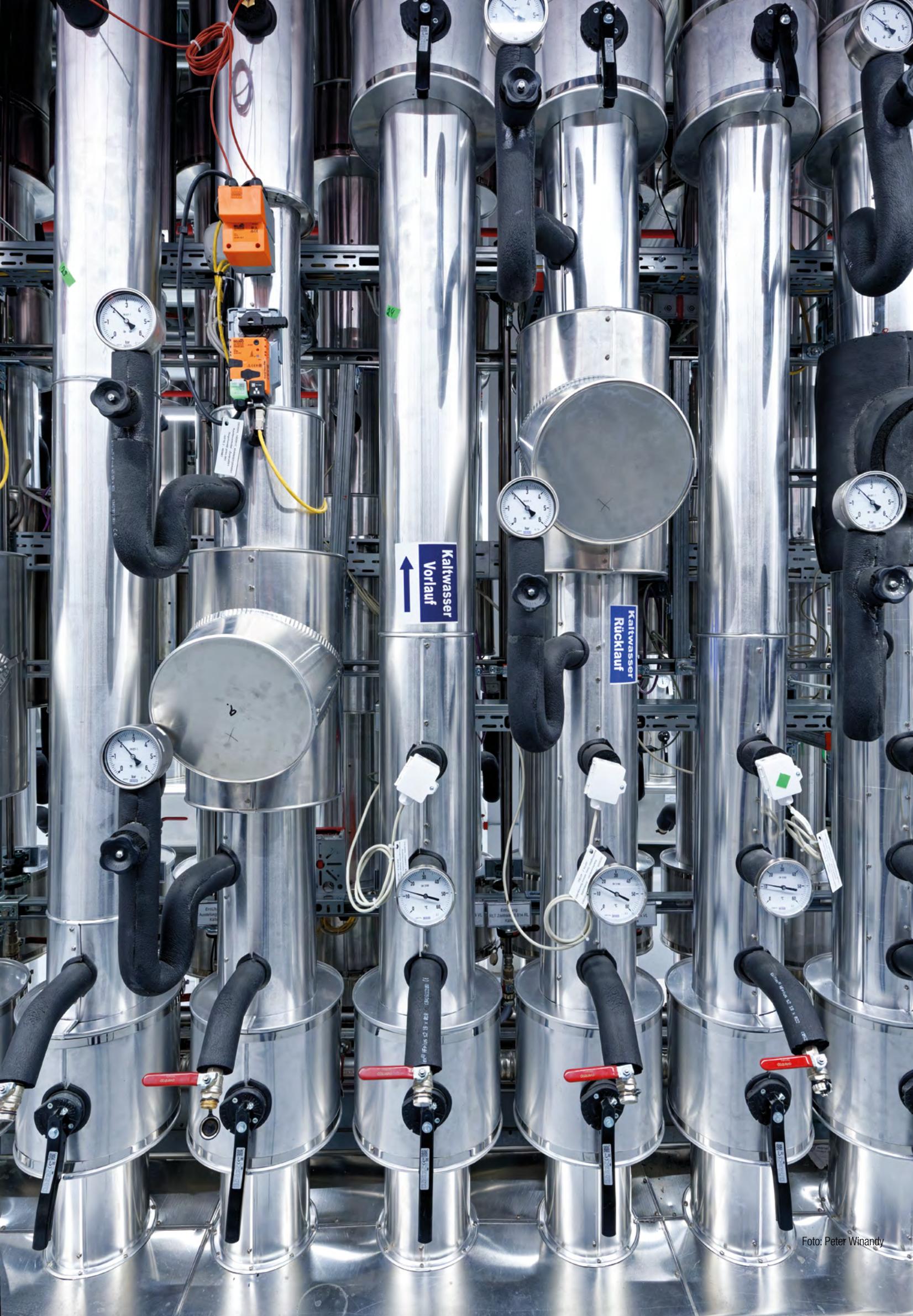
Um Ausfallkaskaden ausschließen zu können, sind alle Leitungsausfälle zu modellieren, deren Anzahl schnell in die Tausende geht. Da die Engpassbehebungsmaßnahmen oft am Vortag bestimmt werden, sind insbesondere die Wetterdaten und damit die Engpässe mit Prognosefehlern behaftet. Entsprechend kommen fallweise stochastische Modelle zum Einsatz.

Die RWTH-Modelle zeigen daher alle Engpässe und Redispatch-Maßnahmen, die zur Beseitigung der Engpässe erforderlich sind, siehe Bild 2.

Forschungsergebnisse im Projekt „InnoSYS 2030“ unterscheiden zwischen sehr schnell und nur mit Vorlauf umzusetzende Engpassbehebungsmaßnahmen. Da aufgrund der thermischen Trägheit der Leiterseile die Temperatur nicht unmittelbar nach einer Erhöhung des Stromes, beispielsweise als Folge eines Leitungsausfalls, steigt, können sofort nach Leitungsausfall angewiesene Maßnahmen eine Überlastung verhindern. Voraussetzung ist allerdings, dass sie noch rechtzeitig vor Erreichen der maximalen Leitertemperatur wirken. Dies erlaubt, sehr schnell umsetzbare Maßnahmen erst kurativ nach tatsächlichem Leitungsausfall und nicht entsprechend der traditionellen Auslegung des (n-1)-Kriteriums präventiv in Vorbereitung auf einen denkbaren Ausfall anzuweisen. Mit dieser kurativen Betriebsführung lassen sich die hohen Redispatch-Aufwände reduzieren.

### Autoren

Katharina Kollenda, M.Sc., Jonas Mehlem, M.Sc., Felix Preuschoff, M.Sc., Robert Schmidt, M.Sc., Tobias Sous, M.Sc. und Marten Simon Thams, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeitende des Lehrstuhls für Übertragungsnetze und Energiewirtschaft. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser ist Inhaber des Lehrstuhls für Übertragungsnetze und Energiewirtschaft und Leiter des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft.



Kaltwasser  
Vorlauf

Kaltwasser  
Rücklauf

# Geothermie – ein wichtiger Baustein für die Wärmewende

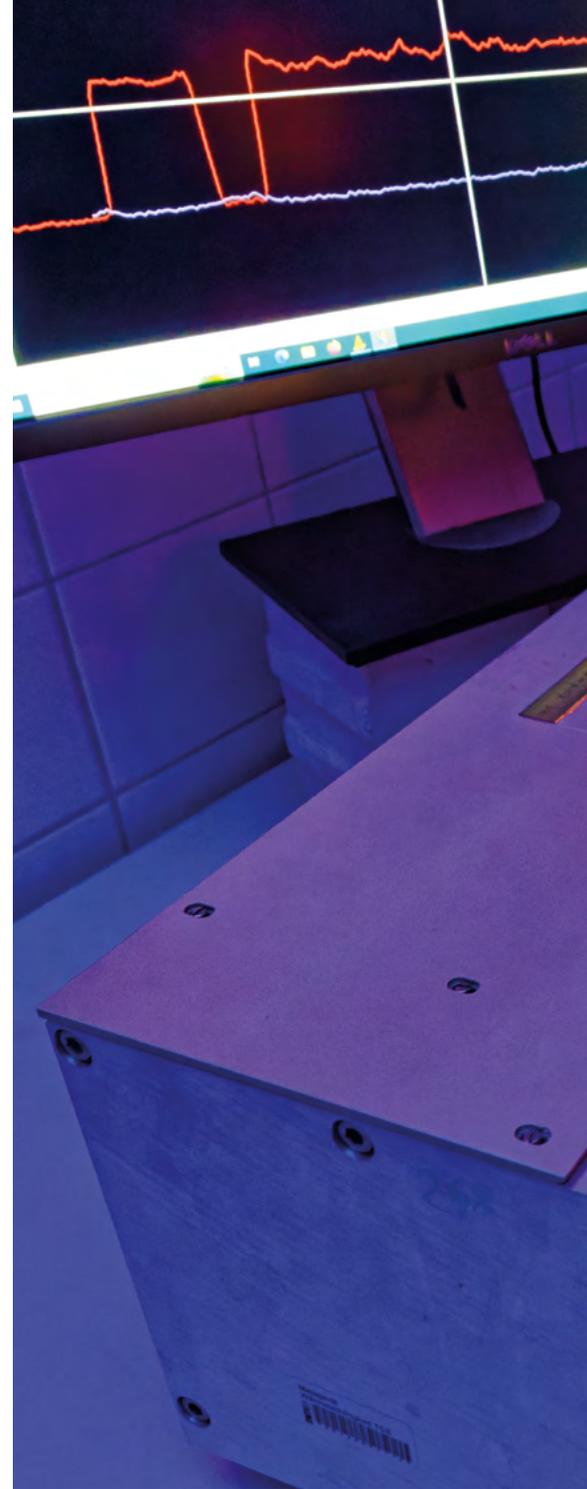
Geothermal energy refers both to the heat stored in the earth's crust and to its use for heating, cooling or power generation. For the heating market in particular, it can make a major contribution to climate neutrality because it provides energy locally and independently of weather conditions with a small land usage. Nevertheless, the technology has been the subject of controversy in recent years: Projects that were unsuccessful, or that even resulted in damage to buildings, have taken up a large place in public perception.

However, there are numerous geothermal projects throughout Germany and Europe that have been successfully providing heat and electricity for many years. There is still a significant need for research to achieve

comprehensive heat recovery from the subsurface. At the Chair of Applied Geophysics 1: Computational Geoscience, Geothermal and Reservoir Geophysics and at several other institutes at the RWTH, we are conducting research together with partners on the efficient and sustainable use of geothermal energy and on minimizing the risks.

Geothermie bezeichnet sowohl die in der Erdkruste gespeicherte Wärme als auch deren Nutzung zum Heizen, zum Kühlen oder auch zur Stromerzeugung. Insbesondere für den Wärmemarkt kann sie einen großen Beitrag zur Klimaneutralität leisten, weil sie witterungsunabhängig und lokal Energie bereitstellt und wenig Fläche benötigt. Dennoch wurde die Technologie in den letzten Jahren immer wieder kontrovers diskutiert: Projekte, die nicht erfolgreich waren, oder die sogar zu Schäden an Gebäuden führten, haben einen großen Platz in der öffentlichen Wahrnehmung eingenommen.

Deutschland- und europaweit gibt es allerdings zahlreiche geothermische Projekte, die seit vielen Jahren erfolgreich Wärme und Strom bereitstellen. Für eine umfassende



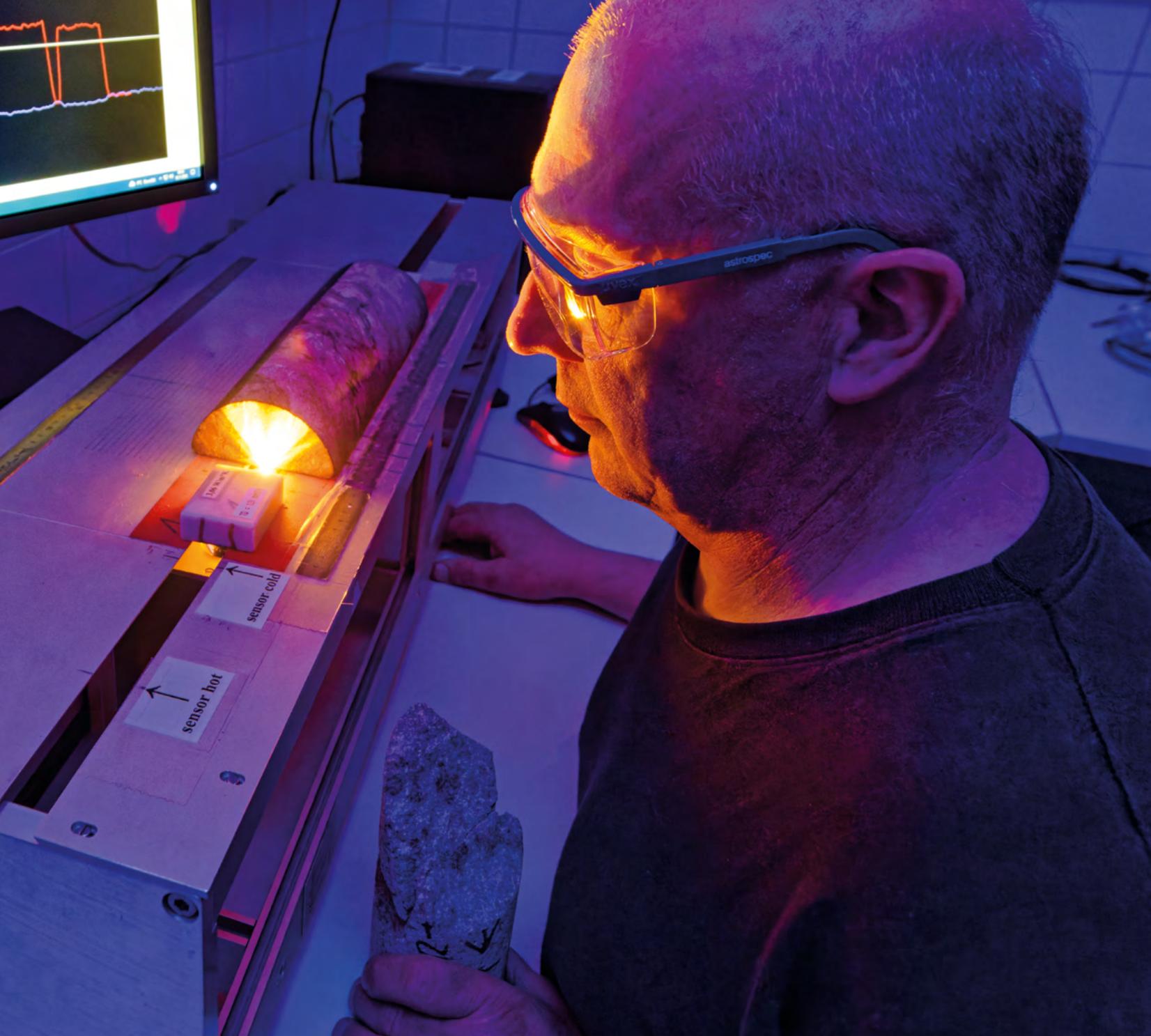


Bild 1: Kontaktlose Messung der Wärmeleitfähigkeit an Gesteinsproben im Labor des Institute for Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics

Foto: Peter Winandy

Wärmegewinnung aus dem Untergrund besteht aber noch bedeutender Forschungsbedarf. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Institute for Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics forschen gemeinsam mit Partnern zur effizienten und nachhaltigen Nutzung der Geothermie und zur Minimierung der Risiken.

#### **Tiefe bestimmt Temperaturen und Verwertung**

Die Temperatur steigt in der Erdkruste durchschnittlich um drei Grad Kelvin pro 100 Meter, weshalb man in verschiedenen Tiefen unterschiedliche Temperaturniveaus erschließen kann.

Von oberflächennaher Geothermie spricht man bei Erdwärmegewinnung bis zu einer Tiefe von 400 Metern. Dies erfolgt meist in geschlossenen Systemen wie Erdwärmesonden, bei denen eine Flüssigkeit in Rohren durch den Untergrund läuft und dabei Wärme entzieht oder zuführt. Zum Heizen muss das Wasser aber mithilfe von Wärmepumpen auf ein entsprechendes Temperaturniveau angehoben werden.

Im Gegensatz dazu wird bei der Tiefengeothermie die Erdwärme aus Tiefen zwischen 400 und 5.000 Metern gewonnen und meist direkt zum Heizen oder als Wärme für industrielle Prozesse eingesetzt. Bei sehr hohen Temperaturen, also wenn Dampf gefördert wird, wird dieser auch zur Stromerzeugung verwendet. Vor allem die direkte Wärmenut-

zung aus hydrothermalen Reservoiren gewinnt zurzeit stark an Bedeutung.

#### **Längst angewandte Technologie**

Der Wärmesektor macht 56 Prozent des nationalen Energiebedarfs aus. Bisher kommen aber lediglich 15 Prozent der Wärme aus regenerativen Quellen. Im Wärmesektor besteht demzufolge ein Nachholbedarf beim Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung beziehungsweise der Einsparung von Treibhausgasen, der in Deutschland mit der sogenannten Wärmewende erreicht werden soll.

Die oberflächennahe Geothermie liefert bereits einen bedeutenden Beitrag zum Heizen und Kühlen von Einfamilienhäusern, Büro- und Industriegebäuden. Aber auch die Nut-



Bild 2: Visualisierung der Geologie und des Geothermischen Systems im Raum Weisweiler  
Foto: Peter Winandy

SMART

22 seconds ago

Loaded space: weisweiler



DWAS

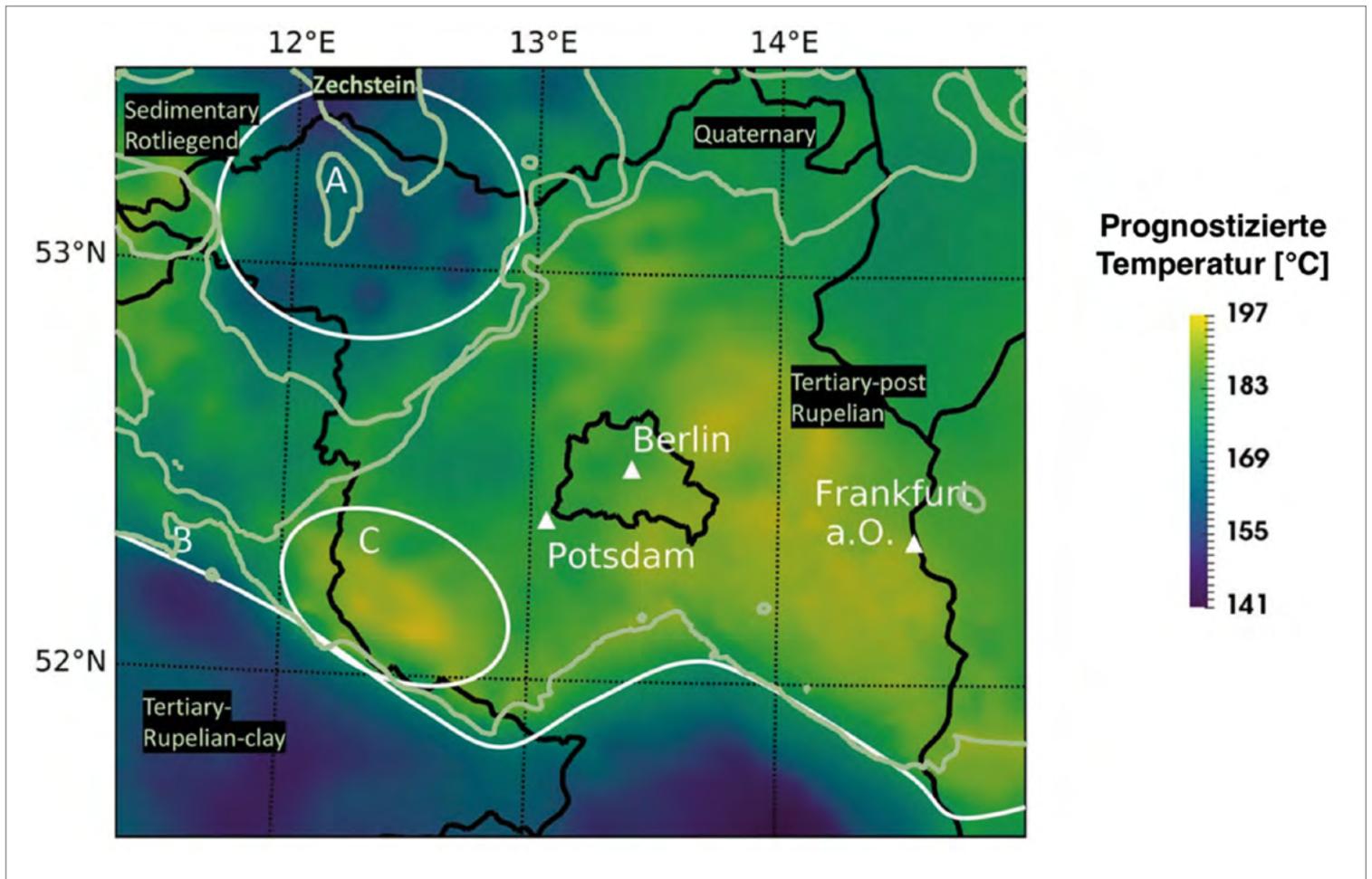


Bild 3: Abschätzung der prognostizierten Temperatur in einer Tiefe von fünf Kilometern in Brandenburg (angepasst nach<sup>[5]</sup>)

zung tiefer hydrothormaler Reservoirs ist etabliert, beispielsweise in München und in Paris. Das aus solchen Reservoirs geförderte Tiefenwasser mit Temperaturen zwischen 15 und 180 Grad Celsius kommt bei der kommunalen Wärmeversorgung, Fernwärme und als Wärme für industrielle Prozesse zum Einsatz.

In den nächsten Jahren sollen sowohl die oberflächennahe Geothermie als auch die Wärmegewinnung aus tiefen hydrothermalen Reservoirs massiv ausgebaut werden. Letztere sind thermalwasserführende Gesteine in bis zu 5.000 Metern Tiefe, die wasser-durchlässig sind und deren Wasser deshalb aus Tiefbrunnen gefördert werden können. Leider sind solche Reservoirs nur in Regionen mit vorteilhaften geologischen Bedingungen vorhanden. Trotzdem hat die Geothermie in Deutschland ein bedeutendes Potenzial. Selbst wenn man sich nur auf hydrothermale Systeme beschränkt, die mit geringem Risiko umgesetzt werden können, gibt eine Studie aus dem Jahr 2022 diese mit etwa 300 Terrawattstunden an.<sup>[1]</sup>

### Hydrothermale Reservoirs in Deutschland und im Raum Aachen

Bisher sind in Deutschland zwei Regionen bei der Nutzung tiefer hydrothormaler Reservoirs führend: die Region um München und der Oberrheingraben zwischen Karlsruhe und Straßburg. Im Münchener Raum sind 24 geothermische Anlagen in Betrieb, die einen Großteil der installierten thermischen Leistung in Deutschland ausmachen. Im Oberrheingraben ist die Verteilung der Wärme im Untergrund deutlich komplexer, da großskalige Fluidzirkulationen lokal bedeutende Wärmeanomalien durch aufsteigende Tiefenwässer verursachen.<sup>[2]</sup>

Die Rhein-Ruhr-Region, mit der Erweiterung im Südwesten bis nach Aachen, hat ein großes Potenzial zur Gewinnung von Wärme durch geothermische Anlagen. Obwohl aus dem Bergbau in den oberen geologischen Stockwerken sehr viel dokumentiert ist, ist kaum etwas aus den tieferen – und für die Geothermie relevanten – Gesteinsschichten bekannt. In welcher Tiefe sie sich befinden, mit welchen Thermalwässern sie gefüllt sind und ob die Durchlässigkeit der Gesteine für

eine Förderung geothermischer Wässer ausreicht, wird in mehreren Forschungsprojekten untersucht, beispielsweise im EU Integrated Training Network „EASYGO – Efficiency and Safety in Geothermal Operations“. In mehreren Projekten – unter anderem im Internationalen Graduiertenkolleg „Moderne Inverse Probleme: Von Geometrie über Daten hin zu Modellen und Anwendungen“ – werden Methoden erarbeitet, um die Geologie im Untergrund zu kartieren.<sup>[3]</sup> In Weisweiler läuft zudem ein Forschungsprojekt, in dem in einer Bohrung der tiefe Untergrund untersucht wird, um wichtige Informationen zu der möglichen geothermischen Verwertung zu erhalten. Über die Kooperation mit der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie ist die RWTH in diese Entwicklungen eingebunden.

Wie bereits erwähnt, sind hydrothermale Systeme geografisch und mengenmäßig begrenzt. Der Wärmebedarf einer Region und deren geothermisches Wärmeangebot stimmen oft nicht überein. Deshalb ist auch die geothermische Nutzung in Regionen ohne hydrothermale Reservoirs für eine nachhaltige

Energieversorgung interessant, die prinzipiell möglich, aber mit höheren Kosten und Risiken verbunden ist. Die Kosten entstehen, weil die Gesteine stimuliert werden müssen, um eine geeignete Durchlässigkeit zu erreichen. Ein Überblick über das geothermische Potenzial in Europa und den Stand der Forschung wurde bereits veröffentlicht.<sup>[4]</sup> Für ein besseres Verständnis der Temperatur im Untergrund werden zudem Verfahren aus dem Bereich des physikbasierten maschinellen Lernens verwendet, um geothermisch relevante Regionen besser prognostizieren zu können, siehe Bild 3. Neue Forschungsansätze ermöglichen darüber hinaus eine Abschätzung der Unsicherheit der Temperaturprognose, die für die weitere Projektplanung bedeutend sein kann.<sup>[5]</sup>

### **Forschung zu oberflächennaher Geothermie**

Die oberflächennahe Geothermie ist etabliert, kaum mit Risiken verbunden und beispielsweise bei Verwendung von Erdwärmesonden überall einsetzbar. Wie gut sich eine Region für die oberflächennahe geothermische Nutzung eignet, hängt hauptsächlich von der mittleren Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds ab. Allerdings gibt es bisher keine deutschlandweit einheitliche Methode zur Berechnung. Dies führt dazu, dass die von den Bundesländern angegebenen Wärmeleitfähigkeiten oder geothermischen Potenziale nicht über Ländergrenzen hinweg vergleichbar sind. Darüber hinaus werden die sehr hohen Unsicherheiten meist nicht angegeben. Am Institute for Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics wurde deshalb eine Methode und ein Geoportal zur Schätzung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds basierend auf öffentlich verfügbaren Daten entwickelt, bei der auch die Unsicherheit der Wärmeleitfähigkeit angegeben wird.<sup>[6]</sup>

Um den Heiz- und Kühlbedarf von größeren Gebäuden oder von Wohngebieten zu decken, kommen oft Erdwärmesondenfelder zum Einsatz, die beispielsweise aus 100 gekoppelten Erdwärmesonden bestehen können. Der effiziente und nachhaltige Betrieb solcher Erdwärmesondenfelder, die fast immer mit einfachen An-Aus-Regelungen betrieben werden, ist fast nie sichergestellt. Insbesondere bei einem unausgeglichene Heiz- und Kühlbedarf kommt es langfristig zur Aufheizung oder Abkühlung des Untergrunds um die Erdwärmesonden und damit zu Effizienzverlusten. Um dies zu vermeiden werden

im Projekt „MPC-Geothermie“ gemeinsam mit dem RWTH-Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik und der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH modellprädiktive Regelstrategien zur Einbindung von Erdwärmesondenfeldern in Gebäudeenergiesysteme entwickelt. Eine solche Regelstrategie, bei der immer nur so viele Erdwärmesonden aktiv sind, wie gebraucht werden, wurde bereits für das aus 41 Erdwärmesonden bestehende Feld des E.ON ERC-Gebäudes an der Mathieustraße in Aachen implementiert. Damit konnte gezeigt werden, dass sich durch die modellprädiktive Regelung nicht nur die Regeneration der Sonden verbessert, sondern auch über 70 Prozent der Energie der Umwälzpumpe eingespart werden.<sup>[7]</sup> Bei großen Erdwärmesondenfeldern können durch eine modellprädiktive Regelung signifikante Einsparungen beim Energieverbrauch und damit auch bei Treibhausgasemissionen erreicht werden.

Zusätzlich zu den vorgestellten Projekten forschen noch weitere RWTH-Institute zu Themen mit Bezug zur Geothermie. So sind das Geologische Institut und das Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau beispielsweise an dem Forschungsprojekt „KarboEx: Karbonatexploration NRW – Erschließung einer Wärmequelle für den karbonfreien Wärmemarkt“ beteiligt. Mit den Forschungsergebnissen von KarboEx lassen sich geothermische Potenziale der Karbonate in Nordrhein-Westfalen abschätzen und weitere Explorationsstätigkeiten steuern. Der Lehrstuhl für Ingenieurgeologie forscht an Methoden zu Risiken bei der hydraulischen Stimulation, beispielsweise im Projekt „FEAR – Fault Activation and Earthquake Rupture“.

Weitere Impulse für Forschung und Anwendung im Bereich der Geothermie ergeben sich durch die Kooperation mit der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie. Gemeinsam mit RWTH-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern wird aktuell ein Standort in Aachen aufgebaut. In dieser Kooperation werden Grundlagenforschung und Anwendung im Bereich der Geothermie eng verknüpft und in Projekten mit Stadtwerken und Energieversorgern getestet und umgesetzt – wichtige Schritte hin zu einer breiteren Nutzung der Geothermie als ein Baustein der nachhaltigen Wärmewende.

### **Literatur**

- [1] Bracke, R., Huenges, E., Acksel, D., Amann, F., Bremer, J., Bruhn, D., ... & Will, H., 2022, Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland | Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende.
- [2] Koltzer, N., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M., Frick, M., Bott, J., 2019, Regional hydraulic model of the Upper Rhine Graben. *Advances in Geosciences*, 49, 197-206.
- [3] Wellmann, F., Caumon, G., 2018, 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. *Advances in Geophysics* (Vol. 59, pp. 1-121). Elsevier.
- [4] Fink, J., Heim, E., Klitzsch, N., 2022, State of the Art in Deep Geothermal Energy in Europe – With Focus on Direct Heating. *SpringerBriefs in Earth System Sciences*.
- [5] Degen, D., Veroy, K., Wellmann, F., 2022, Uncertainty quantification for basin-scale geothermal conduction models. *Scientific reports*, 12(1), 1-10.
- [6] Heim, E., Laska, M., Becker, R., Klitzsch, N., 2022, Estimating the subsurface thermal conductivity and its uncertainty for shallow geothermal energy use – a workflow and geoportal based on publicly available data. *Energies* 15, 3687. <https://doi.org/10.3390/en15103687>.
- [7] Klitzsch, N., Düber, S., Heim, E., Knapp, D., Kumpel, A., Pechinig, R., Stoffel, P., Wägerle, D., 2022, News from the Project “MPC-Geothermal”: Integrating Borehole Heat Exchangers in Building Automation Systems using Model Predictive Control. EGC 2022, Berlin.

---

### **Autoren**

Univ.-Prof. Florian Wellmann, Ph.D., ist Inhaber des Lehrstuhls und Leiter des Institute for Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics.  
Dr.rer.nat. Norbert Klitzsch ist Akademischer Oberrat am Institute for Computational Geoscience, Geothermics and Reservoir Geophysics.

---





# Wärmepumpen und kalte Wärmenetze sind Schlüsseltechnologien für die Wärmewende

Ambitious climate goals and the need to reduce the dependence on fossil energy imports require a rapid shift away from fossil fuels. In this context, the heat pump is a crucial technology for the building sector because heat pumps can provide heat from renewable sources as ambient air, ground water or soil using electricity. As the share of renewable energy sources in the power grid increases, the operation of heat pumps becomes even more sustainable. Compared to conventional fossil fuel boilers, however, it is a challenging task to optimize the design and operation of a heat pump. The seasonal performance depends on its time depended operation conditions and it is highly sensitive to the temperature difference between the heat source and the heat distribution system. In addition to the optimization of the refrigerant circuit, the more precise design and control of a heat pump system are important topics for the further development of this technology.

Therefore, the Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate is conducting research on how heat pumps can be optimally designed and operated in single buildings or even play an integral part in entire district energy concepts. This article gives an overview of the current challenges and related research activities. It describes a holistic perspective on this promising technology, from concept development to experimental evaluation for sustainable heat pumps in buildings and cold heating networks.

Ein wesentlicher Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland ist auf den Gebäudesektor zurückzuführen, hier werden 35 Prozent der im Land eingesetzten Endenergie benötigt. Insbesondere die Beheizung von Bestandsgebäuden und Bereitstellung von Trinkwarmwasser tragen deutlich zu den Emissionen und dem Energiebedarf bei, da zur Wärmeerzeugung vor allem Gas- und Ölkessel genutzt werden. Folglich ist es zum Erreichen der gesetzten Klimaschutzziele in den kommenden Jahren erforderlich, viele technische Maßnahmen umzusetzen, die Emissionen und Energieverbrauch reduzieren. Zwei wesentliche Bausteine der technischen Maßnahmen sind der Austausch von Kesseln gegen Wärmepumpen sowie die Einspeisung von erneuerbarer Energie aus Wind- und Fotovoltaikanlagen in das Stromnetz. Eine systematische Elektrifizierung der Wärmeversorgung mit Wärmepumpen zahlt demnach doppelt auf die Wärmewende ein: Umweltwärme wird mit Wärmepumpen ressourcenschonend auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben und erneuerbare Energien im Stromnetz können direkt für die Wärmeerzeugung verwendet werden. In Kombination mit baulichen Sanierungsmaßnahmen an Bestandsgebäuden lassen sich so die ambitionierten Klimaschutzziele bis 2045 erreichen.



Bild 1: Aufbau eines Hardware-in-the-Loop-Prüfstands mit Klimakammer und Hydraulikstation zur Vermessung von Wärmepumpen unter dynamischen Betriebsbedingungen  
Foto: Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

In verdichteten Gebieten, beispielsweise in Innenstädten, bietet sich der Einsatz von Wärmenetzen an. Wärmenetze nehmen dabei die Abwärme aus Industrie oder Rechenzentren auf, binden Geo- und Solarthermie an zentraler Stelle ein und sparen damit erhebliche Ressourcen. Wärmepumpen als sogenannte Groß-Wärmepumpen insbesondere in Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen übernehmen dabei eine Schlüsselrolle, um Emissionen und den Energieverbrauch in Stadtquartieren zu reduzieren.

### **Keine Wärmewende ohne Wärmepumpe und Sektorenkopplung**

Für das nachhaltige Energiesystem müssen aufgrund der Elektrifizierung die Wärme- und Stromversorgung immer gemeinsam geplant werden. Auf den Gebäudedächern kann Strom produziert und im Gebäude direkt genutzt oder zwischengespeichert werden. Elektrofahrzeuge sind mit ihrer Batteriekapazität zukünftig Teil des häuslichen Energiesystems und durch einen netzdienlichen Betrieb aller Anlagen lassen sich Belastungsspitzen im übergeordneten elektrischen Netz vermeiden. Gleichzeitig sind Anforderungen aus der Industrie, dem Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektor sowie den privaten Haushalten gemeinsam zu betrachten, um

etwaige Engpässe frühzeitig zu erkennen. Das komplexe Zusammenspiel auf übergeordneter Skala kann sowohl für den Systementwurf als auch für den Systembetrieb nur mit fortschrittlichen mathematischen Verfahren abgebildet werden, um die maßgeschneiderte Auslegung und den optimalen Betrieb sicherzustellen. Aus diesen Gründen ist die Optimierung von Energiesystemen in Bestandsgebäuden und Quartieren mit Wärmepumpen und Wärmenetzen ein Fokus laufender Forschungsaktivitäten des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik.

### **Wärmepumpen für Bestandsgebäude**

In vielen Bestandsgebäuden können Wärmepumpen den vorhandenen Kessel ersetzen. Dabei sind ergänzende Maßnahmen an der Gebäudehülle hilfreich, da niedrigere Temperaturen im Heizkreis die Effizienz einer Wärmepumpe erhöhen. Gleichzeitig ist der Einsatz moderner Wärmepumpen zur Kühlung eines Gebäudes möglich, was insbesondere für ältere Menschen in den immer wärmeren Sommern eine Entlastung bedeutet. Beide Funktionen erfordern eine maßgeschneiderte Dimensionierung der Wärmepumpe, so dass die Kosten für Wärme und Kälte möglichst gering ausfallen und der Betrieb maximal nachhaltig ist.

Die Auslegung von Wärmepumpen und angeschlossenen Speichersystemen ist durch die dynamischen Betriebsbedingungen eine anspruchsvolle Aufgabe. Es gilt den besten Kompromiss aus Anschaffungs- und Betriebskosten zu finden, damit Wärme nicht zum Luxus wird. Wird die Wärmepumpe zu klein ausgelegt, kann im Betrieb ein zweiter (weniger effizienter) Wärmeerzeuger notwendig sein. Wird die Wärmepumpe zu groß ausgelegt, kann dies zu ineffizientem Betrieb führen. In beiden Fällen erhöhen sich die Betriebskosten.

Im Rahmen von Forschungsprojekten arbeitet der Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik zur Auslegung von Wärmepumpen in Theorie und Praxis. Hierfür wurde in den letzten Jahren das „Urban Energy Lab 4.0 – Kältemittellabor“ entwickelt. In diesem werden Prüfstände für Wärmepumpen und Einzelkomponenten betrieben, um theoretische Erkenntnisse experimentell zu validieren. Zusätzlich wird im Rahmen geförderter Projekte nach den besten Kältemitteln und Verschaltungen von Kältemittelkreisläufen und Wärmepumpensystemen gesucht. Hier gibt es noch viel zu tun!



Bild 2: Cloudbasierte Auswertung der Ergebnisse aus einem Hardware-in-the-Loop (HIL) Experiment  
Foto: Peter Winandy





Bild 3: In der Klimakammer  
Foto: Peter Winandy

in der Gesellschaft erfährt. In Wohngebieten gibt es insbesondere für die Nacht hohe Anforderungen an Effizienz und maximale Schallemissionen.

Neben der Betriebsoptimierung für mehr Effizienz sind daher Algorithmen und Regelungsstrategien erforderlich, die einen leisen Betrieb einer Wärmepumpe unterstützen. Diese Strategien beinhalten auch die Überwachung des akustischen Umfelds, damit die Wärmepumpe ihre Betriebslautstärke der Umgebung anpasst. So lassen sich durch Vermeidung von Körperschall, strömungstechnische Optimierungen und angepasste Betriebsführung Akzeptanzprobleme vermeiden.

### **Schlaue Wärmepumpen kennen ihre Stärken und Fehler**

Zur Erreichung maximaler Effizienz und minimaler Emissionen sollte eine Wärmepumpe viel Wärme erzeugen, wenn die Temperatur der Wärmequelle möglichst hoch und die Temperatur des Heizkreises möglichst gering ist. In der Mittagszeit kann neben einer höheren Außentemperatur gleichzeitig der Strom aus der eigenen Fotovoltaikanlage genutzt werden. Durch einen vorausschauenden Betrieb und intelligente Speicherbelastungen werden so die Wärmekosten gesenkt und erneuerbare Energie genutzt. Zusammen mit der Anpassung an den Bedarf entstehen neue Anwendungen, die auf Basis selbstlernender Algorithmen aus dem Baukasten der maschinellen Lernverfahren in die Praxis überführt werden.

Neben kurzfristigen Entscheidungen im Betrieb können zusätzliche Potenziale durch vorausschauenden Betrieb erschlossen werden. Wärmepumpen erkennen bei langfristiger Überwachung aller Betriebsparameter zukünftig, ob in den nächsten Tagen oder Wochen ein technisches Problem zu erwarten ist. Durch diese prädiktive Fehlererkennung kann eine Reparatur geplant und durchgeführt werden. Die Entwicklung dieser Funktionen ist doppelt wichtig, da die Fehlerfrüherkennung gleichzeitig die knappen Ressourcen des Handwerks und der Installation entlastet. Insgesamt gilt, die genannten Themen in Bestandsgebäuden umzusetzen und auch auf größere Netze und Quartiere zu skalieren.

### **Wärmepumpen müssen flüstern**

Wenn diese Technik die Kesseltechnik in den nächsten Jahren ersetzt, dürfen Wärmepumpen weder in Gebäuden noch außerhalb von Gebäuden stören. Jede Kompressionswärmepumpe verfügt über einen Verdichter mit sich drehenden Teilen und jede Außenluftwärmepumpe nutzt zusätzlich einen Ventilator, um Umweltwärme effizient aufzunehmen. Diese Komponenten müssen in der jährlich geplanten Stückzahl von 500.000 nicht nur effizient, sondern auch leise arbeiten, damit die Technik insgesamt eine hohe Akzeptanz

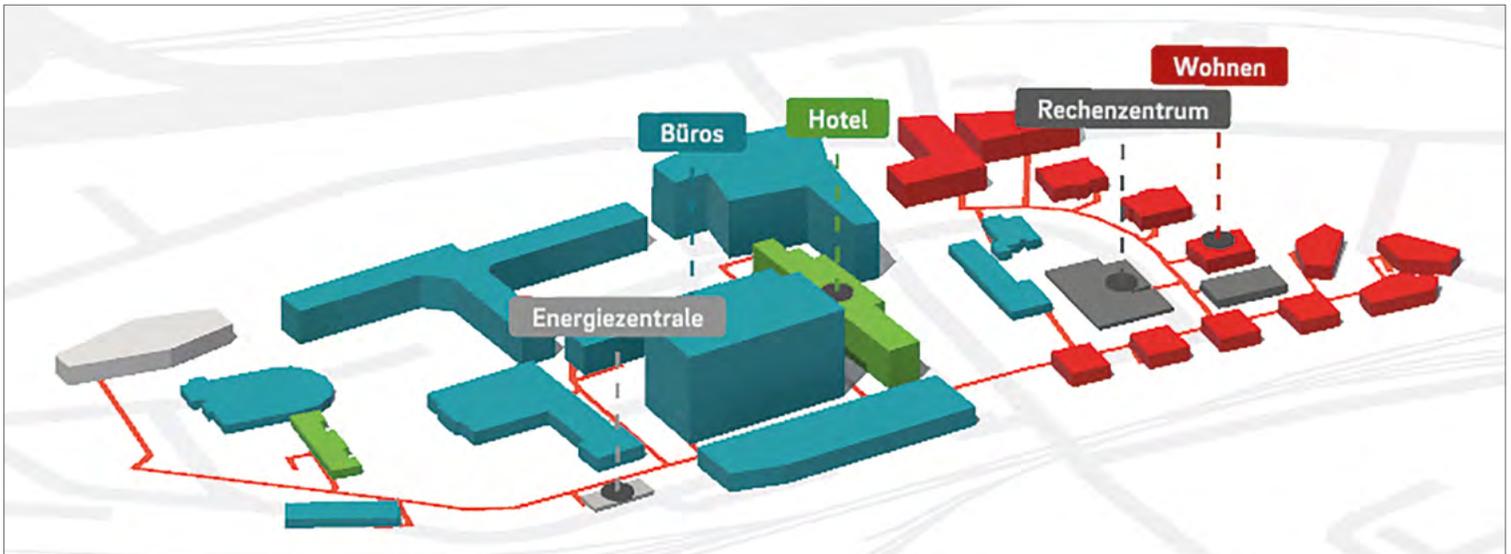


Bild 4: Struktur des Berechnungsmodells zur Auslegung von kalten Wärmenetzen



Bild 5: Verlegung von Rohrleitungen für ein kaltes Wärmenetz im Rahmen des Reallabors „TransUrban.NRW“

Foto: Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

### **Kalte Wärmenetze als eine effiziente und klimafreundliche Versorgungsoption**

Eine Option für die nachhaltige Wärmeversorgung von Quartieren sind kalte Wärmenetze. Kalte Wärmenetze stellen Versorgungsinfrastrukturen, welche durch Wärmepumpen ausschließlich strombasiert oder in Kombination mit einer Kraft-Wärme-Kopplung operieren können. Die Basis für kalte Wärmenetze bilden Wasser-Wasser-Wärmepumpen in den angeschlossenen Gebäuden, die die notwendige Temperatur für Heizungssysteme

und Trinkwarmwasser erzeugen. Angeschlossen an ein solches Wärmenetz kann somit eine Vielzahl von Gebäuden und Energiequellen verbunden und ein optimaler energetischer Ausgleich innerhalb des Quartiers erreicht werden.

### **Energieausgleiche innerhalb von Stadtquartieren**

Ein weiterer Vorteil ist die Verwendung der gleichen Netzinfrastruktur zum Heizen und zum Kühlen. Zu diesem Zweck werden in der Regel Rohrleitungen auf mindestens einem warmen und einem kalten Temperaturniveau (Leiter) betrieben. Heizt eine Wärmepumpe, wird der wärmere Leiter als Wärmequelle verwendet und das abgekühlte Wasser dem Kaltleiter zugeführt. Durch die entstehende Kühlleistung wird der kältere Leiter abgekühlt. Diese Energie lässt sich in anderen Gebäuden wiederum zum Kühlen verwenden. Dies gilt insbesondere in den Übergangszeiten Frühling und Herbst, wenn manche Gebäude heizen und andere kühlen.

### **Flexibilität ist ein Schlüssel in Richtung Nachhaltigkeit**

Durch die Flexibilität in den Temperaturniveaus und die allgemein niedrigeren Temperaturen können eine Vielzahl von regenerativen Wärme- und Abwärmequellen als Versorgungsoptionen in kalte Wärmenetze eingebunden werden. Kalte Wärmenetze werden auf Temperaturniveaus dicht an der Umgebungstemperatur betrieben. Hierdurch können Geothermie, Solarthermie und Außenluftwärmepumpen effizient genutzt und die Wärme- und Kälteversorgung somit nahezu vollständig defossilisiert werden. Auch die Abwärme aus Abwasser, Flusswasser oder

Rechenzentren lässt sich einbeziehen. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Planung und Betrieb der Versorgungsinfrastruktur. Durch das Potenzial des energetischen Ausgleichs reicht es nicht, das gesamte System auf einen statischen Wärmebedarf auszulegen. Vielmehr ist eine Auswertung der zeitlichen Verläufe möglicher Wärme- und Kältebedarfe erforderlich. Hierfür werden am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik Methoden entwickelt, die in Zukunft Auslegung und Betrieb von kalten Wärmenetzen unterstützen. Im Reallabor der Energiewende „TransUrban.NRW“ wird daran geforscht, diese Technologie in vier Quartieren in Nordrhein-Westfalen in die Praxis zu bringen. Das Reallabor deckt sämtliche Schritte von der Planung bis zum Betrieb ab und wird durch ein interdisziplinäres Konsortium aus Energiesystemanbietern, Start-ups und Wissenschaft durchgeführt. Die bisherigen Ergebnisse geben Grund zum Optimismus, dass die Klimaziele durch Wärmepumpen und neue Wärmenetze erreicht werden können, wenn gleichzeitig der Wärmebedarf durch die Sanierung des Bestands reduziert wird.

### **Autor**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller ist Inhaber des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik und Leiter des Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate am EON Energy Research Center.

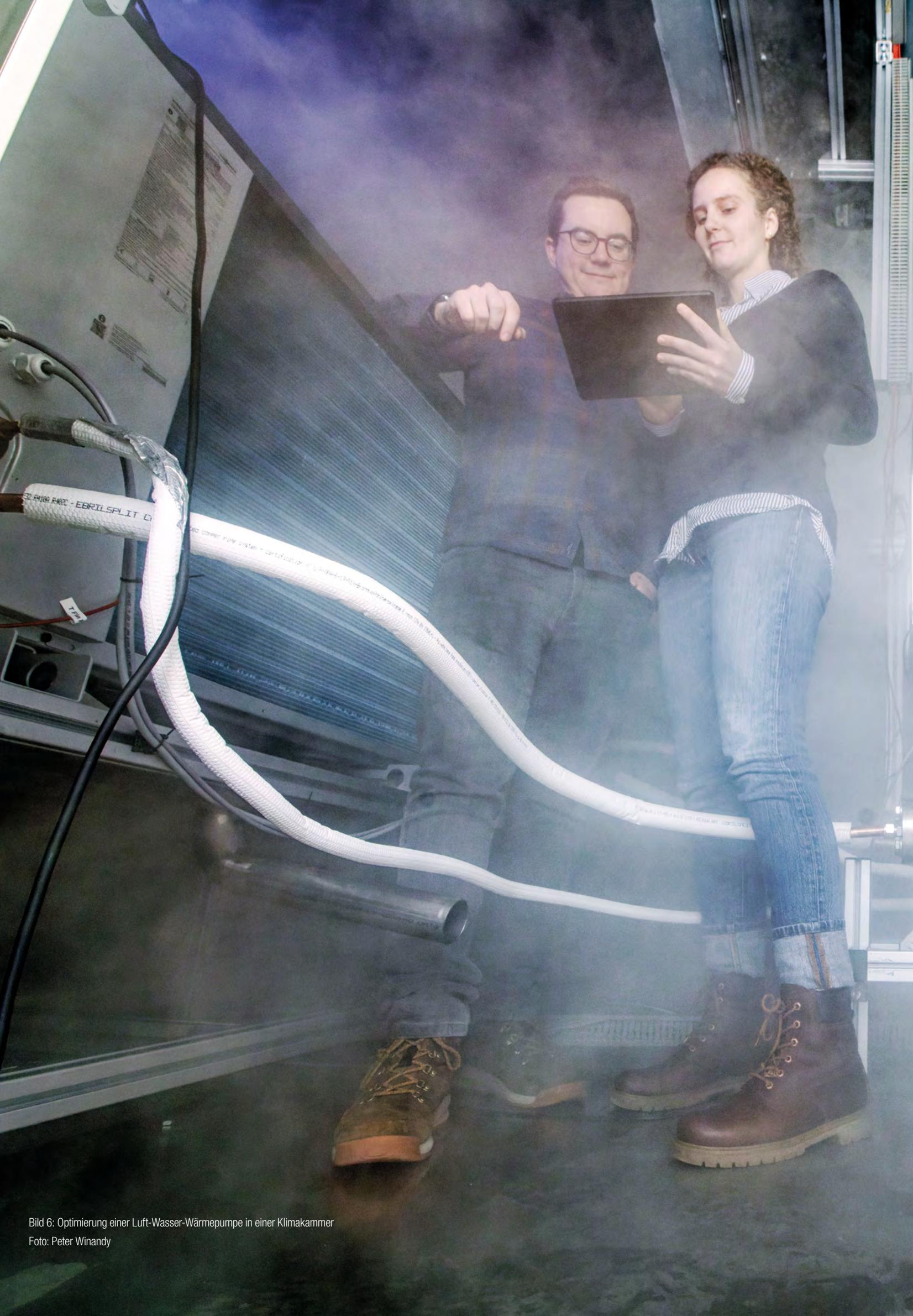


Bild 6: Optimierung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in einer Klimakammer  
Foto: Peter Winandy



# Batterien als Baustein für eine sichere und zukunftsfähige Energieversorgung

Verschiedene Akteure können zur Versorgungssicherheit beitragen

Due to the war in Ukraine, customers in Europe are now experiencing the downside of dependencies on energy imports, especially natural gas. We are seeing exorbitant increase in energy prices on the energy markets. The only way to address this situation is to dramatically increase power generation from renewable energies. Fluctuating generation from wind and solar and dynamics of consumption require flexible generation, which under current conditions can only be met by expensive gas-fired power plants. Batteries provide a solution to better match generation with demand and can thus help to decrease dependencies through a temporal shift of sustainable generation from wind and solar and deliver services to stabilize the power grids that are responsible for the spatial transport of electricity.

Batterien können Energie über Monate hinweg mit wenig Verlusten speichern und mit hohem Wirkungsgrad wieder abgeben, sie können innerhalb weniger Millisekunden Volllast liefern und in modularer Weise von kleinen bis zu sehr großen Kapazitäten aufgebaut werden. Damit können Batterien Versorgungsaufgaben sehr flexibel und nahe bei den kritischen Verbrauchern oder auf verschiedenen Netzebenen übernehmen. Dauer der Versorgung und maximale Leistungsabgabe hängen dabei in erster Linie von der Zahlungsbereitschaft beziehungsweise der Risikoabwägung zwischen den Kosten für die Einrichtung einer Notversorgung und den Kosten für einen Stromausfall ab. Batterien gibt es in unterschiedlichen Größen und Formen. Weltweit werden jedes Jahr Milliarden Batterien hergestellt. Wichtigster Vertreter ist mittlerweile die Lithium-Ionen-Technologie, die leistungsfähiger und günstiger geworden ist als frühere Technologien. Insbesondere durch die Einführung von Elektroautos sind die Kosten für Batteriezellen schneller als erwartet gesunken. Batterien können daher in unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt werden, wo Energie in

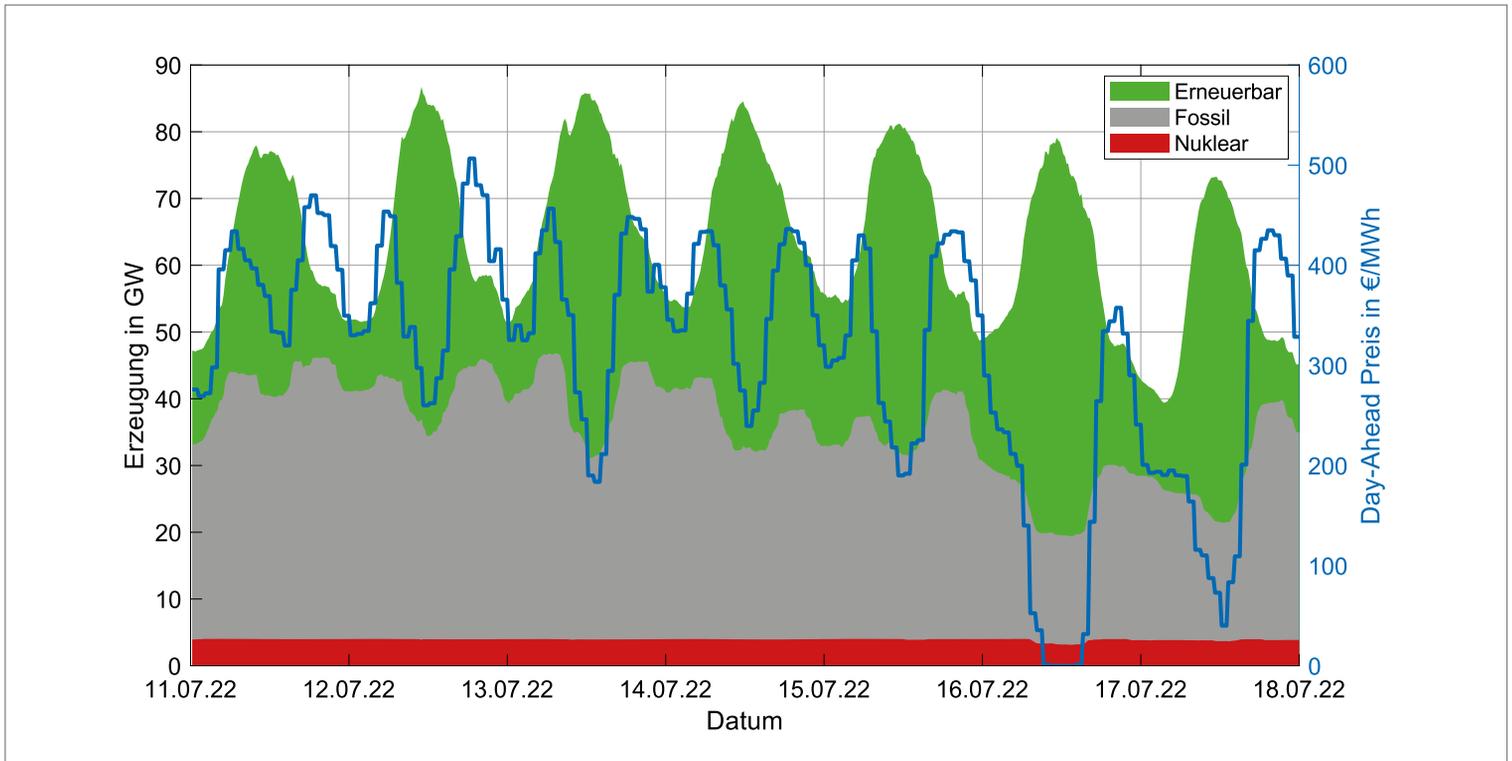


Bild 1: Stromerzeugung und Preise in Deutschland am Day-Ahead-Markt für die Woche vom 11. bis 18. Juli 2022. Eigene Darstellung auf Datenbasis von energy-charts.de.

Form von Strom benötigt wird. Sie bilden einen wichtigen Baustein für das sich wandelnde Energiesystem. In Ländern mit im Vergleich zu Deutschland deutlich schwächeren Stromnetzen wie die USA, Australien oder Großbritannien werden Batteriespeicher in Stromnetzen bereits in großem Stil genutzt.

### Stabilisierung der Energieversorgung

Anders als fossile Kraftwerke sind die erneuerbaren Energien stark volatil, da sie von Wetterbedingungen abhängen. Unsere Stromnetze erfordern für einen stabilen Betrieb, dass zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen veränderlicher Erzeugung und schwankender Nachfrage besteht. Das Stromnetz besitzt aus physikalischen Gründen keine Speicherfähigkeit. Daher sind zusätzliche Technologien erforderlich, die zu einem stabilen Betrieb beitragen und dafür flexibel in das System Strom abgeben oder aufnehmen können. In der Vergangenheit wurden dafür Gaskraftwerke genutzt, die anders als Kern- oder Kohlekraftwerke dynamischer geregelt werden können. Deutschland importiert aber sowohl den größten Teil des Gasverbrauchs, 100 Prozent des Steinkohle-

und Ölbedarfs insbesondere für die Mobilität und die Industrie.

Mit dem Überfall auf die Ukraine und der darauffolgenden Sanktionierung und Störungen von Energieimporten aus Russland, zeigt sich deutlich die Kehrseite von Abhängigkeiten in der Energieversorgung. Insbesondere bei Erdgas sind Preissteigerungen auf mehr als das zehnfache im Vergleich zum Vorkrisenniveau zu beobachten. Mit den operativen Kosten von Gaskraftwerken zur Stromproduktion steigt auch der Strompreis an den Energiemärkten, da die teuersten Kraftwerke den Preis bestimmen. Gleichzeitig hat sich die Volatilität des Strompreises stark erhöht: Insbesondere in Phasen hoher Leistungsbereitstellung von erneuerbaren Stromerzeugern sinkt der Strompreis, da dann keine Gaskraftwerke gebraucht werden. Werden die Gaskraftwerke gebraucht, steigen die Strompreise erheblich an, siehe Bild 1. Dadurch entstehen Preisspannen von teilweise mehreren 100 Euro pro Megawattstunde zwischen den günstigsten und teuersten Stunden eines Tages.



Bild 2: M5Bat-Batteriegrößenpeicher der RWTH Aachen neben dem Umspannwerk der Stadtwerke Aachen AG, kurz STAWAG, Hüttenstraße 9.

Foto: Institute for Power Generation and Storage Systems

Batteriespeicher können eingesetzt werden, um Energie in Zeiten hoher Erzeugung der erneuerbaren Energien und damit Zeiten günstiger Preise aufzunehmen und in den folgenden zwölf bis 24 Stunden bei unzureichenden erneuerbaren Energien anstelle des Betriebs von Gaskraftwerken wieder abzugeben.

Um von fossilen Energieträgern und erforderlichen Importen unabhängiger zu werden, muss in Deutschland der Zubau von erneuerbaren Energien deutlich gesteigert werden. Schlüsseltechnologien erneuerbarer Energien sind hierzulande Fotovoltaik- und Windkraftanlagen. Dadurch kann die Stromproduktion kurz- und mittelfristig gesteigert und gleichzeitig der Gasbedarf in der Erzeugung reduziert werden. Die Bundesregierung plant mit einem Anteil von 80 Prozent der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2030, wozu gegen Ende des Jahrzehnts jährlich 20 Gigawatt Fotovoltaikanlagen und 15 Gigawatt Windkraftanlagen errichtet werden sollen. Die Energiekrise zeigt jedoch, dass es Alternativen bedarf, die unabhängig von fossilen Brennstoffen sind. Batterien stellen eine solche Flexibilitätsressource dar, die die hohen Dynamiken und steilen Rampen gut abbilden können.

### **Batteriespeicher in Privathaushalten und der Industrie**

Fotovoltaikanlagen erfreuen sich bei Privathaushalten einer steigenden Beliebtheit, mit ihnen lässt sich unkompliziert aus Sonnenenergie Strom erzeugen. In den vergangenen Jahren wurden hunderttausende Anlagen auf Einfamilienhäusern oder Garagen installiert. Da der Strom, den man über das öffentliche Netz bezieht, in den letzten Monaten immer teurer geworden ist, verleiht die Energiekrise Fotovoltaik-Strom zusätzlichen Aufwind. Der Arbeitspreis für Endkunden bei Neuverträgen übersteigt mittlerweile 70 Cent pro Kilowattstunde, was um ein Vielfaches über den etwa acht bis elf Cent pro Kilowattstunde für Strom aus kleinen Solaranlagen liegt. Die Einspeisung von Solarstrom in das Netz ist zudem wenig lukrativ, denn die Vergütung wurde in den letzten Jahren stark zurückgefahren. Batterien für die Speicherung von Solarstrom im Eigenheim, sogenannte Heimspeicher, haben dadurch deutlich an Attraktivität gewonnen. Die Batterie speichert dabei tagsüber den Strom ein, den der Haushalt nicht sofort nutzt. Dieser kann dann abends oder über Nacht aufgebraucht werden. Das öffentliche Netz fungiert nur noch als Back-up für Tage, an denen wenig Strom erzeugt werden kann,

oder wenn die Batterie leer wird. Der Einsatz einer solchen Batterie kann daher den Stromverbrauch aus dem Versorgungsnetz deutlich reduzieren und die eigene Versorgung erhöhen. Eine Verschiebung des Sonnenstroms vom Sommer in den Winter lässt sich damit aber ebenso wenig bewerkstelligen, wie eine Versorgung über eine mehrtägige Schlechtwetterperiode hinweg. Heimspeicher liefern dennoch einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit, denn sie entlasten das Stromsystem.

Auch der Industriesektor hat hohes Potenzial, Investitionen in Richtung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Produktion auszurichten. Durch die Energiekrise ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend deutlich verstärken wird. Dachflächen von Industrie- und Produktionshallen bergen ein enormes Potenzial für den Ausbau der Fotovoltaik. Freiflächen erlauben zudem oftmals auch die Integration von Windkraftanlagen. Die Energieerzeugung auf dem eigenen Dach hat zudem den Vorteil, dass Energie dort zur Verfügung steht, wo hohe Verbräuche anfallen. In vielen Betrieben kann die erneuerbare Energie vollständig genutzt werden. Sobald wesentliche Überschüsse erwartet werden, ist der Zubau von Industriebatteriespeichern eine sinnvolle Option. Diese

fungieren zunächst als Pufferspeicher und ermöglichen einen höheren Nutzungsgrad der eigens erzeugten Energie. Darüber hinaus kann die Wertschöpfung der Batterie gesteigert werden, indem sie für weitere Services verwendet wird. Dazu gehört die Glättung von Spitzen im Strombedarf, was für die Betriebe einen geringeren Leistungspreis bedeutet und zudem hilft, das Versorgungsnetz zu entlasten. Des Weiteren kann mit dem Speicher flexibel Strom zu günstigen Preisen an der Börse eingekauft, oder zu teuren Preisen verkauft werden. Industriespeicher stellen somit eine weitere Flexibilitätsoption im Stromnetz dar und können Industriebetrieben helfen Kostensenkungspotenziale zu nutzen.

### **Großbatteriespeicher zur Stabilisierung der Netze**

Zur Stabilisierung der Netze wurden bis vor wenigen Jahren insbesondere von CO<sub>2</sub>-intensiven Kraftwerken Netzdienstleistungen wie Momentanreserve, Primär- und Sekundärregelleistung zur Stabilisierung der Netzfrequenz bei 50 Hertz erbracht. Durch die Absenkung der Mindestlosgröße für Marktteilnehmer auf ein Megawatt und die gesunkenen Batteriepreise sind seit wenigen Jahren auch Batteriegroßspeicher wirtschaftlich und technisch in diesen Markt eingetreten. Zur Erbringung der sogenannten Primärregelleistung reagieren die Batteriespeicher dabei auf die aktuelle Netzfrequenz und sorgen durch gezielte Ent- oder Beladung dafür, dass die Abweichung der Netzfrequenz von 50 Hertz möglichst bei nur wenigen zehntel Hertz liegt. Der Ausgleich von Schwankungen im Stromnetz, die durch kurzfristige Laständerungen oder Einspeisung verursacht werden, muss dabei innerhalb von 30 Sekunden mit voller Leistung erbracht werden. Batteriespeicher können dabei bereits nach wenigen Millisekunden vollautomatisch abgerufen werden. Zudem ist es möglich, mehrere hundert oder tausend kleinere Batteriespeicher zu einem virtuellen Kraftwerk zu koppeln, das dann als eine Einheit ebenfalls Netzdienstleistungen erbringen kann. Technisch spielt es keine Rolle, ob es sich um Heimspeichersysteme oder aber bidirektional agierende Fahrzeuge während der Ladevorgänge handelt. Die große Zahl von Einheiten erhöht die Resilienz des Systems, weil zum einen eine deutlich bessere Verteilung über viele Netzsegmente erreicht wird, zum anderen der ungeplante Ausfall einer Einheit nur einen kleinen Effekt hat und nicht zum Ausfall einer Groseinheit führt.

Batteriespeicher können zudem autark hochgefahren werden und so in Fällen von Blackouts gemeinsam mit den Pumpspeicherkraftwerken den Wiederaufbau der Stromnetze unterstützen. Die automatisierte Steuerbarkeit und schnelle Reaktionszeiten ermöglichen es auch, größere konventionelle Kraftwerke wieder ans Netz zu bringen, die aufgrund der Trägheit ihrer Generatoren und Turbinen erst später mit dem Netz synchronisiert werden können.

### **Notstromversorgung mit Batterien**

In den Medien wird vor einer Versorgungslücke und Blackouts gewarnt. Untersuchungen der Übertragungsnetzbetreiber haben gezeigt, dass die Risiken relativ gering sind und durch einen Weiterbetrieb der Atomkraftwerke kaum gemildert werden. Im Worst-Case-Szenario müssten viele Faktoren zusammentreffen. Gerade das menschliche Verhalten stellt hier eine hohe Unsicherheit dar, da der gleichzeitige Einsatz von Millionen Heizlüftern nicht bei der Auslegung der Stromnetze berücksichtigt wurde und das Potenzial hat, insbesondere Transformatoren und Leitungen in die Überlast zu bringen. Kritische Infrastrukturen gilt es bei Netzausfällen mit hoher Priorität zu schützen, damit die Versorgung mit lebenswichtigen Gütern oder Geld, medizinischen Einrichtungen, Kommunikationsinfrastruktur und staatlichen Einrichtungen aufrechterhalten werden. Dabei kommt Batteriespeichern eine Schlüsselrolle zu. Durch ihr schnelles Reaktionsvermögen sind sie in der Lage, bei einem Netzausfall ein unabhängiges und isoliertes Inselnetz aufzubauen und dieses für mehrere Stunden bis Tage aufrecht zu erhalten. Ihre Pufferwirkung hilft zudem, empfindliche Hardware vor Spannungsschwankungen im Netz zu schützen, die in Rechenzentren, Infrastrukturen der Informations- und Kommunikationstechnik oder medizinischen Geräten zu erheblichen Störungen führen können. Bei der Versorgung lebenserhaltender Maschinen in Krankenhäusern werden ebenfalls Batterien eingesetzt, die bei längeren Stromausfällen aber von Dieselaggregaten oder Brennstoffzellensystemen abgelöst werden, sodass die Versorgung über mehrere Tage gesichert ist.

---

## **Autoren**

Dr.rer.nat. Christian Bußar ist Abteilungsleiter Netzintegration und Speichersystemanalyse am Institute for Power Generation and Storage Systems.

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uwe Sauer ist Inhaber des Lehrstuhls für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik und einer der Leiter am Institute for Power Generation and Storage Systems.

Jonas van Ouwerkerk, M.Sc, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institute for Power Generation and Storage Systems.

---

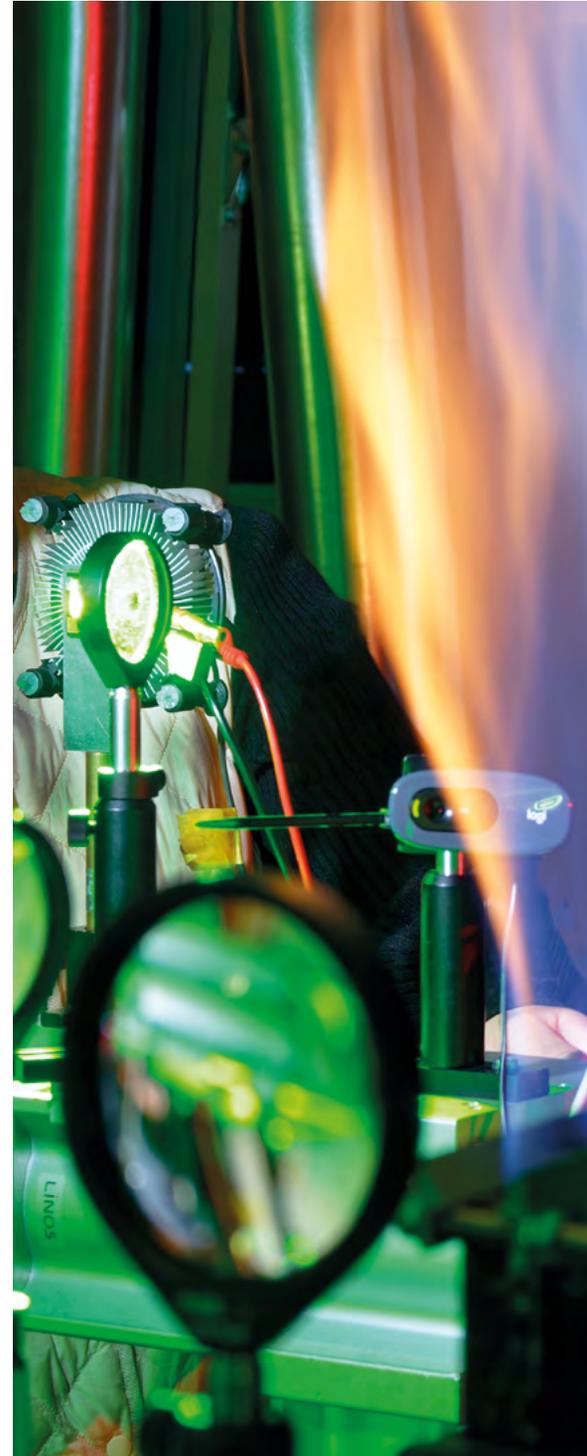
# Regenerative Brennstoffe

## Optimale Umwandlung komplexer Brennstoffe

Harvesting and utilization of renewable energy occur not necessarily at the same time or place, hence long-time storage and long-range transport of energy are needed. Chemical energy carriers are particularly suitable for this purpose and will play an essential role in future energy systems. Hydrogen or ammonia are such energy carriers, which can be produced from renewable electricity. Carbon-containing renewable energy carriers, such as methanol, are possible as well, if CO<sub>2</sub> that has been extracted from the air is used in their production.

The deployment of these energy carriers in presently well-established thermochemical energy conversion processes, e.g., for electrical power generation or for providing high-temperature process heat, has many advantages. Compared to fossil fuels, chemical energy carriers are not only climate neutral but also offer a huge potential to further increase efficiencies and avoid pollutants during combustion. However, some of these fuels, such as hydrogen, are characterized by a particularly complex combustion behavior. These challenges must be better understood in the future, and predictive simulations for the complex combustion behavior is urgently needed to develop highly efficient and sustainable combustion technologies.

Die Bedeutung des Klimawandels und die damit verbundenen Gefahren für die Menschheit werden uns täglich bewusster. Gleichzeitig zeigt die aktuelle Energiekrise die Wichtigkeit der Energiesicherheit und deren Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft. Beide Herausforderungen müssen gemeinsam adressiert werden, denn es ist klar, dass die Energiewende Möglichkeiten bietet, die Energiesicherheit besser zu gestalten. Hierzu bieten sich die Windenergie und die Fotovoltaik mit ihren enormen Potenzialen an. Da Erzeugung und Verbrauch erneuerbarer Elektrizität aber häufig zeitlich und räumlich voneinander getrennt sind, müssen Wege gefunden werden, die Energie über weite Strecken transportieren und langfristig speichern zu können. Hierfür sind synthetisch hergestellte chemische Energieträger, wie Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) oder Methanol (CH<sub>3</sub>OH) besonders gut geeignet. Sie können mithilfe erneuerbarer Elektrizität hergestellt werden, werden daher auch als E-Fuels bezeichnet und sollen eine zentrale Rolle in zukünftigen Energiesystemen einnehmen. Für die spätere Nutzung kann die chemisch gespeicherte Energie wieder in Elektrizität umgewandelt werden. Sie kann aber auch direkt im Schwerlast-, Schiffs- und Luftverkehr sowie bei der Erzeugung von industrieller Prozesswärme eingesetzt werden, wo rein elektrische



Lösungen aufgrund der erforderlichen hohen Energiemengen, Energiedichten und Prozesstemperaturen oft nur schwer oder gar nicht realisierbar sind. Sowohl für die Verstromung wie auch für die direkte Anwendung bieten thermochemische Energieumwandlungsprozesse, also die energetische Umwandlung durch Verbrennung, zum Beispiel in Gasturbinen, Industriebrennern oder Kolbenmotoren, wichtige Vorteile. Sie sind vielseitig, zuverlässig und tolerieren geringere Wasserstoffreinheiten als beispielsweise Brennstoffzellen. Verbrennungsprozesse sind bereits weit verbreitet

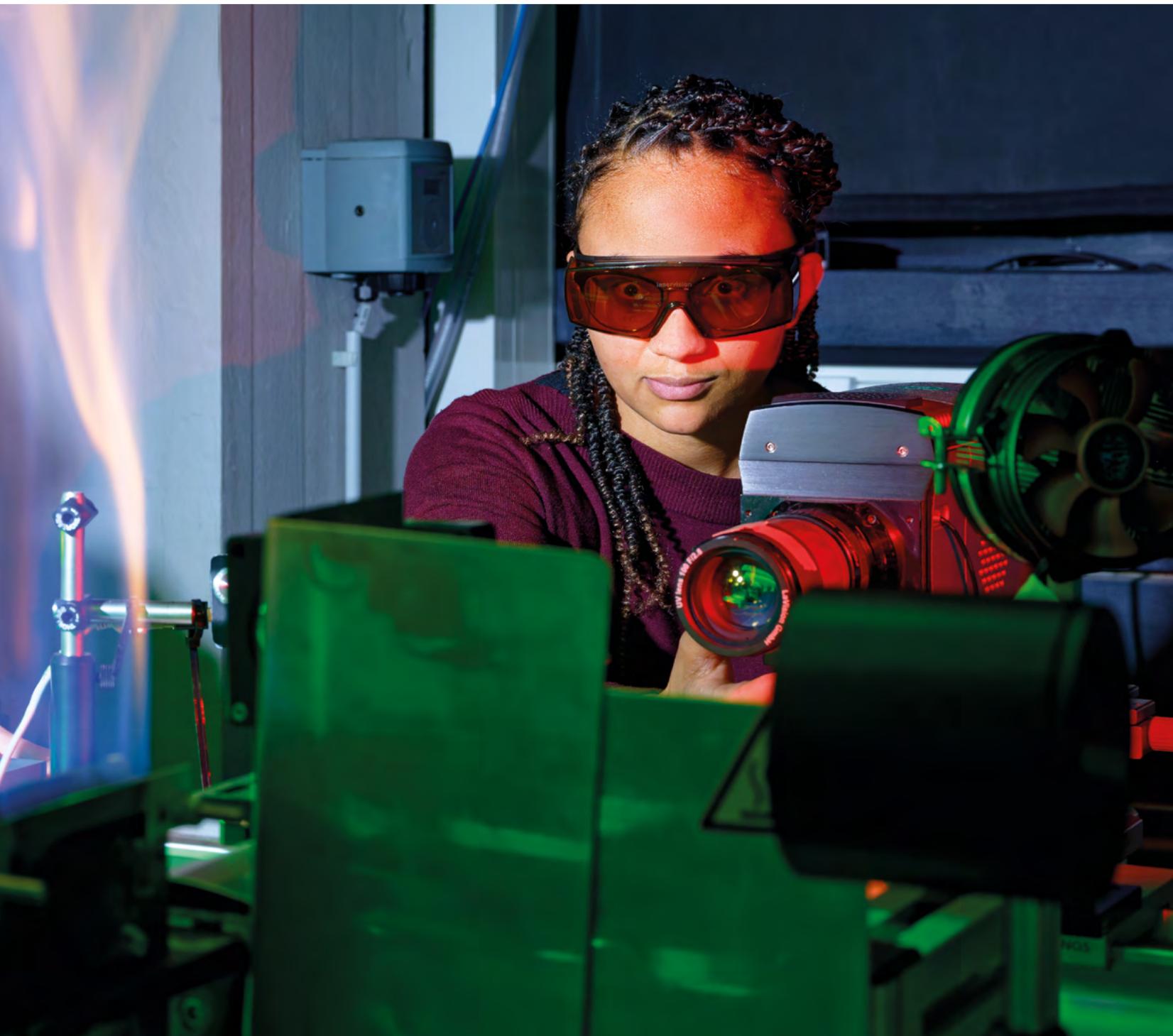


Bild 1: Experimentelle Untersuchungen von Flammen mittels Lasermesstechnik geben Aufschluss über Verbrennungsprozesse chemischer Energieträger  
Foto: Peter Winandy

und können potenziell auf die Verwendung erneuerbarer und klimaneutraler Brennstoffe umgerüstet werden. Darüber hinaus bietet sich für die Verbrennung ein erhebliches Optimierungspotenzial durch den Betrieb mit neuen Brennstoffen. So kann die Verwendung von E-Fuels anstelle fossiler Brennstoffe Emissionen reduzieren, die Effizienz weiter verbessern und die Betriebsflexibilität erhöhen. Darüber hinaus kommen für die Bereitstellung industrieller Hochtemperatur-Prozesswärme nur thermochemische Prozesse in Frage. Dies ist wichtig, da etwa 33 Prozent der gesamten

industriellen Prozesswärme in Europa bei Temperaturen über 1.000 Grad Celsius<sup>[1]</sup> benötigt wird, wovon ein großer Teil aus der Verbrennung stammen muss. Ein weiterer großer Vorteil der Nutzung chemischer Energiespeicherkomponenten in Verbrennungsprozessen besteht darin, dass sie bis zu einem gewissen Grad „drop-in“-fähig sind. Sie können daher einen schrittweisen technologischen Wandel ohne die hohen Risiken und Investitionskosten ermöglichen, die mit der Einführung disruptiver Technologien verbunden sind. Je nach Anwendungsbereich gibt es spezi-

fische Anforderungen, die zu unterschiedlichen idealen Brennstoffen führen. So sind für mobile Anwendungen hohe Energiedichten, also große Energiemengen pro gegebenem Tankvolumen, erforderlich. Diese werden vor allem von kohlenstoffhaltigen Komponenten erreicht. Hier eignet sich zum Beispiel Methanol, das aufgrund der hohen Oktanzahl besonders hohe Wirkungsgrade ermöglicht. Gleichzeitig kann Methanol durch das bereits im Molekül enthaltene Sauerstoffatom Schadstoffemissionen erheblich reduzieren. Für viele Anwendungen ist auch Methan als E-Fuel ge-

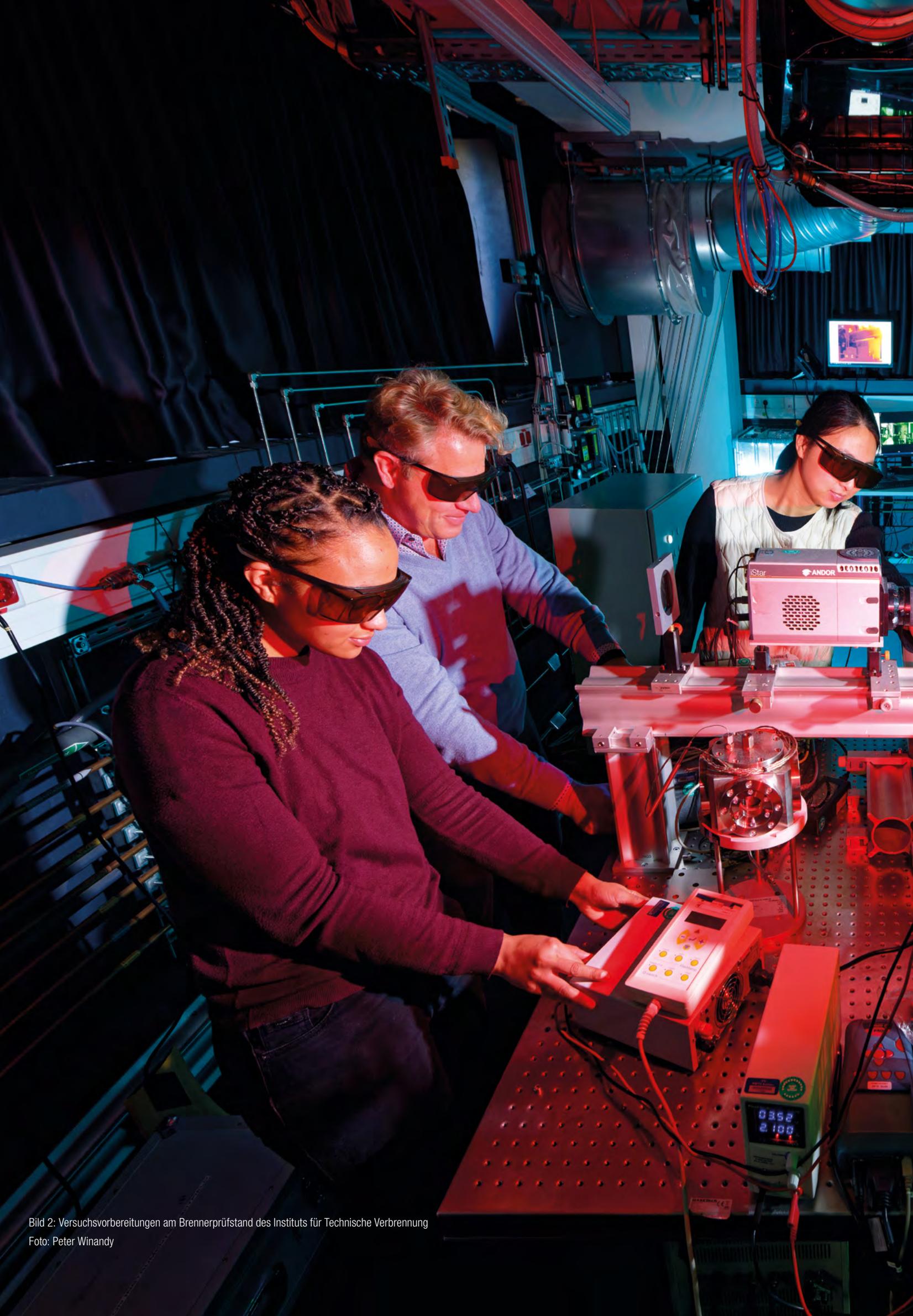
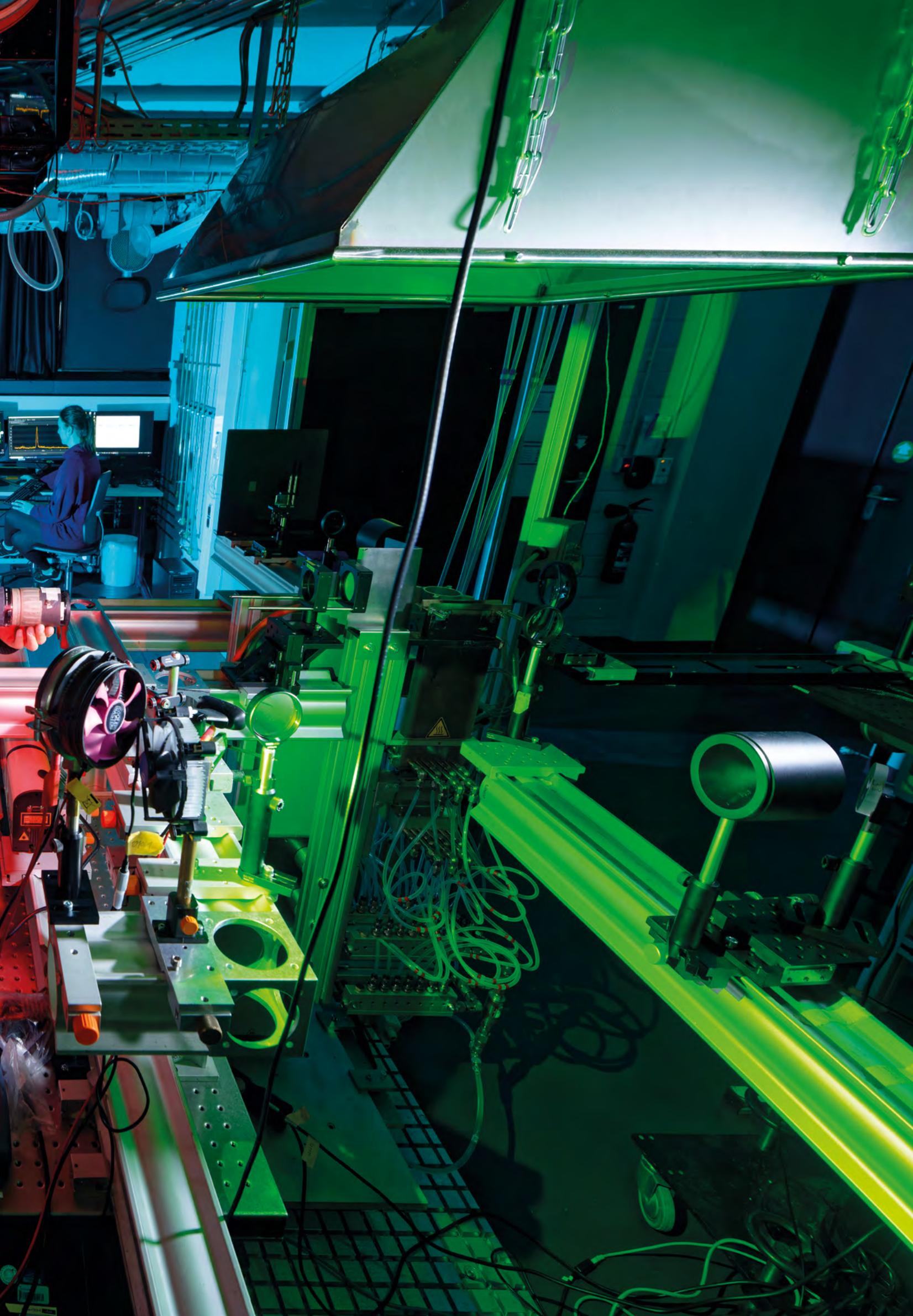


Bild 2: Versuchsvorbereitungen am Brennerprüfstand des Instituts für Technische Verbrennung  
Foto: Peter Winandy



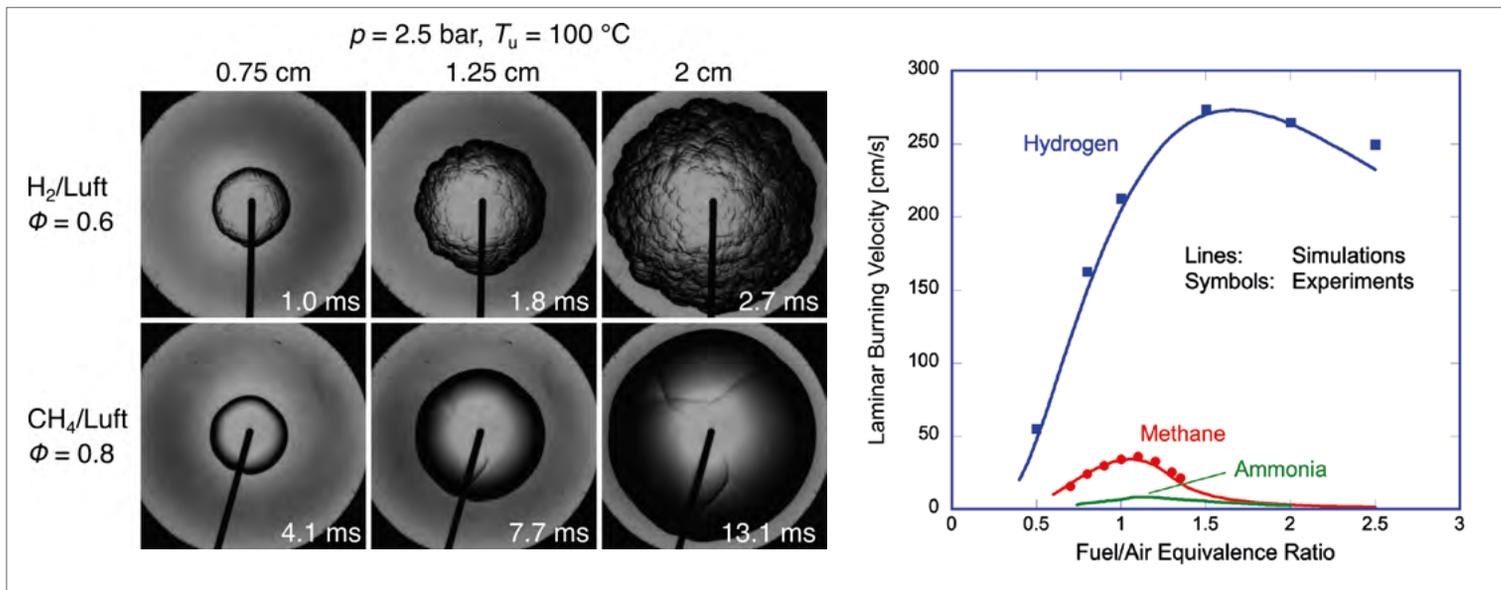


Bild 3: Laminare Flammen von Methan/Luft-Gemischen im Vergleich mit Wasserstoff/Luft-Gemischen.

Links: Flammenausbreitung bei verschiedenen Radien in einem Experiment in einer Kugelbrennkammer bei 2.5 bar und 100 Grad Celsius ( $\phi$  ist das Brennstoff/Luft-Verhältnis).<sup>[2]</sup>

Rechts: Brenngeschwindigkeiten der Brennstoffe Wasserstoff, Methan und Ammoniak aus Experiment und Simulation bei Atmosphärendruck und einer Temperatur von 25 Grad Celsius.<sup>[3]</sup>

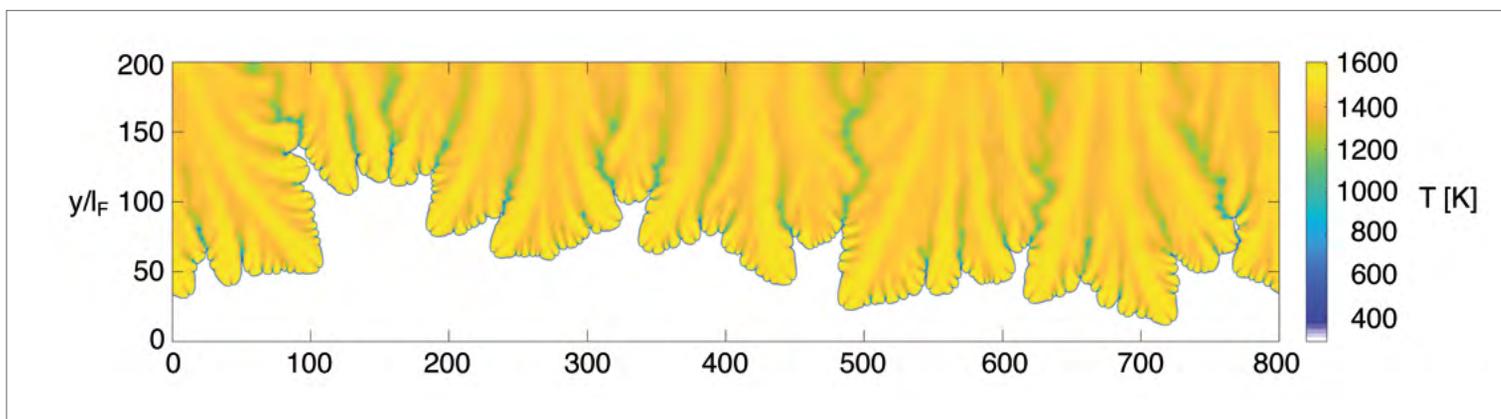


Bild 4: Thermodynamische Verbrennungsinstabilitäten einer mageren Wasserstoff/Luft-Flamme, welche sich von oben nach unten bewegt. Gezeigt ist das Temperaturfeld und  $l_f$  ist die Flammendicke einer planaren Flamme.<sup>[4]</sup>

eignet, dieses ist dem herkömmlichen Erdgas sehr ähnlich und kann damit einfach dem Erdgasnetz zugeführt werden.

Da für die Herstellung kohlenstoffbasierter E-Fuels aber  $\text{CO}_2$  benötigt wird, das der Luft durch sogenanntes Direct-Air-Capture entzogen werden muss, werden rein wasserstoffbasierte Brennstoffe für ein zukünftiges kohlenstofffreies Energiesystem eine besondere Rolle spielen. Beispiele hierfür sind sowohl Wasserstoff selbst wie auch Ammoniak, das bei der Verbrennung mit Luft in Wasser und molekularen Stickstoff,  $\text{N}_2$ , umgewandelt werden kann. Wasserstoff und Ammoniak sind kohlenstofffrei und Wasserstoff ist sehr vielseitig für bedarfsorientierte Energieanwendungen einsetzbar. Ammoniak kann aufgrund seiner Toxizität nicht in allen Prozessen eingesetzt werden, aber seine Herstellung ist gut bekannt und auf der Grundlage erneuerbarer Energien möglich. Vorteil von Ammoniak ist, dass es

sich sehr gut für den einfachen und kostengünstigen Transport über große Entfernungen und für die Langzeitspeicherung eignet, da es schon bei geringem Überdruck als Flüssigkeit vorliegt.

Während die Verwendung wasserstoffhaltiger Brennstoffe eine Gelegenheit zur Dekarbonisierung thermochemischer Energieumwandlungsprozesse bietet, ergeben sich Herausforderungen aus ihren spezifischen Verbrennungseigenschaften. Zur Stromerzeugung können Gasturbinen nicht ohne Weiteres mit Wasserstoff oder Ammoniak betrieben werden.

Eine wichtige Brennstoffeigenschaft ist die sogenannte laminare Brenngeschwindigkeit, die die Geschwindigkeit, mit der sich eine ebene Flamme ohne weitere Störungen durch ein brennbares Gemisch bewegt. Brenngeschwindigkeiten werden am Institut für Technische Verbrennung mithilfe einer sphärischen Kam-

mer bestimmt. Diese wird zunächst mit einem Gemisch aus Brennstoff und Luft gefüllt. Durch einen Zündfunken im Mittelpunkt der Kammer bildet sich eine sphärische Flamme, deren Entwicklung eine Hochgeschwindigkeitskamera erfasst. Bild 3 zeigt einen Vergleich von Wasserstoff und Methan. Zunächst fällt auf, dass für Wasserstoff die gleichen Flammendurchmesser bei viel kürzeren Zeiten erreicht werden. Dies bestätigt sich auch in den Brenngeschwindigkeiten, die für Wasserstoff etwa zehnmal so schnell sind wie für Methan. Diese Brenngeschwindigkeiten sind vorteilhaft, zum Beispiel für die Entwicklung kompakter Verbrennungsaggregate. Aber auch ein sogenannter Flammenrückschlag ist möglich, also die ungewollte Verbrennung in die Düse hinein und durch die Brennstoff/Luft-Vormischstrecke. Dies kann zu starken Beschädigungen am Brennersystem führen. Dagegen hat Ammoniak niedrige Brenngeschwindigkeiten,

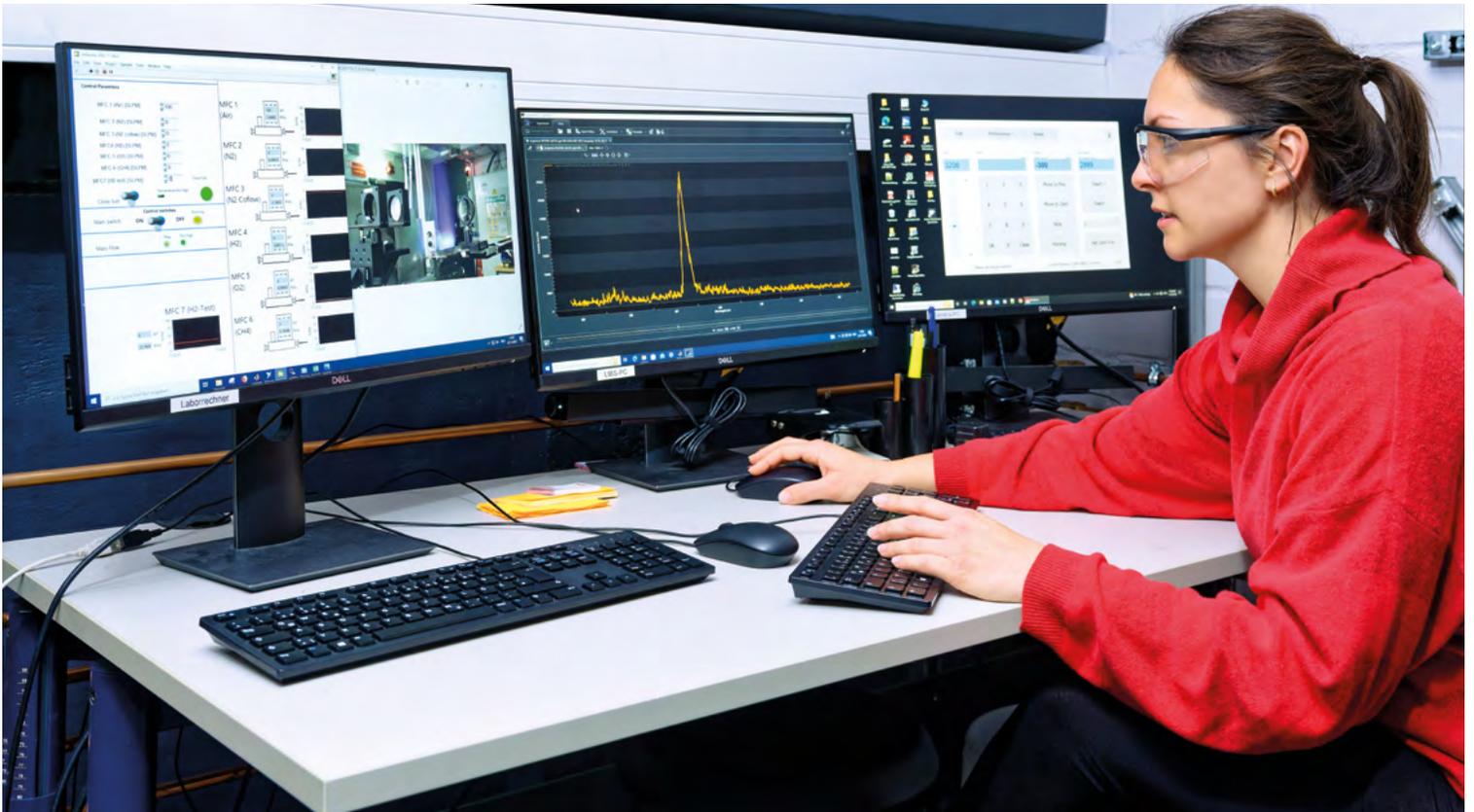


Bild 5: Studierende bei der visuellen Sicherheitsüberwachung und Online-Monitoring von Wasserstoffflammen  
Foto: Peter Winandy

die die Flammenstabilität beeinflussen. Zudem lassen sich die Brenngeschwindigkeiten aufgrund von Auftriebseffekten, welche bei langsamen Flammenausbreitungen relevant sind, nur schwer messen. Entsprechende Experimente werden daher unter Schwerelosigkeit, beispielsweise in Parabelflügen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), durchgeführt. Zur Verbesserung der Verbrennungsstabilität kann das langsam brennende Ammoniak mit dem besonders schnell brennenden Wasserstoff gemischt werden. Ein interessanter Ansatz ist die teilweise katalytische oder thermische Umwandlung des Ammoniaks in molekularen Stickstoff und Wasserstoff, sodass eine für die Anwendung optimierte Brenngeschwindigkeit durch die resultierende Mischung eingestellt werden kann.

Bild 3 zeigt zudem eine interessante und komplexe Eigenschaft der Wasserstoffverbrennung: Im Vergleich zur Methanflamme fällt die wellige Struktur der Flamme auf. Grund hierfür ist die sogenannte thermodiffusive Flammeninstabilität, die aus der Tatsache resultiert, dass Wasserstoff ein sehr leichtes Molekül ist, dessen Diffusion sehr viel schneller ist als die der übrigen Moleküle. Hierdurch werden lokale Störungen weiter angefacht, wodurch sich die komplexe Flammentopologie ergibt. Diese wurde durch Verwendung hochauflösender numerischer Simulationen untersucht, dabei

wurden alle relevanten Zeit- und Längenskalen aufgelöst. Ein Beispiel für eine Wasserstoffflamme mit Luftüberschuss zeigt Bild 4. Im Gegensatz zur experimentellen Konfiguration handelt es sich um eine ebene Flamme, welche durch die thermodiffusiven Instabilitäten stark gewellt ist. Die zentrale Erkenntnis dieser Studie ist die Identifikation unterschiedlicher charakteristischer Längenskalen der Instabilität. Es zeigt sich weiter, dass die Flamme durch das Auftreten der Instabilität etwa viermal schneller brennt und sich dadurch ein komplett unterschiedliches Verbrennungsszenario ergibt, welches unter anderem das Risiko eines Flammenrückschlags noch weiter erhöht.

Somit ist klar, dass die Vorteile von E-Fuels und besonders wasserstoffbasierter Brennstoffe nur dann vollends ausgeschöpft werden können, wenn Forschungsanstrengungen unternommen werden, die zum Verständnis ihres komplexen Verbrennungsverhaltens beitragen, ihre Modellierung ermöglichen und damit eine Basis für zukünftige Technologieentwicklung schaffen.

## Literatur

- [1] Naegler, T., Simon, S., Klein, M., Gils, H.C., Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level. *Int. J. Energy Res.* 39, pp. 2019- 2030 (2015)
- [2] Beeckmann, J., Hesse, R., Kruse, S., Berens, A., Peters, N., Pitsch, H., Matalon, M., *Proceedings of the Combustion Institute* 36(1), 1531 (2017)
- [3] Hesse, R., Beeckmann, J., Pitsch, H., *Ninth European Combustion Meeting*, Lisbon, Portugal (2019)
- [4] Berger, L., Kleinheinz, K., Attili, A., Pitsch, H., *Proceedings of the Combustion Institute* 37, pp. 1879-1886 (2019)

## Autoren

Dr.-Ing. Dipl.Wirt.-Ing. Joachim Beeckmann ist Akademischer Oberrat am Institut für Technische Verbrennung.

Dr.-Ing. Lukas Berger ist Gruppenleiter, Raik Hesse, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Verbrennung.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinz Pitsch ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Verbrennung und Leiter des Instituts für Technische Verbrennung.

# The Fuel Science Center

## Fuel Design für eine nachhaltige Mobilität

One of the most significant global challenges for a sustainable future is the worldwide reduction of greenhouse gas emissions, especially CO<sub>2</sub>. Electric power generation from renewable primary energy sources and the raw material shift from fossil to alternative carbon sources are considered the most important contributions to achieving defossilization, i. e. a closed anthropogenic carbon cycle. For this transition, synthetic liquid energy carriers play a crucial role because (i) they enable efficient storage of fluctuating energy from renewable resources in large quantities, (ii) they combine high energy density with easy distribution, (iii) their application and handling is established in robust technologies and infrastructures, and (iv) they represent an interface between the energy and chemical value chains. To address all dimensions of sustainability, propulsion systems based on the combustion of renewable fuels need to overcome the limitations of current engine technologies and combine reduced carbon intensity of production with improved combustion efficiency and reduced local pollutant emissions<sup>[1]</sup>.

In research and development activities on renewable fuels, great progress has been made in the area of “bio-fuels”, which are mainly produced by fermentation and in chemical

processes<sup>[2]</sup>. More recent approaches focus on “e-fuels” produced by CO<sub>2</sub> conversion using “green hydrogen” from electrolysis<sup>[3]</sup>. For both concepts, there are technologies with a high degree of technical readiness that can also make significant contributions to reducing CO<sub>2</sub> emissions in the short term. While the concepts of “bio-fuels” and “e-fuels” are sometimes perceived as competing technological concepts, detailed studies on future energy scenarios show that in the long term only the integrated use of all alternative carbon feedstocks will enable the chemical conversion of renewable energy at scales relevant to the mobility sector<sup>[4]</sup>. Basic research at the Fuel Science Center (FSC) therefore focuses on “bio-hybrid fuels”<sup>[5]</sup>. The increased diversity of possible molecular structures of such components offers the possibility for fuel design for innovative engine technologies, thus enabling CO<sub>2</sub>-neutral mobility with near-to-zero pollutant emissions while making extensive use of existing infrastructures<sup>[6]</sup>.

Eine der globalen Herausforderungen für eine nachhaltige Zukunft ist die Reduzierung der Treibhausgasemissionen, insbesondere von CO<sub>2</sub>. Strom aus erneuerbaren Primärenergiequellen und der Wechsel von fossilen zu alternativen Kohlenstoffquellen gelten als wichtige Beiträge, um einen geschlossenen anthropogenen Kohlenstoffkreislauf, die „Defossilisierung“, zu erreichen. Synthetische flüssige Energieträger übernehmen hier eine entscheidende Rolle weil sie (i) eine effiziente Speicherung fluktuierender Energie aus erneuerbaren Quellen in großen Mengen ermöglichen, (ii) eine hohe Energiedichte mit einfacher Verteilung verbinden, (iii) ihre Anwendung und Handhabung in robusten Technologien und Infrastrukturen etabliert ist und (iv) sie eine Schnittstelle der energetischen und chemischen Wertschöpfungskette darstellen.

Um alle Dimensionen der Nachhaltigkeit zu adressieren, müssen Antriebssysteme, die auf der Verbrennung erneuerbarer Kraftstoffe basieren, die Grenzen heutiger Motorentchnologien überwinden und die reduzierte Kohlenstoffintensität der Produktion mit einer Verbesserung des Verbrennungswirkungsgrades sowie der lokalen Schadstoffemissionen verbinden.

Bei den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu erneuerbaren Kraftstoffen wurden große Fortschritte bei „Biokraftstoffen“ erzielt, die hauptsächlich durch Fermentation und in chemischen Prozessen hergestellt werden. Neuere Ansätze konzentrieren sich auf „E-Fuels“, die durch  $\text{CO}_2$ -Umwandlung unter Verwendung von „grünem Wasserstoff“ aus der Elektrolyse gewonnen werden. Für beide Konzepte gibt es Technologien mit hohem Reifegrad, die auch kurzfristig wesentliche Beiträge zur Senkung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen leisten können. Während die Konzepte „Biokraftstoffe“ und „E-Fuels“ bisweilen als technologisch konkurrierend wahrgenommen werden, zeigen Studien, dass langfristig nur die integrierte Nutzung aller alternativen Rohstoffe die chemische Umwandlung in für den Mobilitätssektor relevanten Größenordnungen realisieren kann. Die Grundlagenforschung im Exzellenzcluster „The Fuel Science Center“, kurz FSC, fokussiert daher auf „Bio-Hybrid-Kraftstoffe“. Die Vielfalt an molekularen Strukturen der Komponenten ermöglicht Kraftstoffdesign für innovative Motortechnologien, um so eine  $\text{CO}_2$ -neutrale und emissionsfreie Mobilität unter weitgehender Nutzung bestehender Infrastrukturen zu erreichen. Verfolgt wird dazu ein fundamental neuer und interdisziplinärer Forschungsansatz. Die RWTH arbeitet hierzu gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion sowie dem Forschungszentrum Jülich.

### Vision und Mission

Zunächst wird die Basis für die integrierte Umwandlung von erneuerbarer Elektrizität mit biomasse-basierten Rohstoffen und  $\text{CO}_2$  zu flüssigen Energieträgern mit hoher Energiedichte erforscht. Die angestrebten Prozesse und Aggregate sind hochflexibel, um die Effizienz unter zeitlichen Schwankungen und regionalen Unterschieden in der Rohstoff- und Energieversorgung zu maximieren. Wichtig ist dabei Komplementarität und Synergie mit anderen Komponenten des Energiesystems und der stofflichen Wertschöpfungskette. Die Konzepte werden an den gesellschaftlichen Bedürfnissen ausgerichtet und auf ihre Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit hin analysiert. Insbesondere die scheinbar widersprüchlichen Grenzen der Größenordnung des Kraftstoffsektors und der dezentralen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien und Rohstoffen finden Beachtung. Die Erkenntnisse sind Grundlage für anpassungsfähige Produktions- und Antriebstechnologien unter dynamischen Systemgrenzen.

### Bio-Hybrid-Kraftstoffe für molekular kontrollierte Brennverfahren

Auch werden die molekularen und ingenieurtechnischen Grundlagen geschaffen, um flüssige Energieträger, sogenannte „Bio-Hybrid-Kraftstoffe“, über integrierte (elektro)katalytische Transformationen von Biomasse und  $\text{CO}_2$  herzustellen. Verarbeitungsrouten, die beide Kohlenstoffquellen gemeinsam ausnutzen, eröffnen die

Möglichkeit, die Kohlenstoff-Effizienz für die Gewinnung von erneuerbarem Strom durch Speicherung in den chemischen Bindungen flüssiger Energieträger zu maximieren. Bestimmte Zielstrukturen können prinzipiell sowohl aus Biomasse als auch aus  $\text{CO}_2$  gewonnen werden und bieten das Potenzial, bei optimaler regionaler oder zeitlicher Rohstoffbalance zu den gleichen Produkten zu gelangen. Die Kombination von aus Biomasse gewonnenen Zwischenprodukten mit  $\text{CO}_2$  eröffnet den Zugang zu neuen Klassen von Molekülstrukturen, die zusätzliche Optimierungsparameter bieten. Das Design von maßgeschneiderten Bio-, Chemo- und Elektrokatalysatoren mit multiplen Funktionalitäten und deren Implementierung in integrierte Produktionsprozesse ist daher ein besonderer Schwerpunkt.

Das angestrebte integrierte Molekular- und Maschinendesign nutzt die molekulare Vielfalt von Bio-Hybrid-Kraftstoffen, um die inhärenten Grenzen fossil betriebener Motortechnologien zu überwinden und fortschrittliche Verbrennungsmotoren zu etablieren. Das Erkennen der Zusammensetzung und molekularen Struktur des Energieträgers als entscheidender Designparameter eröffnet Möglichkeiten für fortschrittliche Motorkonzepte.

### Nachhaltige Mobilität

Der Übergang zu neuartigen flüssigen Energieträgern für Antriebssysteme ist nicht nur eine technologische Herausforderung, sondern betrifft direkt die drei Dimensionen der

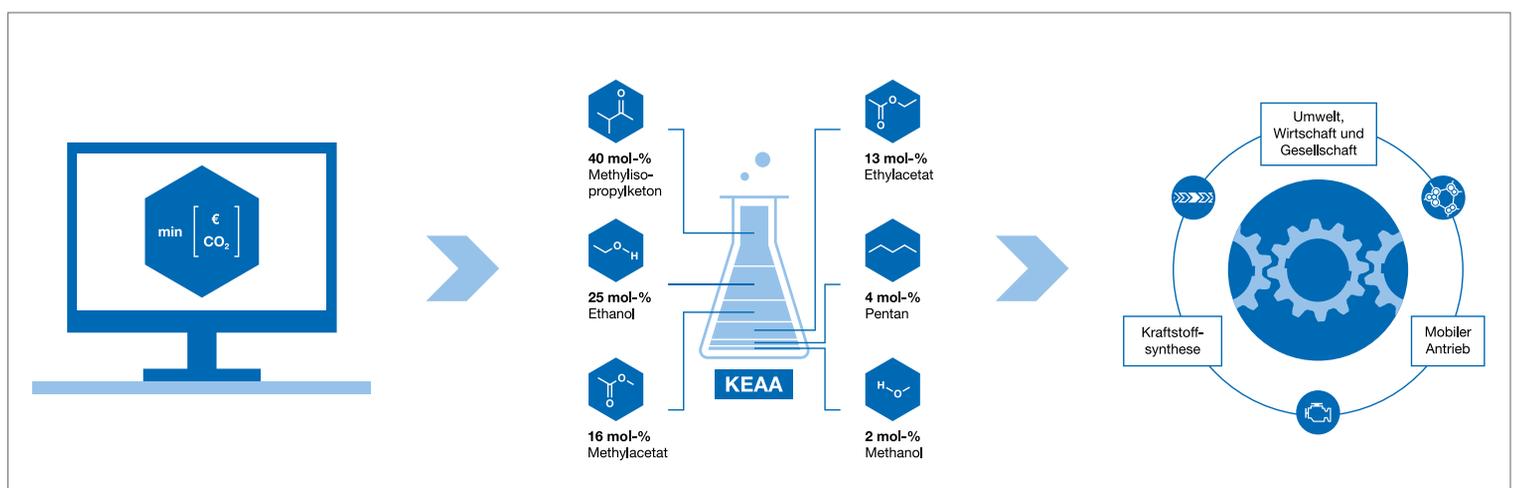


Bild 1: Der modellgestützte „Fuel Design Process“ am Beispiel des Keton-Ester-Alkohol-Alkan-Gemischs (KEAA).

Nach: Ackermann, Braun, Burkardt, Heger, König, Morsch, Lehrheuer, Surger, Völker, Blank, Du, Heufer, Roß-Nickoll, Viell, von der Aßen, Mitsos, Pischinger, Dahmen. ChemSusChem 2021, 14(23), 5254-5264.

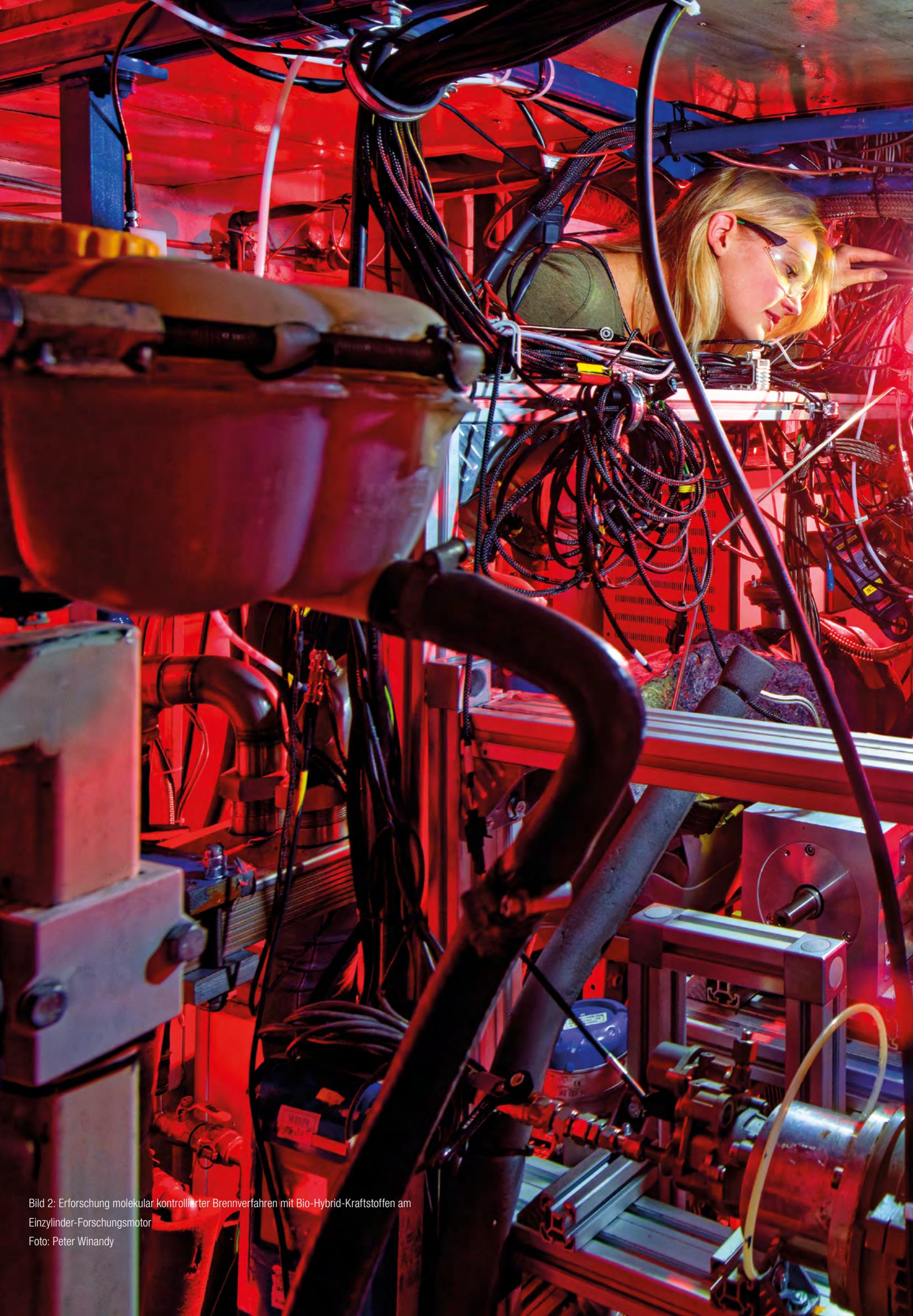
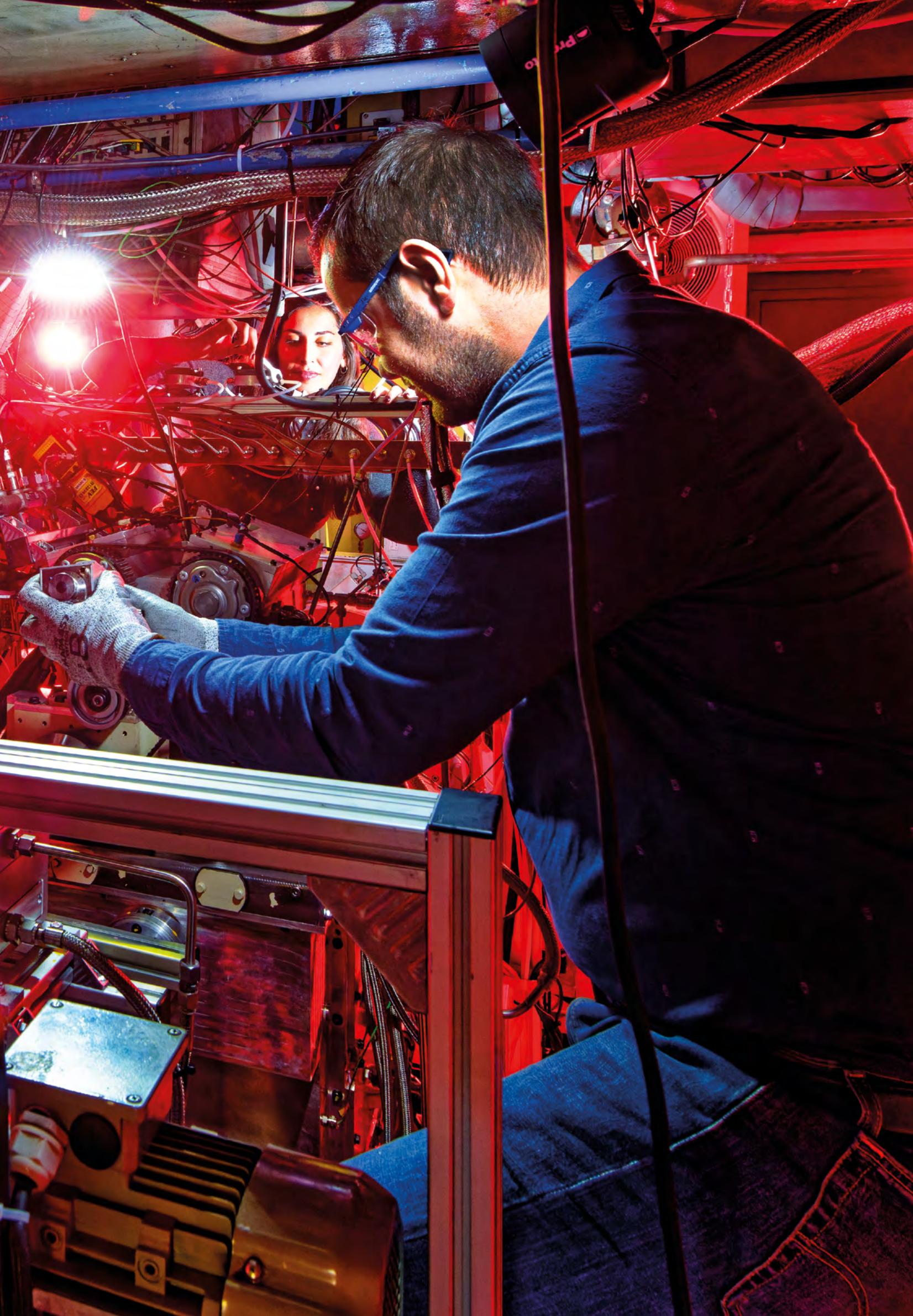


Bild 2: Erforschung molekular kontrollierter Brennvorgänge mit Bio-Hybrid-Kraftstoffen am Einzylinder-Forschungsmotor  
Foto: Peter Winandy



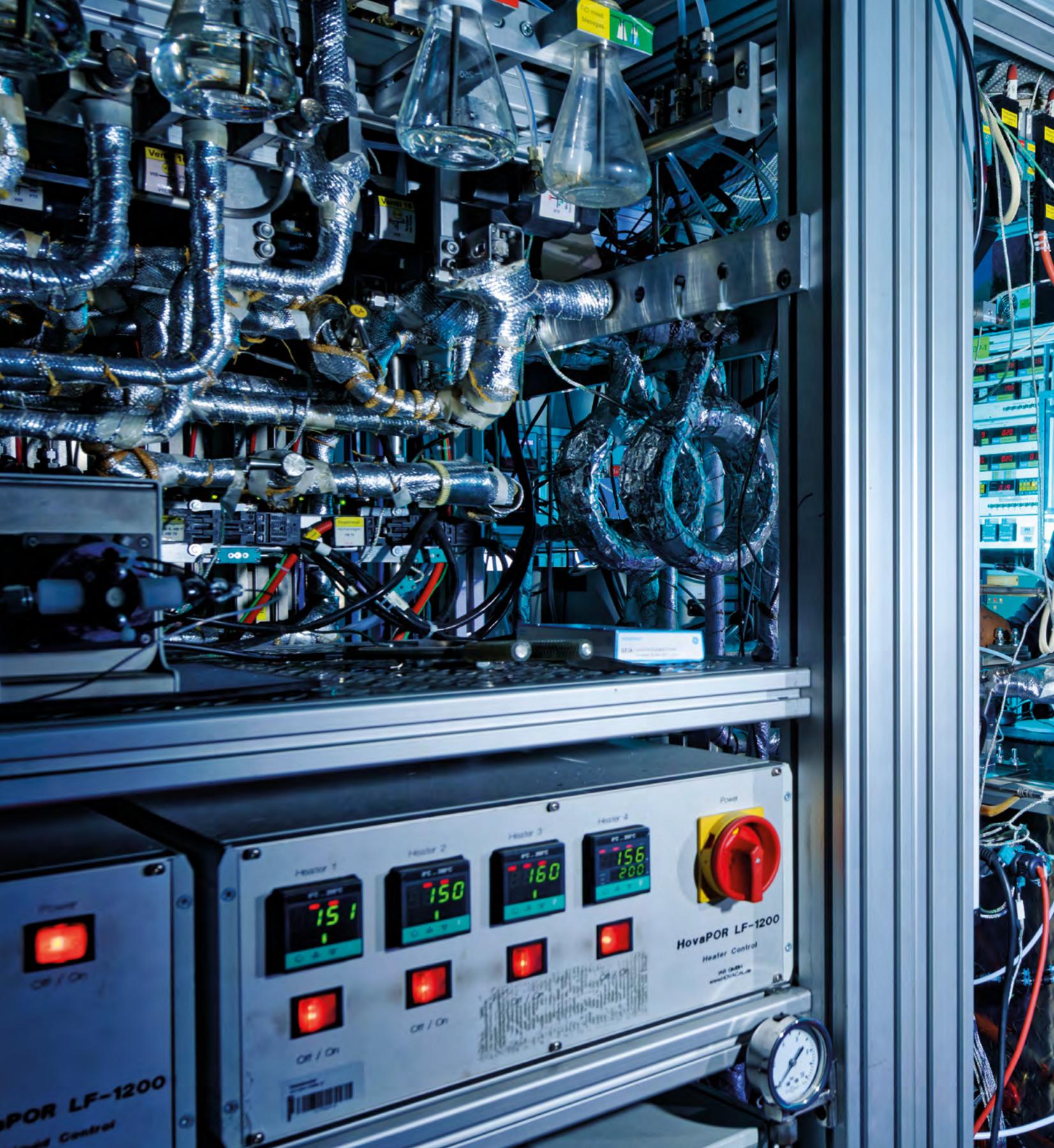


Bild 3: Am Modellgasprüfstand werden innovative Abgasnachbehandlungssysteme analysiert

Foto: Peter Winandy

Nachhaltigkeit und wird letztlich durch die gesellschaftliche Akzeptanz entschieden. Während die Technologieentwicklung üblicherweise zuerst und unabhängig durchgeführt wird, integriert The Fuel Science Center die Bewertung der Nachhaltigkeit und der gesellschaftlichen Akzeptanz der Stakeholder sowie die politischen Implikationen. Emissionen und (Öko-)Toxikologie der Kraftstoff-

kandidaten werden frühzeitig bewertet, um die Zusammenhänge zwischen der Molekülstruktur und den Eigenschaften ex ante zu entschlüsseln. Die Wertschöpfungsketten werden dann auf Kosten und Nachhaltigkeit über den Lebenszyklus von der Produktion bis zum Antrieb optimiert und spiegeln die Wechselwirkungen zwischen dem Strom- und dem Mobilitätssektor. Die verfügbaren

Ressourcen werden dabei zu jedem Zeitpunkt bestmöglich genutzt. Die resultierenden Leistungsindikatoren zur Nachhaltigkeit und öffentlichen Wahrnehmung von Kraftstoffen und deren Wertschöpfungsketten werden iterativ in die Technosphärenforschung zurückgeführt.

Dieser modellgestützte „Fuel Design Process“ kann Kraftstoffe auf eine effiziente Verbren-



nung zuschneiden und gleichzeitig die Umweltauswirkungen und Produktionskosten minimieren. Beispielsweise wurde ein so konzipiertes Keton-Ester-Alkohol-Alkan-Gemisch, kurz KEAA, für hocheffiziente Ottomotoren interdisziplinär von den Produktionskosten bis hin zu den motorischen Eigenschaften, der Ökotoxizität, der mikrobiellen Lagerstabilität und der CO<sub>2</sub>-Bilanz evaluiert und mit

Super-E10-Kraftstoff verglichen. Mit KEAA lassen sich im Einzylinder-Forschungsmotor höhere Wirkungsgrade erzielen als mit fossilen Super E10. KEAA weist eine moderate Toxizität auf und ist nicht anfällig für mikrobiellen Befall. Eine Ökobilanz zeigt das Potenzial, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Vergleich zu Super E10 um 95 Prozent zu senken.

## Literatur

- [1] Sims, R. et al.: Transport. In: Edenhofer, O. et al. (Eds.): Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change – Working Group III, Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, 2014. DOI: 10.1017/ CBO9781107415416.005.
- [2] Leitner, W. et al.: Advanced Biofuels and Beyond: Chemistry Solutions for Propulsion and Production. Angewandte Chemie International Edition, 56 (20), S. 5412–5452, 2017. DOI: 10.1002/anie.201607257.
- [3] Artz, J. et al.: Sustainable Conversion of Carbon Dioxide: An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment. In: Chemical reviews, 118 (2), S. 434–504, 2018. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00435.
- [4] acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/ Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina/Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Rohstoffe für die Energiewende, 2017.
- [5] Beydoun, K.; Klankermayer, J.: Ruthenium-Catalyzed Synthesis of Cyclic and Linear Acetals by the Combined Utilization of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, and Biomass Derived Diols. In: Chemistry – A European Journal, 25 (49), S. 11412–11415, 2019. DOI: 10.1002/chem.201901660.
- [6] Deutz, S. et al.: Cleaner production of cleaner fuels: wind-to-wheel – environmental assessment of CO<sub>2</sub>-based oxymethylene ether as a drop-in fuel. In: Energy Environ., Sci. 11 (2), S. 331–343, 2018. DOI: 10.1039/ C7EE01657C

## Autoren

Dipl.-Ing. Bastian Lehrheuer ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme und Geschäftsführer des Exzellenzclusters „The Fuel Science Center“.

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Walter Leitner ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Chemie und Petrochemie, Direktor am Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion in Mülheim an der Ruhr sowie Sprecher des Exzellenzclusters „The Fuel Science Center“.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger ist Inhaber des Lehrstuhls für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme, Leiter des Instituts für Thermodynamik sowie Sprecher des Exzellenzclusters „The Fuel Science Center“.

# Energieeffizientes Bauen

## Digitale Planung für Neubau- und Bestandsgebäude

Digitalization is a key to foster planning, construction, commissioning and operation of new and existing buildings. In its immediate action plan from July 2022, following the climate protection act, the German government addresses a set of measures for energy saving, improving energy efficiency and increasing the use of renewable energies. The current energy crisis accelerates the decarbonization of the building sector and raises the awareness and need for a resilient energy system. Overdue energetic building refurbishments and expansion targets for living quarters require efficient processes. Digital planning methods support transparency and cost certainty.

Ambitious energy concepts require computer models and dynamic energy performance simulations at building, system and district level. Various representations of the digital twin of a building exist in order to address building performance simulation, computational fluid dynamics for indoor air flow simulations, HVAC system simulation, life cycle assessment or thermal comfort analysis.

This article addresses several use cases of Building Information Modeling to process, investigate, consolidate, reduce or transform a digital building model in the due course of the building life cycle. For example, a new system ontology for building services elements is deployed as linked data approach for visualizing real time data of the building automation within a BIM model using Augmented Reality.

Viele Aspekte des am 13.07.2022 durch die Bundesregierung veröffentlichten Sofortprogramms gemäß Paragraf 8 Absatz 1 Klimaschutzgesetz für den Gebäudesektor sind ein Déjà-vu zu wissenschaftlichen Arbeiten aus den 1980er und folgenden Jahren zum Thema Energieeffizienz in Gebäuden. Spätestens seit Beginn des kriegerischen Überfalls auf die Ukraine ist die Bedeutung der Energieversorgung – nach den Ölkrisen der 1970er Jahre erneut – zum Thema nationaler Sicherheit geworden und im öffentlichen Bewusstsein. Die ohnehin über die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Emissionsbesteuerung im Gebäudesektor kommende und bislang nur zögerlich umgesetzte Thematik einer flächendeckenden Sanierung des Gebäudebestands erfährt damit eine deutliche Beschleunigung. Aber auch weitere Ziele zur Schaffung von Wohnraum und zur Begegnung angespannter Wohnungsmärkte erfordern effiziente Planungs- und Umsetzungsprozesse im Bauwesen.

Digitale Planungsmethoden für Neubau- und Bestandsgebäude nehmen hierfür eine Schlüsselrolle ein, sie schaffen Transparenz und erhöhen die Termin- und Kostensicherheit im Bauprozess. Ambitionierte Energiekonzepte mit Kombinationen zur regenerativen Erzeugung von Wärme, Kälte und Strom erfordern zudem digitale Modelle und energetische Simulationsrechnungen. Auch die technische Inbetriebnahme der Energiesystemtechnik benötigt digitale Systeme und Werkzeuge, allein um die Komplexität für ausführende Unternehmen beherrschbar zu machen.



Bild 1: Betriebsdatenmonitoring am Prüfstand „Viega Cube“ zum Trinkwassermanagement in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen  
Foto: Peter Winandy

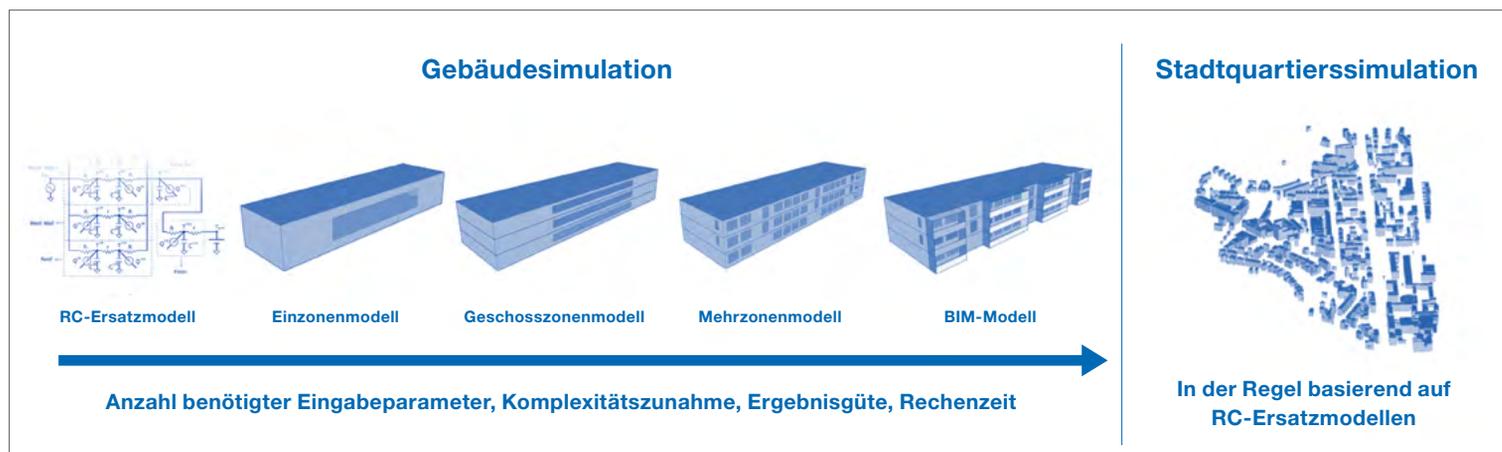


Bild 2: Thermisch-energetische Simulationen von Bauwerken und Quartieren auf unterschiedlichen Komplexitätsebenen zur Erhöhung der Energieeffizienz

Der Ressourcen- und Energiebedarf eines Bauwerks sowie weitere Nachhaltigkeitsaspekte, wie die in Baumaterialien gebundene „graue Energie“ im Rahmen einer Ökobilanz, können als Anwendungsfall des Building Information Modeling, kurz BIM, in einem „Digitalen Zwilling“ des Bauwerks frühzeitig simuliert oder auch für ein Bestandsmodell abgebildet werden. Je nach Aufgabenstellung variiert das Modell in der Komplexität. Von einfachen dynamischen Modellen reduzierter Ordnung, die aus wenigen heuristischen Parametern generiert und für eine Quartierssimulation benötigt werden, bis hin zu detaillierten energetischen Modellen von Bauwerken und Anlagentechnik, erzeugt aus einem BIM-Modell. Letzteres ist das Ergebnis einer Fachplanung und besteht aus mehreren, in Koordinationsmodellen zusammengeführten, semantisch angereicherten 3D-Fachmodellen zu Architektur, Tragwerk und Technischer Gebäudeausrüstung, kurz TGA. Bild 2 zeigt die unterschiedlichen Abstraktionsebene dieser Modelle.

#### **Energetische Sanierung des Gebäudebestands**

Der Energieverbrauch zur Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser im Gebäudesektor hat laut Umweltbundesamt

einen Anteil von rund 70 Prozent in privaten Haushalten und rund 50 Prozent in öffentlichen und kommerziell genutzten Gebäuden. Statistisch gesehen hat der Neubausektor einen geringen Anteil am Primär- beziehungsweise Endenergieverbrauch. Die ambitionierten deutschen sowie europäischen Klimaziele können im Gebäudesektor nur erreicht werden, wenn der Bestand betrachtet und die Rate von energetischen Sanierungsmaßnahmen deutlich, von heute ein Prozent auf drei Prozent oder mehr, gesteigert wird. Auch die Tiefe der Sanierungsmaßnahmen ist hierbei entscheidend; ‚kosmetische‘ Reparaturen reichen nicht. Dies ist mit Fördermechanismen allein nicht erreichbar, sondern erfordert ordnungsrechtliche und insbesondere langfristig planbare Maßnahmen.

Für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung müssen sowohl die Energieeffizienz der energetischen Hülle von Bauwerken als auch die Effizienz der gebäudetechnischen Anlagen verbessert werden. Je weniger Energie ein Bauwerk verbraucht, desto weniger Aufwand muss in die (regenerative) Erzeugung gesteckt werden. Mit Blick auf die Typologie und Baualtersklasse eignet sich nicht jedes Bauwerk gleichermaßen für jede Sanierungsart, einerseits aus wirtschaftlichen, andererseits aus bauphysikalischen Gründen. Auch

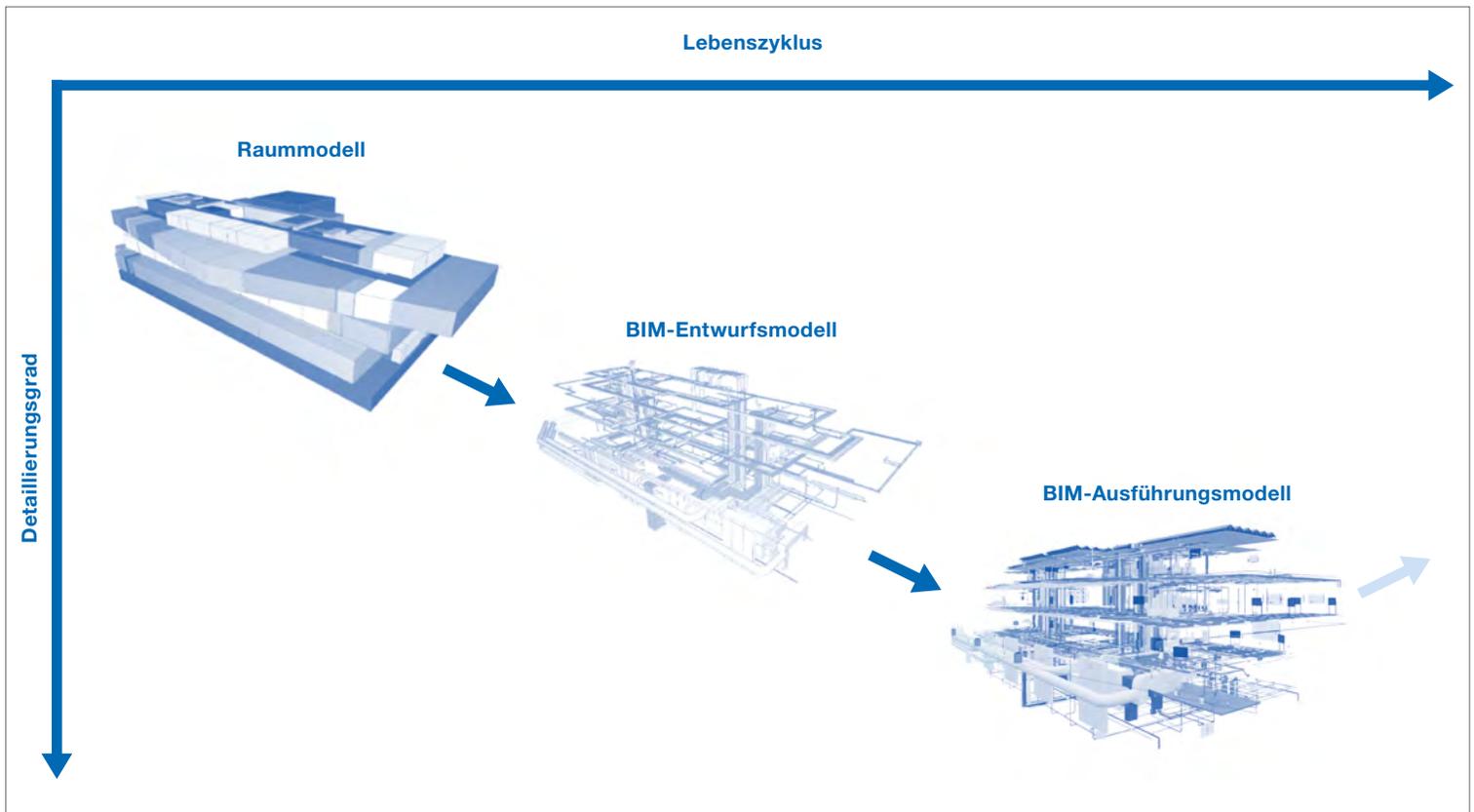


Bild 3: Detaillierung eines digitalen Modells im Zuge der integralen Planung: Vom Raummodell, dem „ersten BIM“ bis hin zum detaillierten Ausführungsmodell, hier am Beispiel des Neubaus eines Seminarcenters

kann nicht ohne weiteres ein fossiler Wärmeerzeuger durch eine Wärmepumpe ersetzt werden. Ein solcher Systemwechsel bringt auch Änderungen der Vorlauftemperaturen mit sich, um einen optimalen Betrieb der Wärmepumpe sicherzustellen. Niedrigere Vorlauftemperaturen erfordern andere Wärmeübergabesysteme um ein vergleichbar behagliches Raumklima zu erreichen. Daher sind großflächigere Wärmeübertragungsflächen, etwa eine Fußbodenheizung oder der Austausch alter Heizkörper durch Niedertemperaturheizkörper, erforderlich.

Für die Energiegewinnung werden oftmals Fotovoltaikanlagen zur Stromerzeugung eingesetzt. Das Erreichen einer „Netto-Null-Bilanz“ über den Jahresverlauf hinweg erfordert jedoch ein Stromnetz, in das Strom eingespeist und aus diesem auch wieder entnommen werden kann. Seit dem Anstieg der Strompreise ist für Verbraucher ein hoher Eigennutzungsanteil des selbst erzeugten Stroms als neue Zielgröße erstrebenswert, erreichbar durch einen Stromspeicher und ein verbrauchsorientiertes Lastmanagement. Eine andere Möglichkeit besteht in der Einbindung regenerativer Energien zur Warmwassererzeugung in Bestandsanlagen, etwa durch eine solarthermische Anlage oder eine Wärmepumpe.

Der direkten Nutzung erneuerbarer Energien sind in Ballungsräumen jedoch Grenzen gesetzt, die sich durch die Anbindung an Quartiersnetze lösen lassen. Neben Strom- oder bestehenden Fernwärmenetzen stellen kalte Nahwärmenetze eine neuartige Alternative dar, um Siedlungen ohne eigene Tiefenbohrungen über das Netz einen ‚einfachen‘ Anschluss ihrer Wärmepumpe an eine vernetzte geothermische Energiequelle zu ermöglichen. Solche Quartiersansätze, an denen der Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen gemeinsam mit weiteren RWTH-Lehrstühlen forscht, erfordern zur Planung, Auslegung und Dimensionierung digitale Simulationstools. Diese werden oftmals umgesetzt als Kette verschiedener Simulationstools.

#### **Wo beginnt und wo endet die digitale Planung von Bauwerken?**

BIM wird oftmals auf ein 3D-Modell reduziert. Dabei handelt es sich jedoch um eine Methode zur kollaborativen Zusammenarbeit auf Basis digitaler Modelle über den Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg und ist Teil der integralen Planung. Vor Beginn der Planung, also vor Beginn Leistungsphase 1 „Grundlagenermittlung“ der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, kurz HOAI, stehen zunächst die Projektentwicklung und



Verteiler 1  
WT freie Kühlung RL  
Kälte

Verteiler 1  
WT freie Kühlung VL  
Kälte

Kälte



Bild 4: Verknüpfung von Daten der Feldebene mit BIM-Daten am Digitalen Zwilling der „Viega World“ als Demonstrator im Rahmen des Projektes „Energie.Digital“  
Foto: Peter Winandy

Verteiler 1  
Kältemaschine VL  
Kälte

Verteiler 1  
Kältemaschine RL  
Kälte

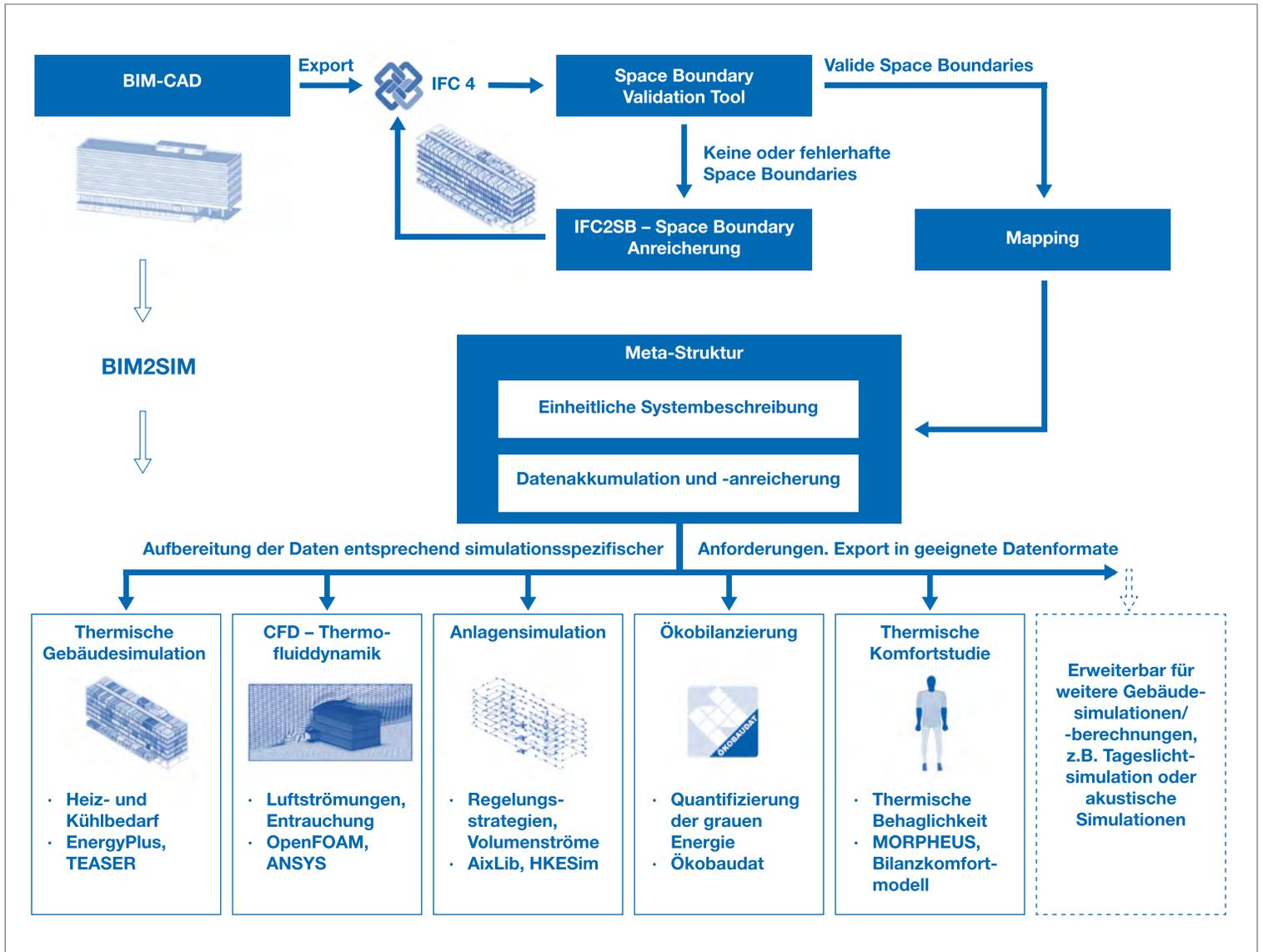


Bild 5: Algorithmische Überführung und semantische Anreicherung von Daten aus IFC-Modellen zur Verbesserung der Energieeffizienz im OpenBIM-Prozess

Bedarfsplanung. Ergebnis ist ein Lastenheft, welches das zu bauende Produkt als Bauherrnanforderung beschreibt. In den Auftraggeber-Informationsanforderungen, kurz AIA, wird dabei festgelegt, wie mit BIM gearbeitet werden soll. Die Vorgaben der AIA werden nach Vertragsabschluss von den beteiligten Fachplanern unter Mitwirkung eines Informationskoordinators in einem BIM-Abwicklungsplan, kurz BAP, umgesetzt. Dieses Pflichtenheft regelt neben Rollenbildern und Fragen zu Software und Datenaustauschformaten insbesondere das Informationsmanagement, also welcher Partner zu welchem Zeitpunkt welche Information in welchem Fertigstellungsgrad zu liefern hat.

Im weiteren Prozess entsteht im Rahmen eines architektonischen Entwurfs aus den Vorgaben im Lastenheft ein Raumprogramm und Raumbuch – das erste BIM-Modell! Bereits in dieser frühen Phase und Unschärfe ist die

Technische Gebäudeausrüstung gefordert, das Energiekonzept umzusetzen. Hier werden Fragen zur Dimensionierung technischer Anlagen und der Lage von Technikzentralen beantwortet, damit auch die Erschließung des Bauwerks frühzeitig geklärt ist. In dieser Phase können der spätere Energieverbrauch und auch die Kosten noch wesentlich beeinflusst werden. Durch das modellbasierte Arbeiten verlagert sich der planerische Aufwand oftmals in frühere Leistungsphasen. So ist es nicht unüblich, dass bereits in Leistungsphase 3 „Entwurfsplanung“ und Leistungsphase 4 „Genehmigungsplanung“ ein detailliertes BIM-Modell entsteht. Bild 3 zeigt das frühe digitale Modell und dessen kontinuierliche Detaillierung am Beispiel des Neubaus eines Seminarcenters, der vom Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen wissenschaftlich begleitet wurde.

Einen wichtigen Anwendungsfall stellt hierbei die BIM-basierte Gebäude- und Anlagensimulation dar. Ein, im Rahmen einer Dissertation entwickelter, robuster Algorithmus ermöglicht hierfür die automatische Erzeugung und Ableitung von Raumbegrenzungsflächen aus einem BIM-Modell, die für Simulationen mit Ein- oder Mehrzonenmodellen im urbanen und energetischen Kontext unverzichtbar sind. Ausgehend von einer über diesen Weg erzeugten Raumgeometrie entstand eine Toolkette, die es ermöglicht, über weitere Datenanreicherung teilautomatisiert energetische Gebäudesimulationsmodelle, Anlagensimulationsmodelle und Strömungssimulationsmodelle abzuleiten, zu berechnen und auszuwerten. Die Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen und des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz bis 2021 im

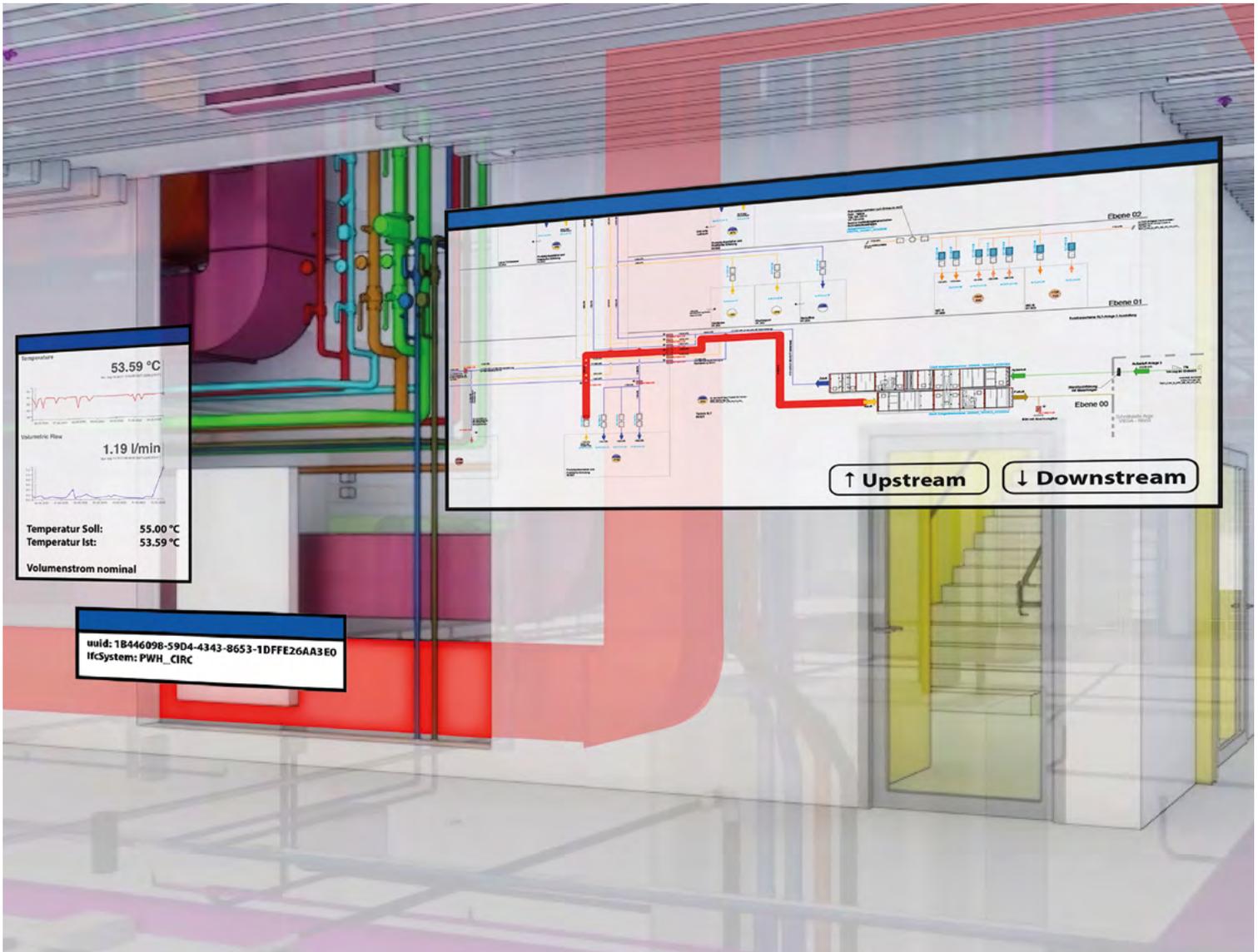


Bild 6: Visualisierung von Betriebsdaten der TGA in Echtzeit mittels Augmented Reality am Digitalen Zwilling der „Viega World“ im Rahmen des Forschungsprojektes „Energie.Digital“

Rahmen des Projekts „BIM2SIM-Methodenentwicklung zur Erstellung von Simulationsmodellen aus Daten des Building Information Modeling“ gefördert. Im aktuell laufenden Projekt „BIM2PRAXIS“, das auch durch das Bundesministerium finanziert wird, wird die Toolkette nun intensiv mit Partnern aus der Industrie getestet.

Zudem wurde ein Verfahren entwickelt, um die Abhängigkeiten komplexer technischer Systeme im Bauwesen zu verstehen und untereinander zu verknüpfen. Dieser „Linked-Data-Ansatz“ basiert auf der TUBES System Ontologie, kurz TSO, und bildet als Wissensrepräsentation verknüpfte technische Systeme, deren hierarchische Untergliederung, strukturelle und funktionale Zusammenhänge sowie Beziehungen zu räumlichen Entitäten. Algorithmen ermöglichen ein Konvertieren von Informationen aus dem BIM-Modell nach TSO und eine semantische Anreicherung zur

späteren, domänenübergreifenden Nachnutzung im Lebenszyklus der technischen Systeme. TSO verlinkt dabei Daten des BIM-Modells mit Daten der Feldebene, den Funktionsbeschreibungen der Gebäudeautomation sowie weiteren Daten. Dies bildet die Grundlage für einen Digitalen Zwilling mit einem bidirektionalen Informationsaustausch zwischen Realität, virtuellem Modell und Betriebsdaten. Als Informationssystem kann der Digitale Zwilling in verschiedenen Visualisierungsformen, wie Virtual Reality, Augmented Reality oder auch über ein webbasiertes Frontend verwendet werden. Bild 6 zeigt eine Möglichkeit, wie die Visualisierung von Betriebsdaten in Echtzeit an einem Demonstrationsgebäude gegenwärtig umgesetzt wird. Entwickelt wurde dies im Projekt „Energie.Digital“, das ebenfalls durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wurde. Beteiligt waren

das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg und die Viega GmbH & Co. KG in Attendorn.

#### Autor

Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Christoph van Treeck ist Inhaber des Lehrstuhls für Energieeffizientes Bauen.

# Auswirkungen der Energiekrise auf Privatverbraucher

Energiepreise belasten soziale Gerechtigkeit und stabilisieren die Versorgung

Energy prices have risen dramatically over the last months. The war in Ukraine led to a further increase in energy prices. A recent study by the Chair for Energy System Economics at RWTH Aachen University has analyzed the impacts of these price increases for private households in Germany. While all private households are directly affected by increases in energy prices, the severity of the impact differs depending on the individual income situation of the households with the lowest income households being affected the most. However, the higher prices also lead to a decrease in energy consumption, which helps to alleviate looming supply scarcities due to the almost complete cessation of Russian energy imports. Energy policy measures therefore need to be well balanced between reducing energy poverty and increasing security of energy supply.

Seit der Aufhebung der Corona-Lockdowns sind die Energiepreise sehr stark angestiegen, siehe Bild 1. Zuletzt sorgte der Krieg in der Ukraine für eine dramatische Belastung der Energieverbraucher. Hiervon sind Privathaushalte maßgeblich betroffen. Vor der Coronakrise gaben diese im Durchschnitt rund 7,0 Prozent ihres verfügbaren Jahreseinkommens für die Energieträger Strom, Erdgas, Heizöl, Benzin und Diesel aus. Dieser Anteil erhöhte sich bis zum September 2022 auf durchschnittlich 9,8 Prozent. Während die hohen Energiepreise sämtliche Privathaushalte belasten, sind diese unterschiedlich stark betroffen. Hinsichtlich der sozialen Gerechtigkeit stellt dies unsere Gesellschaft vor deutliche Herausforderungen. Die Auswirkungen wurden in einer Studie des Lehrstuhls für Energiesystemökonomik untersucht.<sup>[1]</sup>

Preisniveau	Strom	Erdgas	Heizöl	Benzin	Diesel
Januar 2020	31,81 €-ct/kWh	6,63 €-ct/kWh	0,66 €/l	1,43 €/l	1,32 €/l
Januar 2022	36,19 €-ct/kWh	11,84 €-ct/kWh	0,97 €/l	1,76 €/l	1,63 €/l
September 2022	37,56 €-ct/kWh	18,54 €-ct/kWh	1,57 €/l	1,95 €/l	2,12 €/l

Bild 1: Durchschnittliche Verbraucherpreise für die Energieträger Strom, Erdgas, Heizöl, Benzin und Diesel im Januar 2020 vor der Coronapandemie, im Januar 2022 vor Ausbruch des Krieges in der Ukraine und im September 2022.

### 40 Prozent höhere Energiekosten für Privathaushalte

Verbraucher passen ihr Konsumverhalten bei Preisveränderungen ihrer relativen Kaufkraft an. Bei steigenden Energiepreisen reduzieren Privathaushalte deshalb ihre Energieverbräuche. In den Wirtschaftswissenschaften werden diese Verbrauchsmengenänderungen in Relation zur Preisänderung gemessen als Preiselastizitäten der Nachfrage. In der Studie wurden solche Preiselastizitäten für die unterschiedlichen Energieträger für Haushalte abhängig von den jeweiligen Einkommen untersucht und modelliert. Auf dieser Basis wurden anschließend Auswirkungen der Energiepreiskrise für rund 60.000 repräsentative Haushalte simuliert und ausgewertet.<sup>[2,3]</sup>

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass Privathaushalte bei den Preisniveaus von September 2022 insgesamt jährliche Mehrausgaben von rund 46,9 Milliarden Euro aufbringen müssen, was einer Steigerung der Energiekosten – verglichen zum Januar 2020 – von 38,9 Prozent entspricht.

Ein durchschnittlicher Haushalt mit vier Personen, der mit Erdgas heizt, gibt nun beispielsweise zusätzliche 3,7 Prozent seines verfügbaren Einkommens für Energie aus. Das entspricht auf das Jahr gerechnet Mehrausgaben von 2.828 Euro. Hiervon verursachen höhere Erdgaskosten einen Anteil von 63,3 Prozent beziehungsweise 1.790 Euro. Danach folgen anteilmäßig Benzin und Diesel mit insgesamt 26,5 Prozent oder 748 Euro und schließlich elektrischer Strom mit 10,3 Prozent für 290 Euro.

### Einkommensschwache Haushalte am stärksten belastet

Die Ergebnisse verdeutlichen auch, dass die Haushalte in sehr unterschiedlichem Umfang von den gestiegenen Energiepreisen betroffen sind. Hierfür wurden die Haushalte in zehn Einkommensdezile eingeteilt, jedes Dezil repräsentiert zehn Prozent aller Haushalte in Deutschland. Die Auswertung zeigt, dass einkommensschwache Haushalte von den gestiegenen Energiepreisen relativ zum jeweiligen Einkommen am stärksten betroffen sind. Über den Betrachtungszeitraum müssen die einkommensschwächsten Haushalte im untersten Dezil Durchschnitt zusätzlich 4,3 Prozent ihres Einkommens, 560 Euro, aufbringen, um ihre Energierechnungen zu bezahlen. Bei den einkommensstärksten Haushalten im obersten Dezil sind es 1,5 Prozent beziehungsweise 1.473 Euro, siehe Bild 2. Zwischen den Haushalten dieser Einkommensgruppen liegt damit ein Faktor von 2,6 für die absoluten Energiemehrausgaben. Allerdings liegt zwischen den verfügbaren Einkommen der Haushalte ein Faktor von 8,2. Diese Unterschiede schlagen sich letztlich auch in einer leichten Erhöhung des Gini-Koeffizienten in Höhe von 0,45 Prozentpunkten nieder. Der Gini-Koeffizient misst die Einkommensungleichheit in unserer Gesellschaft.

In der Studie wurden die Mehrkosten auch für die einzelnen Energieträger und Einkommenssituationen getrennt untersucht, siehe Bild 3.

Preisniveau	Einkommensdezil									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Januar 2020	10,6%	8,8%	8,4%	7,7%	7,2%	6,7%	6,2%	5,8%	5,2%	3,9%
September 2022	14,8%	12,3%	11,8%	10,8%	10,0%	9,3%	8,6%	8,0%	7,2%	5,4%

Bild 2: Durchschnittlicher Anteil des Einkommens privater Haushalte für Energie (Haushalts- und Heizstrom, Erdgas, Heizöl sowie Benzin, Diesel) nach Einkommensdezilen.

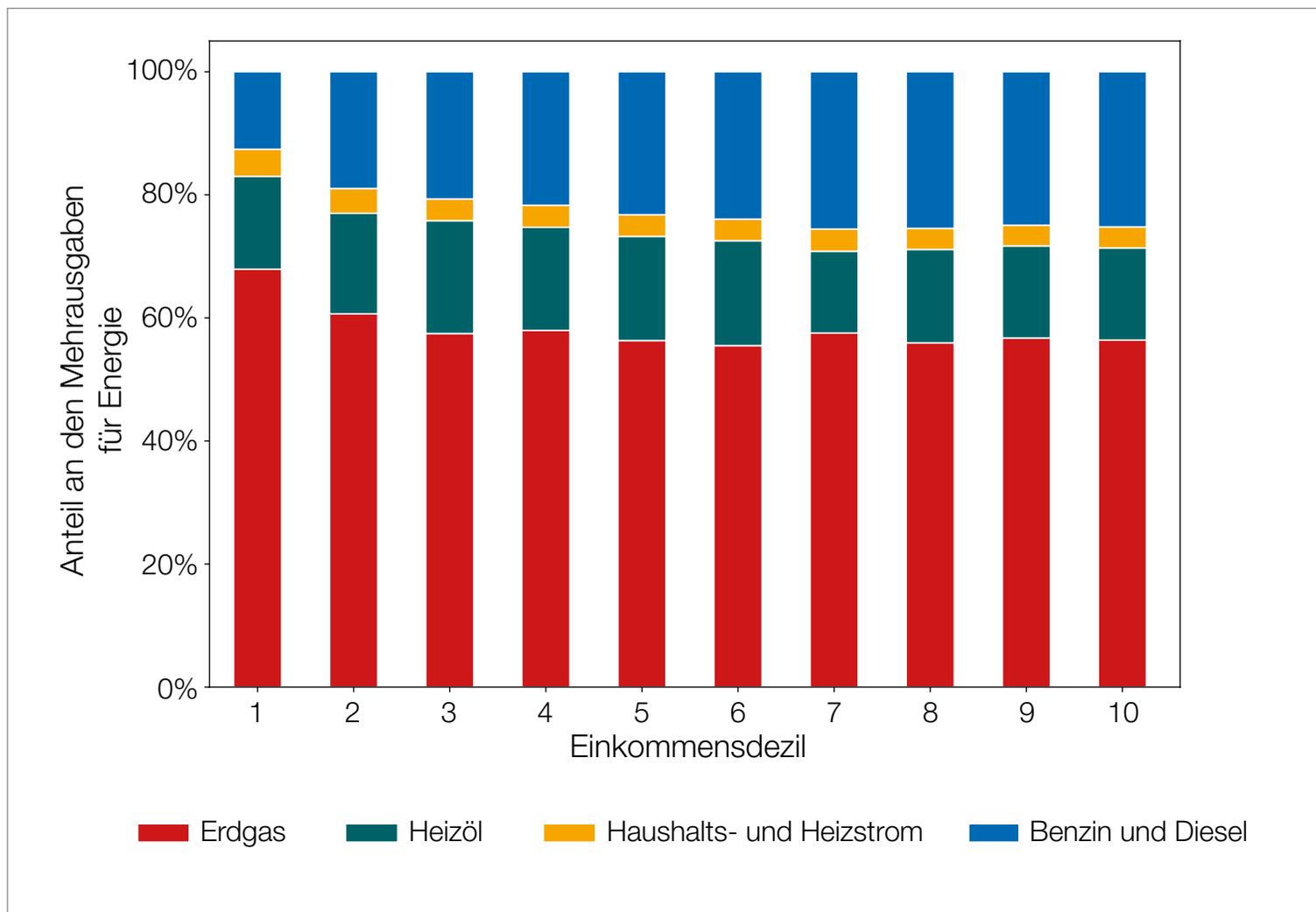


Bild 3: Durchschnittliche anteilige Mehrausgaben privater Haushalte im September 2022 gegenüber Januar 2020 aufgeteilt nach Energieträgern und Einkommensdezilen

Im Einkommensdezil 1 dominieren Mehrausgaben für Erdgas bei den gesamten Energie-mehrausgaben mit einem Anteil von 68 Prozent. Dieser Anteil sinkt mit steigendem Haushaltseinkommen auf schließlich 56 Prozent im Einkommensdezil 10. Ein gegenläufiges Bild zeigt sich beim Anteil der Mehrausgaben für Benzin und Diesel. Während im Einkommensdezil 1 13 Prozent der Mehrausgaben auf Energie für Kraftstoffe zurückgeht, steigt dieser Anteil mit dem verfügbaren Haushaltseinkommen. Im Einkommensdezil 10 liegt dieser bei 25 Prozent.

#### Hohe Preise tragen zur Sicherheit der Energieversorgung bei

Die gestiegenen Energiepreise belasten Privathaushalte erheblich, insbesondere die, welche bereits heute von Armut gefährdet sind. Jedoch verdeutlicht die Studie ebenfalls, dass die hohen Energiepreise gleichzeitig zu einer deutlich messbaren Reduktion der privaten Energieverbräuche führen, siehe Bild 4.

Bei Preisniveaus wie im September 2022 reduzieren Privathaushalte ihren jährlichen Erdgasverbrauch insgesamt um 67,4 Terawattstunden, ihren Heizölverbrauch um 1,9 Milliarden Liter, ihren Kraftstoffverbrauch um 2,3 Milliarden Liter (Benzin und Diesel kombiniert) sowie ihren Stromverbrauch um 1,5 Terawattstunden. Gerade im Kontext der schwierigen Versorgungslage durch den Wegfall russischer Energielieferungen tragen diese preisinduzierten Energieeinsparungen in nennenswertem Umfang auch zur Minderung von Versorgungsengpässen bei. Zum Vergleich: Erdgasimporte aus Russland hatten 2020 einen Umfang von rund 500 Terawattstunden.

#### Politische Maßnahmen zwischen Entlastungen und Versorgungssicherheit

Die Politik versucht mit verschiedenen Maßnahmen einerseits Privathaushalte finanziell zu entlasten und soziale Härtefälle aufzufangen. Andererseits soll auch die Versorgungs-

	Haushalts- und Heizstrom		Erdgas		Heizöl		Benzin und Diesel		Gesamt
	Mrd. €/a	TWh/a	Mrd. €/a	TWh/a	Mrd. €/a	Mrd. l/a	Mrd. €/a	Mrd. l/a	Mrd. €/a
Absolut	+1,7	-1,5	+27	-67,4	+7,4	-1,9	+10,6	-2,3	+46,9
Relativ	+4,5%	-1,3%	+124,6%	-18,3%	+81,0%	-13,8%	+20,7%	-6,1%	+38,9%

Bild 4: Summe der Mehrausgaben und Verbrauchsänderungen privater Haushalte. Verglichen wird das Preis- und das Verbrauchsniveau im Januar 2020 zu denen im September 2022.

sicherheit durch eine Reduktion von Energieverbräuchen verbessert werden.

Bei der Diskussion um energiepolitische Maßnahmen sollten daher neben einer pauschalen Entlastung der Verbraucher zum einen die sozialen Entlastungswirkungen berücksichtigt werden. So weisen die Studienergebnisse darauf hin, dass finanzielle Entlastungen bei Benzin und Diesel tendenziell eher zu einer Entlastung von einkommensstarken Haushalten führen. Einkommensschwächere Haushalte würden hingegen eher von einer Entlastung bei Erdgas profitieren.

Zum anderen sollten bei der Diskussion um geeignete Maßnahmen aber auch Auswirkungen der Maßnahmen auf die Energienachfrage berücksichtigt werden. Insbesondere bei preislichen beziehungsweise steuerlichen Erleichterungen wie Preisdeckeln oder Steuererabatten sollte bedacht werden, dass diese zu einem gewissen Wiederanstieg der Energieverbräuche und damit auch zu einer Verschärfung der Energieknappheiten führen.

#### Quellen

- [1] Praktijnjo, A. J., Priesmann, J., Kurzstudie: Auswirkungen steigender Energiepreise auf Einkommen und Energieverbräuche der privaten Haushalte, Lehrstuhl für Energiesystemökonomik, Aachen, RWTH-2022-03085, 2022. doi: 10.18154/RWTH-2022-03085.
- [2] Forschungsdatenzentren der statistischen Ämter des Bundes und der Länder, „Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2018 - Grundfile 3 (AAGSHB), SUF, Version 1“. 2018. doi: 10.21242/63211.2018.00.04.3.1.1.
- [3] Bach, S., u.a., CO<sub>2</sub> pricing in the heat and transport sector: discussion of effects and alternative relief options (CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Wärme- und Verkehrssektor: Diskussion von Wirkungen und alternativen Entlastungsoptionen). DIW Berlin: Politikberatung kompakt, 2019.

---

#### Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Aaron Praktijnjo ist Inhaber des Lehrstuhls für Energiesystemökonomik und Co-Leiter des Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior am E.ON Energy Research Center. Jan Priesmann, M.Sc., ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Energiesystemökonomik.

---

# Energieversorgungs- sicherheit und Energieautarkie

Handlungsmöglichkeiten privater Haushalte  
und auf der Energiesystemebene



Energy supply security has deteriorated due to the war in Ukraine. As a result, not only have energy prices risen, but private households are also interested in higher levels of energy autarchy. Ultimately, however, the problems of the energy system can only be addressed through a massive expansion of renewable energies, through the investment in storage solutions, including hydrogen-based solutions, as well as through intelligent energy systems and the use of opportunities for sector coupling. Politics can accelerate the energy transition in Germany through economic incentives and regulatory measures.

Deutschland ist seit Jahrzehnten eines der Länder mit der größten Energieversorgungssicherheit. So war im Jahr 2020 jeder Haushalt durchschnittlich nur zehn Minuten und 45 Sekunden ohne Strom – der niedrigste Wert in den letzten 15 Jahren und in Europa. Diese Situation hat sich allerdings durch den Krieg in der Ukraine grundlegend verändert. Der Weltenergieat<sup>[1]</sup> geht aktuell davon aus, dass Deutschland unter den G7-Staaten das höchste Risiko bei der Versorgung mit Energierohstoffen hat. Grund dafür ist die nach wie vor hohe Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, insbesondere Erdöl und Erdgas. Darin liegt ein Grund, die verbliebenen Atomkraftwerke in Deutschland über den Winter 2022/23 weiter zu betreiben. Dennoch müssen Haushalte und Unternehmen historisch hohe Preissteigerungen bei Erdgas und



Foto: Peter Winandy

Strom verkraften. Daher lohnt ein Blick in die Zukunft: Wie wirken sich Braunkohle- und Atomausstieg aus und welche Rolle kann Wasserstoff für das deutsche Energiesystem spielen?

In einer Analyse des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2030 konnte der Lehrstuhl für Controlling zeigen, dass unabhängig vom Zeitpunkt des Kohleausstiegs die Klimaschutzziele der Bundesregierung bei normaler wirtschaftlicher Entwicklung voraussichtlich deutlich verfehlt werden.<sup>[2]</sup> Dies gilt für alle betrachteten Szenarien, die basierend auf Forderungen von Greenpeace und des Bundes für Umwelt und Naturschutz Deutschland auch einen früheren Kohleausstieg umfassen können. Für diese Studie wurde auch die Produktion von Wasserstoff als Zwischenspeicher von Energie herangezogen.

Die heimische Wasserstoffproduktion ist, wenn diese über die Nutzung von Überschussenergie im Energiesystem hinausgeht, nicht nur eine teure Lösung, sondern muss unter Berücksichtigung der Energieerzeugungskapazitäten ab einer gewissen Menge verstärkt auf fossile Energieträger zugreifen. Grüner Wasserstoff, also Wasserstoff, der mithilfe von erneuerbaren Energieträgern erzeugt wird, kann langfristig nur zur Lösung beitragen, wenn erhebliche Mengen beispielsweise aus Nord- und Westafrika importiert werden. Aktuell gehen Studien davon aus, dass mindestens 70 Prozent des Wasserstoffbedarfs über Importe gedeckt werden muss. Beim Aufbau entsprechender Infrastrukturen sind Abhängigkeiten wie in der Vergangenheit zu vermeiden. Folgerichtig bemüht sich die Bundesregierung um den

Aufbau von Partnerschaften mit zahlreichen Ländern und Regionen. Dies geschieht beispielsweise im Rahmen des WASCAL-Engagements in 15 westafrikanischen Ländern. WASCAL wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung initiiert, die Abkürzung steht für West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use.

Wasserstoff kann aufgrund seiner relativ hohen Kosten nicht die alleinige Lösung darstellen. Vielmehr müssen verschiedene Lösungsansätze klug kombiniert werden. Eine wesentliche Komponente ist dabei der massive Ausbau erneuerbarer Energien. Da aber insbesondere Fotovoltaikanlagen und Windkraftwerke von den Wetterbedingungen abhängig sind, unterliegt die Stromerzeugung einer hohen Volatilität. Als Puffer gegen die Volatilität wird ein guter Mix an Speicherlösungen benötigt. Dabei kann es sich beispielsweise um die Erzeugung des bereits genannten Wasserstoffes handeln oder es kann in Batteriespeicher investiert werden. Ziel ist es, nicht benötigte Elektrizität zwischenspeichern und sie zu Zeiten bereitzustellen, zu denen die Stromerzeugung nicht den aktuellen Bedarf decken kann. Intelligente Energiesysteme sind ein weiterer Baustein der zukünftigen Energieversorgung. Sie sorgen einerseits für eine verbesserte Netzaussteuerung ohne vermeidbare Effizienzverluste. Andererseits können sie dazu beitragen, dass Elektrizitätsangebot und -nachfrage gut aufeinander abgestimmt werden. So lassen sich flexible Stromverbräuche, wie das Laden des Elektroautos, die Nutzung verbrauchsintensiver Haushaltsgeräte im privaten Bereich oder energieintensive Produktionsanlagen zeitlich so koordinieren, dass diese der Verfügbarkeit von Energie angepasst werden. Ein Elektroauto könnte zum Beispiel nachts geladen werden, wenn genügend Energie zur Verfügung steht. Viele Privathaushalte kennen das Phänomen schon: Sie waschen ihre Wäsche oder nutzen den Geschirrspüler, wenn sie Strom aus ihren Fotovoltaikanlagen beziehen können. Dadurch profitieren sie von der Differenz aus Strompreis und Einspeisevergütung, die inzwischen bei oft über 30 Cent pro Kilowattstunde liegt – je nach dem Anschaffungszeitpunkt der Fotovoltaikanlage. Im Zusammenhang mit intelligenten Energiesystemen wird auch von einer zunehmenden Digitalisierung und Servitization des Energiesystems gesprochen.

Eine weitere Komponente der Energieversorgungssicherheit ist die sogenannte Sektorenkopplung, die sowohl eine intelligente Nutzung von Energie als auch die Energiespeicherung betreffen kann. Ein Beispiel ist nicht nur das angesprochene intelligente Laden von Elektroautos, sondern auch die Nutzung von leeren Batterien als Energiespeicher. Im Zuge des bidirektionalen Ladens stellen Elektrofahrzeuge Energie für private Haushalte oder das Stromnetz zur Verfügung. Alle beschriebenen Maßnahmen können zur Energieversorgungssicherheit beitragen. Dennoch und gerade in der aktuellen, durch politische Entwicklungen bedingten Krise des Energiesystems reichen diese Maßnahmen (noch) nicht aus, um Angebots- und Nachfrageschwankungen vollständig auszugleichen. Private Haushalte haben zunehmend das Bedürfnis, sich von der öffentlichen Energieversorgung zu entkoppeln; sie möchten energieautark werden. Nachgefragt sind hier Fotovoltaiksysteme gekoppelt mit einer Batterie als Pufferspeicher. In einer im Jahr 2018 durchgeführten Untersuchung konnte der Lehrstuhl für Controlling zeigen, dass Kombinationen aus Fotovoltaik und Batteriespeicher bei hinreichender Dimensionierung Autarkiegrade von deutlich über 80 Prozent ermöglichen können.<sup>[3]</sup> Dafür ist bei Haushalten mit bis zu vier Personen allerdings ein Batteriespeicher von sechs beziehungsweise zehn Kilowatt und ein Fotovoltaiksystem von mindestens sieben Kilowatt erforderlich. Bei 16 Kilowatt können sogar Autarkiegrade von über 90 Prozent erreicht werden. Allerdings sind solche hoch dimensionierten Batteriespeicher teuer und rechnen sich selbst bei den aktuellen Energiepreisen für den privaten Verbraucher rein ökonomisch noch nicht. Eine Erhöhung der Einspeisevergütung, weiter steigende Energiepreise und sinkende Preise von Batteriespeichern verbessern die Wirtschaftlichkeit solcher Investitionen deutlich. Spätestens die Preisschwankungen im Jahr 2022 sowie 2023 zeigen die Fragilität unseres Energiesystems einer breiten Öffentlichkeit. Sowohl auf der Energiesystemebene als auch für private Haushalte gibt es Möglichkeiten, sich für die Zukunft zu wappnen. Der Krieg in der Ukraine wird die aufgezeigten Entwicklungspfade beschleunigen.

## Quellen

- [1] Weltenergierat Deutschland (Hrsg.): Energie für Deutschland: Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext, Berlin 2022, [https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2022/07/EnergiefuerDeutschland2022\\_final.pdf](https://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2022/07/EnergiefuerDeutschland2022_final.pdf)
- [2] Klöckner, K., Letmathe, P., 2020, Is the coherence of coal phase-out and electrolytic hydrogen production the golden path to effective decarbonisation? Applied Energy 279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115779>
- [3] Kappner, K.T., Letmathe, P., Weidinger, P., 2019, Optimisation of Photovoltaic and Battery Systems from the Prosumer-Oriented Total Cost of Ownership Perspective. Energy, Sustainability and Society, 9:44, 1-24. <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0231-2>



[www.wascal.org](http://www.wascal.org)

---

## Autor

Univ.-Prof. Dr.rer.pol. Peter Letmathe ist Inhaber des Lehrstuhls für Controlling.

---



Foto: Peter Winandy



Foto: Peter Winandy



# Namen & Nachrichten

## **DAAD-Preis 2022 für Pit Steinbach**

RWTH-Alumnus Pit Steinbach wurde mit dem DAAD-Preis 2022 für internationale Studierende ausgezeichnet. Der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD) würdigt mit der Verleihung hervorragende Leistungen ausländischer Studierender an deutschen Hochschulen.

Steinbach, geboren in Luxemburg, schloss sowohl den Bachelor- als auch den Masterstudiengang Chemie an der RWTH Aachen mit ausgezeichneten Noten ab. Während seines Studiums engagierte er sich in der Fachschaft, im AStA und in verschiedenen Gremien. Regelmäßig unterstützte er nationale wie internationale Studierende und erleichterte ihnen den Einstieg in das Studium. Außerdem war er im Vorstand des Projektvereins akademischer Kultur an der RWTH Aachen e.V. aktiv, dort organisierte er das Studifest und das Augustinerbachfest. Seit Januar 2022 promoviert Steinbach am Institut für Physikalische Chemie im Bereich Theoretische Physikalische Chemie großer Moleküle.

## **Zwei RWTH-Anträge von der DFG bewilligt**

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) bewilligte den RWTH-Antrag für einen Sonderforschungsbereich „Sparsity and Singular Structures“. Hier werden unter Leitung von Professor Holger Rauhut vom Lehrstuhl für Mathematik der Informationsverarbeitung die mathematischen Grundlagen von modernen Algorithmen für die Datenverarbeitung und das maschinelle Lernen sowie für die Simulation von naturwissenschaftlichen und technischen Phänomenen erforscht. Die DFG finanziert die Arbeiten in den nächsten vier Jahren mit rund sieben Millionen Euro, Es gibt 26 Mitarbeitende in in 19 Teilprojekten. Auch verlängerte die DFG die Förderung

für den Sonderforschungsbereich „Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktionsprozessen“. Dieser wurde bereits 2014 eingerichtet. In der ersten Phase lag der Schwerpunkt in der Analyse der verschiedenen Effekte, die zur Ausbildung, Dynamik und der zeitlichen und örtlichen Ausprägung der Schmelzeentstehung und der Erstarrung inklusive der inneren Effekte nach der Erstarrung führen. In der zweiten Phase wurde ein tiefgehendes Verständnis der präzisionsbestimmenden Faktoren bei schmelzebasierten Fertigungsprozessen erarbeitet. In der nun genehmigten dritten Phase steht die Erarbeitung wirkungsoptimierter Strategien und Systeme zur Vermeidung beziehungsweise Kompensation qualitätsreduzierender thermomechanischer Effekte und unkontrollierter Erstarrungsvorgänge im Vordergrund. Unter der Leitung von Professor Uwe Reisgen vom Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik forschen 35 Mitarbeitende in zehn Instituten in 19 Teil- und drei Transferprojekten. Die DFG finanziert diese interdisziplinäre Zusammenarbeit von drei Fakultäten mit einem Gesamtvolumen von rund elf Millionen Euro.

## **Zwei Alexander von Humboldt-Professuren für die RWTH**

Heike Vallery und Hector Geffner kommen mit einer Alexander von Humboldt-Professur beziehungsweise einer Alexander von Humboldt-Professur für Künstliche Intelligenz an die RWTH. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert seit 2009 die Alexander von Humboldt-Professuren und seit 2020 die Alexander von Humboldt-Professuren für Künstliche Intelligenz. Diese sind mit bis zu fünf Millionen Euro dotiert und damit die höchstdotierten internationalen Forschungspreise Deutschlands. Der Kandidat

beziehungsweise die Kandidatin muss im Ausland arbeiten, weltweit wissenschaftlich anerkannt sein und wird von der Hochschule nominiert. Ein interdisziplinärer Ausschuss der Stiftung entscheidet über die Vergabe. Ziel ist es, die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Forschungsstandortes Deutschlands nachhaltig zu stärken.

Vallery forscht an der Schnittstelle von Maschinenbau und Medizin. Ihre Arbeit zur Robotik zur Unterstützung der menschlichen Bewegung zeichnet sich sowohl durch theoretische Beiträge als auch durch praktische Auswirkungen aus und ebnet den Weg zu einer Medizintechnik, die für alle motorisch eingeschränkten Personen zugänglich ist. Für Vallery ist es eine Rückkehr an ihre Alma Mater. Nach der Promotion an der TU München arbeitete sie als Postdoktorandin an der ETH Zürich, war Assistenzprofessorin an der Khalifa University in Abu Dhabi und an der TU Delft. Aktuell ist sie ordentliche Professorin an der TU Delft und Honorarprofessorin am Erasmus MC in Rotterdam.

Geffner gilt als Vordenker der automatisierten Planung und widmet sich seit einigen Jahren auch dem Maschinellen Lernen. Seine Forschung im Themenfeld der Künstlichen Intelligenz ist weltweit Standard geworden. Aktuell forscht er an der Catalan Institution for Research and Advanced Studies, ist Gründer und Leiter des KI-Labs an der Universität Pompeu Fabra in Barcelona und hat seit 2019 eine Wallenberg-Gastprofessur an der Universität Linköping in Schweden. Zuvor war er am IBM Thomas J. Watson Research Center und an der Universität Simon Bolivar in Venezuela.

### Lindauer Nobelpreisträgertagung

Die RWTH-Chemikerinnen und -Chemiker Teresa Karl, Christian Schumacher, Renè Hommelsheim, Dr. Ruth D. Rittinghaus, Adrian Usler und Hans Gildenast wurden für die Teilnahme an der 71. Lindauer Nobelpreisträgertagung ausgewählt. 611 Studierende, Doktorandinnen und Doktoranden sowie Postdocs aus 91 Ländern trafen am Bodensee auf etwa 35 Nobelpreisträgerinnen und Nobelpreisträger. Die Lindauer Tagung gibt es seit 1951, ihr Schwerpunkt wechselt jährlich zwischen den drei Disziplinen Physik, Chemie und Physiologie/Medizin. Mit der Einladung haben die Nachwuchswissenschaftler ein mehrstufiges Auswahlverfahren erfolgreich durchlaufen. Bewerberinnen und Bewerber dürfen nicht älter als 35 Jahre sein. Die Eingeladenen repräsentieren die nächste Generation führender Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und bleiben Teil des Exzellenznetzwerks der Lindauer Nobelpreisträgertagung.

### RWTH Aachen im QS World University Ranking

Das QS World University Ranking bescheinigt der RWTH einen Platz unter den 150 besten Universitäten weltweit: Die Aachener Hochschule erreicht Position 147 und konnte sich damit deutlich von der bisherigen Platzierung 165 verbessern. Deutschlandweit liegt die RWTH auf Platz sieben. Das Ranking wurde vom britischen Informationsdienstleister Quacquarelli Symonds veröffentlicht, es wird jährlich erstellt und zählt zu den bedeutendsten Hochschulrankings. Analysiert werden Internationalität, Reputation, Betreuungsverhältnis und Qualität der Publikationen. Die Anzahl internationaler Studierender sowie Mitarbeitender bestimmt den Indikator Internationalität. Die RWTH erreicht hier jeweils eine bessere Platzierung als im Vorjahr, deutschlandweit belegt sie Platz zwei bei den internationalen Studierenden. Die Qualität der Publikationen wird anhand der Häufigkeit, mit der Veröffentlichungen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zitiert werden, ermittelt. Hier gelang eine deutliche Verbesserung gegenüber 2021. Deutschlandweit liegt die RWTH auf Platz fünf und erzielt damit ihr bisher bestes Ergebnis.

In der Akademikerreputation verbessert sich die RWTH im deutschen Vergleich auf den neunten Platz, bei der Reputation unter Arbeitgebern liegt Aachen wie in den Vorjahren auf dem zweiten Platz.

### Deutscher Studienpreis 2022 der Körber Stiftung

Für ihre herausragenden Dissertationen erhielten Dr. Lars Nolting und Dr.-Ing. Weihai Li den Deutschen Studienpreis 2022 der Körber Stiftung. Damit zeichnet die Stiftung jährlich die besten Promotionen mit besonderer gesellschaftlicher Bedeutung in den Fächergruppen „Kultur- und Geisteswissenschaften“, „Natur- und Technikwissenschaften“ und „Sozialwissenschaften“ aus. Der Deutsche Studienpreis zählt zu den höchstdotierten wissenschaftlichen Nachwuchspreisen in Deutschland. Nolting, Oberingenieur am Lehrstuhl für Energiesystemökonomik, erhält den mit 25.000 Euro dotierten ersten Preis in der Sektion Sozialwissenschaften. Er überzeugte die Jury mit seinem Beitrag „Der Strom kommt aus der Steckdose, oder? – Einführung von KI-basierter Metamodellierung zur Bewertung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität“. Li, Nachwuchsgruppenleiter am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, wurde für seinen Beitrag „Machine Learning für effizienten Batterieeinsatz in Mobilität und Energieversorgung für nachhaltigen Klimaschutz“ mit dem mit 5.000 Euro dotierten zweiten Preis in der Sektion Natur- und Technikwissenschaften ausgezeichnet.

### IAEE Best Student Paper Award.

Christina Kockel und Jan Priesmann vom Lehrstuhl für Energiesystemökonomik unter Leitung von Professor Aaron Praktiknjo belegten im internationalen Wettbewerb um den besten nachwachswissenschaftlichen Beitrag auf der Welttagung der International Association for Energy Economics (IAEE) in Tokio den ersten und zweiten Platz des IAEE Best Student Paper Award.

### European Paper Recycling Award für EnEWA

Im Projekt EnEWA entwickelt das Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe zusammen mit der Universität Siegen sowie mehreren Industriepartnern eine Lösung, um Altpapier aus Leichtverpackungen, Restabfall und Gewerbeabfall zu recyceln. Die Forschungsarbeiten wurden in Brüssel mit dem European Paper Recycling Award gewürdigt, der höchsten Auszeichnung des Europäischen Rates für Papierrecycling (EPROC) in der Kategorie „Innovative Technologien und Forschung & Entwicklung“. „EnEWA - Energieeinsparung bei der Papierproduktion durch Erschließung der Wertschöpfungsketten Altpapier aus Leicht-

verpackungen (LVP), Restabfall und Gewerbeabfall“ wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. In den vergangenen Jahrzehnten konnte der Energieverbrauch in der Papierherstellung durch technische Optimierungen und einen geringeren Energiebedarf bei der Wiederaufbereitung von Altpapier gesenkt werden. Daher ist der Einsatz von Altpapier eine wichtige Basis für die Papierproduktion. Dennoch gelangen derzeit rund 20 Prozent des produzierten Papiers nicht zurück in den Recyclingkreislauf und werden stattdessen hauptsächlich zur Energieerzeugung verbrannt. Zur Rückführung dieses Papiers entwickelt das Forschungsvorhaben einen Aufbereitungsprozess von der trockenmechanischen Sortierung, Zerkleinerung und Hygienisierung bis hin zum Einsatz in der Papierproduktion. Somit soll auch Altpapier aus Leichtverpackungen, Restabfall und Gewerbeabfall in die nachhaltige Kreislaufwirtschaft integriert werden. Das könnte potenziell über 300.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr in Deutschland einsparen.

Erste Analysen zeigen, dass 50 Prozent des Papiers aus den bislang untersuchten gemischten Abfallströmen auch über die getrennte Altpapiersammlung hätte entsorgt werden können und somit das Potenzial für ein ressourcenschonenderes Handling vorliegt. Die Ergebnisse werden in die Weiterentwicklung des Mindeststandards zum Verpackungsrecycling sowie die 36. Empfehlung „Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt“ des Bundesinstituts für Risikobewertung einfließen.

### Förderung für Lehr- und Lernprojekte

Die RWTH war mit sechs Einzelanträgen, drei Verbundanträgen und als Verbundpartner eines Projektes der Universität Potsdam im Rahmen einer bundesweiten Ausschreibung erfolgreich. Ausgeschrieben wurde das Programm „Freiraum 2022“ für Ideen für die Lehre von der Stiftung Innovation in der Hochschullehre. Freiraum wurde 2022 erstmals ausgeschrieben und soll künftig jährlich innovative Lehr- und Lernprojekte an Hochschulen in Deutschland fördern. Auf eine thematische Fokussierung und auf Empfehlungen der Hochschulleitungen wird verzichtet. An der RWTH werden folgende Projekte mit insgesamt 2,4 Millionen Euro gefördert:

- „Algorithmic Battle“, Henri Lotze/Professor Peter Rossmann, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- „ROS-LP Lehr- und Programmierplatt-

- form“, Eike Stührenberg/Professorin Sigrild Brell-Cokcan, Fakultät für Architektur
- „Nutzbarmachung räumlicher Daten aus Geographischen Informationssystemen unter Anwendung virtueller Realitätsszenarien“, Richard Gramlich/Professor Heribert Nacken, Fakultät für Bauingenieurwesen, und Professor Florian Wellmann, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
- „Unterstützung individueller Lernprozesse und -verläufe durch die lehrinhalten-übergreifende Förderung von Handlungskompetenzen in einer Mixed-Reality-Lernumgebung“, Dr.-Ing. Christopher Brandl/Professorin Verena Nitsch, Fakultät für Maschinenwesen
- „Learning by Video - Einsatz von Videografien“, Dr.phil. Katharina Böhnert/Professor Hans-Joachim Jürgens, Philosophische Fakultät
- „Tutorien zur Vorlesung ‚Einführung in die Sprachdidaktik‘“, Professor Christian Efing, Philosophische Fakultät
- „Physik.SMART“ (Verbundantrag mit FH Aachen), Professorin Heidrun Heinke und Professor Christoph Stampfer, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
- „Additive Reality – Virtuelle, praxisnahe Ausbildung im Digitalen Zwilling“ (Verbundantrag mit FH Aachen), Moritz Kolter/Professor Johannes Schleifenbaum, Fakultät für Maschinenwesen
- „3D-Multi-User-Hologrammtische für innovative Lehre in den Rohstoffwissenschaften und der Medizin“ (Verbundantrag mit Uniklinik RWTH Aachen), Professor Bernd Lottemoser, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
- „Fächerübergreifender Unterricht im VR-Klassenzimmer“ (Partner im Verbundantrag, geleitet von der Universität Potsdam), Professor Ulrik Schroeder, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

### **Carsten Bolm in Academia Europaea aufgenommen**

Professor Carsten Bolm, Leiter des Instituts für Organische Chemie, wurde in die Academia Europaea aufgenommen. Deren Ziel ist die Förderung der europäischen Forschung, die Beratung von Regierungen und internationalen Organisationen in wissenschaftlichen Fragen sowie die Förderung der interdisziplinären und internationalen Forschung. Bolms Forschungsbeiträge reichen von der Grundlagenforschung im Bereich der organi-

schen Synthesechemie über die Mechanochemie bis zur Entwicklung neuer biobasierter Kraftstoffe. Er promovierte 1987 in Marburg und absolvierte anschließend einen Postdoktorandenaufenthalt am Massachusetts Institute of Technology in Boston. 1993 habilitierte er an der Universität in Basel, 1996 nahm er einen Ruf auf einen Lehrstuhl für Organische Chemie der RWTH an. Er gehörte mehrfach zu den „Thomson Reuters Highly Cited Researchers“ und wurde 2015 zum Fellow der britischen Royal Society of Chemistry ernannt. Die Gesellschaft Deutscher Chemiker verlieh ihm für seine Arbeit auf dem Gebiet der Katalyseforschung die Adolf-von-Baeyer-Denkmedaille.

### **Netzwerk deutscher Infektionsforscherinnen**

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt in den kommenden drei Jahren im Rahmen des Programms „Innovative Frauen im Fokus“ den Aufbau eines Netzwerkes deutscher Infektionsforscherinnen. Verantwortlich für das Projekt Infect-Net ist Professorin Gabriele Pradel, Abteilung für Zelluläre und Angewandte Infektionsbiologie am Institut für Biologie 2. Zum Gründungsteam gehören Kolleginnen der Universität Münster, der TU Braunschweig, des Universitätsklinikums Frankfurt und des Bernhard-Nocht-Instituts für Tropenmedizin in Hamburg. Die Wissenschaftlerinnen wollen nicht nur ein nationales Netzwerk bilden, sondern dieses auch durch Gründung eines Verbandes verstetigen. Ziel ist eine erhöhte Sichtbarkeit von Infektionsforscherinnen und damit eine stärkere Position als Expertinnen in einer geschlechtergerechteren Wissenschaftskommunikation. Infect-Net sucht den Dialog mit Gesellschaft, Wirtschaft und Politik in den Bereichen der proaktiven Infektionsaufklärung. Die Maßnahmen umfassen Öffentlichkeitsarbeit, den Aufbau einer Expertinnen-datenbank, Netzwerktreffen, Workshops, Vortragsreihen und Mentoring-Programme. Zusätzlich soll eine Kommunikationsplattform etabliert werden, die der Bewertung aktueller Infektionsgeschehen durch Vertretungen von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft dient.

### **Christa Reicher für ihr Lebenswerk geehrt**

Professorin Christa Reicher, Inhaberin des Lehrstuhls für Städtebau und Entwerfen, wurde mit dem Großen Preis für Baukultur des Verbandes Deutscher Architekten- und

Ingenieurvereine e.V. (DAI) geehrt. Diese Auszeichnung wird seit 1990 alle zwei Jahre für besondere Verdienste um die Baukultur in Deutschland verliehen und ist die bedeutendste Ehrung dieser Art. Gewürdigt wird stets das Lebenswerk der Person. Reicher studierte Architektur an der RWTH und der ETH Zürich. Sie arbeitete in internationalen Planungsbüros, gründete ein Architekturbüro, lehrte an der FH Frankfurt, der Hochschule Bochum und der TU Dortmund. Zum Wintersemester 2018/19 übernahm sie den RWTH-Lehrstuhl und die Leitung des Instituts für Städtebau und europäische Urbanistik. 2019 erhielt sie für ihr Engagement im Ruhrgebiet den Innovationpreis der Immobilienwirtschaft, die Professorin ist auch Vorsitzende des Revierknotens Raum im Rheinischen Revier. Gemeinsam mit ihrem Team gewann Reicher zahlreiche internationale Planungswettbewerbe, etwa für den Aachener Campus Melaten, bei der Urban Tech Republic für den Berliner Flughafen Tegel und das städtebauliche Verfahren für das Areal des ehemaligen Berliner Flughafens Schönefeld-Nord.

### **Auszeichnung für Christoph Kuppe**

Für seine Forschungen auf dem Gebiet der chronischen Nierenkrankheit erhielt Privatdozent Dr. Christoph Kuppe den mit 100.000 Euro dotierten Life Sciences Bridge Award der Aventis Foundation. Dieser ist einer der höchstdotierten Nachwuchspreise Deutschlands und wird jährlich an drei Personen vergeben, die an deutschen Universitäten forschen. Kuppe ist Arbeitsgruppenleiter am Institut für Experimentelle Innere Medizin und Systembiologie und Oberarzt in der Klinik für Nieren- und Hochdruckkrankheiten, rheumatologische und immunologische Erkrankungen (Medizinische Klinik II) an der Uniklinik RWTH Aachen. Die Progression der chronischen Nierenkrankheit, an der mehr als zehn Prozent der Weltbevölkerung leiden, lässt sich bisher kaum aufhalten. Sie ist von einer zunehmenden Vernarbung der Niere gekennzeichnet und mündet meist in ein Herz-Kreislauf- oder Nierenversagen. Kuppe und sein Team erforschten die molekularen Ursprünge dieser Krankheit. So unterzogen sie rund 100.000 Zellen aus gesunden und kranken Nieren einer Einzelzell-RNA-Sequenzierung und bestimmten für jede dieser Zellen, welche Gene darin aktiv sind. Die Ergebnisse verzeichneten sie mit bioinformatischen Methoden in einem zeitlich differenzierten Koordinatensystem

– einer Art Aktivitätslandkarte des Nierengewebes. So bewiesen sie, dass Fibroblasten und Perizyten die zellulären Ursprünge der Nierenfibrose sind und entdeckten, dass das Protein NKD2 dabei als Signalmolekül eine Rolle spielt und ein Angriffspunkt für medikamentöse Therapien sein könnte. Hierauf aufbauend wurden die Signalwege der diabetisch bedingten Nierenkrankheit analysiert und ein mehrschichtiges Sequenzierungsmodell für Einzelzellen etabliert. Kuppe studierte und promovierte an der RWTH. Es folgten eine Facharztausbildung in der Klinik für Nieren- und Hochdruckkrankheiten, rheumatologische und immunologische Erkrankungen an der Uniklinik RWTH Aachen und ein Studium an der Universität Erlangen-Nürnberg zum Master of Health and Business Administration. Anschließend forschte er am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg und an der Erasmus Universität in Rotterdam. Ende 2021 wurde Kuppe Emmy Noether-Nachwuchsgruppenleiter, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, und Anfang 2022 erhielt er einen ERC Starting Grant des Europäischen Forschungsrates.

### **Schwerlasttransportmaschinen in der heimischen Rohstoffindustrie**

Im Projekt „ELMAR“ erarbeitet ein Konsortium aus Forschungs- und Industriepartnern, wie die Dekarbonisierung der heimischen Rohstoffgewinnung ganzheitlich gedacht und umgesetzt werden kann. Dabei werden die Einbindung autonom-elektrischer Schwerlasttransportmaschinen, damit einhergehende Anpassung erforderlicher Infrastruktur und Umgestaltung betrieblicher Prozesse umgesetzt. Weiter werden in dieser Transformation die Kopplung und Optimierung zwischen Energiebedarfs- und Energieversorgungsseite in einer vernetzten, modellbasierten und intelligenten Betriebsführung umgesetzt. Das Projekt wird bis Juli 2025 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz nach der Förderrichtlinie „Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität“ mit rund sechs Millionen Euro unterstützt. Seitens der RWTH sind das Institute for Advanced Mining Technologies und das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe involviert.

### **Schutz von Binnengewässern**

Professor Thomas Wintgens, Leiter des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, koordiniert in den nächsten drei Jahren das internationale Projekt „StopUP – Protecting

the aquatic environment from urban runoff pollution“. Die Europäische Union finanziert die Arbeiten im Rahmen von HORIZON Europe mit insgesamt 3,7 Millionen Euro. Beteiligt sind elf Partner aus acht Ländern, auch aus der Schweiz und Großbritannien. Im Mittelpunkt der Forschung steht die Wasserqualität in Binnengewässern.

Über städtische Oberflächenabflüsse sowie Regenwasser- und Kanalüberläufe gelangen Schadstoffe in die aquatische Umwelt. Aufgrund des Klimawandels mit ausgeprägten Dürrezeiten und intensiven Niederschlägen erhöht sich die Umweltbelastung, beispielsweise durch stoßartige Einträge abgelagerter Stoffe. Eine Eindämmung der Verschmutzung ist daher erforderlich. Die Projektpartner identifizieren zunächst Verschmutzungspfade in städtischen Einzugsgebieten mit Überwachungskonzepten, Online-Sensoren sowie Datenverarbeitung und -analyse. Außerdem testen sie Technologien, etwa Retentionsbodenfilter, die sich besser in städtische Gebiete integrieren lassen. Geografische, klimatische, hydrologische sowie sozioökonomische Umgebungen und Einflussfaktoren der Städte werden dabei berücksichtigt. Schließlich sollen Umweltbehörden, Wasserverbände und Versorgungsunternehmen Instrumente zur Umsetzung und Durchführung von Schadstoffminderungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt werden.

### **RWTH mit sehr guten Ergebnissen im U-Multirank**

Die RWTH Aachen erreicht im U-Multirank erneut sehr gute Ergebnisse. Das Ranking wurde von der Europäischen Kommission initiiert und wird auch von ihr finanziert. Es verfolgt – im Gegensatz zu den meisten anderen Hochschulrankings – einen multidimensionalen Ansatz, für jeden Indikator werden Noten von „sehr gut“ bis „mangelhaft“ vergeben. In der Gesamtbewertung anhand von 27 Kriterien erhält die RWTH 22 Mal die Noten „sehr gut“ und „gut“. Die Bereiche Lehre und Wissenstransfer sind hierbei herausragend, beim Wissenstransfer wird bei sieben von acht Indikatoren die Note „sehr gut“ erreicht. Beurteilt wurden beispielsweise die Anzahl der Publikationen in Kooperation mit der Industrie, Patentanmeldungen und Spin-offs. Auch wurden die Fächer Biologie, Chemie, Mathematik, Physik, Informatik, Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik sowie Wirtschaftsingenieurstudiengänge in vier Fachrichtungen

einzel gerankt. Die Chemie erhält zwölf Mal die Spitzenbewertung, die Biologie und die Physik folgen direkt dahinter und erreichen neun beziehungsweise acht Mal eine sehr gute Bewertung.

# Impressum

Herausgegeben im Auftrag des Rektors  
der RWTH Aachen  
Dezernat 3.0 – Presse und Kommunikation  
Templergraben 55  
52056 Aachen  
Telefon +49 241 80 - 93687  
pressestelle@rwth-aachen.de  
**www.rwth-aachen.de**

Verantwortlich:  
Renate Kinny

Redaktion:  
Angelika Hamacher

Titelbild:  
Visualisierung der Digitalisierung von Ener-  
giesystemen durch eine modulare Bildungs-  
plattform für Schülerinnen und Schüler  
Peter Winandy, Aachen

Anzeigen:  
Medienhaus Aachen GmbH  
Elke Brooren, Projektleitung  
Telefon +49 241 5101 270  
elke.brooren@medienhausaaachen.de

Gestaltung:  
Kerstin Lünenschloß, Aachen

Druck:  
image Druck + MEDIEN GmbH, Aachen

Nachdruck einzelner Artikel, auch auszugs-  
weise, nur mit Genehmigung der Redaktion.

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren  
verantwortlich.

ISSN-Nummer 0179-079X



# Im Effizienzsystem Heizen, Kühlen, Lüften und Strom erzeugen

Minimieren Sie jetzt Ihre Energiekosten durch intelligentes Management der Wärme- und Stromerzeugung.

Die Wärmepumpe Vitocal ist das Herzstück unserer integrierten Energielösungen. In Kombination mit einer Photovoltaik-Anlage, unserem kompakten Stromspeicher Vitocharge und der innovativen Lüftung Vitoair entfaltet unsere Systemlösung ihre volle Effizienz, und kann jederzeit auch durch eine Wallbox ergänzt werden.

Weitere Informationen zu unseren energieeffizienten Systemlösungen finden Sie unter [viessmann.de](https://www.viessmann.de)



Viessmann Deutschland GmbH | 35107 Allendorf (Eder) | Telefon 06452 70-0



Alle Systemkomponenten sind miteinander vernetzt und können mit der ViCare App einfach und schnell gesteuert werden.