



# RWTH THEMEN

Forschungsmagazin

1/2022

Center for Circular Economy



# NIE WAR STILLE LAUTER.



## Der vollelektrische Ford Mustang Mach-E GT

In 3,7 Sekunden von 0–100 km/h.<sup>1</sup>  
Bis zu 860 Nm maximales Drehmoment.<sup>2</sup>  
500 km Reichweite pro Ladung.<sup>3</sup>

**Ford** | **BEREIT FÜR  
MORGEN**

**Verbrauchswerte nach § 2 Nrn. 5, 6, 6 a Pkw-EnVKV in der jeweils geltenden Fassung: n. v.\***

Verbrauchswerte nach WLTP: Stromverbrauch: 20,0 kWh/100 km (kombiniert); CO<sub>2</sub>-Emissionen: 0 g/km (kombiniert).

\* n. v. = Daten nicht verfügbar. Der Gesetzgeber arbeitet an einer Novellierung der Pkw-EnVKV und empfiehlt in der Zwischenzeit für Fahrzeuge, die nicht mehr auf Grundlage des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) homologiert werden können, die Angabe der realitätsnäheren WLTP-Werte. Diese sind in der nachfolgenden Zeile zu finden.

<sup>1</sup> Ford Testdaten basierend auf der Testmethodik mit 0,3-Meter-Rollout, d. h. von einem rollenden Start aus. <sup>2</sup> Maximales Drehmoment bei Overboost, kurzzeitig verfügbar. <sup>3</sup> Gemäß Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP). Es können bis zu 500 km Reichweite (beabsichtigter Zielwert nach WLTP) bei voll aufgeladener Batterie erreicht werden – je nach vorhandener Serien- und Batterie-Konfiguration. Die tatsächliche Reichweite kann aufgrund unterschiedlicher Faktoren (Wetterbedingungen, Fahrverhalten, Fahrzeugzustand, Alter der Lithium-Ionen-Batterie) variieren.



# Inhalt

- 4 **Kreislaufwirtschaft ist mehr als Recycling**  
von Mohammad Chehadé und Bernhard Friedrich
- 8 **Der Weg zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft**  
Die Rolle von Circular-Economy-Indikatoren  
in der Nachhaltigkeitsbewertung  
von Anna Luthin und Marzia Traverso
- 12 **Kreislaufwirtschaft als regionale Gestaltungsaufgabe**  
Wirtschaftsgeographische Expertise unterstützt Ideenfindung  
und Umsetzung  
von Martina Fromhold-Eisebith und Paul Szabó-Müller
- 14 **Ökonomische Aspekte zirkulärer  
Wertschöpfungsarchitekturen**  
von Peter Letmathe, Maren Paegert, Linda Reinhart, Dustin  
Sperling und Richard Woeste
- 18 **Soziale Akzeptanz als Steuerungsgröße  
in der Kreislaufwirtschaft**  
Methoden und Befunde für eine nach sozialen Kriterien  
ausgerichtete Kreislaufwirtschaft  
von Linda Engemann, Lilian Kojan, Anika Linzenich und  
Martina Zieffle
- 24 **Zirkularität in der Gebäudeplanung**  
Die Circular Economy schafft neue Handlungsfelder  
im Bausektor  
von Linda Hildebrand, Alina Kretschmer und Kim Ha Tran
- 28 **Ressource Abwasser**  
Wertstoffe aus Klärschlamm gewinnen und Abwasser  
wiederverwenden  
von Isabell Allwicher, Jan-Hendrik Ehm, Hiep Le, David Montag,  
Thomas Wintgens und Tabea Zachäus
- 34 **Neue Baumaterialien für die Bioökonomie**  
Das Potenzial von Pilzen  
von Dana Saez, Denis Grizmann, Martin Trautz, Anett Werner
- 40 **Mikroben – Katalysatoren der Kreislaufwirtschaft**  
von Hendrik Ballerstedt, Lars M. Blank, Philipp Demling,  
Melanie Filbig und Lena Ullmann
- 44 **Phosphat-Recycling aus entölten Samen**  
Grünes Phosphat aus nachwachsenden Rohstoffen  
für eine gesunde Lebensmittelproduktion  
von Anna Joëlle Ruff und Ulrich Schwaneberg
- 46 **Der Biokunststoff Polylactid hat Potenzial für Zirkularität**  
Funktionelle und umweltfreundliche Materialien sind möglich  
von Martin Fuchs, Sonja Herres-Pawlis und Ruth D. Rittinghaus
- 50 **Wege zum wirkungsvollen Einsatz von  
Kunststoffrezyklaten**  
Durchgehender Datenaustausch und tiefgehende Analyse als  
Voraussetzungen für einen ökologisch sinnvollen Rezyklateinsatz  
von Elena Berg, Rainer Dahmann und Malte Schön
- 54 **Wie lange leben Batterien?**  
Zustandsbewertung und Lebensdauerprognose  
von Jan Figgene, Christopher Hecht und Dirk Uwe Sauer
- 62 **Von Abfall zu Rohstoff:  
Recycling von Lithium-Ionen-Batterien**  
von Karl Bernhard Friedrich, Damien Latacz, Lilian Schwich,  
Christin Stallmeister, Dzeneta Vrucak
- 68 **Kreis? Läuft!**  
Aufbereitung und Recycling im Kontext einer nachhaltigen  
Circular Economy  
von Xiaozheng Chen, Merle Hüsgen, Kathrin Greiff, Nils Kroell  
und Karoline Raulf
- 74 **Trennverfahren als Schlüsseltechnologie für eine  
nachhaltige Kreislaufwirtschaft**  
Wie die Entwicklung von innovativen Trennverfahren  
neue Möglichkeiten in Bioraffinerien eröffnet  
von Andreas Jupke und Katharina Saur
- 82 **Grüner Stahl mit rotem Problem**  
Stahlrecycling im Kontext der Kreislaufwirtschaft  
von Alexander Gramlich und Ulrich Krupp
- 90 **Alttextilien als Rohstoffquelle?**  
Mechanisches und chemisches Recycling  
von Amrei Becker, Thomas Gries, Amon Krichel,  
Stefan Schlichter, Stefan Schonauer und Jan Thiel
- 94 **Narkosegase sind Klimagase!**  
Narkosegas-Absorptionssysteme im klinischen Alltag  
von Linda Grüßer, Ina-Maria Kochendörfer und Rolf Rossaint
- 96 Namen & Nachrichten
- 102 Impressum

# Kreislaufwirtschaft ist mehr als Recycling

Die Welt ist im Wandel. Die vergangenen Jahre waren von der Pandemie, den Auswirkungen der Klimakrise sowie steigenden Energie- und Rohstoffpreisen geprägt und prägen auch gegenwärtig. Ein Grund ist der globale Überkonsum. Mehr als 90 Prozent der zur Verfügung stehenden Rohstoffe werden verschwendet und keiner Wiedernutzung zugeführt. Ein „weiter so“ ist mit Blick auf die begrenzte Menge an Rohstoffen nicht realistisch. Eine Möglichkeit Ressourcen nachhaltiger zu nutzen, ist die Schaffung eines zirkulären Systems – einer Kreislaufwirtschaft. Unter dem Begriff Kreislaufwirtschaft wird die zirkuläre Führung von Wertstoffen verstanden. Idealerweise sind Produkte und Prozesse so ausgestaltet, dass Ressourcen möglichst wiederverwendet werden. Dies umfasst jedoch deutlich mehr als das Recycling von Abfällen und erfordert eine Transformation unserer Gesellschaft und der gesamten Wertschöpfung. Um diesen Wandel zu ermöglichen, wurde das Center for Circular Economy (CCE) der RWTH Aachen ins Leben gerufen. Das CCE soll die RWTH-Kompetenzen auf dem Gebiet der Kreislaufwirtschaft bündeln und Lösungen für technologische, soziale und wirtschaftliche Herausforderungen bereitstellen. Den Impuls zur Gründung gaben Professor Bernhard Friedrich, Leiter des

Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie und aktuell Sprecher des Centers, sowie Professor Peter Kukla, Dekan der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik und Leiter des Geologischen Instituts. Die Aufholjagd der ehemaligen Entwicklungsländer und deren steigender Konsum sowie der Überkonsum der Industrieländer führen zu einer immens steigenden Abfallmenge. Abfälle verursachen nicht nur schädliche Emissionen, sie verschwenden auch Ressourcen und Energie. Produzierende Unternehmen müssen ihre Geschäftsmodelle und Strategien ändern, um den Konsum zu bedienen und dennoch nachhaltig wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft spielt hierbei eine wichtige Rolle. Durch innovative Informationssysteme, die Prozesse in der Industrie und Gesellschaft begleiten, wird die Kreislaufwirtschaft vorangebracht. Die Analyse großer Datenmengen, maximale Transparenz sowie Informationen zu den Produkten können zur optimalen Verwendung von Produkten beitragen. Derzeit sind industrielle Wertschöpfung, Konsum und Abfallverwertung größtenteils linear aufgebaut. So kaufen wir beispielsweise eine Packung Nudeln, kochen den Inhalt und entledigen uns der Kunststoffverpackung.

Im besten Fall wird diese dann recycelt und in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt. Doch die Idee, dass aus der leeren Nudelpackung wieder eine neue Nudelpackung wird, entspricht nicht der Realität. Es ist zwar möglich, aus der Verpackung ein sogenanntes Rezyklat zu erzeugen, dieses darf jedoch nicht für die Herstellung einer Nudelverpackung genutzt werden. Zusätzlich können die meisten Kunststoffe nur wenige Male recycelt werden, bevor sie ihre Materialeigenschaften einbüßen. Entsprechend wird die Verpackung bestenfalls zu einem neuen, verpackungsfernen Produkt oder thermisch verwertet, also verbrannt. Das Leben einer Nudelpackung ist also recht linear. Eine Kreislaufwirtschaft setzt daher die Transformation unserer linearen Wertschöpfung und Verwertung zu einem zirkulären System voraus. Dies geschieht nicht nur über die ständige Wiederverwendung von Rohstoffen, sondern fordert auch die effektive Nutzung langlebiger Produkte. Diese müssen zudem gut reparierbar sein und sollten bestenfalls einer weiteren Nutzung zugeführt werden. So können Akkumulatoren aus batterieelektrischen Fahrzeugen einen zweiten, ausgiebigen Lebenszyklus als stationäre Stromspeicher in privaten Haushalten durchlaufen. Auf diese Weise wird ein Abfallprodukt aus





Bild 1: Diskussion zu aktuellen Herausforderungen der Kreislaufführung von Technologieprodukten  
Foto: Peter Winandy

der Automobilwirtschaft zu einem essenziellen Produkt in der Speicherung nachhaltiger Energien und Dezentralisierung unseres Stromnetzes. Gleichzeitig wird ein kalkulierbarer Markt von Altbatterien für den Recyclingsektor geschaffen. Es wird deutlich, dass zur Schließung von Produkt- und Stoffkreisläufen vor allem die transdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Branchen nötig ist, die bislang nicht unbedingt in Kontakt gekommen sind. Dabei spielt neben der Schaffung nachhaltiger Geschäftsmodelle vor allem auch das recyclinggerechte Design von Produkten eine Rolle. Mobiltelefone werden aktuell eher gegen ein neueres Modell ausgetauscht statt repariert. Das liegt zumeist an der komplizierten Verklebung der Bauteile sowie fehlenden Ersatzteilen.

#### **Mehr Unabhängigkeit!**

Rohstoff- und Ressourcenknappheit sind zwar seit Jahren ein Thema, seit der Pandemie sind Rohstoffe sowie Produkte aus Stahl und Holz knapper geworden. Die globale Produktion und Lieferungen der Güter hat sich zunehmend verzögert. Um Unternehmen vor Abhängigkeiten in der Lieferkette oder Preisschwankungen an den Rohstoffmärkten zu schützen und gleichzeitig profitabler zu machen, ist das Konzept der Kreislaufwirt-

schaft ein wichtiger Ansatz. Eine Analyse der eigenen Wertschöpfungskette kann Potenziale zur Verringerung des Ressourcen- und Energieeinsatzes aufzeigen, beispielsweise ein Life-Cycle-Assessment oder eine Life-Cycle Cost analysis. Durch eine regelmäßige Analyse können kontinuierlich Daten gewonnen werden, die Grundlagen für weitere Optimierungen der Wertschöpfungskette bilden. Das Sprichwort „Des einen Müll, des anderen Schatz!“ findet wohl kaum eine bessere Anwendung als in der Bauindustrie. Dort werden Sand und Kies als „neues Gold“ bezeichnet. Aufgrund des globalen Baubooms werden primäre Rohstoffe knapper, obwohl diese durch Nutzung von Bauschutt in ausreichenden Mengen bereitgestellt werden könnten. Der jährliche Verbrauch der begehrten Baumaterialien beläuft sich global auf 40 Milliarden Tonnen. Ein Teil dieses Verbrauchs könnte durch die Nutzung von feinkörnigem Bauschutt gedeckt werden. Dieser wird bislang lediglich deponiert, dabei ist die Zementproduktion für acht Prozent der anthropogenen Emissionen klimaschädlicher Gase verantwortlich. Für die Transformation zur Kreislaufwirtschaft wird ein Paradigmenwechsel entlang der gesamten Wertschöpfungskette benötigt. Die Etablierung einer funktionellen Kreislaufwirt-

schaft benötigt das Zusammenspiel diverser Akteure aus unterschiedlichsten Branchen. Diese Ausgabe der „RWTH THEMEN“ soll einen Einblick in die Forschung auf dem Gebiet der Nachhaltigkeit und Zirkularität sowie einen Ausblick auf die Welt von morgen geben.

#### **Autoren**

Dr.-Ing. Mohammad Chehadé ist Geschäftsführer des Centers for Circular Economy. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Bernhard Friedrich ist Sprecher des Centers for Circular Economy, Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling und Leiter des Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie.



# Circular Economy is More Than Recycling

The world is changing. The COVID-19 pandemic, the effects of the climate crisis, and rising prices for energy and raw materials have shaped the past few years, and they continue to shape our present and future. One reason for these developments is global overconsumption. More than 90 percent of the raw materials available are wasted instead of being reused. And since raw materials are limited, it is just not an option to continue wasting them at the current rate. One way to use resources more sustainably is to create a circular system – a circular economy. This term refers to the circular management of recyclable materials. Ideally, products and processes are designed to allow the reuse of resources wherever possible. However, this involves much more than just recycling waste – it requires a transformation of our society and the entire value creation process. The Center for Circular Economy (CCE) at RWTH Aachen University was established to advance this transformation. The aim of the CCE is to pool expertise at the University in the area of the circular economy and develop solutions for technological, social, and economic challenges. The initial impetus for the Center was provided by Professor Bernhard Friedrich, head of the Institute of Metallurgical Process Technology and Metal Recycling and

now the spokesperson for the Center, and Professor Peter Kukla, dean of the Faculty of Georesources and Materials Engineering. The increasing consumption of the formerly „developing“ group of countries, which have caught up with the advanced economies, and the overconsumption of the industrialized countries result in ever increasing amounts of waste. Waste not only causes harmful emissions, it also represents a waste of resources and energy. Manufacturing companies need to change their business models and strategies to keep up with consumption and still remain competitive in the long term. Digitalization in the circular economy plays an important role in this process. Innovative information systems that support processes in industry and society help advance the circular economy. Big data analysis, maximum transparency, and the provision of product information can all contribute to the optimal use of products. Currently, industrial value creation, consumption, and waste recycling are largely linear. For example, we buy a package of pasta, consume its content, and throw away the plastic packaging. In the best case, this is then recycled and returned to the materials cycle. But the notion that an empty package of pasta becomes a new packaging for food does not

correspond to reality. It is possible to produce so-called recyclate from the packaging, but this must not be used for the production of food packaging. In addition, most plastics can only be recycled a few times before losing their material properties. At best, the packaging is turned into a new product for non-packaging use or is thermally recycled, i.e. incinerated. Thus, the life cycle of a pasta package is quite linear.

A circular economy, however, requires the transformation of our linear value creation and recycling into a circular system. To achieve this, raw materials must be constantly reused, and durable products must be used more effectively. Durable products should also be easily repairable and, ideally, should be put to further use at the end of their life cycle. For example, accumulators of battery electric vehicles can be used in a second life cycle as stationary electricity storage units in private households. In this way, a waste product from the automotive industry becomes an essential product in the storage of sustainable energy, facilitating the decentralization of the power grid. At the same time, a calculable market of spent batteries is created for the recycling sector. It is becoming clear that closing product and material cycles requires, above all, interdisciplinary collaboration between



different sectors that do not traditionally work together. In addition to creating sustainable business models, it is key to develop recycling-friendly products. Today, cell phones are more likely to be exchanged for a newer model than repaired. This is mostly due to the complicated bonding of the components and the lack of spare parts.

**More Independence!**

Although raw materials and resource scarcity have been an issue for years, raw materials, steel, and wood products have become significantly scarcer since the pandemic. Global production and delivery of goods have been increasingly delayed. The circular economy is an important approach to protect companies from dependencies in the supply chain and from price fluctuations on the raw material markets; at the same time, it makes them more profitable. Analyzing the value chain may open up potential for reducing the use of resources and energy, for example with the help of a life cycle assessment or a life cycle cost analysis. Regular analysis allows us to obtain data for further optimization of the value chain on a continual basis.

The saying “One person’s trash is another person’s treasure!” rings particularly true for the construction industry. In the sector, sand

and gravel are referred to as the “new gold”. Due to the global construction boom, raw materials are becoming scarcer, although they are in sufficient supply. Annual global consumption of the coveted building materials amounts to 40 billion tons. Part of this consumption could be covered by the use of fine-grained construction waste. Up to now, such waste has been disposed of in landfills, although cement production is responsible for eight percent of anthropogenic emissions of climate-damaging gases. The transformation to a circular economy requires a paradigm shift along the entire value chain. Establishing a functional circular economy requires the interaction of diverse players from a wide range of industries. This issue of RWTH Themen is intended to provide insights into research in the field of sustainability and circular economy and an outlook on the world of tomorrow.

---

**Authors**

Dr.-Ing. Mohammad Chehadé is managing director of the Center for Circular Economy. Professor Bernhard Friedrich is spokesperson for the Center for Circular Economy.

---

# Der Weg zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft

## Die Rolle von Circular-Economy-Indikatoren in der Nachhaltigkeitsbewertung

What can be measured can be compared and managed. However, when introducing new ideas and concepts in the field of circular economy (CE), most decisions are based on gut feeling. Research is currently being carried out worldwide to find indicators that make circular economy measurable and thus manageable. To ensure sustainable CE-strategies, these indicators need to be integrated in sustainability assessment. This is because, contrary to popular belief, CE-concepts are not automatically sustainable. Trade-offs within and between the individual sustainability dimensions (environment, economy, social aspects) can occur due to burden shifting, such as greenhouse gas potential, use of chemicals, or job displacement. In particular,

the social impacts of the circular economy are still little considered at present. Research conducted at the Institute for Sustainability in Civil Engineering (INaB) seeks to integrate CE in sustainability assessment. The institute has set itself the goal of contributing to the design of a sustainable circular economy of the future.

Die Verknappung primärer Rohstoffe, der Klimawandel, das steigende Abfallaufkommen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen führen zum Umschwung von einer linearen zu einer Kreislaufwirtschaft, der Circular Economy (CE). Die Notwendigkeit von Kreislaufwirtschaftsstrategien wird unter anderem von den Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen – genauer von SDG 12 Nachhaltige/r Konsum und Produktion – angesprochen. Die Kreislaufwirtschaft gilt als Konzept der nachhaltigen Entwicklung, da ihr ein großes Potenzial zur Verringerung der globalen Erwärmung, zur Einsparung von Primärressourcen wie fossiler Brennstoffe und zum Erhalt der Biodiversität zugeschrieben wird.





CE-Indikatoren alleine reichen **nicht** aus, um eine nachhaltige Performance von Kreislaufwirtschaftsstrategien sicherzustellen!



24

INB RWTH AACHEN UNIVERSITY

Bild 1: Das Team des Instituts für Nachhaltigkeit im Bauwesen forscht an Methoden, um Kreislaufwirtschaftskonzepte hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit lebenszyklusbasierend zu bewerten.  
Foto: Peter Winandy

## Aber ist eine Umstellung von einer linearen zu einer Kreislaufwirtschaft immer nachhaltig?

Eine Entwicklung ist nach der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen nachhaltig, wenn sie den Bedürfnissen heutiger Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen. Wenngleich oftmals mit Nachhaltigkeit nur Umweltaspekte assoziiert werden, umfasst diese jedoch darüber hinaus die ökonomische und soziale Dimension. Eine Umstellung gängiger Prozesse auf die Kreislaufwirtschaft betrifft alle drei Dimensionen – positiv und negativ.

Aus ökologischer Sicht ist der größte Vorteil der Kreislaufwirtschaft die Ressourcenschonung durch Einsparung primärer Rohstoffe zur Güterproduktion und fossiler Energieträger. Das kann unter anderem auch einen geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit sich bringen. Außerdem trägt ein vermindertes Abfallaufkommen zu einem geringeren Flächenbedarf für Deponien bei. Allerdings ist es möglich, dass eine intensive Aufbereitung von Abfällen zur weiteren Nutzung notwendig ist. Erhebliche Umweltauswirkungen durch erhöhten Chemikalien- und Energieeinsatz sind mögliche Konsequenzen. Auch die Industrie wird durch eine Umstellung auf die Kreislaufwirtschaft erheblich beeinflusst. Positive Effekte sind die Steigerung von Wettbewerbsfähigkeit

durch neue Businessmodelle und Förderung von Innovationen. Herausforderungen sind hingegen höhere Kosten, da Recyclingtechnologien ausgebaut werden müssen und oft noch unwirtschaftlich sind. Produktionsstandorte verlagern sich und neue Unternehmen entstehen während andere schließen müssen. Da die Gesellschaft von der Industrie stark geprägt ist, kommt es auch zu sozialen Auswirkungen. Während an einer Stelle neue Arbeitsplätze entstehen, ist regional ein Wegfall möglich. Ein Beispiel hierfür ist der durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung bedingte Strukturwandel im Rheinischen Revier. Im Zuge einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sollten also nicht nur negative Auswirkungen ermittelt, sondern



Bild 2: Mögliche Auswirkungen einer Umstellung der Kreislaufwirtschaft auf die Nachhaltigkeit in den Bereichen Ökologie, Soziales und Ökonomie.

auch mögliche Gegenmaßnahmen identifiziert werden, etwa Umschulungsmaßnahmen für Arbeitnehmer.

Das zeigt, dass nicht alle Kreislaufwirtschaftsaktivitäten automatisch nachhaltiger sind, da Trade-offs und eine Verlagerung von Kosten, Umwelt- und Soziallasten möglich sind. Diese Verlagerung tritt zum einen innerhalb, zum anderen aber auch zwischen den drei Dimensionen auf. Weiterhin basiert die Wahl, welche Kreislaufwirtschaftsstrategien umgesetzt werden sollen, oftmals auf Bauchentscheidungen. Werden Kreislaufwirtschaftsaspekte in Ausnahmefällen berücksichtigt, wird sich in der Regel auf Kennzahlen wie die Recyclingrate konzentriert, wodurch verschiedene (Nachhaltigkeits-)Aspekte vernachlässigt werden. Um jedoch eine steuerbare und nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu erreichen, ist eine kontinuierliche Überwachung der umgesetzten Strategie entscheidend. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von Indikatoren, welche Charakteristika und Auswirkungen der Kreislaufwirtschaft quantifizieren, um sie messbar und damit vergleichbar zu machen. Die Forschung in diesem Bereich hat in den letzten Jahren stark zugenommen und ver-

schiedene Circular-Economy-Indikatoren wurden entwickelt. Ein Indikator, der sich auf die Ressourcennutzung fokussiert, ist beispielsweise der Materialfußabdruck, auch bekannt als Raw Material Consumption. Der Materialfußabdruck ist ein verbrauchsbasierter Indikator, der alle eingesetzten Materialien aufsummiert und so die globale lebenszyklusweite Materialgewinnung und den Endverbrauch von Material innerhalb einer Region veranschaulicht. Entscheidungsträger können über den Materialverbrauch informiert werden und Maßnahmen zur Optimierung des Ressourcenverbrauchs ergreifen. Unter anderem durch Wiederverwendung und Recycling kann dieser Fußabdruck deutlich verringert werden.

Ein weiterer und in der Wissenschaft häufig verwendeter Indikator zur Betrachtung der Material- und Prozesseffizienz ist der Material Circularity Indicator, der von der Ellen Mac Arthur Foundation und Granta Design entwickelt wurde. Dieser misst, inwieweit der lineare Materialfluss minimiert und die Rückführung von Materialien maximiert wird und gibt Auskunft über die Nutzungseffizienz des Produkts. Produktmerkmale, die bei der



Berechnung dieses Indikators einfließen, sind der Einsatz primärer Rohstoffe, dem Produkt zuzuordnende nicht verwertbare Abfälle sowie Dauer und Intensität der Nutzung. Emissionen, die als Nebeneffekt entstehen – etwa durch Transport – werden nicht berücksichtigt. Der Material Circularity Indicator nimmt einen Wert zwischen 0 (lineares Produkt nur aus primären Rohstoffen und einem Lebensende auf der Deponie) und 1 (vollständig zirkuläres Produkt) an. Neben den beiden beschriebenen Indikatoren, welche den Fokus auf die Umweltauswirkungen legen, gibt es eine Vielzahl anderer Indikatoren. Recyclingrate, Zeit und Anzahl erforderlicher Werkzeuge zur Demontage, Anteil der Materialien mit sicheren Recyclingmöglichkeiten, Beschäftigungszahl in der Kreislaufwirtschaft und Wachstumsrate der industriellen Wertschöpfung sind nur einige Beispiele weiterer Indikatoren.

### **Welche Circular-Economy-Indikatoren sollten also verwendet werden, und wie können diese im Kontext der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden?**

Neben den wirtschaftlichen Aspekten liegt der Schwerpunkt der aktuellen Forschung zur Kreislaufwirtschaft auf den Umweltauswirkungen. Die Ökobilanz, auch bekannt als Life Cycle Assessment, ist die derzeit am meisten verwendete Methodik, um die Umweltauswirkungen der Kreislaufwirtschaft zu bewerten. Um Trade-offs zu vermeiden, wurden in einigen Studien beispielsweise Ökobilanz und der Material Circularity Indicator miteinander kombiniert. Das ist unter anderem dadurch möglich, dass sich einige der notwendigen Daten überschneiden. Allerdings ist anzumerken, dass die Ökobilanz oftmals nur einen Lebenszyklus oder ein Produktsystem betrachtet, was nicht der Idee der Kreislaufwirtschaft entspricht. Daneben werden auch mit dem Material Circularity Indicator nicht alle Kreislaufwirtschaftsaspekte abgedeckt. Um sicherzustellen, dass die Kreislaufwirtschaft ganzheitlich zur nachhaltigen Performance beiträgt, müssen neben den ökologischen Aspekten auch die ökonomische und soziale Dimension berücksichtigt werden. Die ökonomische Nachhaltigkeit kann mit der Lebenszykluskostenrechnung (LCC) erfasst werden und die sozialen Auswirkungen mit der Sozialbilanz (S-LCA). Die lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertung (LCSA) deckt durch Kombination und gleichzeitiger Anwendung der drei Bewertungsmethoden alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit ab:

$LCSA = LCA + LCC + S-LCA$ . Eine Integration von Circular-Economy-Indikatoren in LCSA ermöglicht also aussagekräftige Erkenntnisse zur Nachhaltigkeit bestimmter Kreislaufwirtschaftsstrategien.

Allein diese lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertung an sich ist ein neues und komplexes Forschungsfeld genauso wie die Bewertung der Kreislaufwirtschaft an sich. Es besteht daher ein großer Forschungsbedarf in der Weiterentwicklung beider Ansätze – aber auch in ihrer Kombination, um frühzeitig nachhaltige Kreislaufwirtschaftsstrategien festzulegen und Lastenverlagerung zu minimieren. Die Wahl geeigneter und ergänzender Circular-Economy-Indikatoren (einige Kreislaufwirtschaftsaspekte, wie das Treibhausgaspotenzial, werden bereits in der Nachhaltigkeitsbewertung berücksichtigt) ist dabei eine der größten Herausforderungen. Darüber hinaus sind eine einheitliche Nutzung von Begriffen, einheitliche Vorgehensweisen und Transparenz für die Bewertung und Einführung nachhaltiger Kreislaufwirtschaftsstrategien unabdingbar.

Das Team vom Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen trägt mit seiner Forschung zur Weiterentwicklung dieser Ansätze bei. Beispielsweise beschäftigt sich das Team im Projekt „TransPhoR“ – gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung – gemeinsam mit Projektpartnern mit der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung regionaler Phosphor-Recycling-Strategien. Aufgabe im Projekt „FaBeR“ – ebenfalls vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert – ist das Durchführen einer Ökobilanz und die ökonomische Bewertung der erzeugten Werkstoffe beim Faser- und Beton-Recycling von Carbon- und Textilbeton. Auch werden Indikatoren und Tools zur Integration der Kreislaufwirtschaft in die lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertung entwickelt. Ziel ist es, Entscheidungsträgern frühzeitig Erkenntnisse vorzulegen, um Kreislaufwirtschaftsstrategien nicht nur gewinnbringend und umweltverträglich, sondern auch mit einem Nutzen für die Gesellschaft zu gestalten.

---

### **Autorinnen**

Anna Luthin, M.Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marzia Traverso ist Inhaberin des Lehrstuhls für Nachhaltigkeit im Bauwesen und Leiterin des Instituts für Nachhaltigkeit im Bauwesen.

---

# Kreislaufwirtschaft als regionale Gestaltungsaufgabe

## Wirtschaftsgeographische Expertise unterstützt Ideenfindung und Umsetzung

Developing and implementing circular economy approaches requires not only engineering and material science competences, but also profound expertise relating to relevant local context factors. The regional availability of pre-used products, components or materials, in line with advantages of spatial proximity between different stakeholders, are crucial for successfully and sustainably installing recycling systems. At the Chair of Economic Geography, a focus is set on both research and policy consulting concerning how local actors and assets for the circular economy can be identified and how they may be motivated to constructively interact. This article outlines specific economic geography views on the issue and gives examples of contributions to interdisciplinary research and development projects as well as to the development of applicable policies.

Die Wieder- oder Weiternutzung von Produkten, Komponenten oder Werkstoffen hängt erheblich von ihrer Verfügbarkeit vor Ort ab. Das Forschungsgebiet Wirtschaftsgeographie bringt hier integrierte Perspektiven ein: Entwicklungen werden als ortsspezifisches Zusammenspiel von naturräumlichen Grundlagen, ökonomischen Erfordernissen, sozialen Strukturen, technologischen Potenzialen und politischen Absichten verstanden. Die Konzeption und Umsetzung von längerfristig tragfähigen Ansätzen der Kreislaufwirtschaft ist eine systemische Aufgabe. Deshalb werden vermehrt auch Bezeichnungen wie Circular Economy, Zirkuläre Wirtschaft oder Zirkuläre Wertschöpfung verwendet, um sich vom Abfallmanagement und Recycling abzugrenzen. Es müssen nicht nur vielfältige materielle Austauschbeziehungen organisiert und koordiniert werden, zusätzlich sind Schlüsselakteure aus Wirtschaftsbereichen, Hochschulen, Verwaltung und Gesellschaft zum Engagement hin zu mehr Zirkularität bei Produktion und Konsum zu bewegen. In diesem Setting können die Vorteile räumlicher Nähe bedeutsam sein und regionalen Ansätzen Rückenwind verleihen. Diese Vorteile gehen über Einsparungen bei Transportkosten deutlich hinaus und umfassen auch soziale Aspekte, siehe Bild 1. Am Lehrstuhl für Wirtschaftsgeographie werden Beziehungssysteme für die Regional-

entwicklung bezogen auf verschiedene Vernetzungsarten untersucht. Dabei bietet der etablierte Fokus auf regionale Zusammenhänge von Innovation, Nachhaltigkeit und wirtschaftsräumlichen Trends auch für das Themenfeld Kreislaufwirtschaft Anknüpfungspunkte. Ziel ist, Optionen für eine auf das Akteursgefüge und sonstige Merkmale zugeschnittene Kreislaufwirtschaft zu entwickeln, dabei regionale Schlüsselakteure und Pionierbetriebe zu identifizieren sowie Kräfte effektiv zu bündeln und koordinieren. Dies umfasst, eng verzahnt, sowohl Forschungs- als auch praxisorientierte Gestaltungsaufgaben. Beiträge der Wirtschaftsgeographie zu beiden Bereichen werden folgend näher vorgestellt. Im Projekt „100 Smartphones“ des Lehrstuhls für Anthropogene Stoffkreisläufe stehen abfallwirtschaftliche und materialwissenschaftliche Untersuchungen zur Demontage und Recyclingfähigkeit von gesammelten Handys im Zentrum. Aus der Wirtschaftsgeographie können Erkenntnisse zu Rahmenbedingungen, Interaktionserfordernissen sowie international recherchierten Vorbildentwicklungen beige-steuert werden. Die Beteiligung am Deutschen Kunststoffkreislaufzentrum im Rheinischen Revier (DKR<sup>2</sup>), einem zur Förderung beantragten Vorhaben an den Standorten Weisweiler und Baesweiler unter Federführung des Lehr- und Forschungsgebiets Technologie der Energierohstoffe, ist





Bild 1: Wirtschaftsgeographische Sicht auf regionsspezifische Bedingungen der Kreislaufwirtschaft

ein weiteres Beispiel. Hier werden Forschungs- und Anwendungsaufgaben zur Sammlung, Sortierung und Wiederverwertung von Kunststoffabfällen verbunden. Dabei sollen über wirtschaftsgeographische Ansätze Aspekte der nachhaltigkeitsorientierten Vernetzung, interaktiven Innovativität und regionalwirtschaftlichen Einbettung untersucht werden. Die Beteiligung am Evaluationsprojekt „Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier“ – gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) – bietet Möglichkeiten, regionale Aktivitäten der klimaresilienten zirkulären Materialnutzung zu analysieren und weiterzuentwickeln. Hier sind weitere RWTH-Partner und das Forschungszentrum Jülich involviert. Beispiele für Kooperations- und Beiratstätigkeiten des Lehrstuhls sind das vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen geförderte Projekt „Prosperkolleg“ an der Hochschule Ruhr West und der dort vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierten Projektansatz „reWIR“. In beiden Vorhaben sollen Akteure motiviert sowie Initiativen angeregt werden, um die zirkuläre Wirtschaft zum Baustein einer nachhaltigen Ausrichtung des Strukturwandels zu machen. Im Projekt Prosperkolleg haben sich die Hochschule Ruhr West und die WiN Emscher-

Lippe GmbH mit der Stadt Bottrop, der Effizienz-Agentur NRW und dem Prosperkolleg e.V. zusammengeschlossen. Ein Fokus liegt auf strukturschwachen Teilräumen des nördlichen Ruhrgebiets, der Emscher-Lippe-Region. Insbesondere untersucht das inter- wie transdisziplinäre Vorhaben, wie die Zirkuläre Wertschöpfung die Gestaltung von Produkten, Verfahren, Geschäftsmodellen und Wertschöpfungsnetzwerken verändert, wobei es etwa betriebswirtschaftliche sowie verfahrens- und informationstechnische Kompetenzen bündelt. In einem Arbeitspaket wird das NRW-weite Forschungsnetzwerk zur Circular Economy „CEResearchNRW“ aufgebaut, in dem der Lehrstuhl Mitglied ist. Raumwissenschaftliche Kompetenzen sind auch bei der digital unterstützten Circular Economy Transformation gefragt. Das im Rahmen des BMBF-Programms „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“ geförderte Projekt „reWIR – Regionaler Wandel durch Innovationen für digitale Zirkuläre Wertschöpfung im Ruhrgebiet“ explorierte, wie der Einsatz digitaler Technologien (wie Additive Fertigung, Internet der Dinge, Blockchain, Künstliche Intelligenz) das zirkuläre Wirtschaften unterstützen kann. Hierdurch lassen sich zum Beispiel Produktionsprozesse ressourcensparender organisieren, Unternehmen besser vernetzen und Recyclingprozesse optimieren. Solche Ansätze sollen eine zukunfts-

fähige Wirtschaftsentwicklung des Ruhrgebiets maßgeblich stützen, internationale Abhängigkeiten von Lieferketten mindern, Arbeitsplätze schaffen und gleichzeitig die Umwelt schonen. Neben einem Konzept für Organisation und Management des Bündnisses sind auch Ideen für Umsetzungsprojekte erarbeitet worden.

 [www.prosperkolleg.de](http://www.prosperkolleg.de)  
[www.rewir.org](http://www.rewir.org)

**Autoren**  
Univ.-Prof. Dr.phil. Martina Fromhold-Eisebith ist Inhaberin des Lehrstuhls für Wirtschaftsgeographie.  
Paul Szabó-Müller, M.A., war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wirtschaftsgeographie, ist jetzt AP-Leiter im Projekt Prosperkolleg der Hochschule Ruhr West und war dort zwischenzeitlich Projektleiter von reWIR.

# Ökonomische Aspekte zirkulärer Wertschöpfungs- architekturen

Circular value chains are highly complex. In particular, they are associated with many uncertainties, including quantitative, qualitative, value-related, temporal and technological uncertainties. In order to create successful value chain architectures, these uncertainties need to be analyzed and addressed economically. Including all relevant stakeholders and addressing potential incentive defects are essential prerequisites for creating a sustainable circular economy that meets ecological, social, economic and technological goals. Using circular e-cars as an example, this article shows that financial incentives, changing ownership models, increasing return rates, and expanding producer and user responsibilities can help to overcome tradeoffs between economic and environmental goals.

Zirkuläre Wertschöpfungsketten oder besser Werterhaltungsketten sind komplex. Sie sind sogar viel komplexer als klassische Wertschöpfungsketten. Grund dafür ist eine Reihe von Faktoren, auf die die meisten Akteure kaum Einfluss haben. Stellen Sie sich einen Beschaffungsprozess vor, bei dem Sie einen Lieferanten ausgewählt haben, der weder genau sagen kann, wann er liefert, wieviel er liefert, ob er überhaupt liefert noch was er genau liefert. Auch die Anlieferungskosten sind unklar, und ob Sie das angelieferte Beschaffungsprodukt überhaupt verwenden können. Kein Unternehmen wird sich auf einen solchen Lieferanten einlassen. Leider beschreiben diese Unsicherheiten und Unzuverlässigkeiten jedoch recht gut die Ausgangssituation vieler zirkulärer Wertschöpfungsketten. Selbst bei einer zwischenzeitlichen Anschlussverwendung (die ja in vielen Fällen organisatorisch/ökologisch ebenfalls schwierig ist), wäre eine Entsorgung der Produkte wirtschaftlicher als ein entsprechender Recyclingprozess. Warum also eine zirkuläre Ökonomie? Die Antwort ist einfacher als die Lösung der angesprochenen Probleme: Weil wir schon





Bild 1: Zieldimensionen einer Circular Economy

heute mit einer großen Ressourcenknappheit zu kämpfen haben und die Umwelt als Senke von Abfallstoffen stark übernutzen. Damit verbunden sind dann ökonomische und soziale Fragen. Am Ende müssen Werterhaltungsketten stehen, die es für alle betroffenen Akteure lohnenswert machen, Produkte, deren Komponenten oder mindestens die darin enthaltenen Rohstoffe möglichst hochwertig zirkulieren zu lassen, also in wirtschaftlichen Kreisläufen zu erhalten. Sprich, wir brauchen hinreichend große ökonomische Anreize für alle relevanten Akteure, sich an einer zirkulären Ökonomie zu beteiligen und diese im Sinne von ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeit zum Erfolg zu führen. Bild 1 stellt die typischen Ziele einer Circular Economy (Kreislaufwirtschaft) anhand des auch im Folgenden gewählten Beispiels zirkulärer Elektroautos (Circular E-Cars) auf. Am Beispiel von Elektrofahrzeugen lassen sich Lösungsmöglichkeiten aufzeigen. Ein Elektrofahrzeug hat eine Nutzungsdauer von deutlich über zehn Jahren. Während dieser Zeit erfolgen Reparaturen und der Austausch von Komponenten. Auch verändert sich

die Qualität der enthaltenen Komponenten während der Nutzung, ganz besonders die der verbauten Batterie. Selbst wenn also der günstigste Fall eintritt und das Fahrzeug als Ganzes für die Weiternutzung beziehungsweise das Recycling zurückgegeben wird, bestehen erhebliche Unsicherheiten bezogen auf die Zusammensetzung des Fahrzeugs und die Qualität der enthaltenen Komponenten und Rohstoffe. Der günstigste Fall tritt aber nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein, da Altfahrzeuge in erheblichem Ausmaß in andere Länder verbracht oder zur Bereitstellung von Ersatzteilen ausgeschlachtet werden. Damit kommt der Rücklaufquote eine besondere Bedeutung zu. Nur eine hohe Rücklaufquote von Altprodukten macht Investitionen in höherwertige, kreislauffähige Materialien und Komponenten lohnenswert. Zusätzliche technologische Unsicherheiten ergeben sich dadurch, dass viele Recyclingtechnologien, beispielsweise für Batterien von Altfahrzeugen, noch nicht ausgereift sind. Auch die aktuellen Effizienzsteigerungen von Batterien führen dazu, dass der materielle Wert von Altbatterien aufgrund anderer stoff-

licher Zusammensetzungen abnimmt. Diese Unsicherheiten hinsichtlich Menge, Qualität, Wert, Zeit und Technologie zeigen in ihrer Gesamtheit, dass es sehr schwierig ist, eine tragfähige ökonomische und technologische Grundlage für eine erfolgreiche Kreislaufführung von Produkten, Komponenten und Rohstoffen zu schaffen. Ein erster Schritt für die Durchsetzung des Kreislaufkonzepts ist das Denken in Lebenszyklusansätzen. So wird bereits beim Design die Grundlage für die Recyclingfähigkeit des Produkts am Ende seiner Nutzungsdauer gelegt. Eine auf Kreislaufführung ausgerichtete Materialauswahl, Langlebigkeit von Komponenten, Demontierbarkeit, Reparierbarkeit und Modularisierung von Produktkonzepten können wesentlich zur Werterhaltung von sekundären Stoff-, Komponenten- und Produktströmen beitragen. Auch die Automatisierung von Sammlungs-, Sortier-, Demontage- und Aufbereitungsprozessen kann die Wirtschaftlichkeit zirkulärer Ansätze verbessern. Diese in erster Linie technologisch angelegten Maßnahmen lassen sich jedoch kaum ohne Hilfe der Umweltpolitik realisieren.

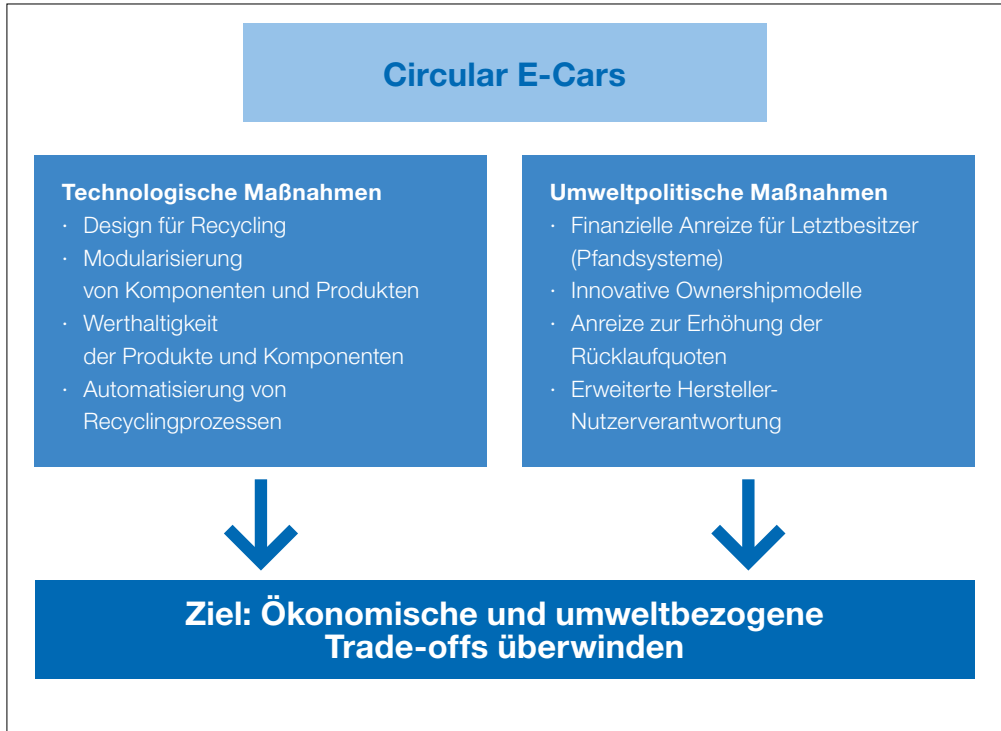


Bild 2: Ökonomische und umweltbezogene Trade-offs von Circular E-Cars  
(Quelle: Letmathe et al. 2020)

Warum sollen Hersteller von Neufahrzeugen die Recyclingphase beim Produktdesign in den Fokus nehmen, wenn nicht garantiert ist, dass sie vom (höheren) Wert des recycelten Altfahrzeugs profitieren? Trade-offs zwischen ökonomischen und umweltbezogenen Zielen müssen daher durch geeignete Maßnahmen aufgelöst werden, siehe Bild 2:

- Finanzielle Anreize für Letztbesitzer von Fahrzeugen können sicherstellen, dass diese ordnungsgemäß im Sinne der Ziele einer Circular Economy weitergegeben und nicht in grauen Kanälen entsorgt werden. Die Höhe solcher Anreize sollte zustandsabhängig festgelegt werden, um so die Recyclingfähigkeit der Altfahrzeuge zu erhöhen.
- Ownershipmodelle: Ein weitergehender Ansatz zielt darauf ab, dass besonders wertvolle Fahrzeugkomponenten im Besitz der Hersteller oder von Recyclingunternehmen verbleiben. Dadurch kann eine großzahlige (wirtschaftliche) und auch standardisierte Weiternutzung und Wiederaufbereitung wichtiger Komponenten, wie der in Elektrofahrzeugen enthaltenen Batterien, sichergestellt werden.
- Die Rücklaufquote lässt sich in Verbindung mit innovativen Ownershipmodellen durch eine geeignete logistische Infrastruktur sowie zielgerichtete Nutzerinformationen deutlich steigern. Auch eine Verknüpfung

mit finanziellen Anreizen (Stichwort: Pfandsysteme) kann zu einer Steigerung der Rücklaufquote beitragen.

- Eine erweiterte Hersteller- und Nutzerverantwortung kann sicherstellen, dass Produkte leichter demontiert, Stofffraktionen besser getrennt und die Nutzungsdauer von Produkten erhöht werden. So können beispielsweise Klebeverbindungen unterbunden, die Austauschbarkeit von Produktkomponenten gefördert und die Reparierbarkeit von Produkten verbessert werden. Denkbar sind hier Ge- und Verbote, etwa das Verbot bestimmter Klebemethoden, wenn alternative intelligente Kleber zur Verfügung stehen. Auch ist denkbar, die Hersteller mit einem Teil der späteren Recyclingkosten basierend auf dem gewählten Produktdesign zu belasten.

Nur wenn es gelingt, die Komplexität zirkulärer Wertschöpfungs- und Werterhaltungsketten zu beherrschen, ist in naher Zukunft zu erwarten, dass eine Circular Economy im Sinne der Erreichung ökologischer, ökonomischer und sozialer Ziele erfolgreich etabliert werden kann. Dafür ist nicht nur viel Forschung, sondern auch politischer Wille erforderlich, um diesen für die Gesellschaft so wichtigen Transformationsprozess zügig voranzutreiben. Eine Vorreiterrolle Deutschlands und Europas trägt nicht nur zur Rohstoffunabhängigkeit und technologischer

Souveränität bei, sondern wird im Idealfall sogar zu einem Exportschlager, der die Circular Economy auf ein neues Niveau hebt.

#### Literatur

Letmathe, P., Friedrich, B., Kampker, A., Sauer, D.A.; (2020), Elektroautos als Teil der Circular Economy: Tradeoffs und Werttreiber. In: Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Goldmann, D., Friedrich, B. (Hrsg.), Recycling und Sekundärrohstoffe, Band 13. Neuruppin, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. ISBN: 978-3-944310-51-0, S. 172-181.

---

#### Autoren

Univ.-Prof. Dr.rer.pol. Peter Letmathe ist Inhaber des Lehrstuhls für Controlling. Maren Paegert, M.Sc., Linda Reinhart, M.Sc., Dustin Sperling, M.Sc., und Richard Woeste, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Lehrstuhl für Controlling.

---





Im Recyclingprozess erfolgt mit Pyrolyse eine thermische Vorbehandlung von Lithium-Ionen-Akkus.  
Foto: Peter Winandy



# Soziale Akzeptanz als Steuerungsgröße in der Kreislaufwirtschaft

Methoden und Befunde für eine nach sozialen Kriterien ausgerichtete Kreislaufwirtschaft

One of the world's greatest challenges is to reconcile social and economic prosperity and growth with a sustainable and careful use of natural resources. Circular economy approaches aim at the transformation from a linear to a circular economy by (re)using resources and recycling materials efficiently. Increasingly, it is acknowledged that circular economy efforts not only touch questions of technology, economics, and ecology. Rather, the social acceptance of closed-loop production and its products in line with social and individual needs from the perspective of the stakeholders involved is of considerable importance. In this article, we explain how technology acceptance is defined, what contribution acceptance research can make to circular economy approaches, how acceptance can be measured, and when acceptance should be considered in the technology development or market introduction process. In this way, we can learn about

the perception of potential barriers and risks of novel energy technologies and use the social acceptance of these innovations in the development process. Using the example of Carbon Capture and Utilization (CCU) technologies as one part of a circular economy process, we demonstrate examples of recent CCU acceptance findings. Whenever acceptance assessments are integrated quite early in the technology design process, acceptance can be used as a steering component in order to better adapt system solutions to the needs of the public and to identify socially acceptable development paths for circular economy products and their production. In addition, on the basis of acceptance findings, realistic information and communication strategies can be derived that are tailored to different stakeholder groups and provide a basis for informed acceptance decisions of the public.

Eine der weltweit größten Herausforderungen ist die Frage, wie wir gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Wohlstand und Wachstum mit einem klugen und schonenden Umgang mit unseren Ressourcen in Einklang bringen können. Dazu gehören Ansätze der konsequenten Einschränkung der Nutzung fossiler zugunsten erneuerbarer Energiequellen, die Einhaltung der Klimaziele, aber auch die Reduzierung des Abfalls, die Erhöhung der Lebensdauer von Produkten und die Wiederverwertung von Materialien und Produkten entlang der Wertschöpfungskette. Im Jahr 2018 hat das Europäische Parlament mit der Verabschiedung des Kreislaufwirtschaftspakets neue Wege beschritten. Die Circular Economy – die Kreislaufwirtschaft – wurde als gesetzlich verankertes Rahmenmodell für die europäischen Länder definiert und institutionalisiert. Mit diesem sektorenübergreifenden Ansatz wird die Transformation von einer linearen zu einer kreislaufgestützten Wirtschaft beschritten. Ziel ist es, Ressourcen effizient mehrfach und zirkulär zu nutzen. Die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft bedingt die konsequente und effiziente Kooperation verschiedener Sektoren, Disziplinen und Ansätze. Ohne Zweifel hat eine erfolgrei-

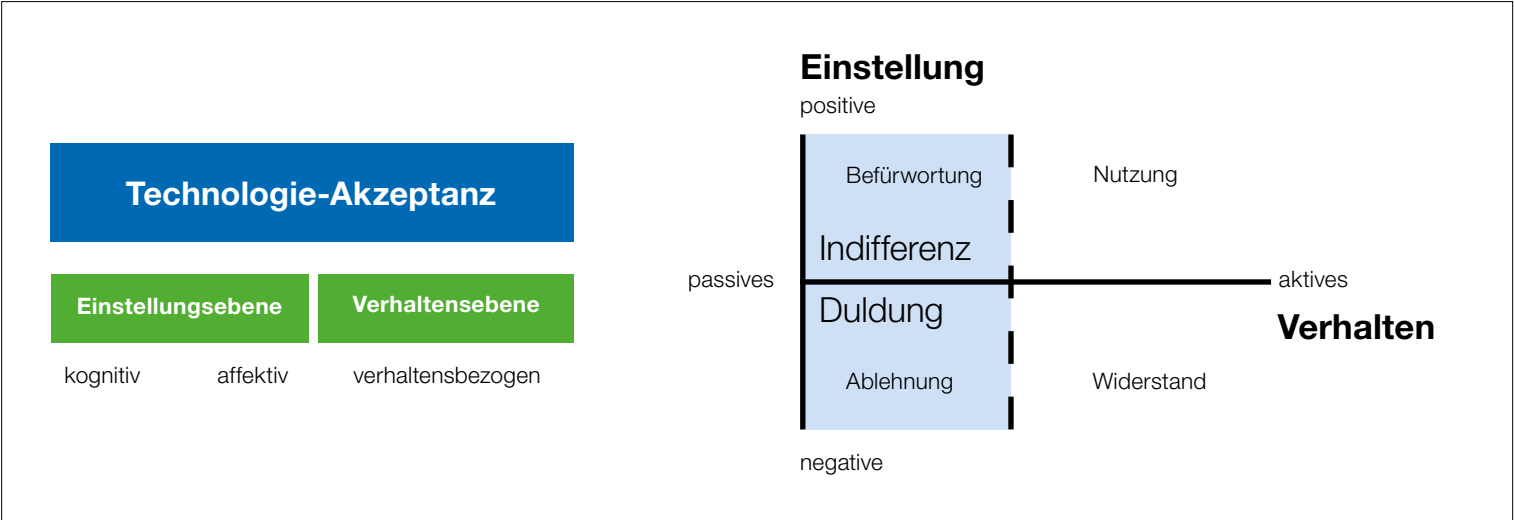


Bild 1: Der Bezugsrahmen für Akzeptanzphänomene (links), der sich zwischen Befürwortung, Indifferenz und Ablehnung (rechts) bewegen kann.

che Kreislaufwirtschaft eine inhärent soziale, gesellschaftliche und nicht zuletzt eine politische Dimension. Nur wenn die Bedürfnisse und Anforderungen Konsumierender in ihrer Lebenswelt mit den Anforderungen des Marktes und der Wirtschaft verknüpft und von politischen Strategien unterstützt werden, kann die Idee der Kreislaufwirtschaft von allen getragen und langfristig gelebt werden. Bisher fehlen holistische Konzepte für eine systematische und interdisziplinäre Integration der Perspektive Nutzender in den kreislaufbasierten Umsetzungs- und Produktionsprozess. Der erfolgreiche Roll-out von Kreislaufprodukten wird nicht nur davon abhängen, ob sie technisch machbar, wirtschaftlich sinnvoll, ökologisch, ressourcenschonend oder klimaneutral sind. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die soziale Akzeptanz der Kreislaufproduktion und ihrer Produkte, die ihre gesellschaftliche Rahmung, Sozialverträglichkeit und die Berücksichtigung der sozialen und individuellen Bedürfnisse aus der Sicht der beteiligten Akteure einschließt.

**Der Beitrag der Akzeptanzforschung**

Die ersten quantitativ unterlegten Technikakzeptanzmodelle sind in den Achtzigerjahren des letzten Jahrhunderts erschienen, zeitgleich mit der flächendeckenden Einführung der Computertechnologie in die Arbeitsumgebung. Seitdem hat sich die Akzeptanzforschung und die Modellierung der Technikakzeptanzfacetten weiterentwickelt, entlang sich immer stärker ausdifferenzierender Nutzungskontexte, Technologietypen, gesellschaftlicher Rahmenbedingungen und unterschiedlicher Gruppierungen Konsumierender, die am Technologieentwicklungsprozess, der Produktion oder der Vermarktung beteiligt sind. Mit Akzeptanz wird die positive An beziehungsweise Übernahme einer Idee, eines Sachverhaltes oder eines Produktes bezeichnet. Entscheidend ist hierbei eine aktive Bereitswilligkeit und nicht eine reaktive Duldung.<sup>[1]</sup> Akzeptanzphänomene sind auf der Einstellungs- und der Verhaltensebene abbildbar. Einstellungen weisen sowohl kognitive Komponenten (Wissen, Annahmen, Überzeugungen) als auch affektive Bewertungen (positive und negativ besetzte Emotionen) auf, die sich im Korridor zwischen Befürwortung und Ab-

lehnung gegenüber einer Technologie bewegen können, siehe Bild 1. Charakteristischerweise unterliegen Akzeptanzbewertungen sogenannten „Trade-offs“. Diese Kippunkte sind das Ergebnis aus Abwägungsprozessen zwischen positiv und negativ bewerteten Eigenschaften und/oder Ausprägungen einer Technologie. Mit Nachteilen besetzte und emotionale Bewertungsmuster wiegen in der Akzeptanzentscheidung stärker als positive und eher faktenorientierte Aspekte. Dies gilt insbesondere, wenn es sich um neuartige, bislang unbekannte und deshalb mit starken Risiken behaftete Systemlösungen handelt. Die Gründe für eine positive oder negative Einschätzung variieren. Akzeptanz ist ein mehrdimensionales Konstrukt interagierender Größen, abhängig von Technikbereichen, Anwendungskontexten und Einzeltechnologien. Technologien, die sich der Einsicht und der Einflussnahme der Nutzenden entziehen, unterliegen anderen Wahrnehmungsmustern, Maßstäben und Meinungsbildungskontexten als Technik, deren Erwerb und Nutzung im direkten Handlungsspielraum und im unmittelbaren Interesse der oder des Einzelnen liegen.



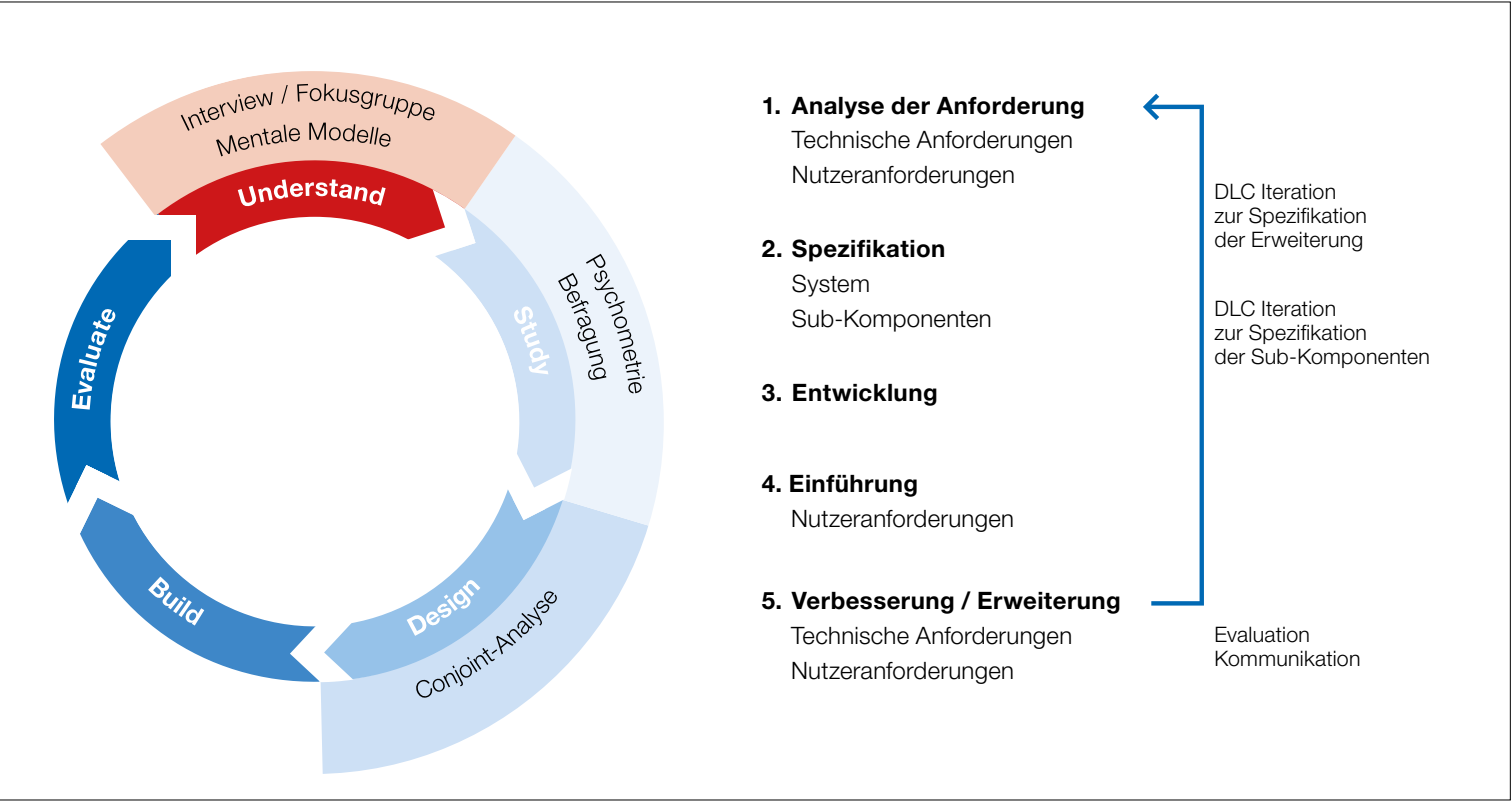


Bild 2: Das iterativ ausgelegte empirische Vorgehen zur Erhebung der Akzeptanzfaktoren, die mit unterschiedlichen Gruppierungen Nutzender in unterschiedlichen technischen Nutzungskontexten durchgeführt werden, hier dargestellt als Design Lifecycle (DLC).

Akzeptanz ist nicht zuletzt eine Perspektivenfrage. So steht beispielsweise die Perspektive der Entscheidenden in Wirtschaft und Politik der Perspektive der Nutzenden oder Entwickelnden gegenüber. Zunehmend ist die gesellschaftliche Einstellung zu Technologien gekennzeichnet durch eine stärker differenzierte, von Kosten-Nutzen-Überlegungen und Kontrollerwartungen, aber auch von symbolischen Assoziationen geprägte Haltung. Eine weitere Quelle technikakzeptanzrelevanter Bewertungen sind individuelle Faktoren, die in erheblichem Ausmaß über die Bevölkerungsgruppen variieren. Neben demographischen Faktoren spielen gesellschaftliche Ideale, Werte, Denkmuster und Praxen eine Rolle, ebenso wie sozioökonomische Rahmenbedingungen. Weiterhin sind Bildungs- und „Wissensfaktoren“ zentral. Da gerade Akzeptanzfacetten in starkem Ausmaß mit der individuellen Persönlichkeit interagieren, sind normativ-ethische Grundhaltungen, kognitive Stile der Auseinandersetzung und Risikowahrnehmungen, aber auch der Umgang mit bedrohlichen Ereignissen sowie der Grad des Verantwortungsbewusstseins für gesellschaftliche Entwicklungen von Relevanz. Zunehmend zeigt sich, dass das Vertrauen in die Industrie und Politik in ihrer Rolle als an der Umsetzung beteiligte Akteure und Informationsquellen in hohem Maße die Akzeptanz-

entscheidungen für oder gegen technische Innovationen mitbestimmt.

### Die methodische Erfassung von Akzeptanzbewertungen

Die Akzeptanzerfassung vollzieht sich in einem mehrschrittigen empirischen Prozess, der ergebnisoffen akzeptanzrelevante Faktoren in unterschiedlichen Technologiekontexten und Aspekten der technischen Entwicklungen erfasst. Im ersten Schritt werden – zumeist mittels qualitativer Verfahren (beispielsweise Fokusgruppen und Interviews) – Bewertungen, Narrative und Vorstellungen erhoben. Im zweiten Schritt werden anhand psychometrischer Test- und Fragebogenverfahren die Bewertungsgrößen (wahrgenommene Vor- und Nachteile) quantifiziert und ihr Zusammenhang mittels korrelativer, pfadanalytischer Verfahren und/oder Strukturmodellierungen bestimmt. Um die Kipppunkte zu bestimmen, an denen die Akzeptanz in eine Nichtakzeptanz kippt, werden in einem dritten Schritt mittels sogenannter Conjoint-Analysen die Gewichte der einzelnen Faktoren für die finale Akzeptanzentscheidung bestimmt und die unterschiedlichen Profile von Nutzenden mit spezifischen Akzeptanzbewertungsmustern identifiziert. In Bild 2 ist das Vorgehen dargestellt,

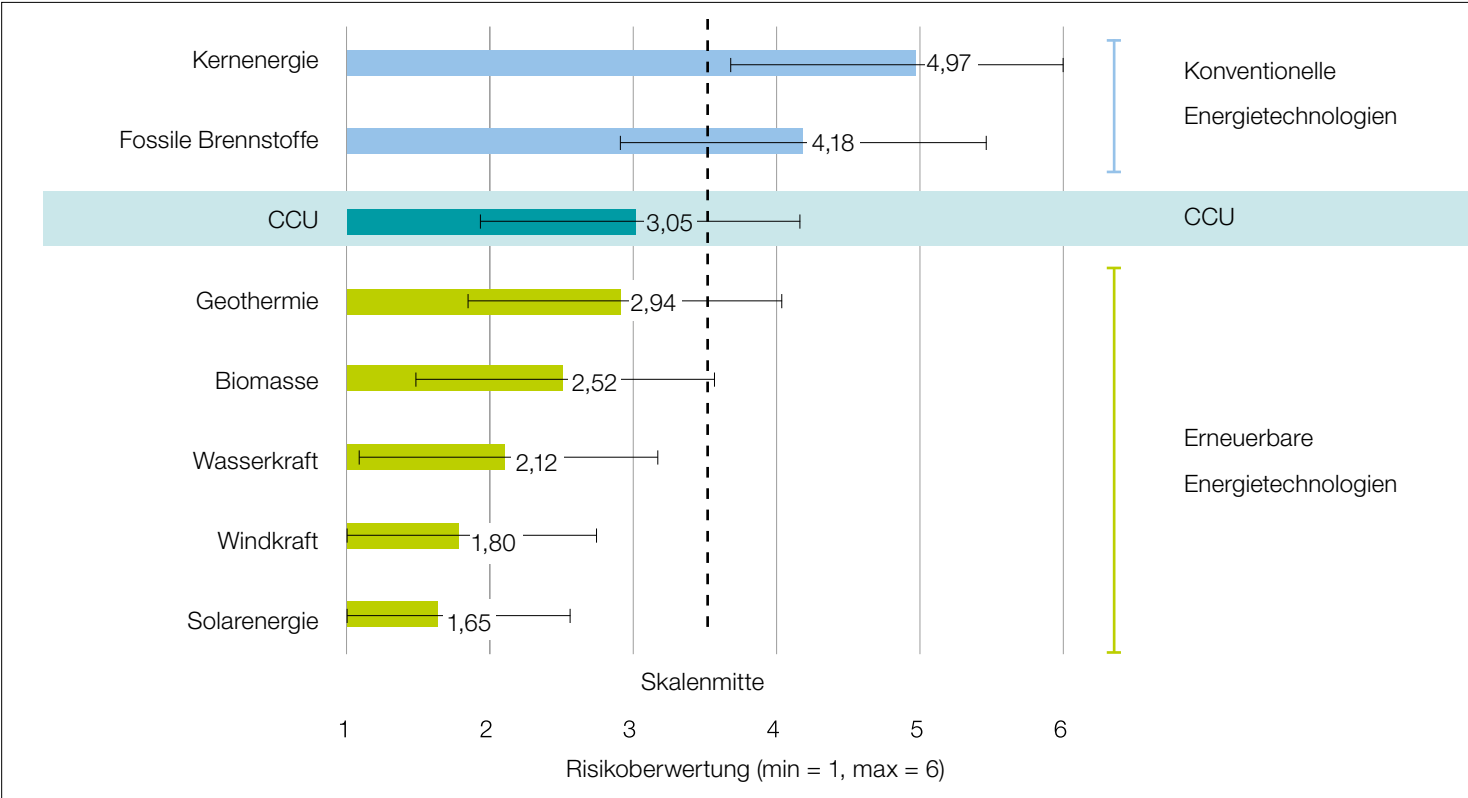


Bild 3: Risikobewertungen bei konventionellen und erneuerbaren Energietechnologien im Vergleich.<sup>[4],[5]</sup>

in dem Akzeptanz in Kombination mit den technischen Anforderungen im Auslegungs- und Entwicklungsprozess erhoben wird.

**Kreislaufwirtschaft aus der Perspektive der sozialen Akzeptanz: Ausgewählte Befunde**

Am Beispiel der der Verwendung von CO<sub>2</sub> in neuen Produkten, der Carbon Capture and Utilization (CCU) werden im Folgenden Akzeptanzerhebungen und -befunde beschrieben.

Bei der Kohlenstoffabscheidung und -nutzung wird das emittierte CO<sub>2</sub> abgeschieden, gegebenenfalls transportiert und gereinigt und dann zur Herstellung verkaufsfähiger Produkte wiederverwendet. CO<sub>2</sub> kann aus verschiedenen Quellen, etwa aus Abgasen von Industrieanlagen oder direkt aus der Luft, gewonnen werden. Anschließend wird es anhand chemischer Verfahren in Stoffe oder Produkte umgewandelt, wie Kunststoffprodukte, Chemikalien, Baumaterialien oder Kraftstoffe.

Grundsätzlich wird die CCU-Technologie neutral bis positiv bewertet. Akzeptanzrelevante Faktoren sind wahrgenommene Gesundheitsrisiken (Toxizität), Sicherheit, Belastbarkeit und Nachhaltigkeit (Entsorgung) sowie die Frage, ob CCU-Produkte die gleichen Qualitätsanforderungen wie konventionelle Pro-

dukte erfüllen können. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Endprodukte als auch des Produktionsprozesses.<sup>[2]</sup> Hinsichtlich der Produktvielfalt (siehe nachfolgende Beispiele) ergaben sich jedoch Unterschiede in der Akzeptanzbewertung.<sup>[3]</sup>

Eine erste Studie<sup>[4]</sup> hatte zum Ziel, die Risikobewertung der CCU-Technologie im Vergleich zu anderen Energieerzeugungstechnologien zu ermitteln. In einer empirischen Erhebung mit 266 Teilnehmenden im Alter von 18 bis 76 Jahren in Deutschland (54.1 Prozent Männer, 45.9 Prozent Frauen) bewerteten diese das wahrgenommene Risiko von sieben Energieerzeugungstechnologien im Vergleich zu CCU. Deutlich wird, dass sich die CCU-Technologie hinsichtlich des wahrgenommenen Risikos zwischen den traditionellen und den erneuerbaren Technologien einordnet, siehe Bild 3.

In einer weiteren Studie wurden Kraftstoffe für die Luftfahrt in den Blick genommen.<sup>[6]</sup> Erhoben wurden Risikobewertungen von CO<sub>2</sub>-basierten Kraftstoffen in Bezug auf verschiedene Risikocharakteristiken, etwa Folgen für Gesundheit und Umwelt. Zusätzlich wurden auch affektive Bewertungen mittels eines semantischen Differentials erhoben. An der Studie nahmen 138 Befragte (63 Prozent Frauen, 37 Prozent Männer) im Alter zwischen 18 und 70 Jahren teil. Bild 4 zeigt die

Ergebnisse der Bewertung von CO<sub>2</sub>-basierten Kraftstoffen für die Luftfahrt im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen. Insgesamt ergab sich für CO<sub>2</sub>-basierte Kraftstoffe eine geringere Risikowahrnehmung: Sie wurden als umweltfreundlicher, ungefährlicher, weniger schädlich für die Umwelt und das Klima und insgesamt als sicherer in der Handhabung wahrgenommen.

Ein drittes Beispiel<sup>[3]</sup> demonstriert, wie die Akzeptanz von CCU-Standort-Einsatzszenarien anhand verschiedener Bewertungskriterien bestimmbar ist. Drei Bewertungskriterien (in vorgeschalteten Fokusgruppen ermittelt), wurden in unterschiedlich gestalteten Einsatzszenarien variiert. Ein erstes Attribut war die CO<sub>2</sub>-Quelle (Chemiewerk, Stahlwerk, Kohlekraftwerk). Das zweite Attribut zielte auf die Profitabilität der CCU-Anlage, für deren Bau entweder eine öffentliche Anschubfinanzierung, eine längerfristige öffentliche Finanzierung oder keine öffentliche Finanzierung erforderlich sein kann. Das dritte Attribut adressierte unterschiedliche CCU-Produkte (Matratze, Dünger, Kraftstoff, Arzneimittel). 110 Teilnehmende im Alter von 18 bis 59 Jahren (53,6 Prozent Männer, 46,4 Prozent Frauen) bewerteten Einsatzszenarien, die experimentell aus den Varianten der Attribute zusammengesetzt waren, im Hinblick auf ihre

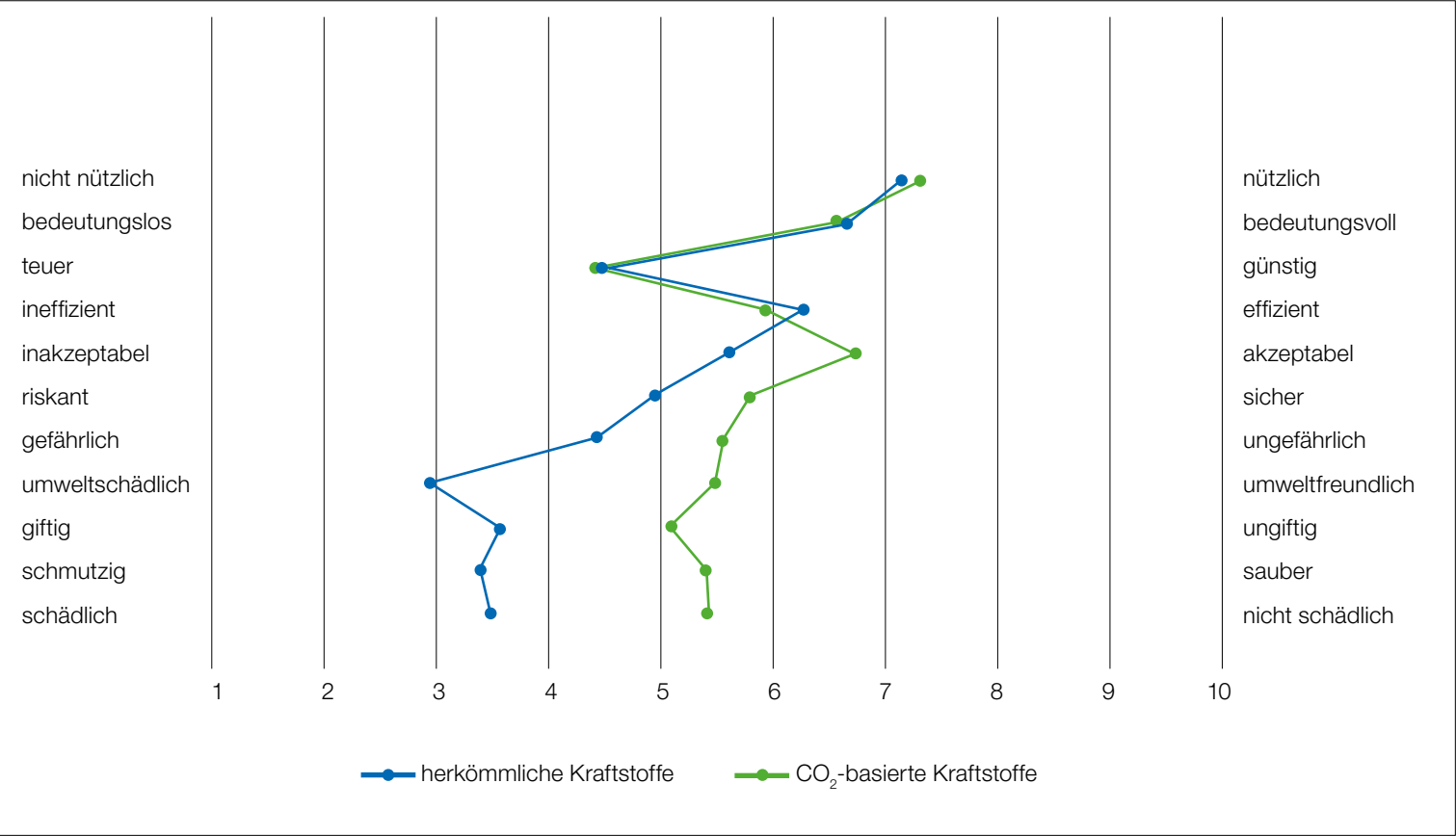


Bild 4: Eigenschaftszuschreibungen (semantisches Differential) bei CO<sub>2</sub>-basierten und herkömmlichen Kraftstoffen im Vergleich.<sup>[6], [7]</sup>

Akzeptabilität. Aus den Gesamtbewertungen wurden die Gewichte der einzelnen Akzeptanzfaktoren berechnet und die Kippunkte zwischen positiven und negativ bewerteten Einsatzszenarien bestimmt, siehe Bild 5. Die Profitabilität hatte insgesamt das größte Gewicht auf die Akzeptanzentscheidung, in deutlichem Abstand gefolgt von der Art des CCU-Produktes und der CO<sub>2</sub>-Quelle. Hinsichtlich Profitabilität war die längerfristige öffentliche Finanzierung der CCU-Anlage das mit Abstand am negativsten bewertete und der Anlagenbetrieb ohne öffentliche Finanzierung das bestbewertete Kriterium. Das Stahlwerk war als einzige der auswählbaren CO<sub>2</sub>-Quellen akzeptiert, bei den CCU-Produkten wurde der CO<sub>2</sub>-basierte Kraftstoff am besten, die CCU-Matratze am schlechtesten bewertet. Letztlich wird die soziale Akzeptanz von (System-)Lösungen in der Kreislaufwirtschaft davon abhängen, ob und wie es gelingt, die Bevölkerung, aber auch beteiligte Wirtschaftsunternehmen sowie Gesetzgebung und Politik für die mit den neuen Konzepten verbundenen Änderungen von Infrastruktur, Lebensbedingungen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen zu gewinnen. Entscheidend ist, dass Akzeptanz von Anfang an als Steuerungskomponente im

Technologieauslegungsprozess integriert wird. Dies erlaubt, Akzeptanz als frühzeitige Informationsquelle für den Technologieentwicklungsprozess nutzbar zu machen, um Systemlösungen besser an die Bedürfnisse der Öffentlichkeit anzupassen und sozial akzeptierte Entwicklungspfade für Kreislaufwirtschaftsprodukte und deren Produktionsweg zu identifizieren. Zusätzlich können auf der Grundlage der auf diese Weise prozessbegleitend empirisch ermittelten Akzeptanzfaktoren realitätsnahe und auf Profile von Nutzenden zugeschnittene Informations- und Kommunikationsstrategien abgeleitet werden, die eigenständige und informierte Akzeptanzentscheidungen ermöglichen.



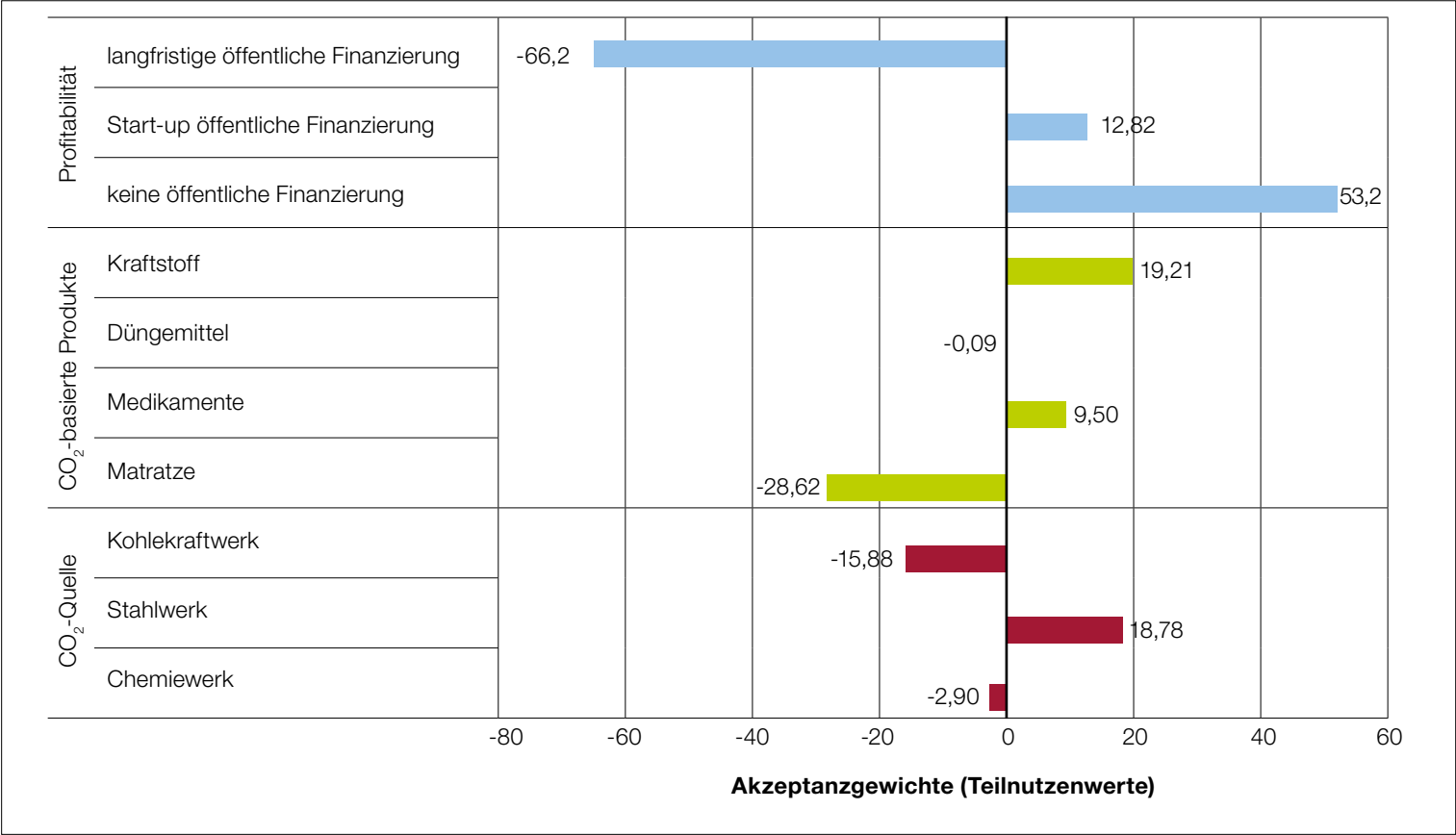


Bild 5: Akzeptanzgewichte für die Bewertungen unterschiedlicher Einsatzszenarien (Profitabilität, CCU-Produktart und CO<sub>2</sub>-Quelle)<sup>[3],[8]</sup>

Quellen

[1] Dethloff, C. (2004), Akzeptanz und Nicht-Akzeptanz von technischen Produktinnovationen. Pabst Science Publishing, Lengerich

[2] Simons, L., Ziefle, M., & Arning, K. (2021), The Social Acceptance Factors for Insulation Boards Produced with CO2-Derived Foam. *Frontiers in Energy Research*, 422, (doi: 10.3389/fenrg.2021.717975)

Simons, L., Engelmann, E., Arning, K. & Ziefle, M. (2021), Two Sides of the Same Coin—Explaining the Acceptance of CO2-Based Fuels for Aviation Using PLS-SEM by Considering the Production and Product Evaluation. *Energy and Climate Change. Frontiers in Energy Research*. 9:742109, (doi: 10.3389/fenrg.2021.742109)

[3] Arning, K., Zaunbrecher, B. S., Sternberg, A., Bardow, A., & Ziefle, M. (2018), Blending Acceptance as Additional Evaluation Parameter into Carbon Capture and Utilization Life-Cycle Analyses, in *SMARTGREENS* (pp. 34-43), (doi: 10.5220/0006683000340043)

[4] Linzenich, A., Arning, K., & Ziefle, M. (2021), Acceptance of energy technologies in context: Comparing laypeople’s risk perceptions across eight infrastructure technologies in Germany. *Energy Policy*, 152, 112071, (doi: 10.1016/j.enpol.2020.112071)

[5] Gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Exzellenzcluster 2186 „The Fuel Science Center“, ID: 390919832

[6] Engelmann, L., Arning, K., Linzenich, A., & Ziefle, M. (2020), Risk Assessment Regarding Perceived Toxicity and Acceptance of Carbon Dioxide-Based Fuel by Laypeople for Its Use in Road Traffic and Aviation. *Frontiers in Energy Research*, 291, (doi: 10.3389/fenrg.2020.579814)

[7] Gefördert von der Europäischen Union (Horizon 2020, eCOCO2, ID: 838077) sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Exzellenzcluster 2186 „The Fuel Science Center“, ID: 390919832

[8] Gefördert von The European Institute of Innovation & Technology (EIT) within the EnCO2re flagship program Climate-KIC sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Exzellenzcluster 236 „Tailor-Made Fuels from Biomass“

Autorinnen

Linda Engelmann, M.A., Lilian Kojan, M.Sc., und Anika Linzenich, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeiterinnen am Lehrstuhl für Kommunikationswissenschaft. Univ.-Prof. Dr.phil. Martina Ziefle ist Inhaberin des Lehrstuhls für Kommunikationswissenschaft.

# Zirkularität in der Gebäudeplanung

## Die Circular Economy schafft neue Handlungsfelder im Bausektor

In the construction sector, linear economic models have contributed to the exploitation of finite resources at considerably high energy cost and emission output, without taking circularity into consideration. In light of planetary limits, this model based on infinite growth has long been unsustainable.

With its current use of primary raw materials and its large amount of waste, the construction sector receives a key role in improving resource efficiency.

To capture the environmental impact of buildings holistically, the focus has shifted from energy efficiency in building operation, which has been a key objective for the last 40 years, to resource and emission efficiency in the production and deconstruction phases.

Political requirements already show the need for action. The implementation of regulatory measures such as the Construction Products Regulation (CPR) consequently makes strategic and life-cycle related perspectives necessary. As a result, these considerations become obligatory for professionals in the construction sector. At the national level, policy papers by the Federal Environment Agency specify necessary developments aimed

at “protecting natural resources by creating material cycles in the construction sector”. A paradigm shift in the construction industry is necessary and foreseeable. Economic concepts such as the circular economy are providing new impetus and uncover questions that have not been addressed so far in the construction industry. Thus, this will add further fields of action to all professions in the construction sector.

Lineare Wirtschaftsmodelle im Bausektor haben dazu beigetragen, Ressourcen unter erheblichem Energieaufwand und Emissionsausstoß auszuschöpfen, ohne eine Rückführung in den Kreislauf zu bedenken. Angesichts der planetarischen Grenzen ist dieses Modell längst nicht mehr tragfähig. Dem Bausektor kommt mit dem derzeitigen Einsatz von Rohstoffen und Abfallaufkommen daher eine Schlüsselrolle bei der Verbesserung der Ressourceneffizienz zu.

Nachdem in den vergangenen 40 Jahren der Fokus auf der Energieeffizienz im Gebäudebetrieb lag, wird der Begriff des „Nachhaltigen Bauens“ heute um die Ressourcen- und Emissionseffizienz in der Produktions- und Rückbauphase erweitert. So soll die Umweltwirkung von Gebäuden ganzheitlich erfasst werden.

Politische Vorgaben auf EU-Ebene verlangen bereits mit der Bauprodukteverordnung strategische und lebenszyklusbezogene Sichtweisen zur ressourcenschonenden Planung. Folglich werden diese zu einer verpflichtenden Aufgabe für planende und ausführende Berufe im Bausektor. Auf nationaler Ebene geben Positionspapiere des Umweltbundes-



Bild 1: Materialien mit ökologischen Eigenschaften aus der EMMY Materialbibliothek

Foto: Juniorprofessur Rezykliergerichtetes Bauen

amtes Entwicklungen vor, die eine „Schonung natürlicher Ressourcen durch Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft“<sup>[1]</sup> zum Ziel haben. Ein Paradigmenwechsel in der Bauwirtschaft ist nötig und absehbar. Wirtschaftskonzepte wie die Circular Economy, kurz CE, führen zu neuen Impulsen und Fragestellungen, die zukünftig auch das Berufsbild von Planenden um weitere Handlungsfelder ergänzen werden. Dabei stehen Konzepte im Vordergrund, die die Lebensdauer von Produkten stärker integrieren und damit das Lebensende und weitere Verarbeitungsmöglichkeiten erfassen.

### Zirkuläre Gebäudeplanung

Zirkularität ist ein Prinzip, das den Kreislauf zugrunde legt und in unterschiedlichen Dimensionen wie Materialität, Wert und Information gedacht werden kann. Circular Economy und Zirkularität im Bausektor bedingen einander. Zum einen schafft ein zirkuläres Wirtschaftsmodell allgemeine Voraussetzungen, um den Ressourcenverbrauch und das Abfallaufkommen zu senken, zum anderen ist eine zirkuläre Gebäudeplanung und Bauweise eine wichtige Stellschraube, die zur Umsetzung einer Circular Economy beiträgt. Im

Zentrum zirkulärer Gebäudeplanung steht die Anwendung von Planungsstrategien, welche den in Gebäuden gebundenen Materialien weitere Nutzungszyklen zuordnen, um deren größtmögliche Werterhaltung zu gewährleisten. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass gesetzliche Vorgaben bisher nicht auf eine zirkuläre Baupraxis abgestimmt sind. Planungsstrategien wie das Bauen mit wiederverwendeten Bauteilen finden deshalb nur erschwerte Umsetzung.

Nichtsdestotrotz lassen sich in anderen Bereichen bereits Beispiele finden, die sich übertragen lassen. So wurde bei der Neuen Nationalgalerie in Berlin die Demontage und Dokumentation von einzelnen Komponenten sowie ihre Wiederaufbereitung zum Wiederaufbau veranlasst. Bisher erfahren Gebäude also einen Werterhalt der Bausubstanz, wenn ihr kultureller Wert sich in einen wirtschaftlichen übersetzen lässt. Um zukünftig die Zirkularität von Gebäuden zu gewährleisten, muss dieses Wertschöpfungsprinzip um ökologische Betrachtungen erweitert werden. Für die Umsetzung zirkulärer Bauweisen ist das Schließen von Stoffkreisläufen durch die Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen

aus dem Gebäudebestand und die Planung von neuen ressourceneffizienten und kreislaufgerechten Gebäuden entscheidend. Sowohl im Neubau als auch beim Bauen im Bestand, wird der Planungsprozess um Betrachtungen zur Material- und Konstruktionswahl ergänzt, die eine Kreislaufführung ermöglichen und vielfältige Nachnutzungsoptionen vorhalten. Anders als bei konventionellen Bauprozessen, die keine Nachnutzungsszenarien berücksichtigen, gewinnt die Betrachtung von Herstellungs- und Rückbauphase an Relevanz. Erst wenn der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet wird, lassen sich die Eignung zur Kreislaufführung und auch externe Umweltfolgekosten feststellen.

Derzeit ist das Wissen zur kreislaufgerechten Gebäudeplanung bei den beteiligten Akteuren noch nicht ausreichend. Daher müssen Betrachtungen zur Zirkularität in Forschungs- und Lehrformaten eingearbeitet werden. Im Rahmen der Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen findet das Thema in verschiedenen Aspekten Anwendung.



## Fokus Rückbau

Das anthropogene Lager, also die Menge an Gütern im Gebrauch und auf Deponien, wird in der Europäischen Union auf 400 Tonnen pro Kopf geschätzt. Jährlich kommen etwa zehn Tonnen pro Kopf dazu.<sup>[2]</sup> Da 55 Prozent der Lagermassen in Gebäuden gebunden sind, hat der Gebäudebestand ein großes Potenzial, künftig als urbane Mine für Bauvorhaben aktiviert zu werden.<sup>[3]</sup> Der Großteil der Baustoffe und Materialkonstruktionen ist jedoch nicht für einen sortenreinen Rückbau geeignet – folglich ist die Entwicklung von effizienten Rückbauverfahren nötig, um Sekundärrohstoffe zu erhalten, die hochwertig verwertbar sind.

In diesem Rahmen wurde das Lehrprojekt „Deconstruction for Circularity“ entwickelt, welches mit Studierenden der Masterstudiengänge Architektur und Construction and Robotics durchgeführt wurde. Durch die manuelle und automatisierte Dekonstruktion von Lehmbaustoffen erschließen sich in Wechselwirkung von Rückbau und Planungsprozess neue Erkenntnisse für die Konstruktions- und Materialwahl. Bei der Erstellung von sogenannten Rückbaukonzepten ergeben sich zudem Schnittstellen zu logistischen und aufbereitungstechnischen Aspekten, die in Zukunft weiterer Forschung bedürfen. An einer solchen Schnittstelle knüpft das EIT RawMa-

terials Projekt „FacadeReLog“ in Kooperation mit TU Delft, KU Leuven, Coventry University und Leiden University an. In verschiedenen Workshops wurden zusammen mit Partnern aus der Fassadenindustrie Wissenslücken in der Praxis identifiziert. Infolgedessen konnte darauf aufbauend ein Kursformat entwickelt werden, welches Grundlagenwissen zu kreislaufgerechten Logistiken für Industriepartner in der Baubranche vermittelt.

## Fokus Materialwahl

Neben dem Einsatz sekundärer Rohstoffe aus urbanen Minen ist die Entwicklung neuer Bauprodukte mit ökologischen Eigenschaften und dem Fokus auf Kreislauffähigkeit wichtig. Datenbanken, die umweltbezogene Datensätze zu Bauprodukten bereitstellen, bieten eine Grundlage für informierte Entscheidungen. Zwar sind objektive Vergleichsinstrumente in Form von Zertifikaten erhältlich, jedoch finden diese in der Praxis wenig Beachtung. Die Ecological material mini library (EMMy) versucht hier zwischen wissenschaftlicher Bewertung und handhabbaren Kategorien zu vermitteln. Die Materialien werden auf Grundlage der Herkunft und Rückführbarkeit in Gruppen unterteilt und jedes Produkt wird auf Basis von Herstellerangaben anhand ökologischer Eigenschaften vorgestellt. Neben der digitalen und physischen Materialbibliothek

dient die Entwicklung von Ausstellungsformaten dazu, das Wissen zu kreislaufgerechten Bauprodukten auch der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. Die Entwicklung von Datenbanken mit Bauprodukten ist in Anbetracht der langen Nutzungszyklen von Gebäuden notwendig, um eine Dokumentation der eingesetzten Ressourcen in Form von Materialpässen zu gewährleisten. Erst mit dem Wissen zum Material können Nachnutzungsmöglichkeiten und Informationen für den Rückbau sichergestellt werden. Die Relevanz dessen wird im Koalitionsvertrag 2021 „Mehr Fortschritt wagen“ der Bundesregierung deutlich, der einen digitalen Gebäuderessourcenpass fordert.

## Fokus Informationsfluss im Gebäudelebenszyklus

Ein ganzheitlicher Wandel ist nur zu erreichen, wenn alle Akteure im Bausektor einbezogen werden. Vor allem im Spannungsfeld der Herstellungs- und Rückbauphase von Gebäuden braucht es einen interdisziplinären Informationsaustausch, bei welchem vorhandene Expertisen zusammengebracht und neu verknüpft werden. So kann etwa vorhandenes Wissen eines Rückbauunternehmens bei der Entwicklung eines Rückbaukonzeptes bereits im Entwurfsprozess miteinbezogen werden.



Bild 2: Dämmung aus Sekundärrohstoffen  
Foto: Lisa Beller

Im Rheinischen Revier wird dies durch das Forschungsprojekt „Regionales Netzwerk Ressourceneffizientes Bauen (ReNeReB)“ umgesetzt. Im Mittelpunkt steht hierbei der Aufbau eines digitalen Informationsnetzwerks zu Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Ein Schwerpunkt besteht in der Entwicklung einer Datenbank mit handhabbaren Kriterien für ressourcenschonende Produkte, Gebäude und Akteursdienstleistungen sowie deren nutzungsgerechte Kommunikation. Regionale Bauproduktersteller und am Bau beteiligte Akteure können die Plattform nutzen, um sich zu vernetzen sowie Informationen zu Produkten und Dienstleistungen der Allgemeinheit zugänglich zu machen.

**Das Ende von Anfang an mitdenken**

Eine zirkuläre Wirtschaftsweise im Bauwesen reduziert den Ressourcenverbrauch und bietet die Möglichkeit sich von globalen Lieferketten sowie geopolitischen Abhängigkeiten zu lösen. Darüber hinaus birgt der Wandel ein großes Innovationspotenzial für neue Geschäfts- und Nutzungsmodelle, die sich im Handlungsfeld der Circular Economy bewegen. Einige von ihnen finden bereits heute erste Anwendung: Online-Plattformen wie Madaster oder Concular inventarisieren mittels digitaler Materialpässe Materialbe-

stände in Gebäuden und weisen diesen einen monetären Wert zu. Infolgedessen können die Rohstoffe zukünftig einer weiteren Wertschöpfung zugeführt werden. Bei zirkulären Nutzungsmodellen erwerben Nutzende nicht mehr das Produkt, sondern eine Dienstleistung. Die Herstellerverantwortung wird somit über die Produktionsphase hinaus mit der Rücknahme der Produkte erweitert. Aus eigenem wirtschaftlichem Interesse handeln Hersteller ressourcenschonender, indem sie qualitativ hochwertigere und wartungsfreundliche Produkte vertreiben. Um Zirkularität umzusetzen, muss demnach das Ende bereits am Anfang mitgedacht werden. Mit der Umsetzung der Circular Economy kommt eine Vielzahl neuer Aufgaben im Bausektor hinzu. Gleichzeitig entstehen Fragestellungen, die noch nicht ausreichend erforscht sind. Auch muss die Ausbildung aller Akteure um Inhalte ergänzt werden, die Grundlagen für eine zirkuläre Baupraxis schaffen. Das erfordert eine große Anstrengung – doch der Wandel im Bausektor kann auch als Chance begriffen werden, eine zukunftssichere Umwelt zu schaffen.

**Quellen**

[1] Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (2019): Positionspapier des UBA zur Schonung natürlicher Ressourcen durch Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schonung-natuerlicher-ressourcen-durch> , abgerufen am 20.12.2021  
[2] Scharff, C. (2016): Das EU Kreislaufwirtschaftspaket und die circular economy coalition for Europe, in Recycling und Rohstoffe, Seite 23., verfügbar unter: [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR9/2016\\_RuR\\_11-26\\_Scharff.pdf](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR9/2016_RuR_11-26_Scharff.pdf), abgerufen am 20.12.2021  
[3] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., 2019

**Autorinnen**

Prof. Dr. Linda Hildebrand ist Juniorprofessorin für Rezykliergerichtetes Bauen.  
Alina Kretschmer, M.Sc., war wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen, Kim Ha Tran, M.Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen.

# Ressource Abwasser

## Wertstoffe aus Klärschlamm gewinnen und Abwasser wiederverwenden

The objective of municipal waste water treatment plants (wwtp) is to protect water bodies by removing pollutants from waste water. In response to the challenge of climate change, wwtp's aim is to reduce their energy demand through different strategies. Another way to protect the environment is to recover and recycle important nutrients, like nitrogen and phosphorus, contained in waste water. Different processes for phosphorus recovery from sewage sludge or sewage sludge ash are reported, but most of them are still being developed. To optimize phosphorus recovery, the Institute for Environmental Engineering investigates the influence of different process parameters and the characteristics of sewage sludge ash. By the time phosphorus recovery processes are mandatory due to legal requirements, other valuable compounds of waste water, such as valuable metals, will become of interest for simultaneous recovery.

Für die Reinigung des häuslichen Abwassers sind in Deutschland über 9.000 kommunale Kläranlagen zuständig. Diese verhindern die unregelmäßige Emission von Schadstoffen und Verunreinigungen in die Umwelt und schützen somit unsere sensiblen aquatischen Ökosysteme. Aus diesem Grund gibt es für Kohlenstoffverbindungen, Nährstoffe und weitere Parameter einzuhaltende Grenzwerte, bevor das gereinigte Abwasser in ein naheliegendes Gewässer eingeleitet wird. Es ist absehbar, dass neue Vorgaben hinzukommen, beispielsweise die Elimination von organischen Mikroverunreinigungen, wie Rückstände von eingenommenen Arzneimitteln. Diese werden mit den konventionellen Technologien nicht zurückgehalten oder abgebaut.

### Innovationstreiber Klimawandel

Da Kläranlagen einen hohen Energiebedarf haben, gibt es seit Jahren Bemühungen, den Einsatz von Energie zu reduzieren und die Energiepotenziale des Abwassers zu nutzen. Die Erzeugung und energetische Verwertung von Klärgas aus dem kohlenstoffreichen Klärschlamm sind seit Jahrzehnten Stand der Technik für mittlere und große Kläranlagen und tragen zu einem gewissen Teil zur Energieversorgung bei. Im Zuge der Energiewende ergibt sich auch für kommunale Kläranlagen der Anspruch, Klimaneutralität zu erreichen. So wird an energieoptimierten

biologischen Prozessen geforscht und es gibt beispielsweise Ansätze, überschüssigen Sauerstoff aus der Elektrolyse zur Wasserstofferzeugung auf Kläranlagen zu nutzen, siehe Bild 1. Auf diese Weise könnte der hohe Energiebedarf für die Sauerstoffversorgung von Abwasser reinigenden aeroben Mikroorganismen stark reduziert werden. Allerdings bedeuten neue Reinigungsanforderungen auch den Einsatz zusätzlicher, teils erheblicher Energiemengen. Zur Herstellung von Ozon, welches zur Elimination von Mikroschadstoffen eingesetzt wird, kann ebenfalls erwähnter überschüssiger Sauerstoff verwendet werden.

Die zunehmende Aufrüstung der Kläranlagen führt dazu, dass das behandelte Abwasser eine ausreichende Qualität zur Wiederverwendung aufweisen kann. Angesichts zunehmender Dürreperioden respektive steigendem Wassermangel und -bedarf ist somit das Wasser selbst schon heute ein wertvoller Rohstoff auf Kläranlagen, dessen Nutzung von immer größerer Bedeutung wird.

### Klärschlamm ist die Schadstoff- und Wertstoffs Senke der Abwasserbehandlung

Unabhängig davon, welche neuartigen Technologien zum Einsatz kommen, bleibt Klärschlamm die Schadstoffs Senke der Abwasserbehandlung. Einige der auf Kläranlagen in



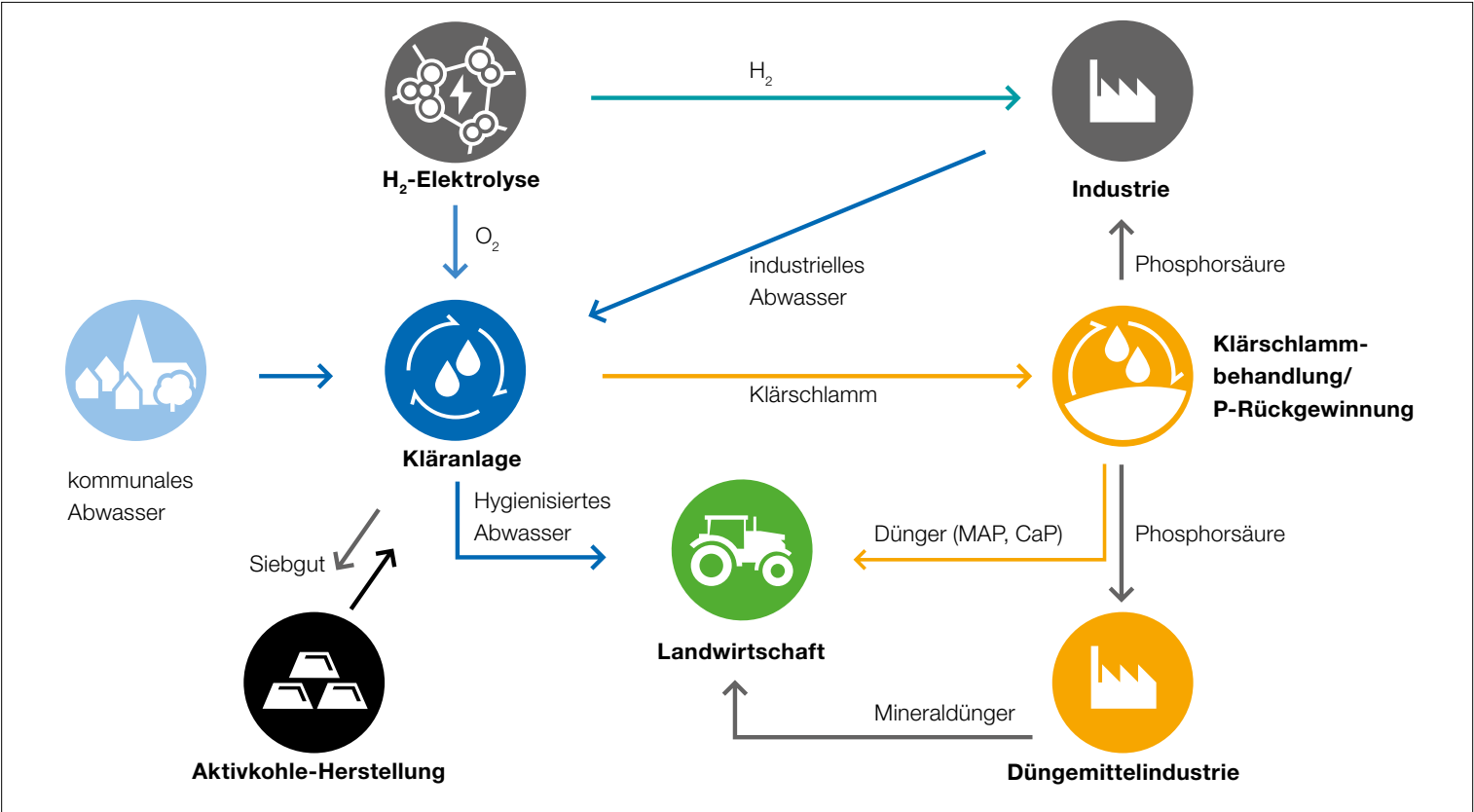


Bild 1: Sektorenkopplung zwischen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Industrie

den Klärschlamm überführten Elemente sind potenzielle Wertstoffe, deren Rückgewinnung unter sich ändernden ökonomischen und ökologischen Gegebenheiten zunehmend interessant wird. Dazu gehören auch Phosphor und Stickstoff, welche als Düngemittel für die Landwirtschaft von großer Bedeutung sind. In Zukunft sollen diese Pflanzennährstoffe durch neue Verfahren rückgewonnen werden. Die Rückgewinnung von Stickstoff kann interessant sein, da die künstliche Erzeugung von Ammoniak mit dem Haber-Bosch-Verfahren einen enormen Energiebedarf bedeutet. In der kommunalen Abwasserbehandlung steht in Deutschland und einigen Nachbarländern jedoch vor allem Phosphor im Fokus.

**Phosphatgestein ist ein kritischer Rohstoff**

Phosphor ist für Lebewesen und Pflanzen von großer Bedeutung. In seinen Funktionen, beispielsweise im Energiestoffwechsel oder als Bestandteil der DNA, ist Phosphor nicht substituierbar. Vor allem aber muss Phosphor für eine gute Pflanzenentwicklung in ausreichender Menge im Boden vorliegen. Um dies zu gewährleisten, wird er Pflanzen über Düngemittel zugeführt. Aktuell werden die mineralischen Phosphatdüngemittel aus Rohphosphatgestein hergestellt. Dieses wird aus dem außereuropäischen Ausland importiert, da es in der EU

keine nennenswerten abbaubaren Reserven gibt. Die EU ist entsprechend auf Importe angewiesen, und Phosphor wird von der Europäischen Kommission als kritischer Rohstoff eingestuft. Die Verunreinigung der Rohphosphate mit zum Teil toxischen Schwermetallen ist ein zunehmendes Problem. Kritisch sind dabei vor allem Cadmium und Uran. Die Rückgewinnung von Phosphor aus Reststoffen ist eine Möglichkeit, die Versorgung mit diesem essenziellen Rohstoff nachhaltig zu garantieren. Vor allem die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ist aufgrund rechtlicher Änderungen in den Mittelpunkt von Forschung und Praxis gerückt. In der Vergangenheit wurde Klärschlamm vor allem in der Landwirtschaft als Düngemittel eingesetzt. Dies ist allerdings mit der 2017 novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV) nach einer Übergangsfrist für den Großteil aller kommunalen Klärschlämme verboten. Außerdem wurde eine Phosphorrückgewinnungspflicht beschlossen. Diese greift, wenn die Klärschlamm-trockenmasse mehr als zwei Prozent Phosphor enthält. Der Beginn dieser Vorgabe ist abhängig von der Größe der Kläranlage. Für große Anlagen gelten sie ab 2029, für mittelgroße Anlagen ab 2032. Die Klärschlamm-entsorgung in Deutschland wird sich in Zukunft entsprechend anpassen. Hierbei zeigt sich eine Tendenz zur thermi-

schen Behandlung und einer anschließenden Phosphorrückgewinnung aus der entstehenden Klärschlamm- asche. Daneben wird auch an Verfahren gearbeitet, die eine Phosphorrückgewinnung vor der Verbrennung des Klärschlamm- anstreben und zum Teil Bestandteil der Abwasser- reinigungsprozesse sind. Hochrechnungen zufolge lassen sich ungefähr 40 Prozent des landwirtschaftlichen Bedarfs an mineralischem Phosphor mit aus Abwasser recyceltem Phosphor substituieren.

**Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm- asche**

Es gibt verschiedene Prozesse zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm- asche, von denen sich mehrere noch in Entwicklung und/oder im Planungsprozess befinden. Nur zwei Anlagen sind in Deutschland im großtechnischen Maßstab umgesetzt. Zu unterscheiden ist vor allem zwischen thermochemischen und nasschemischen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung: Thermochemische Verfahren haben im Allgemeinen das Ziel, eine phosphorhaltige Asche zu produzieren, die als Düngemittel eingesetzt werden kann. Bei nasschemischen Verfahren wird die Asche mit Säure aufgeschlossen, um den Phosphor heraus zu lösen. Hierfür können verschiedene Mineralsäuren, wie Salzsäure (HCl) oder Phosphorsäure (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), verwendet werden. Das mit Phosphor angereicherte





Bild 2: Verschiedene Aschen, Klärschlämme und Lösungen bei der Phosphorrückgewinnung  
Foto: Peter Winandy







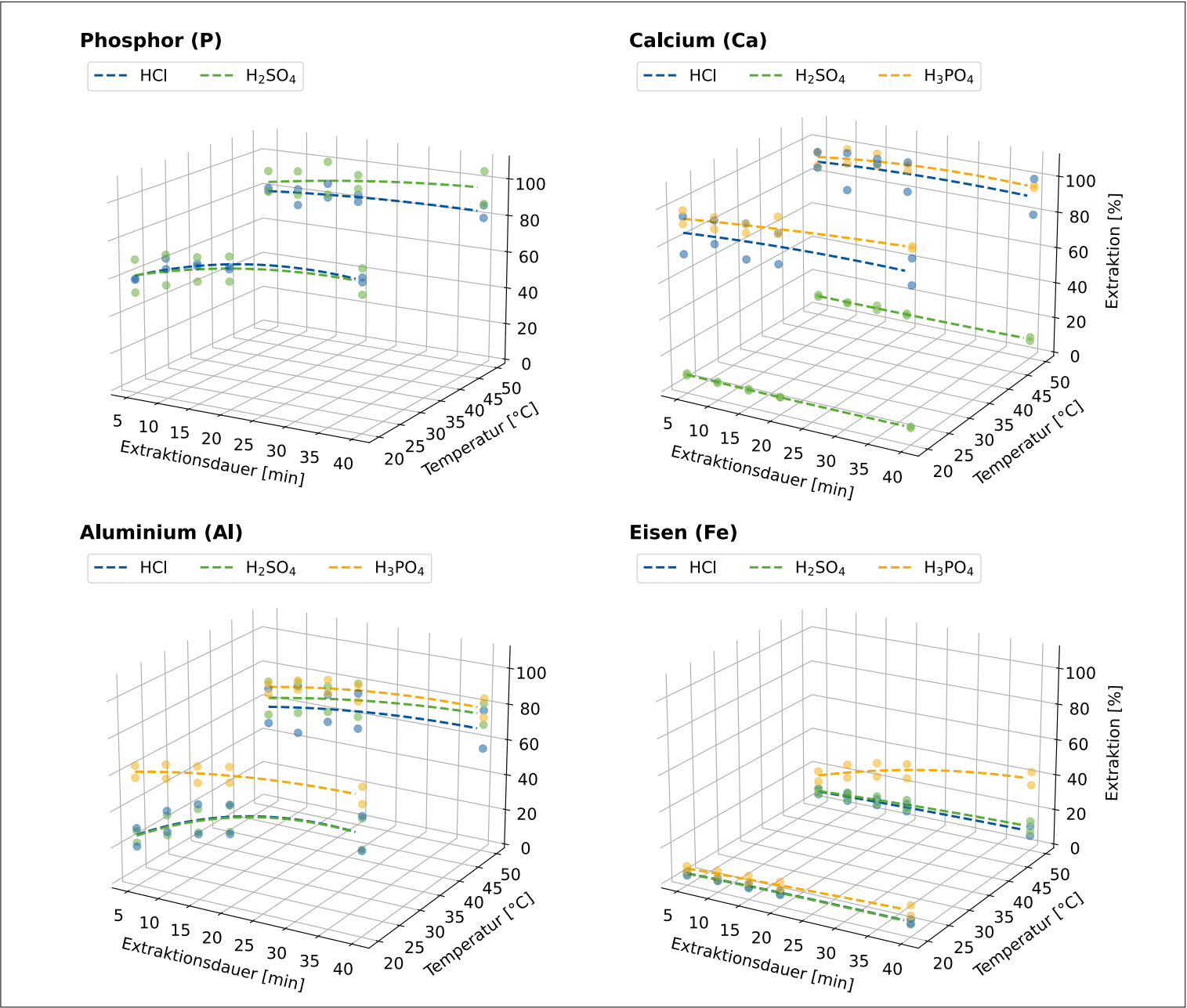


Bild 3: Extraktionsverhalten von Phosphor und anderen Elementen in verschiedenen Aufschlussäuren und bei unterschiedlichen Temperaturen und Extraktionsdauern (beispielhafte Darstellung)

flüssige Extrakt wird anschließend mittels verschiedener Separationsverfahren von Störstoffen befreit. Der in der flüssigen Phase enthaltene Phosphor wird entweder ausgefällt oder mittels Verdampfer und Membrantechnik aufkonzentriert. Als Produkte entstehen Calciumphosphate oder Phosphorsäure. Am Institut für Siedlungswasserwirtschaft durchgeführte Versuche zeigen verschiedene Abhängigkeiten bei dem Initialschritt der nasschemischen Verfahren. Die Menge der extrahierten Elemente wird von der Zusammensetzung der Asche und den Prozessparametern während des Säureaufschlusses beeinflusst. Vor allem die vorliegenden Phosphorverbindungen sind ein Schlüssel zur Optimierung dieser Form der Phosphorrückgewinnung. Jüngst wird versucht, bereits in den

Verbrennungsprozess einzugreifen und somit die Phosphorrückgewinnung zu erleichtern. In Bild 3 ist das Extraktionsverhalten von Phosphor, Calcium, Aluminium und Eisen bei unterschiedlichen Versuchseinstellungen dargestellt. Dabei ist gut erkennbar, dass sich das Extraktionsverhalten der Elemente je nach Säureart unterscheidet. Generell zeigen Aluminium und Eisen höhere Extraktionsquoten in Phosphorsäure im Vergleich zu Salz- und Schwefelsäure. Bei höheren Temperaturen und längeren Kontaktzeiten wird ein größerer Anteil der Elemente in die flüssige Phase überführt. Insbesondere löst sich Phosphor, trotz einer kurzen Extraktionsdauer, deutlich schneller als andere Elemente. Diese Kenntnisse dienen zur Weiterentwicklung und Optimierung des Säureaufschlussprozesses.

**Nebenprodukte der Phosphorrückgewinnung als Wertstoffquelle**

Da Klärschlamm und Klärschlammasche neben Phosphor viele weitere Bestandteile haben, kommen auch diese mit zunehmender Entwicklung der bestehenden Prozesse für eine Rückgewinnung in Betracht. Zu diesen Wertstoffen zählen Seltene Erden, wie beispielsweise Cer und Gadolinium, und Übergangsmetalle, etwa Kupfer und Zink. Wenn Anlagen zur Phosphorrückgewinnung großtechnisch betrieben werden, erscheint eine Kopplung mit der Rückgewinnung weiterer Wertstoffe sinnvoll und nachhaltig.

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „Amphore“ erfolgt der erste Schritt für diese ganzheit-



Bild 4: Probenahme von Faulschlamm auf der Kläranlage Aachen-Soers  
Foto: Peter Winandy

liche Umsetzung der Phosphorrückgewinnung: In einer Region, in der etwa acht Prozent des deutschen Klärschlammes verbrannt werden, wird eine Pilotanlage zur Phosphorrückgewinnung gebaut. Ziel ist es, neben dem Phosphor-Rezyklat auch die Nebenprodukte einer nachhaltigen Nutzung zuzuführen. Das Hauptprodukt, Phosphorsäure, kann sowohl als Düngemittel, als auch in der Industrie Anwendung finden. Nebenprodukte können als Fällmittel in der Kläranlage eingesetzt werden oder als Ersatzstoff in der Baustoffindustrie verwendet werden.

Abwasser kann als Ressource für viele wertvolle Inhaltsstoffe angesehen werden, wie zum Beispiel Phosphor oder Seltene Erden. Die Rückgewinnung dieser Stoffe kann einen Beitrag zum Umweltschutz leisten. Das gerei-

nigte Wasser selbst ist ebenfalls ein wichtiger Rohstoff. Laut dem World Water Development Report 2020 der Vereinten Nationen führt der Klimawandel zu einer schlechteren Süßwasserqualität und einer ungleich verteilten Niederschlagsmenge. Die Realisierung einer hochwertigen Abwasserwiederverwendung kann somit einen wichtigen Teil zum Schutz der Ressource Wasser beitragen.

## Autoren

Dr.-Ing. David Montag ist Oberingenieur und Leiter der Arbeitsgruppe Ressourcenmanagement am Institut für Siedlungswasserwirtschaft.

Isabell Allwicher, M.Sc., Jan-Hendrik Ehm, M.Sc., und Hiep Le, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Institut für Siedlungswasserwirtschaft.

Tabea Zachäus, B.Sc., ist wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Siedlungswasserwirtschaft.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Wintgens ist Inhaber des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütwirtschaft und Leiter des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft.



# Neue Baumaterialien für die Bioökonomie

## Das Potenzial von Pilzen

Towards an imminent transformation of the construction industry, the circular economy is looking for solutions to lower emissions, CO<sub>2</sub> footprint of buildings, and life cycles. In this context, the investigation of fungal mycelium composites has gained ground among researchers in recent years. The research conducted by the Chair of Structures and Structural Design (Trako) at the Faculty of Architecture is aligned with circular economy principles. It proposes replacing conventional construction materials with novel mycelium-based materials. Although most of the published research of fungal materials for construction focuses mainly on their favorable isolation properties, the researchers at Trako further explore the load-bearing capacity of these materials. The virtual growth of fungal

mycelium, combined with a lignocellulosic material such as wood, yields a promising scenario for a material that allows being shaped into any given form. Moreover, the fungal hyphae develop a network among the chipped-wood substrate connecting it into a matrix. This process also highlights mycelium's binding capacity. Both properties, rapid virtual growth and binding, served as a basis for Trako's research. We focused not only on determining the basics for defining the load-bearing capacity of the material but also on two possible case studies. The overall aim of the researchers at Trako is to develop fungal-based building materials that can contribute to the transformation of the oil-based economy into a sustainable, bio-(circular) -economy.

Die in einem Gebäude zum Einsatz kommenden Bauteile unterscheiden sich in ihrer Langlebigkeit. So ist die Haut eines Gebäudes anfälliger für Veränderungen, während tragende Elemente vor allem aufgrund ihrer langen Lebensdauer immanent bleiben. Laut einem Bericht der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) ist der Gebäudesektor für rund 30 Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen, 40 Prozent des Energieverbrauchs in Europa und 30 Prozent des Ressourcenverbrauchs weltweit verantwortlich, wobei 80 bis 90 Prozent davon auf die tragenden Strukturen von Gebäuden entfallen. Der Entwicklung neuer tragfähiger Materialien kommt damit eine wichtige Rolle zu. Am Lehrstuhl für Tragkonstruktionen wird zu Verbundwerkstoffe auf Basis von Pilzmyzel geforscht. Das Myzel von Pilzen sind die fadenförmigen Zellen, die zumeist unter der Erde liegen. Sie bieten eine große Chance ölbasierte Baumaterialien zu ersetzen und ermöglichen eine Kreislaufwirtschaft: Pilzmyzelle können organische Abfälle in Verbundwerkstoffe umzuwandeln.

Das Baumaterial ist dabei stets ein Komposit aus Pilzmyzel und einem Substrat. Das Substrat dient dem Myzel als Nahrung und wird im Zuge des Myzelwachstums von diesem komplett durchsetzt, das Myzel agiert also als Bindemittel. Aufgrund des geringen Energieverbrauchs und ihrer Abbaubarkeit können solche Materialien eine entscheidende Rolle für das kreislaufgerechte Bauen spielen. Die Biotechnologie von Myzelwerkstoffen hat aufgrund der natürlichen Stoffwechseleigenschaften der Pilze eine große Bandbreite. Derzeit gibt es etwa 60.000 Pilze in Kultur, die alle ihre ökologischen Nischen haben



Bild 1: Substrat-Pilz-Myzel-Wachstumsverhältnistest mit Buchenholzspänen (grob und fein) und Ganoderma Lucidum in einer Petrischale.



und auf bestimmte Leistungen spezialisiert sind. Neben der verbreiteten Anwendung zur Speisepilzproduktion, bietet der Bereich interessante Forschungsobjekte für Medizin (Stoffwechselwege), Pigmente oder Wirkstoffe. Die technische Verwendung geht kaum über die Herstellung von Verpackungsmaterial hinaus. In der Bauindustrie liegt der Anwendungsschwerpunkt noch auf einer experimentellen Ebene. Auch die technische Anwendung myzelbasierter Verbundwerkstoffe ist weltweit Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Durchgeführte Studien beinhalten elementare Untersuchungen dieser Werkstoffe im Hinblick auf die physikalischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wasseraufnahmekapazität, aber auch mechanische Eigenschaften wie Festigkeit und Elastizität. Als Substratwerkstoffe kommen Naturfasern wie Gras, Hanf und Stroh sowie Holzspäne zum Einsatz. Einige grundlegende Eigenschaften, etwa die hohe Wärmedämmfähigkeit, und die begrenzte Feuchtigkeitsaufnahme, konnten bereits herausgearbeitet werden.

**Erforschung myzelbasierter Materialien**

Neben den Forschungsaktivitäten im Bereich des klassischen Holzbaus beschäftigt sich der Lehrstuhl für Tragkonstruktionen mit bio-basierten Werkstoffen. Dabei stehen ihre technischen und mechanischen Eigenschaften und somit die Verwendbarkeit als tragende, also statisch funktionale Werkstoffe in Architektur und Bauwesen, im Vordergrund. Das Projekt „LimyBrick“ widmete sich der Untersuchung von Pilzmyzel-Verbundmaterialien und den Möglichkeiten zur Herstellung von modularen Bauelementen wie beispielsweise Ziegel, siehe Bild 3. Hier konnten wertvolle Erkenntnisse zu Herstellung und Umgang mit dem Material gesammelt werden: Die Besiedlung und Biomasseproduktion des Pilzmyzels wird von der Substratauswahl, den Kultivierungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit und pH-Wert) und der spezifischen genetischen Zusammensetzung beeinflusst. Daher wurden Untersuchungen zur Herstellung von festen, technisch und statisch verwertbaren Myzelverbundmaterialien durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Kombinationen von Pilzen und Holzsubstrat analysiert, um den Einfluss des Substrats auf die Festigkeit, die idealen Klima- und Nährstoffbedingungen für das Wachstum und die Herstellungsschritte für die Materialherstellung zu ermitteln. Trotz des Autoklavierens der Substratmischung sind die Umgebungsbedingungen für die Kultivierung auch für das Wachs-



Bild 2 : Prototyp eines Sandwichpaneels mit einem Kern auf Myzelbasis in einem frühen Entwicklungsstadium.



Bild 3 : Prototyp der Verbundwand. Das Pilzmyzel ermöglicht die Verbindung der einzelnen Elemente in einem zweistufigen Wachstumsprozess.



Bild 4 : Probekörper Z1 für Druckuntersuchung; Draufsicht



Bild 5 : Probekörper Z1 für Druckuntersuchung; Seitenansicht





Bild 6: Das Team des Myco-Matrix-Projekts diskutiert Materialoptimierungsstrategien.  
Foto: Peter Winandy







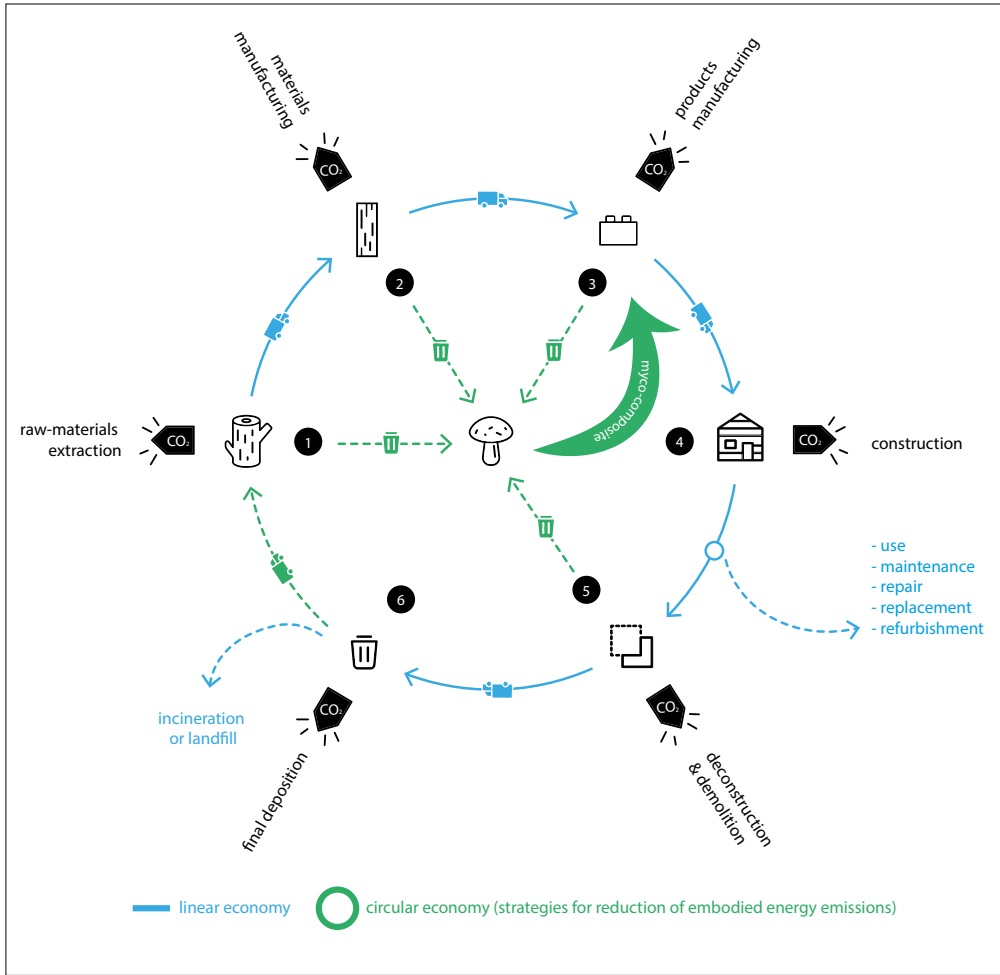


Bild 7: Integration von Pilzmyzel und Holzwerkstoffen in die Kreislaufwirtschaft der Bauindustrie.

Quelle: Myco-Matrix

tum anderer, unerwünschter Pilze, etwa Schimmelpilze, günstig. Aus diesem Grund wurde der Feuchtigkeitsgehalt der lebenden Matrix unter Beibehaltung einer praktikablen Wachstumsrate reduziert. Hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens wurden Experimente zur Füll- beziehungsweise Packungsdichte und deren Auswirkung auf die Druckfestigkeit des Materials durchgeführt. Außerdem wurde der Einfluss der Substratkorngröße, basierend auf drei verschiedenen Korngrößen und deren Kombination, untersucht. Durch eine systematische Kombination und Abstimmung der Komponenten konnten so die Festigkeitseigenschaften deutlich verbessert werden. Die Erfahrungen dienten als Grundlage für die Entwicklung des Folgeprojekts „Myco-Matrix“, welches ebenfalls durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert wurde. Projektpartner war das Institut für Naturstofftechnik der TU Dresden, gemeinsam wurde die strukturelle Leistungsfähigkeit von Myzelwerkstoffen in konkreten Einsatz-

szenarien beleuchtet. Dazu wurden die im Erstprojekt durchgeführten Untersuchungen erweitert. Neben der Optimierung der Materialeigenschaften stand die Entwicklung von auf das Material zugeschnittenen Konstruktionsmethoden im Vordergrund. Durch eine Kombination des Myzelmaterials mit Holzwerkstoffplatten konnten Leichtbauplatten in Sandwichbauweise hergestellt werden, die sowohl für Wand- als auch Deckenplatten eingesetzt als auch planmäßig als statisch aktive Elemente für aussteifende Wände oder tragende Deckenkonstruktionen verbaut werden können. Die durchgeführten Fallstudien zeigen Prototypen im Maßstab 1:1. Die Prototypen, siehe Bild 3, ermöglichten es, maßstabsbezogene Konstruktionsprobleme zu beobachten und Designlösungen zu implementieren.

## Die Zukunft des Bauens überdenken

Jedes Gebäude, das wir in Zukunft bauen, sollte so nachhaltig und umweltfreundlich wie möglich sein. Dabei müssen Materialien verwendet werden, die in den Kreislauf der Natur zurückgeführt werden können. Wie in Bild 7 dargestellt, würde die Einführung von kreislaufgerechten Baumaterialien, wie das beschriebene Myzelmaterial, nicht nur die Ökobilanz von Gebäuden stark verbessern, sondern auch ein zweites Leben für Neben- oder Abfallprodukte der Holzverarbeitenden Industrie ermöglichen. Auch ergibt sich die Möglichkeit, bereits verwendete Baumaterialien aus Holz nach Ihrer Erstnutzung in einem Gebäude zu Substrat zu verarbeiten und somit in den Kreislauf zurückzuführen. Die vorgestellten Projekte liefern eine Basis zur weiteren Entwicklung myzelbasierter Werkstoffe für den Einsatz als statisch wirksame Baumaterialien. Aufgrund der großen Varianz an Pilzarten besteht die Möglichkeit, in einem groß angelegten Screening die bestmögliche Kombination von Pilz und Holzsubstrat zu ermitteln. Darüber hinaus können die Kultivierungsparameter für die jeweiligen Kombinationen weiter optimiert und so die mechanischen und physikalischen Eigenschaften gesteigert werden. Gemeinsam mit der Entwicklung neuer, angepasster Anwendungsszenarien durch den Bau von Prototypen wird die Erforschung eines vielversprechenden Materials für das Bauwesen vorangetrieben.

## Autoren

Denis Grizmann, M.Sc., und Dana Saez, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Lehrstuhl für Tragkonstruktionen. Univ. Prof. Dr.-Ing. Martin Trautz ist Inhaber des Lehrstuhls für Tragkonstruktionen. Dr.-Ing. Anett Werner ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Naturstofftechnik der TU Dresden.





Bild 8: Die Teammitglieder Denis Grizmann und Dana Saez präsentieren eine Reihe von Materialproben auf Myzelbasis.

Foto: Peter Winandy



# Mikroben – Katalysatoren der Kreislaufwirtschaft

Microbes contribute significantly to the world's major material cycles (e.g., C, N, S, P). At iAMB, by using metabolic engineering, microbes are constructed that achieve outstanding catalytic properties (titer, rate, yield). These catalytic performances can be used to produce valuable materials from renewable carbon sources (e.g., biomass, CO<sub>2</sub>, methane) or waste streams (e.g., plastics). The research at iAMB focuses on fundamental and applied aspects of microbial metabolism. Studies on *in silico*/*in vivo* functional modes of metabolic networks provide a deeper understanding of cellular functions and thus contribute to rational strain design.

Mikroorganismen verändern und haben unseren Planeten Erde in einem Umfang verändert, wie kaum eine andere Lebensform. Vieles haben wir ihnen zu verdanken, von der sauerstoffhaltigen Atmosphäre durch oxygene Fotosynthese bis hin zur Stickstofffixierung, viele geochemische Prozesse in den Stoffkreisläufen der Elemente (Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor) werden durch sie dominiert und angetrieben. Die katalytischen Leistungen der Mikroben ermöglichen das ständige Wachsen und Vergehen in der Natur ebenso wie das Funktionieren des menschlichen Körpers. Dieser beherbergt in seinem Mikrobiom bis zu zehnmal mehr mikrobielle als humane Zellen. Vielfältige mikrobielle Abbau- und Syntheseleistungen können zur Herstellung von Wertstoffen aus erneuerbaren Kohlenstoffquellen wie Biomasse (Kohlenhydrate, Zellulose), Methan (CH<sub>4</sub>) oder Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) genutzt werden. Ein Wandel von erdölbasierten zu nachhaltigen und biologisch basierten Rohstoffen ist essenziell. In sogenannten Open-loop-Kreisläufen können Mikroben auch Problemstoffe wie fossilbasierte Kunststoffpolymere in Biopolymere oder biobasierte Bausteine transformieren und diese so in eine Kreislaufwirtschaft einbinden, siehe Bild 1.

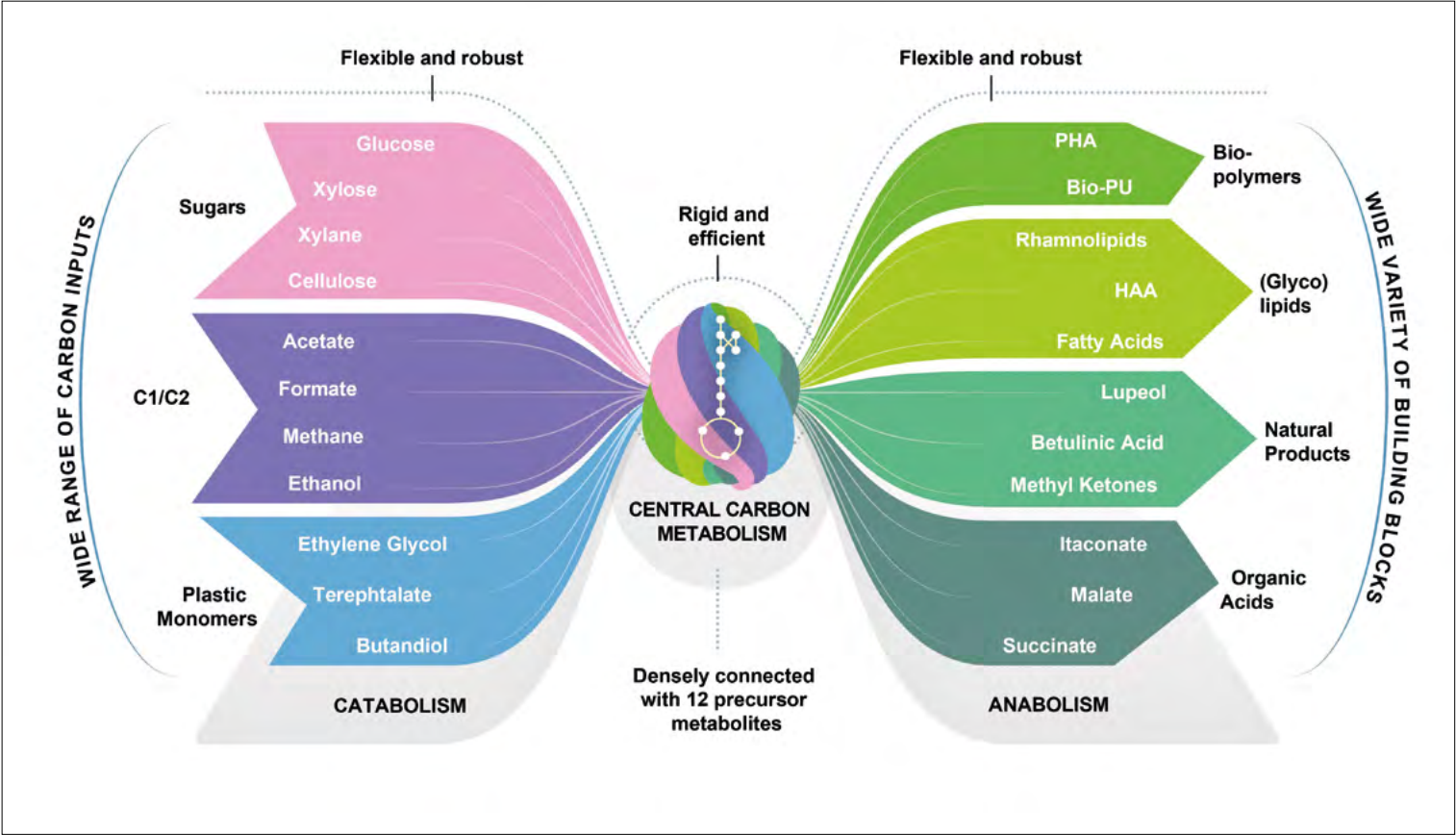


Bild 1: Bow-Tie-Struktur des mikrobiellen Metabolismus. Produktion von Wertstoffen aus diversen Kohlenstoffquellen (Biomasse, CO<sub>2</sub>) und Kunststoffen.

**Plastikabbau**

Das Upcycling von fossilbasiertem Post-Consumer-Kunststoff in einem Open-loop-Kreislaufprozess zu biologisch abbaubarem Kunststoff oder Plattformchemikalien soll ein wichtiger Teil einer effizienten zirkulären Bioökonomie werden. Hierbei sind zwei Aspekte entscheidend: die Aufwertung und Verwertung von Abfällen mit geringem Eigenwert aber hohem Umweltverschmutzungspotenzial und die Verfügbarkeit eines alternativen Rohstoffs ohne Nahrungsmittelrelevanz. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ist gering, da der fossile Kohlenstoff durch Transformation in anderen Produkten gebunden bleibt und nicht als CO<sub>2</sub> freigesetzt wird.

Die weltweite Kunststoffproduktion ist in den letzten sechs Jahren um weitere 21 Prozent gestiegen und erreichte 2019 368 Millionen Tonnen.<sup>[1]</sup> Wesentlicher Nachteil der bestehenden Kunststoffwirtschaft ist ihre Linearität. Diese zeigt sich darin, dass von allen weltweit produzierten Kunststoffen 83 Prozent nicht wiederverwertet werden, da es an geeigneten Recyclingtechnologien mangelt. Von den recycelten zehn Prozent wurden nur 15 Prozent mehr als einmal wiederverwertet.<sup>[2]</sup> Die verfügbaren Recyclingkonzepte sind oft nicht kosteneffizient und produzieren bei jedem chemisch-mechanischen Aufarbeitungs-

zyklus Polymere von geringerer Qualität. Ein kompletter Systemwechsel in eine alternative Kunststoffzukunft wäre die mögliche Antwort. In der zirkulären Bioökonomie ersetzen biologisch abbaubare Polymere herkömmliche, fossilbasierte Kunststoffe. Ein erster Schritt auf diesem Weg in eine (Bio)Kreislaufwirtschaft ist die Verwertung herkömmlicher, minderwertiger Kunststoffe, die nicht direkt recycelt werden können, als mikrobielles Substrat für die Produktion hochwertiger Biopolymere wie beispielsweise Polyhydroxyalkanoate (Polyhydroxyfettsäuren, PHAs). Das biotechnologische Recycling als Kombination von enzymatischer Depolymerisierung und Biotransformation, ergänzt durch physikalisch-chemische Techniken, um schlecht zugängliche Kunststoffpolymere in den Griff zu bekommen, wird im EU H2020 Projekt „Mix-Up“ intensiv bearbeitet.<sup>[3]</sup> Dieses wird am Institut für Angewandte Mikrobiologie koordiniert. Mit Blick auf eine tragfähige Kreislaufwirtschaft ist die selektive Entfernung von Polymerbausteinen durch enzymatischen Aufschluss unter milden Bedingungen (Temperatur, Druck) und die Möglichkeit der selektiven Rückgewinnung von Monomeren aus gemischten Kunststoffsubstraten ein großer technologischer Sprung. In den letzten Jahren wurden signifikante Fortschritte beim

enzymatischen Aufschluss von Kunststoffpolymeren mit hydrolysierbaren Gruppen im Polymer-Grundgerüst (Polyethylenterephthalat [PET], Polyamide [PA] oder Polyurethane [PUR]) erzielt. Die Monomere (Ethylenglycol [EG] und Terephthalat [TA]) wurden in äquimolaren Mengen aus qualitativ minderwertigem PET freigesetzt. Hier war kein direktes Recycling zu neuen Flaschen, Fasern oder Folien ökonomisch sinnvoll. Die PUR-Modellmonomere EG, 1,4-Butandiol (BDO), Adipinsäure (AA), sowie 4,4'-Diaminodiphenylmethan (MDA) und 2,4-Diaminotoluol (TDA) vom Isocyanat, wurden wie schon die PET-Monomere (EG, TA) zum biologisch abbaubaren Biopolymer PHA in verschiedenen rekombinanten Pseudomonaden umgesetzt. Die größte Herausforderung des enzymatischen Abbaus sind jedoch die resistenten chemischen Gruppen, die der herkömmlichen Hydrolyse durch biologische Enzyme widerstehen. Diese können nur nach intensivem Protein-Engineering und in Kombination mit begleitenden chemischen Prozessen angegriffen werden. Diese Polymere, wie beispielsweise PE, PP oder PVC, besitzen ausgedehnte stabile C-C-Grundstrukturen, sind völlig frei von funktionellen Gruppen und können entsprechend nur durch hochenergetische Redoxreaktionen angegriffen werden.



Eine C-C-Bindungsspaltung durch Radikalreaktionen konnte bisher nur in einigen wenigen Fällen (Alkanhydroxylase (AlkB), Laccasen) nachgewiesen werden.

### C1- und C2-Verbindungen

Um die Nachhaltigkeit von Bioproduktionsprozessen zu erhöhen, werden neben der Verwertung von traditioneller kohlenhydrat- und lignocellulosehaltiger Biomasse neue Ansätze gesucht. Die Gasfermentation mit dem Ziel der direkten Nutzung von CO<sub>2</sub> beziehungsweise CH<sub>4</sub> oder potenzielle CO<sub>2</sub>-abgeleitete C1- und C2-Verbindungen (Methanol, Formiat, Acetat, Ethanol) wurden als (Co-)Substrate etabliert. Ziel sind kohlenstoffneutrale Produktionsprozesse.

Bei der aeroben Umwandlung von Methan zu mikrobieller Biomasse werden PHA oder Proteine gebildet, die im Anschluss als Futtermittel Verwendung finden. Methan kann in aeroben Fermentationen mit methanotrophen Organismen zu mikrobieller Biomasse und PHA umgesetzt werden. Unter Stickstofflimitation wird intrazelluläres PHB- oder seltener C3-C6 PHA Granula mit einer Kettenlänge von C3-C11 synthetisiert.

Kohlenstoffdioxid kann durch acetogene Bakterien direkt in Acetat und geringe Mengen Alkohole mittels Gasfermentationen umgesetzt werden. Dafür ist allerdings eine (grüne) Wasserstoffquelle (H<sub>2</sub>) notwendig und Glucose dient als Co-Substrat. Das aus CO<sub>2</sub> entstandene Acetat kann wiederum als Substrat für Hefen oder Ustilaginaceae-Stämme dienen, die dann organische Säuren wie Malat beziehungsweise Itakonsäure oder natürliche Produkte (Triterpenoide, Methyl-

ketone) produzieren. Vielversprechend ist auch der Einsatz von Acetat und Ethanol als Co-Substrate zur Produktion von Rhamnolipiden beziehungsweise deren Vorstufen den Hydroxyfettsäureestern (HAAs) durch Pseudomonaden. Hierdurch kann die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Prozesses ins Negative gewandelt werden. Allerdings wird das Wachstum der Ausgangsstämme von hohen Konzentrationen der C2-Verbindungen beeinträchtigt. Das Interesse an Formiat und Methanol als Kohlenstoffquellen ist in letzter Zeit gestiegen, da sie durch (elektro-)chemische oder photochemische Reduktion aus CO<sub>2</sub> synthetisiert werden können. Der Formiatabbau über die NAD<sup>+</sup>-abhängige Formiatdehydrogenase (FDH) zu NADH ist in allen methylotrophen Mikroorganismen vorhanden. Methanol wird über eine Methanol-Dehydrogenase oxidiert und als Formaldehyd über stark regulierte C1-Abbaupfade (RuMP- beziehungsweise Serin-Weg) assimiliert.

### Metabolic Engineering

Am Institut für Angewandte Mikrobiologie werden mittels Metabolic Engineering Mikroben als integrierte Zellfabriken aufgebaut, die herausragende Katalyseeigenschaften (Titer, Rate, Ausbeute) garantieren. Dabei sind grundlegende und angewandte Aspekte des mikrobiellen Stoffwechsels im Fokus. Die Forschung an in silico/in vivo-Funktionsweisen von Stoffwechselnetzwerken soll ein tieferes Verständnis von Zellfunktionen ermöglichen und somit zur rationalen Stammentwicklung beitragen. Vielversprechende Produktionswirte (Bakterien, Hefen, Pilze) werden je nach Prozessanforderungen (pH, T, Medienforde-

rungen, Co-Substrate) durch die Optimierungsstrategie der adaptiven Laborevolution (ALE) weiter verbessert, um die (Co-)Substrataufnahme, -verwertung und Prozessparameter-toleranzen systemisch zu optimieren.

### Biopolymerprodukte:

#### PHA, Biotenside und Polyphosphat

Neben typischen Plattformmolekülen der Kreislaufwirtschaft wie organischen Säuren oder Aromaten rücken mikrobielle Biopolymere wie Tenside, PHAs und Polyphosphate in den Mittelpunkt des Interesses. Letztere sind das Äquivalent der für Pflanzen und Tiere typischen Vorratsstoffe Stärke, Glycogen beziehungsweise Fette, die diese für schlechte Zeiten anlegen. PHAs sind Bioplaste, deren Granula bis zu 80 Prozent der Masse von Bakterien ausmachen. Sie können als Mischpolymere unterschiedlichste Eigenschaften und Kettenlängen besitzen und zu biologisch abbaubaren Folien, Tüten oder Flaschen verarbeitet werden. Für Biotenside (Rhamnolipide, HAAs) gibt es eine Vielzahl von wirtschaftlich relevanten Anwendungsbereichen (Umweltschutz, Reinigungsmittel, Kunststoffindustrie) und sie sind am Markt etabliert. Der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* ist es möglich, Phosphat in Form von langkettigen Polymeren (Polyphosphate) zu akkumulieren. Die Weltressourcen in Form von Phosphatgestein sind zeitnah aufgebraucht, weshalb eine Transformation zu einer zirkulären Phosphat-Ökonomie durch Rückgewinnung und Wiederverwertung nötig wird. Am Institut für Angewandte Mikrobiologie wurde die Polyphosphatproduktion in Bäckerhefe durch spezielle Kultivierungsverfahren eta-

# SAURER.

## Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft

...

**... braucht die Textilindustrie Ideen und Talente.**

**Saurer unterstützt heute schon viele Kunden beim Spinnen von rezykliertem Material.**

**Moderne Technologien, Digitalisierung und Automatisierung sind Themen, die die Textilindustrie von morgen formen.**

**Sei dabei!**



**saurer.com**



bliert, welche zurzeit intensiviert und an einen industriellen Maßstab herangeführt werden. Produkte für die Kreislaufwirtschaft sind reines Polyphosphat und Polyphosphat angereichert in Hefeextrakt.

### Quellen

[1] PlasticsEurope, (2020), Plastics - the facts 2020, Messe Düsseldorf and PlasticsEurope Deutschland e.V., Düsseldorf

[2] Geyer, R, Jambeck, JR, Law KL (2017), Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci Adv. [https://doi.org/ 10.1126/sciadv.1700782](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782)

[3] Ballerstedt, H, Tiso, T, Wierckx, N, et al., (2021), MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities: EU Horizon 2020 project MIX-UP started January 2020, Environmental Sciences Europe 33:99. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00536-5>

### Autoren

Dr.rer.nat. Hendrik Ballerstedt ist Laborleiter am Lehrstuhl für Angewandte Mikrobiologie. Dr.-Ing. Philipp Demling, Melanie Filbig, M.Sc., und Lena Ullmann, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Lehrstuhl für Angewandte Mikrobiologie.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lars M. Blank ist Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Mikrobiologie und Leiter des Instituts für Angewandte Mikrobiologie.



# Phosphat-Recycling aus entölten Samen

Grünes Phosphat aus nachwachsenden Rohstoffen  
für eine gesunde Lebensmittelproduktion

Phosphorus is one of the most essential elements, which play a significant role in feeding humankind as fertilizers. Phosphorus has been defined a critical nutrient because it is exclusively gained by rock mining and we are lacking efficient recycling strategies. Our consumption exceed by far its regeneration rates leading to no significant concentrated reserves. So far, Germany has been 100% dependent on importing phosphorus from deposits outside of Europe and thus on a non-renewable fossil raw material source. However, there are numerous untapped phosphate-containing biomasses. As renewable raw materials, these have a high potential to serve as a sustainable P-source in a circular economy.

At the Chair of Biotechnology, headed by Prof. Schwaneberg, one research focus is the development of biocatalysts for the production of valuable compounds and healthy food from renewable raw resources. Dr. Ruff and Prof. Schwaneberg have developed a novel, integrated, and sustainable process for phosphate recycling from biomass using enzymes and scaled up the project. Protein engineering was used to develop tailor-made enzymes for phosphate recovery from deoiled seeds and bran which are side products in food production. By using engineered enzyme variants (phytases), the phosphate storage of the plant (phytate) in the seeds is hydrolyzed and the phosphate contained therein is recovered. Phosphate Products are used as food additives, feed supplements, and in material sciences. Thanks to biotechnological processes, which are environmentally friendly and, not tied to high energy costs or harmful chemicals, the phosphate cycle could be closed. Phosphorus recovery strategies such as the biotechnological valorization of food manufacturing side products like meals from oil seeds offer a solution to the previously missing sustainable concept for phosphate management in the bioeconomy.

Welche Gemeinsamkeit haben satte grüne Wiesen, Schmelzkäse und saftige Brühwurst? Phosphat! Ohne Phosphat würde einiges in unserem Alltagsleben nicht existieren oder eine andere Beschaffenheit haben. Phosphat ist als Dünger ein essenzieller Nährstoff in der Tier- und Pflanzenzucht und ein Additiv in zahlreichen Industrieprodukten. Phosphate werden für Flamm- und Korrosionsschutz oder im Straßenbau verwendet und sind Zusatzstoffe in Lebensmitteln, etwa als Schmelzsalze in der Käsezubereitung oder zur Konservierung in Wurstzubereitungen. Phosphate werden ausschließlich über Bergbau aus phosphorhaltigen Erzen gewonnen. Bislang importiert Deutschland zu 100 Prozent Phosphat von Lagerstätten außerhalb Europas und ist somit von einer nicht erneuerbaren fossilen Rohstoffquelle abhängig. Der Verbrauch übertrifft bei weitem die Regenerationsrate, die Reserven sind in 300 bis 500 Jahren aufgebraucht. Es gibt jedoch ungenutzte phosphathaltige Biomassen, diese haben als nachwachsende Rohstoffe ein hohes Potenzial als Quelle in einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Bisher erfolgt Phosphat-Rückgewinnung aus Abwasser für die Düngerproduktion. Allerdings sind noch keine Strategien implementiert, um Phosphate für die Lebensmittelindustrie aus nachwachsenden Rohstoffen zu recyceln.

### Biokatalysatoren für Nahrungsmittel

Am Lehrstuhl für Biotechnologie liegt ein Forschungsschwerpunkt in der Entwicklung von Biokatalysatoren aus nachwachsenden Rohstoffen für die Produktion von Wertstoffen und gesunden Nahrungsmitteln. In der Abteilung für Molekulare Bioökonomie wurde ein neuartiges, integriertes und nachhaltiges Verfahren für das Phosphat-Recycling aus Biomasse mittels Enzymen etabliert und skaliert.

Enzyme sind Proteine, die eine biochemische Reaktion katalysieren. Sie können Reaktionen beschleunigen, Stoffe umwandeln oder neue Stoffe generieren. Im letzten Jahrzehnt wurde „Protein Engineering“ ein Standardverfahren zur Entwicklung maßgeschneiderter Enzyme in Wissenschaft und Industrie.

Enzyme werden durch Protein Engineering an nicht natürliche Bedingungen angepasst und so zu leistungsstarken Helfern. Diese Möglichkeiten werden in der Pharma- und chemischen Industrie, im Agrobusiness und dem beschriebenen Prozess des Phosphat-Recyclings genutzt. Genetische Veränderungen können gezielt durch Proteindesign oder zufällig durch evolutives Design in iterativen Runden eingebracht werden. Für ihre Pionierarbeiten der Gelenkten Evolution wurden Frances H. Arnold, George P. Smith und Sir Gregory P. Winter mit dem Nobelpreis für Chemie 2018 ausgezeichnet.

Anhand der enzymatischen Phosphat-Extraktion aus Rapspresskuchen konnte am Lehrstuhl für Biotechnologie die Bio-Phosphat-Herstellung aus erneuerbaren Ressourcen und das Potenzial der Technologie gezeigt werden. Mittels Protein Engineering wurden Enzyme für den Prozess der Phosphat-Rückgewinnung aus entölten Samen und Kleien entwickelt. Durch die Enzymvarianten (Phytasen) wird der in den Samen vorliegende Phosphat-Speicherstoff der Pflanze (Phytat) gespalten und das enthaltene Phosphat für weitere Anwendungen gewonnen. Entölte Samen, auch Pflanzenschrot genannt, entstehen als Nebenprodukte bei der Ölherstellung. Sie haben einen unerwünschten hohen Gehalt an Phytat. Gleiches gilt für Kleien, die ein Nebenprodukt der Mehlerstellung sind. Phytasen sind sehr stabile, hoch aktive, industriell unverzichtbare Enzyme der Tierfutterindustrie, die spezifisch den Phosphat-Speicherstoff spalten. Die entwickelten Phytasen wurden in Hefen exprimiert und in gelenkten Evolutionsrunden in ihrer Effizienz und spezifischen Aktivität optimiert.

### Abfall und Nebenprodukte für das Phosphat-Recycling nutzen

Die Technologie ist nicht auf Rapsschrot begrenzt, sondern wurde für weitere Ölsamen und Früchte – etwa Soja, Sonnenblume, Senf, Sesam oder Haselnuss – sowie Kleien von Reis, Roggen oder Weizen optimiert, die in der Lebensmittelherstellung verwendet werden. In Zukunft können zahlreiche phytathaltige Biomassen, die lokal als Abfall oder Nebenprodukt anfallen, für das Phosphat-Recycling verwendet werden. Neue Wertschöpfungsketten entstehen und verknüpfen produzierende Industrien.

Die Europäische Union definierte Phosphor – chemisches Element im Phosphat – als kritisches Element. Im Deutschen Ressourcen-effizienzprogramm ist Phosphor Beispiel für einen relevanten Stoffstrom, eine nachhaltige Nutzung und der Schutz natürlicher Ressourcen wird angestrebt. Im Zuge der Verantwortung für ökologische und soziale Ressourcennutzung sowie einer Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen ist eine Entwicklung von Schlüsselkompetenzen im effizienten Umgang mit Ressourcen wichtig.

Phosphate in der Landwirtschaft haben einen großen Umwelteinfluss. Über die Gülle akkumulieren die von Masttieren nicht verdauten Phosphate auf den Feldern und sättigen die Böden mit Phytat, das wiederum auch für die Pflanzen keine bioverfügbare Phosphat-Form ist. Die Schließung des Phosphat-Kreislaufs würde maßgeblich zu einer zirkulären Bioökonomie beitragen. Werden die Phytate vor der Fütterung oder bevor sie in die Umwelt gelangen abgebaut, ist nicht nur die Last auf das Ökosystem reduziert. Vielmehr entsteht zusätzlich eine nachhaltige Quelle für die Phosphat-Rückgewinnung sowie neue Wertschöpfungsketten. Das Phosphat-Recycling aus Stoffnebenströmen hat eine positive Auswirkung auf die Tierernährung: Der nicht erwünschte Phytat-Gehalt im Tierfutter wäre gesenkt, es würde weniger nicht verdautes Phytat ausgeschieden und zusätzlich stände das zurückgewonnene Phosphat für die Produktion von Lebensmittelzusatzstoffen oder Dünger zur Verfügung. Hochwertige Produkte wie Polyphosphate können in einer Biotransformation mit Mikroorganismen anhand der Phosphate aus den nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Solch ein Prozess mittels Hefen wurde mit dem Institut für Angewandte Mikrobiologie entwickelt und die Anwendung der Polyphosphate in der Brühwurst untersucht. Die Schließung des Phosphat-Kreislaufs ist dank biotechnologi-

scher Prozesse realisierbar. Sie sind umweltfreundlich, nicht an hohe Energiekosten oder schädliche Chemikalien gebunden.

Die vorgestellte enzymatische Phosphat-Rückgewinnung aus Ölpesskuchen ist der erste Ansatz der Phosphat-Herstellung aus nachwachsenden Rohstoffen. Sie bietet eine Lösung zu dem bisher fehlenden Nachhaltigkeitskonzept für das Phosphat-Management in der Bioökonomie. Phosphat-Recyclingverfahren aus Abwasser oder Klärschlamm stellen eine Alternative mit hohem Potenzial für die Anwendung in Dünger dar. Diese Phosphate werden jedoch aus ethischen Vorbehalten und Marketinggründen nicht in der Tierfutter- und Lebensmittelherstellung eingesetzt. Die Bio-Phosphate aus nachwachsenden Rohstoffen können für die Lebensmittelherstellung verwendet werden, da die Phosphate aus Nebenprodukten dieser stammen.

Das Anwendungspotenzial des Bio-Phosphats erstreckt sich, ebenso wie das des Phosphats aus Erzen, über alle Anwendungsfelder und kann langfristig das aus Erzen gewonnene Phosphat ablösen. Zieht man als Rohstoff die in Deutschland verarbeiteten Rapsamen heran, könnten potenziell bis zu 30 Prozent des Phosphat-Mineral-Düngebedarfs gedeckt werden. Die Bio-Phosphat-Herstellung anhand der maßgeschneiderten Enzyme in der entwickelten Phosphat-Rückgewinnungstechnologie leistet somit einen signifikanten Beitrag zu einer autarken Lebensmittelherstellung in Europa, zur Phosphat-Kreislaufwirtschaft und zum effizienten Umgang mit der Ressource Phosphat.

---

### Autoren

Dr. Anna Joëlle Ruff ist Abteilungsleiterin für Molekulare Bioökonomie am Lehrstuhl für Biotechnologie.

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Ulrich Schwaneberg ist Inhaber des Lehrstuhls für Biotechnologie.

---



# Der Biokunststoff Polylactid hat Potenzial für Zirkularität

Funktionelle und umweltfreundliche Materialien sind möglich

Innovative plastics are needed to enable a truly circular material flow. Polylactide (PLA) is a high potential bioplastic suitable for the biological as well as the technical cycle. The group of Prof. Dr. Sonja Herres-Pawlis works on efficient biocompatible catalysts for the production and recycling of PLA.

Kunststoffe haben in den letzten 100 Jahren einen signifikanten Wandel in Bezug auf ihre öffentliche Wahrnehmung durchlebt: vom gefeierten Material, dass überall eingesetzt wird, hin zu einem weltweiten Umweltproblem und einer Bedrohung für eine Reihe von Ökosystemen. Während die Politik Regelungen setzt, wie beispielsweise mit Einwegartikeln aus Kunststoff umzugehen ist, und Umweltorganisationen sich bemühen, den bereits entstandenen Schaden durch Sammelaktionen zu begrenzen, kommt der Wissenschaft die Rolle zu, kreislauffähige Materialien für die Zukunft zu entwickeln.

Neben verbesserten Systemen für das Recycling von traditionellen Kunststoffen, die typischerweise erdölbasiert und nicht biologisch abbaubar sind, bekommen Biokunststoffe viel Aufmerksamkeit. Biokunststoffe umfassen sowohl Materialien, die eine nachwachsende Rohstoffquelle haben als auch solche, die biologisch abbaubar sind. Allein durch Erfüllen einer dieser beiden Aspekte liegt aber keinesfalls eine Qualifizierung für eine sinnvolle Kreislaufführung vor. Entweder wird ein geeignetes Recyclingsystem benötigt, um das Material in einem technischen Kreislauf zu führen oder Bioabbaubarkeit muss gegeben sein, damit ein Biokunststoff mit einer nach-

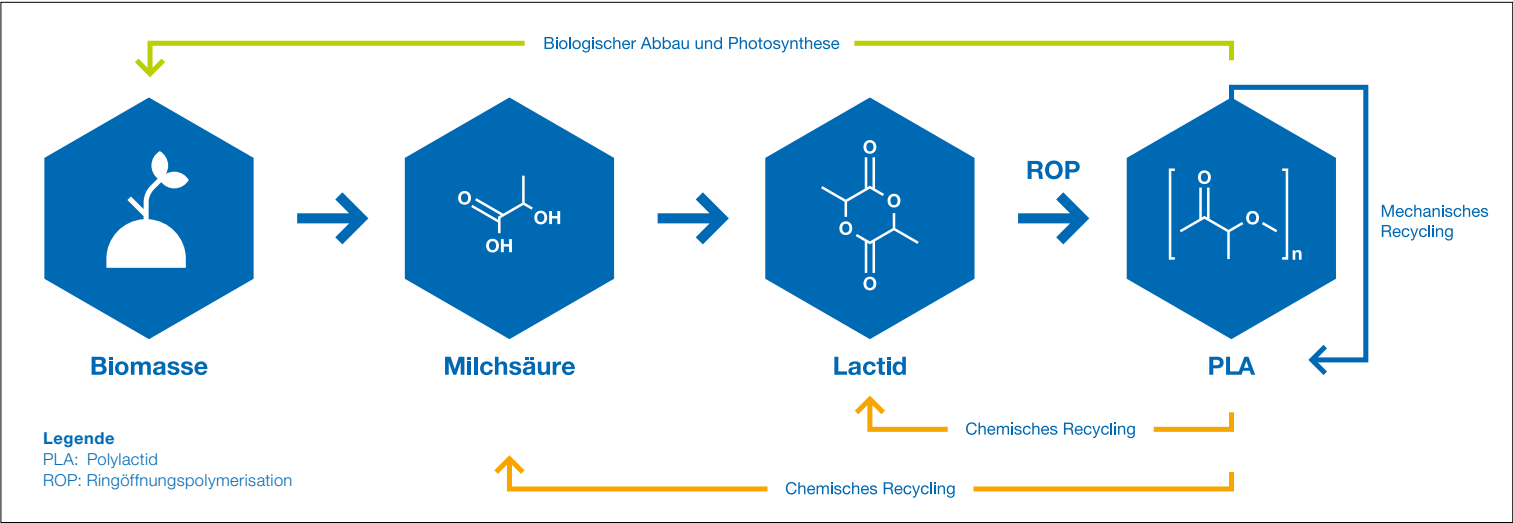


Bild 1: End-of-life-Optionen von Polylactid

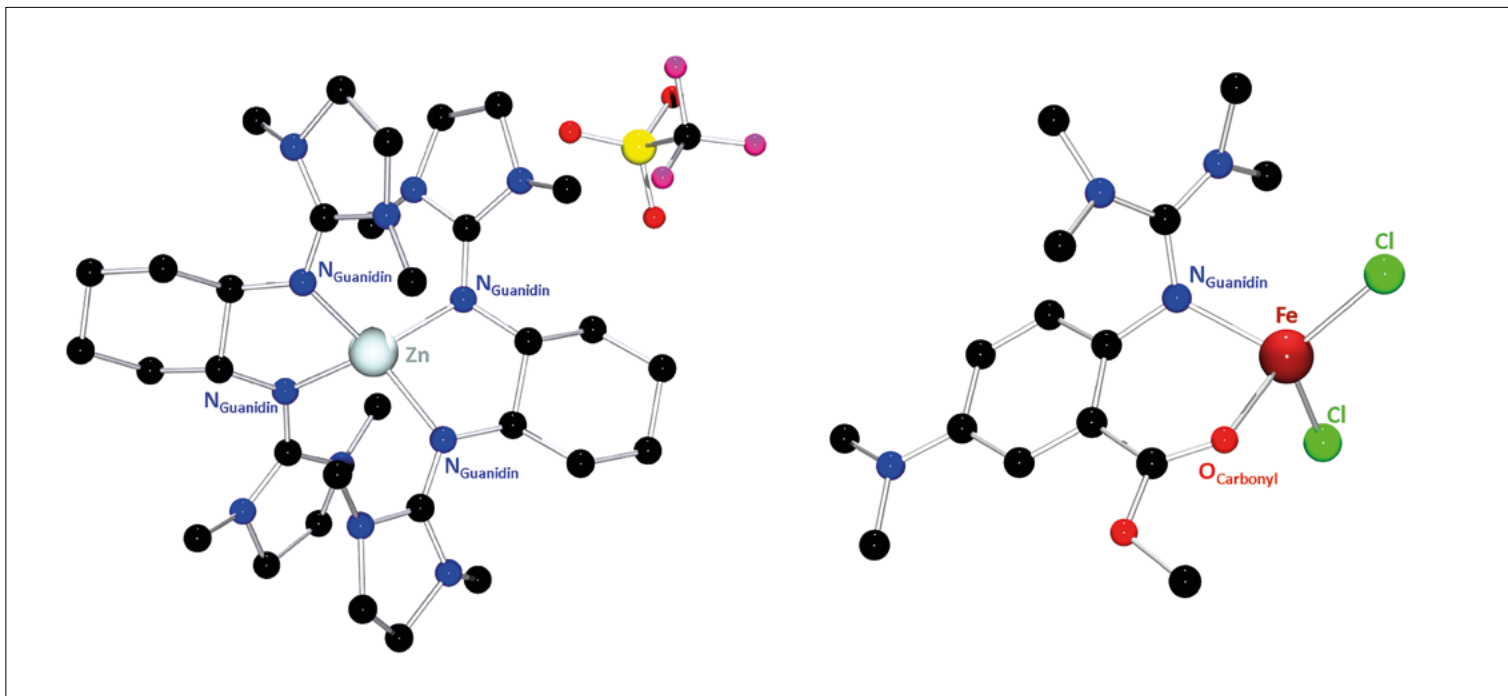


Bild 2: Erfolgreiche Zink- (links) und Eisenguanidin-Komplexe (rechts)

wachsenden Quelle in einem biologischen Kreislauf geführt werden kann. Polylactid, kurz PLA, ist einer der populärsten Biokunststoffe, der sowohl biobasiert als auch biologisch abbaubar ist. Seine Rohstoffquelle ist stärkehaltige Biomasse, die sich fermentativ mit Milchsäure als Zwischenprodukt zu Lactid umwandeln lässt. Lactid wiederum ist der Baustein (das Monomer), der zu langen Ketten verknüpft das Polymer PLA ergibt. PLA wird industriell hergestellt und findet Anwendung als Verpackungsmaterial, in Einwegprodukten oder im medizinischen Bereich. Ein weiterer Vorteil von PLA sind die vielfältigen End-of-life-Optionen, denn neben biologischem Abbau lässt sich PLA mechanisch und mittlerweile auch chemisch recyceln. Im Vergleich der Lebenszyklusanalysen mit den verschiedenen End-of-life-Optionen schneidet der biologische Abbau am schlechtesten ab, da es energetisch wenig sinnvoll ist, ein Produkt in seine kleinsten Bausteine  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  zu zersetzen, um es dann wieder neu aufzubauen. Beim mechanischen Recyceln, welches zwar energetisch am günstigsten ist, bleibt teilweise die Qualität des Kunststoffs nicht erhalten. Mit dem chemischen Recycling lassen sich künftig Kunststoffe durch chemische Reaktionen in kleinere Moleküle zerlegen. Im optimalen Fall sind diese Moleküle direkt die Monomere, welche erneut zu einer Kette polymerisiert werden und somit ein Material entsteht, das die Eigenschaften eines neu hergestellten Kunststoffs besitzt. Im Fall von PLA kann das Monomer Lactid

durch thermische Verfahren direkt gewonnen werden. Diese Verfahren sind jedoch sehr energieaufwändig. Durch Hydrolyse, also durch die Reaktion von PLA mit Wasser, lässt sich das Material zu Milchsäure umwandeln, Vorstufe des Monomers für PLA. Hierfür sind meist stark saure oder basische Prozessbedingungen notwendig, durch die Umweltbelastungen möglich sind, die es im Sinne der Nachhaltigkeit zu vermeiden gilt. Aktuell vielversprechend ist das chemische Recyceln von PLA mit Alkoholen. Produkte sind dann verschiedene „grüne“ Lösungsmittel, die optional zum Monomer für PLA weiterverarbeitet werden. Durch den Einsatz geeigneter Katalysatoren ist diese so genannte Alkoholyse ressourcenschonend unter milden Prozessbedingungen möglich. PLA besitzt also die Eigenschaft, über mechanisches oder chemisches Recycling sowohl in einem technischen Kreislauf geführt zu werden als auch über seine biologische Abbaubarkeit in einem biologischen Kreislauf. Da unabhängig von der Güte des technischen Recyclingkreislaufes damit zu rechnen ist, dass ein gewisser Prozentsatz in die Umwelt gelangt, wäre es gut, wenn langfristig keine persistenten Materialien wie die traditionellen Kunststoffe verwendet werden. Vielmehr sollten Materialien bevorzugt werden, die notfalls biologisch abbaubar sind. Da PLA dieses Kriterium erfüllt, hat es vielversprechende Zukunftsaussichten und bereits seit Jahren Wachstumsraten im zweistelligen Bereich.

Trotz der positiven Aspekte von PLA muss auch bei diesem mit „Bio“ bezeichnetem Produkt genau hingeschaut werden, um seine Nachhaltigkeit einzuschätzen. So zeigen sich einige Herausforderungen, die noch nicht dem Standard wahrer Nachhaltigkeit entsprechen. Zum einen wird für die industrielle Herstellung von PLA ein giftiger Schwermetallkatalysator verwendet, der im Anschluss im Material verbleibt und potenziell am Ort des Abbaus mit negativen Folgen für die Umwelt freigesetzt wird. Insbesondere in Anbetracht der erwarteten Produktionssteigerung ist die Verwendung eines biokompatiblen Katalysators essenziell, damit der Vorteil des biologischen Abbaus ohne Bedenken weiter genutzt werden kann. Zum anderen zeigen Studien, dass PLA sich zwar unter industriellen Kompostbedingungen entsprechend der Norm für biologische Abbaubarkeit zersetzt, im heimischen Kompost, im Waldboden und insbesondere in Meerwasser jedoch deutlich länger bestehen bleibt. Erhöhte Abbaugeschwindigkeiten für nicht-optimale Bedingungen wären ebenso wie maßgeschneiderte Eigenschaften für spezielle Anwendungen wünschenswert. Schlussendlich bedarf es auch beim chemischen Recycling, insbesondere der vielversprechenden Alkoholyse, weiterer Forschung, um diese Prozesse industriell konkurrenzfähig zu machen und ein effizientes Recycling des Kunststoffs zurück zum Monomer zu gewährleisten. Seit einigen Jahren wird am Lehrstuhl für Bioanorganische Chemie an einem biokom-



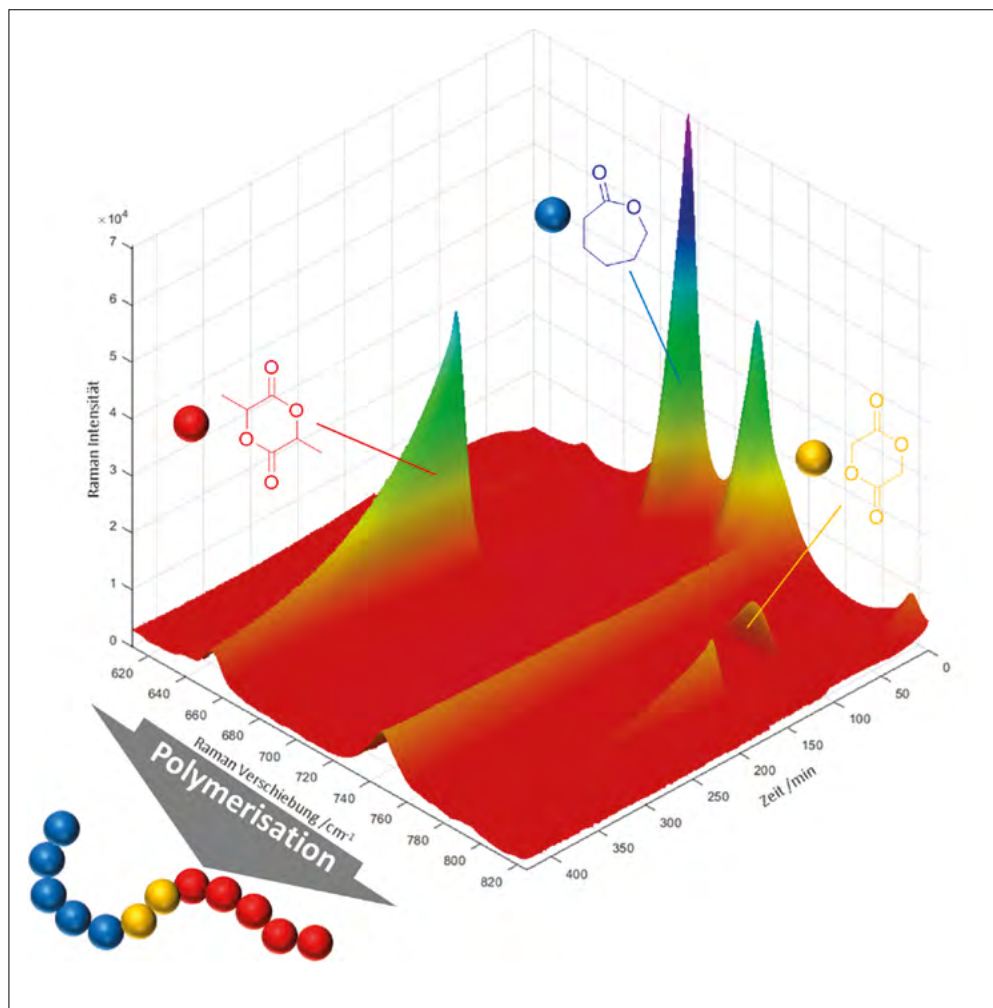


Bild 3: Verlauf einer Polymerisation von verschiedenen Monomeren zu Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften

patiblen Katalysator geforscht, der mit der Aktivität der für die Herstellung verwendeten Schwermetallverbindung unter industriell relevanten Bedingungen mithalten kann. Viele biokompatible Katalysatoren sind bereits bekannt, jedoch sind die meisten nur für Polymerisationen unter hoch reinen Laborbedingungen oder unter Einsatz von Lösungsmitteln aktiv. Ein Katalysator für industrielle Reaktoren sollte luftstabil sein, Verunreinigungen im Lactid wie Wasser oder Milchsäure tolerieren und eine lösungsmittelfreie Polymerisation oberhalb der Schmelztemperatur von Lactid durchführen. Um die benötigte Stabilität des Katalysators zu erreichen, bedarf es eines neutralen Ligandens, der dennoch das zentrale Metallatom stark koordiniert. Guanidine erfüllen beide Kriterien und haben in den vergangenen Jahren mit Zink oder Eisen als Metallatome vielversprechende Ergebnisse geliefert. Durch den modularen Aufbau von Guanidinliganden ist eine Vielzahl von Strukturvariationen zugänglich, die in Kombination

mit den verschiedenen Metallen hinsichtlich ihrer Polymerisationsaktivität untersucht wurden. 2019 gelang der Durchbruch: Ein Eisenkatalysator zeigte unter industriell relevanten Bedingungen eine höhere Aktivität als die Schwermetallverbindung. Es war das erste Mal, dass ein biokompatibler Katalysator PLA schneller herstellen konnte als der etablierte Komplex. Nur ein Jahr später konnte ein Zink-Komplex präsentiert werden, der eine vielfach höhere Aktivität zeigte. Damit entwickelte der Lehrstuhl gleich zwei geeignete Kandidaten als potenziellen Ersatz für den giftigen Schwermetallkatalysator. Die Evaluierung von industrieller Seite dauert noch an. Der Eisenguanidin-Komplex zeigt neben seiner hohen Polymerisationsaktivität für Lactid noch weitere erstaunliche Eigenschaften: Er kann verschiedene Co-Monomere mit Lactid verknüpfen und darüber die Eigenschaften des Kunststoffs steuern. Neben der mäßigen Bioabbaubarkeit von PLA ist es recht spröde und deswegen nicht für Anwendungen ge-

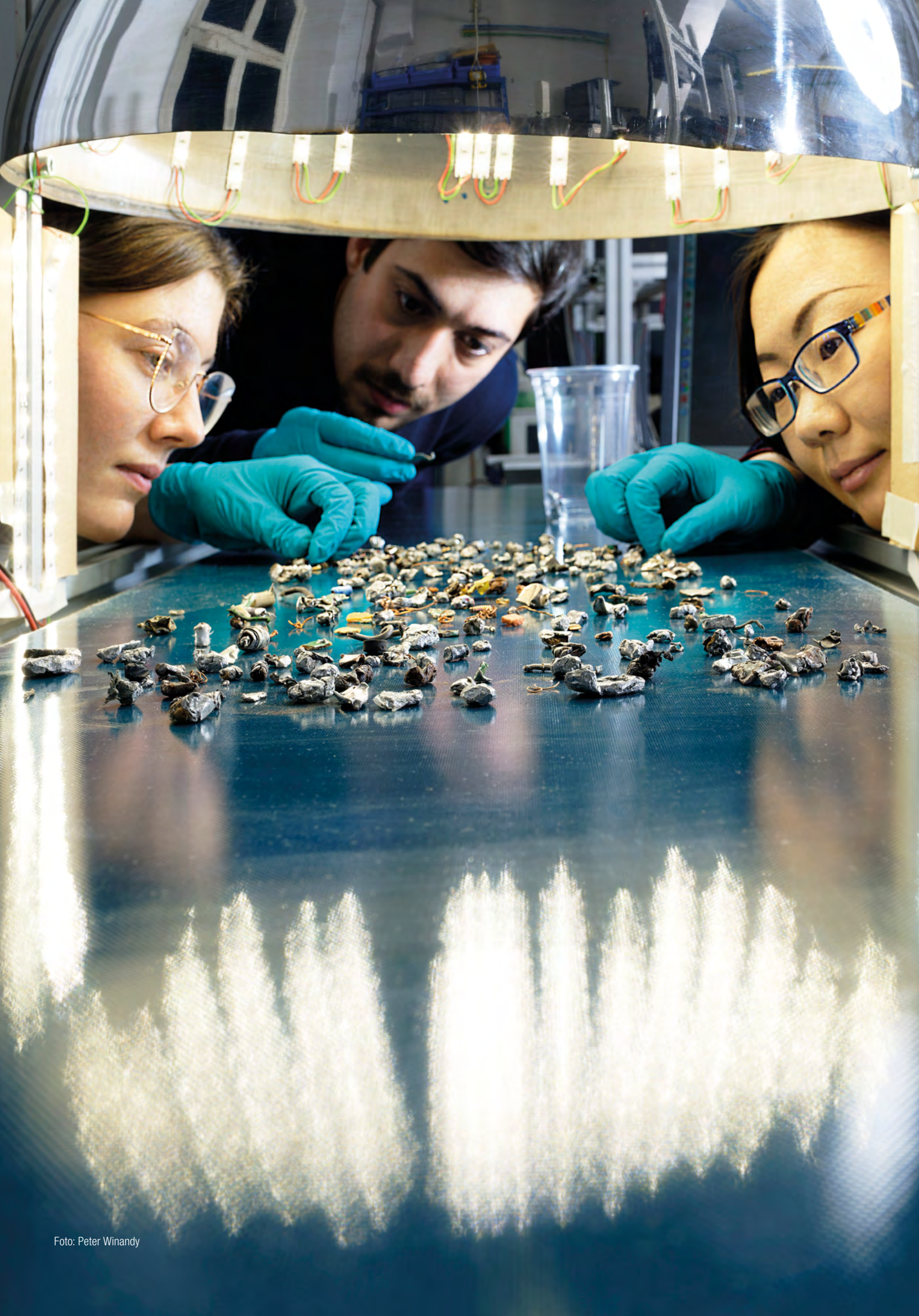
eignet, die ein flexibles Material benötigen. Kombiniert man Lactid nun mit  $\epsilon$ -Caprolacton und Glycolid können diese Eigenschaften genau eingestellt werden. Neben den Anteilen der einzelnen Monomere im Material ist auch ihre Anordnung höchst relevant. Liegen die Monomere zufällig verteilt in der Polymerkette vor, resultiert bei gleichen Monomeranteilen ein deutlich weiches Material als wenn die Monomere sortiert nach Art in Blöcken im Polymer zu finden sind. Der Eisenguanidin-Komplex besitzt die Flexibilität, beide sogenannten Mikrostrukturen herzustellen in Abhängigkeit von der gewählten Reaktionstemperatur, was ein Novum ist. Üblicherweise wird pro Mikrostruktur ein optimierter Katalysator benötigt. Durch diese Flexibilität des Katalysators wird die einfache Synthese von Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften erleichtert. Eisenguanidin-Komplexe zeigen darüber hinaus Aktivitäten in verschiedenen Polymerisationsmechanismen, wodurch sich Monomere kombinieren lassen, die üblicherweise zwei verschiedene Katalysatoren benötigen würden. Auch hier wird die Herstellung von komplexen Polymerarchitekturen deutlich vereinfacht. Eisenguanidin-Komplexe sind also Multitalente was ihre Polymerisationsaktivität angeht.

In ersten Tests konnte bereits für Zink- als auch Eisenkatalysatoren eine vielversprechende Aktivität in der Alkoholyse von PLA nachgewiesen werden. Das Zielprodukt Methyllactat entsteht in hoher Ausbeute und Reinheit. Die Katalysatoren ermöglichen also nicht nur die umweltfreundliche Herstellung von PLA, sondern ebnen mit ihrer Fähigkeit, PLA am Ende seiner Lebenszeit chemisch zu recyceln, auch den Weg zu einer effizienten Kreislaufführung von PLA.

## Autoren

Martin Fuchs und Dr.rer.nat. Ruth D. Rittinghaus sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Lehrstuhl für Bioanorganische Chemie. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Sonja Herres-Pawlis ist Inhaberin des Lehrstuhls für Bioanorganische Chemie.







# Wege zum wirkungsvollen Einsatz von Kunststoffrecyklaten

Durchgehender Datenaustausch und tiefgehende Analyse als Voraussetzungen für einen ökologisch sinnvollen Rezyklateinsatz

Although the use of plastics often conserves resources, it is nevertheless associated with ecological disadvantages. The potential for ecological improvement through the use of recycled plastics depends to a large extent on the previous history of plastics. However, this history often cannot be considered in a life cycle analysis due to a lack of continuous data collection. Additionally, it is often unclear exactly how the manufacturing process interacts with the numerous different contaminants in the recycled plastic and how optical defects in the plastic product develop as a result.

Only by combining a data exchange along the entire value chain (which is made possible by a cooperation model) with analyses of the recyclates and their processing does a comprehensive approach become possible. This then allows optimization for the best possible holistic ecological effectiveness.

Kunststoffe sind in Vergleich mit anderen Werkstoffen meist die ressourcenschonende Alternative. Sie sparen schon beim Transport Gewicht ein – sei es als Verpackung eines Joghurts oder als Teil eines Armaturenbretts – und senken so den Kraftstoffverbrauch. Auch verbessert eine Kunststoffverpackung von Käse deutlich die Haltbarkeit der Ware und beugt so Lebensmittelverschwendung durch Verderben vor. Dennoch führen die linearen „Lebensläufe“ der Kunststoffe entlang der Kette „Produktion – Nutzung – Entsorgung“ zu erheblichen ökologischen Nachteilen. Diese sind auf Schadstoffemissionen während der Produktion, Logistik, und Entsorgung beziehungsweise Verwertung zurückzuführen.

Allerdings macht sich hier ein Umdenken bemerkbar: Die europäische Verpackungsrichtlinie fordert eine Recyclingquote von 50 Prozent im Jahr 2025, für Deutschland sieht das Verpackungsgesetz für das Jahr 2022 eine Quote von 63 Prozent vor. Eine

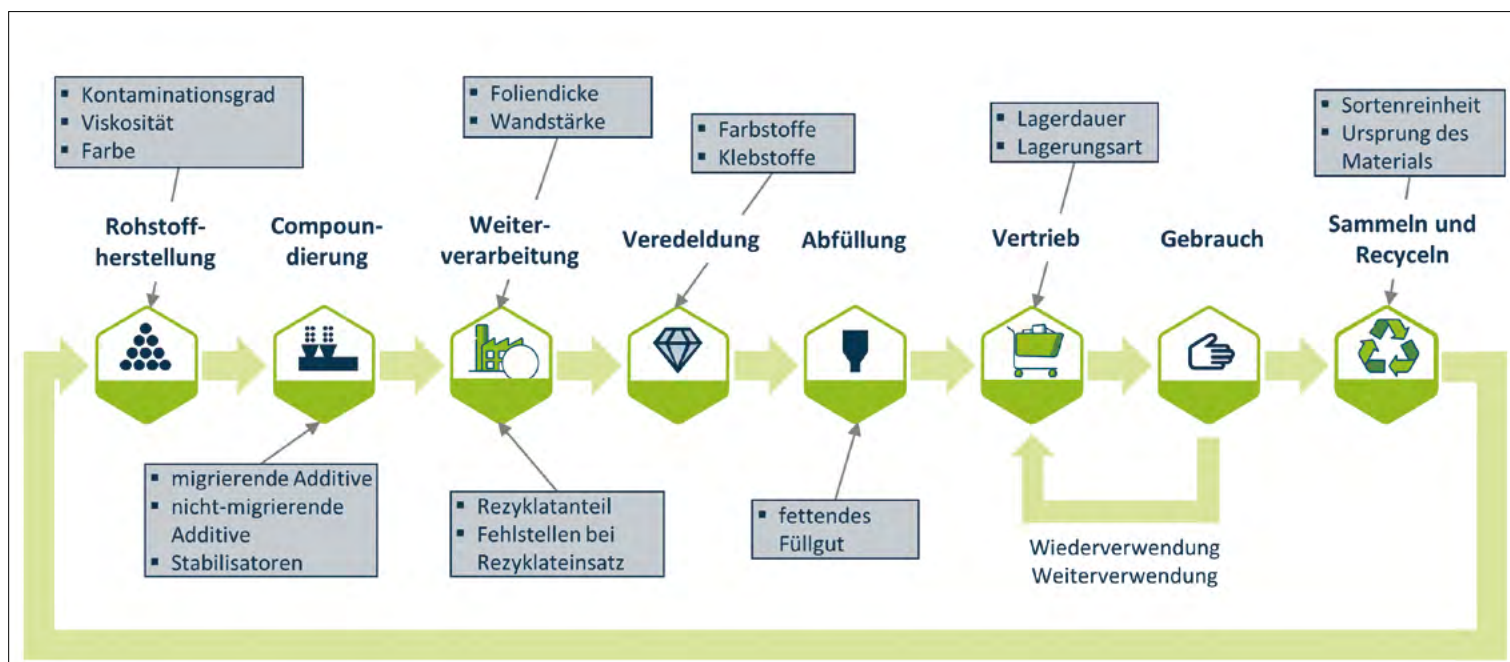


Bild 1: Exemplarische Prozess- und Wertschöpfungskette einer Kunststoffverpackung  
 Quelle: Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen

Erhöhung der Recyclingquote bedeutet jedoch nicht, dass Ressourcen gespart werden oder die Umwelt geschont wird. Zur Abschätzung der Umweltwirkungen muss eine Vielzahl von Energie- und Stoffströmen zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst werden. Dies erfolgt in einer Ökobilanz oder dem Life Cycle Assessment, kurz LCA. In diese Analyse fließen unter anderem die Emissionen von Treibhausgasen und weitere Umweltwirkungen wie die Eutrophierung oder die Humantoxizität ein. Die Emissionen aus Treibhausgasen werden durch Äquivalente von je einem Kilogramm CO<sub>2</sub> als Indikatoren des Einflusses auf die globale Erwärmung beschrieben. Mit der Festlegung des Designs des Kunststoffprodukts, der Herstellung, Weiterverarbeitung sowie der Prozesse zur Verwertung werden die Energie- und Stoffbedarfe einer Produktion (auch durch die Transportwege und Recyclingmethoden) vorbestimmt. So kann die ökologische Wirkung der Kreislauf-

führung eines Kunststoffprodukts je nach Transport-, Energie-, Sortier- und Materialaufwand deutlich unterschiedlich ausfallen. Ein ökologisch (und ökonomisch) erfolgreicher Einsatz von rezyklierten Kunststoffen in einer Kreislaufwirtschaft stellt folglich Anforderungen an das Produktdesign, die Produktionsplanung und die Prozessentwicklung. Im Verpackungsbereich werden die größten Kunststoffmengen verarbeitet. Gegenüber langlebigen Produkten aus dem Bau- und Automobilsektor haben Verpackungen wie der Joghurtbecher eine Nutzungsdauer von nur wenigen Tagen oder Wochen. Die produzierten Mengen und damit auch das Abfallaufkommen sind zudem besonders hoch. Unternehmen spezialisieren sich häufig nur auf einzelne Teilschritte und können damit lediglich einen kleinen Teil der Wertschöpfungskette beeinflussen, siehe Bild 1. So ist bei einem Joghurtbecher nicht unrealistisch, dass dieser auf dem Weg vom Rohöl bis zum Recyclingbetrieb ein Dutzend Unter-

nehmen „durchläuft“. Welche Unternehmen dies sind, variiert. Auch gehen Verbraucherinnen und Verbraucher unterschiedlich mit dem Becher um, nicht alle trennen die Aluminiumfolie des Deckels ab und spülen den Becher aus. Entsprechend stark kann die Qualität von Sekundärrohstoffen schwanken, die ein Hersteller von Produkten aus Kunststoffrezyklaten vorfindet. Nahezu alle vorgeschalteten Prozesse, aber auch die Abfallsortierung und -reinigung haben Einfluss auf die Rezyklatqualität. Steigt zum Beispiel der Grad an Verschmutzung im Sekundärrohstoff stark an, gibt es Defekte auf der Produktoberfläche, die nicht akzeptiert werden. Auch die Verringerung der mechanischen Leistungsfähigkeit der Kunststoffe durch die Degradation der polymeren Strukturen beeinträchtigt die Nutzung und Wiederaufbereitung sowie die späteren Produkteigenschaften. Intensivere Aufreinigung und vermehrte Zugabe von Neuware bieten zwar theoretisch



Abhilfe, wirken sich aber negativ auf die Ökobilanz aus. Über den ökologisch (und ökonomisch) erfolgreichen Einsatz von Kunststoffrezyklaten entscheiden also alle Prozessschritte der Kette „Produktion – Nutzung – Entsorgung – Rückführung – Wiederverwertung“ mit.

Infolge der vielen Wechselwirkungen zwischen diesen Prozessschritten, an der Unternehmen unterschiedlicher Struktur, Kompetenz und Größe beteiligt sind, ist eine Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit ohne ein Kooperationsnetzwerk nicht möglich. In diesem müssen Daten, Informationen und Wissen geteilt werden und digital verfügbar sein. Nur so können Einflüsse von Änderungen im Material, Produktdesign und Herstellungsprozess auf die ökologische Bewertung der gesamten Kunststoff-Wertschöpfungskette quantifiziert werden.

Zur Etablierung eines Kooperationsnetzwerks und technischen Umsetzung eines (teil-) automatisierten Datenaustauschs müssen drei Kernaspekte betrachtet werden, um der Skepsis im Bereich Datenhandel zu begegnen:

- Das Erheben der Daten und das Teilen ausgewählter Daten und Informationen für Anwendungsfälle muss sichergestellt sein. Dabei muss der Verlust von geistigem Eigentum oder Einblicke in die Unternehmensabläufe verhindert werden.

- Die Datenformate und Inhalte inklusive der Definition flexibler Schnittstellen müssen angeglichen werden, so können ohne großen Mehraufwand möglichst viele Anlagen und Systeme integriert werden.
- Die Teilnahme am Kooperationsnetzwerk „muss sich lohnen“: Diejenigen, die Daten zur Verfügung stellen, sollten an den „Früchten“ der datengetriebenen Optimierung beteiligt werden.

Die Entwicklung und Umsetzung eines solchen Ansatzes erfordert ein breites Projektkonsortium mit allen Akteuren der Kunststoffindustrie.

Ziel des Leuchtturmprojektes „PlasticBOND“ – gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung – ist die ökologische Optimierung von Kunststoffverpackungen mit digitalen Methoden. Hierzu werden anhand eines Demonstratorproduktes mit zahlreichen Forschungs- und Industriepartnern relevante Stoff- und Energieflüsse identifiziert und ein allgemeines Beschreibungsmodell zur Bewertung von Kunststoffverpackungen erstellt. Parallel werden Kooperationsmodelle entwickelt, welche Produkt- und Prozesseigenschaften auf jeder Stufe des Lebenszyklus berücksichtigen und diese als Informationen bereitstellen. In diesem Zusammenhang sind Datenplattformen von Bedeutung, um den allgemeinen Informationsaustausch zu steigern, Wertstoffströme nachzuverfolgen und

Nachhaltigkeitsdaten über Rohstoffe beziehungsweise Produkte zu hinterlegen.

Flankierend werden der Einsatz unterschiedlicher Rezyklatqualitäten und variierender Rezyklatanteile auf Verarbeitungsprozesse und deren Einfluss auf die Prozessführung untersucht. Hierbei werden umfangreiche mikroskopische, spektroskopische, rheologische und thermodynamische sowie mechanische Analysen zur Sammlung von Erkenntnissen über die Eigenschaftsprofile durchgeführt. Den Schwerpunkt bilden Untersuchungen zum Einfluss von Degradation und Verunreinigungen sowie die dadurch beeinflussten mechanischen Eigenschaften des Endproduktes.

Erst durch das Zusammenspiel eines Datenaustauschs entlang der ganzen Wertschöpfungskette mit Analysen der Rezyklate und ihrer Verarbeitung wird ein umfassender Ansatz möglich. Dieser erlaubt dann eine Optimierung auf eine ganzheitliche ökologische Wirksamkeit. Hierzu werden zwei Ziele verfolgt:

- Es wird ein Bewertungsmodell entwickelt, mit dem die Ökobilanz von (rezyklierten) Kunststofferzeugnissen sowohl für Prozessbeteiligte als auch für Konsumenten transparent wird. Diese Ökobilanz erlaubt es, Informationen aus dem Kooperationsnetzwerk frühzeitig mit in das Produktde-

sign und die Prozessauslegung einzubeziehen. Auch unterstützt sie Konsumenten bei einer fundierten Kaufentscheidung.

- Die Auswirkungen unterschiedlicher Rezyklatqualitäten und variierender -anteile auf Verarbeitungsprozesse wird untersucht. So sollen Anwendungsbereiche identifiziert und erweitert werden. Durch manipulationsgeschützte, nachvollziehbare und rückverfolgbare Datensätze wird gewährleistet, dass Kunststoffrezyklat so eingesetzt wird, dass die bestmögliche ökologische Wirkung erzielt wird.

Perspektivisch werden Kooperationsnetzwerke aufgebaut, die die Barrieren für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten durchbrechen. Sobald diese Netzwerke eine durchgehende Ökobilanzierbarkeit sowie ein Verständnis der visuellen Defekte und der schlechten mechanischen Leistungsfähigkeit von Rezyklaten erreicht haben, ist zu erwarten, dass die Nutzung von Rezyklaten mehr und mehr in der ökonomisch getriebenen Realität der Märkte ankommt. Der Joghurtbecher der Zukunft wird vermutlich weiterhin aus Kunststoff hergestellt – aber aus einem Kunststoff, der ein Teil einer Kreislaufwirtschaft ist.

---

## Autoren

Elena Berg, M.Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

Prof. Dr.rer.nat. Rainer Dahlmann ist außerplanmäßiger Professor am Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung und wissenschaftlicher Direktor Kreislaufwirtschaft am Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

Malte Schön, M.Sc., ist Leiter der Abteilung Extrusion und Kautschuktechnologie am Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

---



# Wie lange leben Batterien?

## Zustandsbewertung und Lebensdauerprognose

Battery storage systems are an important part of achieving climate goals and will show strong market growth in the coming years. The largest markets in this context are electromobility followed by stationary battery storage. Considering the large production volumes, it is of high importance to use raw materials as resource-efficiently as possible in combination with long operating life and efficient recycling within the framework of the circular economy. This article focuses on condition assessments and lifetime predictions of batteries during operation. With the help of these assessments, informed decisions can be made about the further use of batteries. After its first life, the battery can be remanufactured and still be used in a second life application prior to recycling. However, battery aging introduces a certain complexity that needs to be solved with the help of data-based algorithms.

Batterien sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Dabei sind sie längst in viel mehr Bereichen als der allgegenwärtigen Kommunikations- und Unterhaltungselektronik vertreten: Neben unseren Handys und Notebooks speichern wir mittlerweile Solarenergie in külschrankgroßen Batterien im Keller und sehen immer mehr Elektrofahrzeuge auf den Straßen. Abseits dieser sichtbaren Anwendungsgebiete werden Batterien auch zur Stützung des gesamten europäischen Energiesystems verwendet und balancieren in jeder Sekunde das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch. Zunächst freuen wir uns über lange Akkulaufzeiten des neuen Handys, aber mit der Zeit müssen wir immer öfter nachladen und irgendwann reicht die Laufzeit nicht mehr für den Alltag. Dies wird nach einigen Betriebsjahren auch mit den Elektrofahrzeugen passieren. Doch woran liegt dieses Phänomen und welche Rolle spielt es in der Circular Economy?

### Welchen Lebenszyklus durchlaufen Batterien?

Batterien durchlaufen analog zu anderen Gütern die Phasen Produktion, Betrieb und Recycling beziehungsweise Entsorgung. Im Gegensatz zu vielen anderen Produkten kann die Betriebsphase gemäß Bild 3 jedoch in das sogenannte First Life (Erstnutzung) und Second Life (Zweitnutzung) aufgeteilt werden. Zunächst wird die Batterie im First Life in ein Elektrofahrzeug eingebaut und dort jahrelang betrieben. Im Laufe der Lebenszeit verliert die Batterie jedoch beständig Kapazität. Dies hat zur Folge, dass immer weniger Energie in der Batterie gespeichert werden und das Fahrzeug immer weniger Kilometer mit einer Vollladung fahren kann. Oftmals wird der Bereich zwischen 70 und 80 Prozent der ursprünglichen Kapazität als (fiktives) Lebensdauerende bezeichnet. Die Batterie ist dann aber meist nicht kaputt, sondern kann die gewünschte Aufgabe, in diesem Fall also eine bestimmte Reichweite, nicht mehr erfüllen. Dann könnten die Batterien aus dem Fahrzeug ausgebaut und im Rahmen des Second







Bild 1: Blick in den Lithium-Ionen-Batterieraum des Großspeichers M5Bat  
Foto: Peter Winandy

Lifes in einer stationären Anwendung wie einem Heimspeicher zur Speicherung von Solarenergie verwendet werden. Kann die Batterie auch die Anforderung im Second Life nicht mehr erfüllen, wird sie dem Recycling zugeführt. Dieses Vorgehen klingt recht simpel, aber die Bestimmung der Zeitpunkte des Wechsels von einer Lebenszyklusstufe in die nächste ist alles andere als trivial. Zur Lösung dieses Problems entwickelt das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe Methoden und Algorithmen zur Zustandsbewertung und Lebensdauerprognose. Im Rahmen der Circular Economy wird eine möglichst lange Betriebsphase angestrebt, damit der Ressourceneinsatz über eine lange Zeitspanne hinweg die Einsparungen von Emissionen beispielsweise im PKW durch die Verwendung von Strom anstelle von Benzin oder Diesel ermöglicht. Durch den Einsatz von Batteriemonitoringsystemen und Algorithmen zur genauen Zustandsbewertung können kontinuierlich Informationen zur verbleibenden Reichweite, dem Sicherheitsstatus und der verbleibenden Lebensdauer

abgerufen werden. Die Algorithmen nutzen dabei die Betriebsdaten wie Strom, Spannung, Temperatur und Impedanz der Batterie, um den Zustand und die verbleibende Lebensdauer der Batterie abzuschätzen. Es gibt aber keine standardisierten und allseits akzeptierten Verfahren insbesondere für die verbleibende Restlebensdauer. Für die Zustandsbewertung und Lebensdauerprognosen sind umfangreiche Kenntnisse über das Alterungsverhalten der Batterien nötig, die im Folgenden kurz erklärt werden.

### Über Batterien und Gummibänder

Batterien und Gummibänder haben mehr gemeinsam als man zunächst denken könnte: Sie altern recht ähnlich. Wird ein Gummiband lange Zeit unter maximaler Ausdehnung gehalten, wird es spröde und reißt bald. Eine Batterie altert analog insbesondere bei hohen Ladezuständen sehr schnell. Dies gilt auch für hohe Temperaturen. Diese sogenannte kalendarische Alterung tritt insbesondere in den Standzeiten eines Fahrzeugs auf. Bei direkter Ladung eines Fahrzeugs nach der

Ankunft steht es über Nacht viele Stunden bei vollem Ladezustand. In dieser Zeit altert die Batterie deutlich schneller als wenn sie bei tieferen Ladezuständen gelagert und erst kurz vor der nächsten Nutzung vollgeladen wird. Neben der kalendarischen Alterung gibt es auch die zyklische Alterung, die ebenfalls anhand des Gummibands erklärt werden kann. Bei kontinuierlichem Wechsel zwischen minimaler und maximaler Ausdehnung wird das Gummiband wesentlich eher reißen als bei sehr kleinen kontinuierlichen Ausdehnungen. Analog dazu altern auch Batterien bei großen Zyklastiefen – also dem Wechsel zwischen leerer und voller Batterie – deutlich schneller als bei kleinen Zyklastiefen. Es ist also besser, auch nach relativ kurzen Fahrten wieder nachzuladen (möglichst ohne voll zu laden) als erst nach mehreren Fahrten, wenn die Energie für den nächsten anstehenden Weg nicht mehr reichen wird. Schädlich sind zudem sehr schnelle Aufladungen bei hoher Leistung.





Bild 2: Zustandsüberprüfung von Blei-Säure-Batterien im Großspeicher M5Bat  
Foto: Peter Winandy







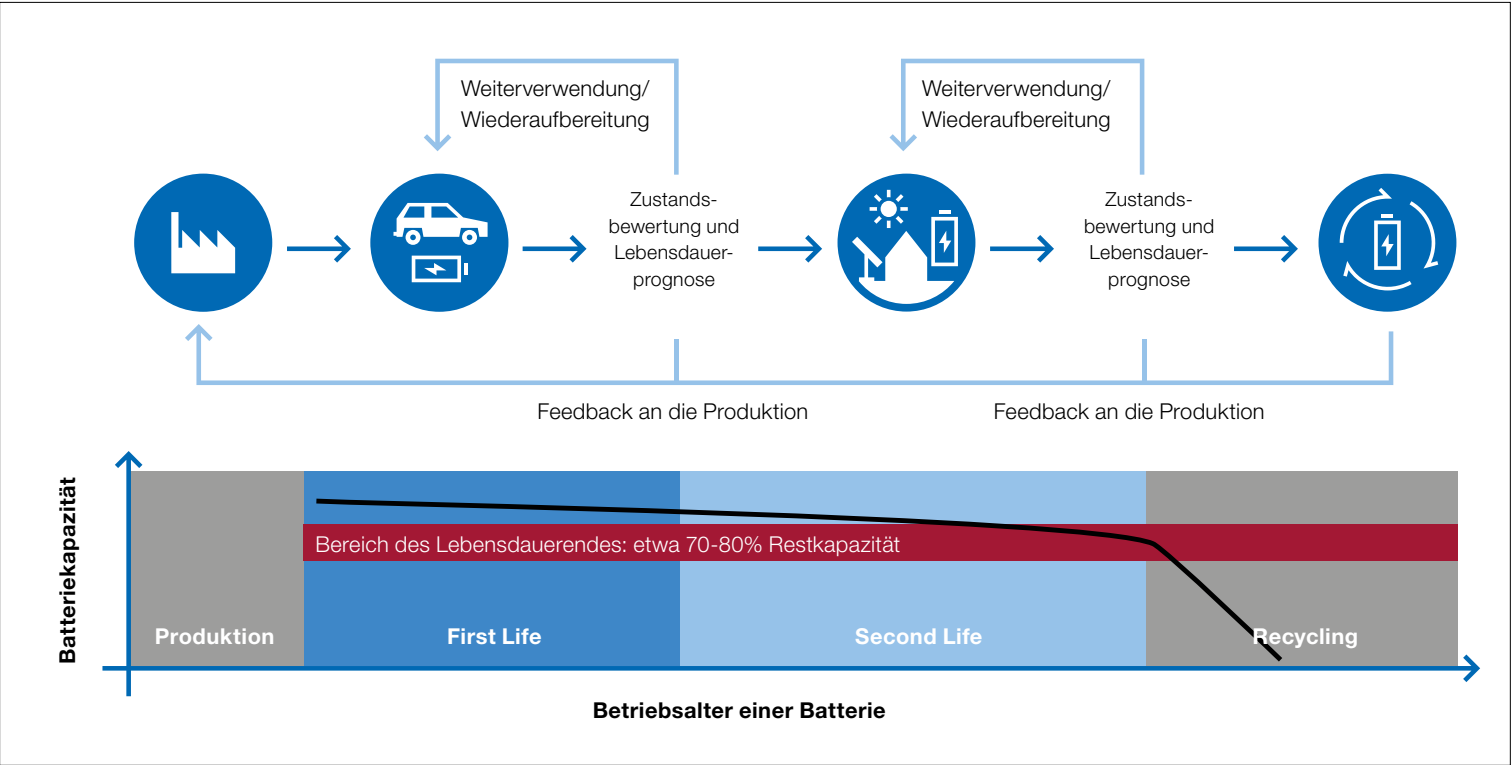


Bild 3: Schematischer Lebenszyklus einer Batterie

**Unterschiede in der Alterung von der Batterie bis zum Fahrzeug**

Die Umweltbedingungen und das Lade- und Mobilitätsverhalten der Personen haben bereits einen enormen Einfluss auf die Alterung im Elektrofahrzeug und daher gibt es keine pauschale Dauer, nach der die Batterie vom First ins Second Life wechseln sollte. Neben den betriebsbedingten Unterschieden gibt es aber auch Varianz zwischen den einzelnen Batteriezellen. Bild 4 zeigt dies sehr anschaulich: 48 Batteriezellen desselben Typs wurden unter identischen Bedingungen im Labor über viele Tage kontinuierlich ge- und entladen. Zu Beginn des Tests liegen die Batteriezellen alle oberhalb von 1,8 Amperestunden sehr nah beieinander. Mit steigender Zahl an gefahrenen Zyklen drifteten die Batteriezellen jedoch mehr und mehr auseinander, schließlich liegen 20 Prozent und mehr Unterschied in der Kapazität bei gleicher Zyklenzahl vor. Batterien für Fahrzeuge werden typischerweise aus 100 bis 200 in Serie verschalteten Batteriezellen gebaut und unglücklicherweise bestimmt die schlechteste Zelle in diesem Verbund die Kapazität des Gesamtsystems. Ein solches Verhalten erschwert es ebenfalls, pauschale Angaben über die Lebensdauer treffen zu können. Insgesamt werden für die Circular Economy also performante Zustandschätzungen und Lebensdauerprognosen benötigt, die eine zustandsbasierte Wartung und den Wechsel in den nächsten Lebens-

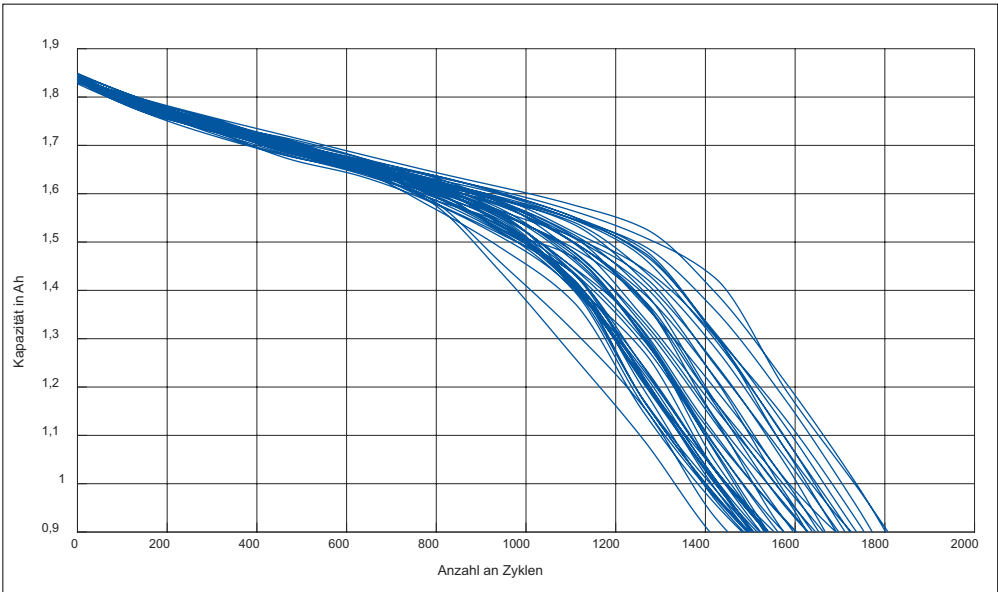


Bild 4: Zyklische Alterungstests von 48 identischen Batteriezellen

Eigene Darstellung der Messdaten des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe aus <https://publications.rwth-aachen.de/record/818642>.

zyklusabschnitt ermöglichen. Als besondere Herausforderung gilt dabei die Vorhersage des Zeitpunkts, ab dem sich die Alterung stark beschleunigt und die Batterie nicht mehr genutzt werden kann (siehe Knickpunkte bei 1.000 – 1.400 Zyklen in Bild 4). Generell lassen die Tests darauf schließen, dass qualitativ hochwertige Batterien für den Automobilmarkt unter normalen Betriebsbedingungen etwa zehn bis 15 Jahre im Einsatz bleiben können.

**Die Kapazität nimmt ab – und nun?**

Die Zustandsbewertung und Lebensdauerprognose während des Betriebs erfordert den Einsatz von Online-Algorithmen. Diese Algorithmen reichen vom klassischen Amperestundenzähler bis hin zu fortgeschrittenen Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens und werden am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe entwickelt. Zur Validierung dienen tausende Labortests und Betriebsdaten

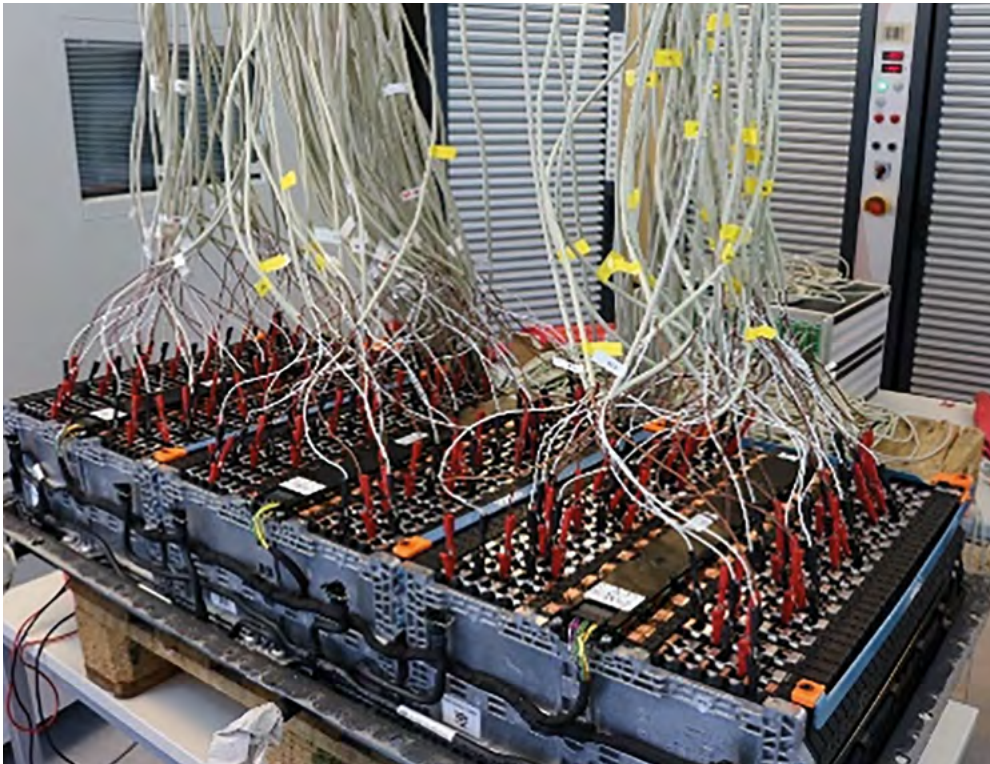


Bild 5: Bestimmung des Alterungszustands eines Batteriepacks aus einem Elektrofahrzeug im Labor

von realen Batteriesystemen. Detektieren die Algorithmen einen dauerhaften Kapazitätsverlust, sind unter Umständen weitere Analysen im Labor erforderlich, siehe Bild 5. Mit diesen wird überprüft, ob das gesamte Batteriepack stark gealtert oder die schlechtere Performance eventuell auf einzelne Batterien zurückzuführen ist und es durch einfache Maßnahmen wie den Austausch von Komponenten noch einmal wiederaufbereitet werden kann. Je nach Ausgang dieser Analysen kann die Batterie dann weiterhin im First Life verbleiben, ins Second Life wechseln oder gar bei sehr schlechten Ergebnissen direkt ins Recycling gehen. Neben der verbleibenden Kapazität ist auch die Einschätzung des Sicherheitsstatus eine zentrale Aufgabe des Batteriemonitorings.

### Second Life – Mythos oder Realität?

Die Idee des Second Lifes hört sich zunächst sehr vielversprechend an, birgt jedoch auch gewisse Hindernisse. So unterscheiden sich Batteriesysteme im Aufbau, bei den Anschlüssen und der Überwachungselektronik. Eine problemlose Integration der verschiedenen Fahrzeugpacks in stationäre Anwendungen ist dabei ohne die richtige Standardisierung eine komplexe Aufgabe. Mit Blick auf die Ökonomie werden auch in den kommenden Jahren die Preise für neue Batterien weiter fallen und die gebrauchten Batterien müssen sich gegen die günstiger werdenden neuen

Batterien am Markt behaupten. Aus diesem Grund ist jede Minute Arbeit, die in den zusätzlichen Test und Umbau eines Batteriepacks gesteckt wird, für die Wirtschaftlichkeit oftmals eine Minute zu viel. Daher wären Second-Life-Ansätze vor allem dort sinnvoll, wo große Mengen gleicher Fahrzeugpacks ohne viele Zwischenstufen standardisiert in dafür ausgelegte stationäre Anwendungen integriert werden können. Das wesentliche Problem ist aber, dass Fahrzeugbesitzende wohl kaum nach vielleicht zehn Jahren eine neue Batterie in ein dann schon stark gealtertes Fahrzeug einsetzen werden. In der Herstellung macht die Batterie rund ein Drittel der Herstellungskosten aus und wird als Ersatzteil noch teurer sein. Daher ist ein oftmals übersehener Fall für einen „Second-Life-Einsatz“ der Verkauf des Fahrzeugs an eine Person, der eine geringere Reichweite noch vollkommen ausreicht – solange durch genaue Lebensdauerprognosen eine ausreichende Garantie und Sicherheit gegeben werden kann.

### Circular Economy am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe

Das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe fokussiert sich einerseits auf die Minimierung des Materialeinsatzes durch die Mehrfachnutzung von Batteriespeichern und die Verlängerung der Lebensdauer durch optimierte Betriebsstrategien. Andererseits

erarbeitet es Methoden für die Zustandsbewertung und Lebensdauerprognose der Komponenten im Betrieb. Diese Informationen dienen der Entscheidungsfindung zwischen Weiterverwendung, Wiederaufbereitung und Recycling der Komponenten. Die genannten Kompetenzen werden in Zusammenarbeit mit anderen Instituten zukünftig im interdisziplinärem Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems, kurz CARL, zusammengeführt, das 2022 auf dem Campus der RWTH eröffnet wird.

### Autoren

Jan Figgner, M.Sc., ist Abteilungsleiter am Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik.

Christopher Hecht, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik.

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uwe Sauer ist Inhaber des Lehrstuhls für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik und in der Leitung des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe.











# Von Abfall zu Rohstoff: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

To achieve the full ecologic potential of e-mobility in contributing to the circular economy, the recycling of e-cars and especially of lithium-ion batteries is essential. An efficient and flexible recycling process is necessary to ensure that, once all other circular economy options and models have been used, the materials contained in end-of-life products are brought back into the economy as new resources. The Chair Process Metallurgy and Metal Recycling works on developing sustainable recycling processes, combining optimized mechanical and thermal pre-treatment, with pyro- and hydrometallurgical methods, to achieve a high raw material recovery.

Die Automobilindustrie steht im Mittelpunkt vieler Herausforderungen auf dem Weg zu einer stärker kreislaforientierten Wirtschaft, insbesondere im Hinblick auf den Aufschwung der E-Mobilität. Die Realisierung des Klimaschutzpotenzials von E-Autos muss mit der Kreislaufwirtschaft Hand in Hand gehen, um sowohl ihre gesellschaftlichen als auch ihre materiellen Aspekte zu verbessern. Die Intensivierung der Materialnutzung in Produkten und die Verlängerung ihrer Lebensdauer kann große Auswirkungen haben, sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch. Von Design-for-Circularity über Product-as-a-Service-Modelle bis hin zu Reparatur- und Wiederaufbereitungskonzepten ist durch die Kreislaufwirtschaft eine Minimierung des Ressourcenbedarfs möglich.

Dennoch wird der Bedarf an neuen Ressourcen und besseren Produkten immer vorhanden sein. Aus diesem Grund spielt das Recycling auch zukünftig eine große Rolle in der Kreislaufwirtschaft, da es sicherstellt, dass die in Altprodukten enthaltenen Materialien nach Ausschöpfung aller anderen Verwertungsmöglichkeiten wieder in die Wirtschaft eingebracht werden können.

Unter diesem Aspekt erhalten Lithium-Ionen-Batterien viel Aufmerksamkeit. Mehrere Faktoren tragen dazu bei: ein hoher Anteil kritischer Rohstoffe, deren primäre Gewinnung problematisch ist; ihre begrenzte Lebensdauer für eine bestimmte Nutzung; ihre schwierige Sammlung und Wiederverwendung. Im Zentrum der E-Mobilität werfen diese Probleme die Frage auf: Können Lithium-Ionen-Batterien nachhaltig recycelt werden?

Das Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie hat verschiedene Konzepte für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien untersucht. Auch wurden Optionen für einen ganzheitlichen Recyclingprozess entwickelt, welche den Energieverbrauch optimieren und die Materialrückgewinnung maximieren. Ein solcher Prozess muss nicht nur effizient, sondern auch robust sein, um die große Vielfalt der Batteriesysteme zu behandeln.

Es hat sich gezeigt, dass eine Kombination aus thermischer und mechanischer Vorbehandlung, Pyrometallurgie und Hydrometallurgie das größte Potenzial bietet.



Bild 1: Thermische Vorbehandlung im Labormaßstab in einem Drehrohrföfen

Foto: Peter Winandy

### Thermische Vorbehandlung

Die thermische Vorbehandlung kann sowohl der erste Schritt in der Recyclingkette sein als auch nach einer mechanischen Aufbereitung erfolgen. Häufig wird sie in Form einer Pyrolyse durchgeführt. Hierbei wird das Batteriematerial unter Ausschluss von Sauerstoff erhitzt. Dies führt zur Zersetzung und Verflüchtigung der in den Batterien enthaltenen Organik, die sowohl aus den Elektrolyten als auch aus Bindern und dem Separator stammt. Dabei entstehen ein Pyrolysegas, Pyrolyseöle, Teere sowie ein fester kohlenstoffhaltiger Reststoff. Brand- und explosionsgefährliche Inhaltsstoffe können so kontrolliert ausgetragen werden. Die dabei erfolgende sichere Deaktivierung von Batteriezellen ermöglicht eine vereinfachte mechanische Aufbereitung unter atmosphärischen Bedingungen. Weitere Vorteile der thermischen Behandlung ergeben sich aus der Entfernung der Binder. Da der Binder für die Haftung der werthaltigen Aktivmasse (Cobalt, Nickel, Mangan, Lithium und Graphit) auf den Stromableiterfolien sorgt, erleichtert seine Zerstörung die sortenreine Auftrennung. Außerdem ist der Binder insbesondere in hydrometallurgischen Prozessschritten nach-

teilig, da er die Auflösung der Metalloxidpartikel erschwert. Ein weiterer Vorteil der Pyrolyse sind erwünschte Phasenumwandlungen, so werden je nach Prozessbedingungen beispielsweise Metalloxide reduziert, etwa Nickel bis zum Metall.

Der Erfolg der thermischen Behandlung hängt von vielen Prozessparametern ab. Einfluss nehmen insbesondere Temperatur, Haltezeit sowie die eingestellte Gasatmosphäre. Ziel laufender Forschung ist, das Batteriematerial möglichst optimal auf die folgenden Prozessschritte vorzubereiten. Dies soll zum einen den Aufwand verringern und zum anderen zu maximierten Ausbeuten der werthaltigen Elemente führen.

### Pyrometallurgische Behandlung

Lithium-Ionen-Batterie-Recycling kann über Schmelzprozesse bei hohen Temperaturen erfolgen. Die pyrometallurgische Behandlung ermöglicht es sowohl ganze Zellen oder Electric-Vehicle-Module, als auch die aus einer thermischen und mechanischen Behandlung extrahierte Aktivmasse einzusetzen. Der Prozess ist hinsichtlich der Heterogenität des Einsatzmaterials robuster und bietet eine

höhere Kinetik als die hydrometallurgische Prozessierung.

Als Aggregate für die pyrometallurgische Behandlung werden industriell vorwiegend Elektrolichtbogen- und Schachtöfen eingesetzt. Gegenwärtig wird zudem der Einsatz von Widerstands- oder Kippdrehtrommelöfen untersucht. Unabhängig vom gewählten Aggregat ist das Ziel die Herstellung einer Nickel-Cobalt-Kupfer-haltigen Legierung bei Prozesstemperaturen um 1400 °C. Die Legierung besteht dann aus den chemisch gesehen edlen Metallen der Batterien. Die Batterien enthalten aber auch chemisch unedle Metalle, etwa Lithium, Aluminium und Stahl-Legierungen. Diese werden in einer mineralischen Phase, einer Schlacke, angereichert. Der pyrometallurgische Prozess fungiert also als Splitter für die enthaltenen Rohstoffe abhängig von ihren chemischen Eigenschaften. Da Cobalt den höchsten monetären Wert hat, steht die Maximierung der Cobalt-Anreicherung im Fokus. Um vorherzusagen, wie sich die Verteilung von Cobalt auf die Phasen Metall und Schlacke verhält, und mittels Additivzugabe zur Schlacke die Cobalt-Anreicherung zu beeinflussen,









Bild 2: Pyrometallurgische Untersuchungen zum Batterierecycling im Elektrolichtbogenofen  
Foto: Peter Winandy



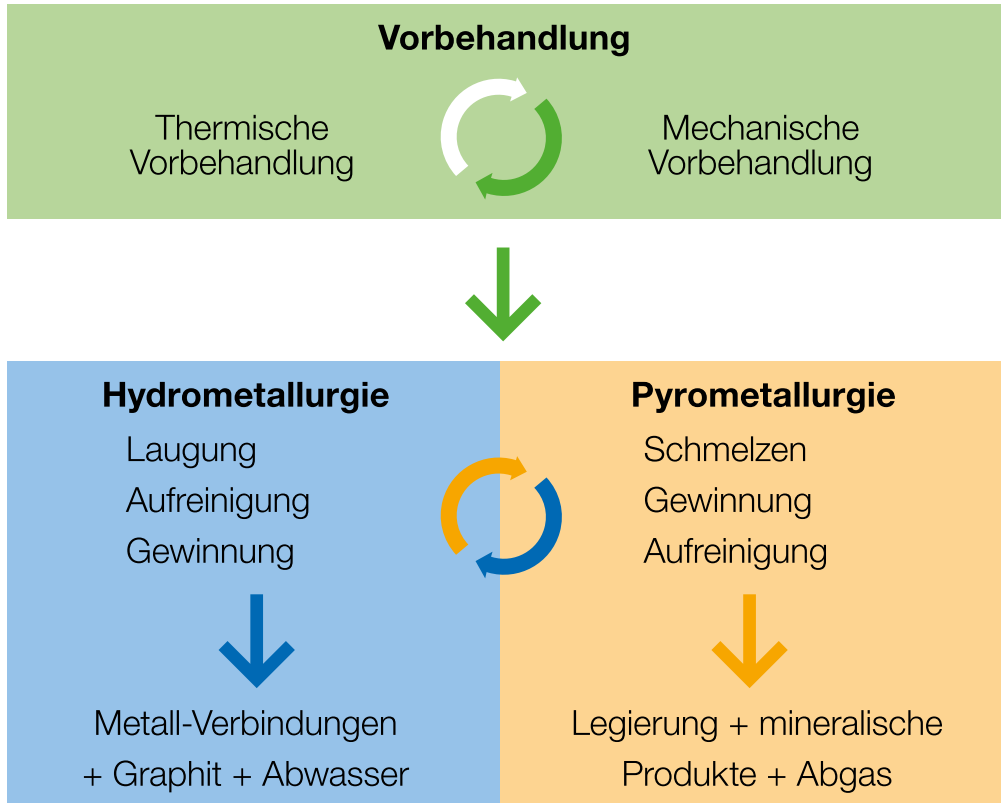


Bild 3: Überblick und Zusammenhang der möglichen Prozessoptionen

müssen grundlegende thermodynamische Betrachtungen durchgeführt werden. Diese Modellierungen werden in der Metallurgie als Schlackendesign bezeichnet, wodurch mittels Additivzugaben eine Veränderung der Schlackeneigenschaften bewirkt wird. So kann über eine reduzierte Schmelztemperatur oder Viskosität die Löslichkeit und damit Phasentrennung der Metalle optimiert werden. Für die weitere Prozessierung der beiden Produkte Schlacke und Legierung mit dem Ziel einer Raffination, also einer Aufreinigung, werden hydrometallurgische Behandlungen eingesetzt. Enthält die Schlacke nur geringe Anteile an Schwermetallen, wie Cobalt und Nickel, so kann sie auch als Baustoff zum Beispiel für den Straßenbau eingesetzt werden.

#### Hydrometallurgische Behandlung

Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien unter Nutzung nasschemischer (hydrometallurgischer) Methoden bei niedrigen Temperaturen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ein nennenswerter Vorteil der Hydrometallurgie ist die Möglichkeit auch unedle Metalle zu gewinnen. Voraussetzung hierfür ist eine mechanische Vorbehandlung, da eine geeignete Korngröße des Materials eingestellt werden muss.

Die Hydrometallurgie umfasst verschiedene Schritte wie die Laugung zur selektiven Metalextraktion, die Raffination der Laugungslösung und die anschließende Fällung zur Metallgewinnung. Die Laugung ist üblicherweise der erste Schritt der Rückgewinnung. Durch geeignete Laugungsmittel werden die Zielmetalle Cobalt, Nickel, Lithium, Mangan in Lösung gebracht. Dabei lösen sich Begleitelemente des Batteriematerials wie Aluminium, Kupfer und Eisen. Als Laugungsmedien können anorganische Lösungsmittel wie Schwefel-, Salz- und Salpetersäure oder nachhaltige Alternativen, wie organische Säuren wie Zitronensäure, Ascorbinsäure und Oxalsäure zum Einsatz kommen. Weiterhin werden bei der Laugung die löslichen von den unlöslichen Bestandteilen separiert. Graphit bleibt nach einer Filtration als fester Rückstand übrig.

Dieser kann anschließend aufgereinigt und als sekundärer Rohstoff verwendet werden. Die Lösung wird anschließend vor der Gewinnung der Zielmetalle raffiniert, um die unerwünschten Begleitelemente aus der Lösung zu entfernen. Die Ziel-Metalle werden mittels verschiedener Methoden wie Ionenaustausch, Solvent-Extraktion, Fällung und Elektrolyse extrahiert. Abhängig von der Gewinnungsmethode können verschiedene

marktfähige Produkte generiert werden. Die nasschemische Verfahrensrouten bietet gegenüber einer pyrometallurgischen einige Vorteile: Graphit geht als Wertstoff nicht verloren und die Metallverbindungen können mit hoher Reinheit sowie Selektivität rückgewonnen werden. Die Prozesse finden zumeist bei Temperaturen bis 100 °C statt und führen im Vergleich zu einer geringeren CO<sub>2</sub>-Emission. Die Prozessführung kann jedoch komplex sein und es besteht ein hoher Aufwand für die Abwasserbehandlung.

#### Zusammenfassung

Pyro- und hydrometallurgische Verfahren zeigen spezifische Vor- und Nachteile. Erst die Kombination beider Verfahren führt zu einem nachhaltigen Recyclingverfahren mit hohen Rückgewinnungsquoten der in Lithium-Ionen-Batterien enthaltenen Rohstoffe. Zusammenfassend kann die Frage nach der Recyclingfähigkeit von Batterien somit bejaht werden. Zur effizienten Rückgewinnung vorhandener Wertstoffe aus Batterien und zur Sicherstellung einer Kreislaufwirtschaft besteht aber jeder Recyclingprozess aus mehreren Verfahrensstufen. Am Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie können diese Prozesse entlang der Recyclingroute abgebildet werden. Allerdings gibt es noch an vielen Stellen Forschungsbedarf, um ein tiefgreifendes Verständnis der ablaufenden chemischen Prozesse, zu den Mechanismen und Einflussfaktoren zu erhalten.

#### Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Karl Bernhard Friedrich ist Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling und Leiter des Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie. Damien Latacz, M.Sc., Lilian Schwich, M.Sc., Christin Stallmeister, M.Sc., und Dzeneta Vrucak, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie.





Bild 4: Hydrometallurgische Metallextraktion unter Nutzung kontinuierlicher Datenerfassung  
Foto: Peter Winandy





# Kreis? Läuft!

## Aufbereitung und Recycling im Kontext einer nachhaltigen Circular Economy

Transforming the European economy from linear to circular is a key measure when it comes to battling the climate crisis. By rethinking the way we currently consume natural resources, the EU contributes to its goal of reaching climate neutrality by 2050 and strengthens its future economic independency. Recycling forms part of the Circular Economy framework by closing material cycles and thus providing a secondary alternative to primary resources. Nevertheless, a holistic approach to recycling that not only focuses on the technological part of selected recycling processes but also considers the life cycle phases prior to end-of-life scenarios is necessary to achieve truly circular solutions.

The Chair of Anthropogenic Material Cycles (ANTS) optimizes existing recycling processes and creates new recycling pathways. By combining a diverse set of technological equipment and expertise with life cycle assessment and circularity indicators, the ANTS contributes to research and development of recycling solutions embedded in a sustainable Circular Economy environment. Our research involves industrial and societal stakeholders to ensure that interfaces between different stages of a product's life cycle are considered in our results as well as the three pillars of sustainability.

Der weltweite Rohstoffverbrauch nimmt weiter zu und hat weitreichende Umweltauswirkungen. Etwa die Hälfte der global ausgestoßenen klimaschädlichen Emissionen sind auf die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen zurückzuführen. Der sich beschleunigende Klimawandel und der Verlust der biologischen Vielfalt zeigen die Dringlichkeit und Bedeutung des Übergangs der globalen Volkswirtschaften hin zu einer nachhaltigen Entwicklung innerhalb der planetaren Grenzen. Darüber hinaus hat der global exponentiell wachsende Rohstoffverbrauch auch wirtschaftliche Folgen. Knappheiten nehmen zu und damit auch Lieferunsicherheiten, beispielsweise für Halbleiter als Bestandteile von Chips in Elektronikprodukten. Doch wie kann dieser Trend gestoppt werden? Technologische Lösungen werden nicht ausreichen. Heute ist die Effizienz oder vielmehr die Produktivität an das bestehende lineare Produktions- und Verbrauchssystem der Konsumgesellschaft gebunden. Erforderlich ist eine ganzheitliche Veränderung des Sys-



Bild 1: Das Team des Lehrstuhls für Anthropogene Stoffkreisläufe diskutiert Systemgrenzen, Stoffstromflüsse und Rezyklatqualitäten, damit Modelle zur Bewertung der Umweltauswirkungen und Kreislaufführung von Materialien und Produkten möglichst realitätsgetreu entwickelt werden.

Foto: Peter Winandy

tems, wie strukturelle Veränderungen der Verbrauchsmuster und ein Übergang von linearen zu zirkulären Rohstoffströmen. Die Circular Economy, meist mit „Kreislaufwirtschaft“ übersetzt, stellt dafür ein übergreifendes Konzept dar. In der Circular Economy wird der gesamte gesellschaftliche Metabolismus betrachtet und mit einer lebenszyklusweiten Denkweise auf Produktebene verbunden. So sollen Rohstoffe und Materialien in der Nutzung, also im Wirtschaftskreislauf, gehalten und Abfälle, inklusive Emissionen, vermieden werden. Ziel ist es, den Rohstoffeinsatz über die Lebenszyklusphasen hinweg zu schmälern, den Rohstoffverbrauch zu verlangsamen beziehungsweise die Nutzungsdauer von Rohstoffen und Materialien zu verlängern und Rohstoffkreisläufe möglichst zu schließen. Hierfür werden bis zu zehn Strategien, auch R-Strategien genannt, angewandt: Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle und Recover.

Der Zeitpunkt End-of-Life im Lebenszyklus von Produkten ist wesentlicher Ansatzpunkt für verschiedene R-Strategien. Hier entscheidet sich, ob eine Wiederverwendung (Reuse) von Produkten, Produktteilen oder alternativ eine materielle oder rohstoffliche Rückführung (Recycle/Recover) möglich ist. Die Voraussetzungen dafür werden bereits in der Produktentwicklung geschaffen. Somit ist für die erfolgreiche Kreislaufführung von Materialien und Produkten ein Zusammenspiel der einzelnen Lebenszyklusphasen unerlässlich. Obwohl dieser ganzheitliche Ansatz der Circular Economy bereits vielfach Eingang in die politische Agenda gefunden hat, sind Europa und Deutschland noch weit von der tatsächlichen Umsetzung des Konzepts entfernt: Der Rohstoffverbrauch verharrt auf hohem Niveau und auch die Rückführung von Recyclingrohstoffen (Circular Material Use Rate) in den Wirtschaftskreislauf hat derzeit nur einen Anteil von zwölf Prozent, obwohl der überwiegende Teil des gesammelten Abfallaufkommens einer Verwertung zugeführt wird. Demnach ist



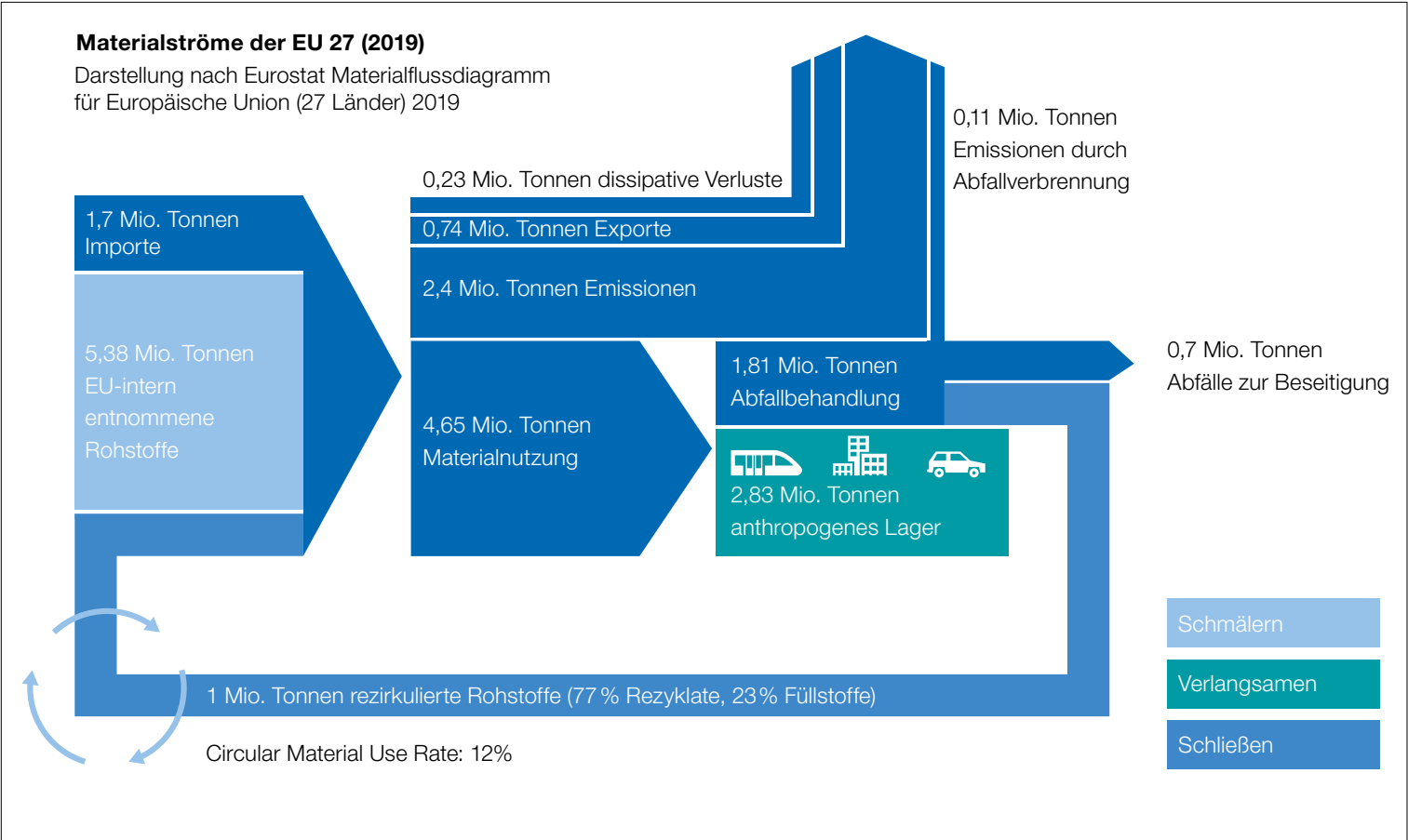


Bild 2: Materialströme in der EU (2019)

die Produktentwicklung noch nicht ausreichend an die Zielsetzung der Circular Economy angepasst. Gleichzeitig fehlt es mit Blick auf den aktuellen Rückfluss von Materialien an innovativen (technischen) Lösungen für End-of-Life-Strategien.

Zwei relevante Stoffströme sind im Rahmen dieser Diskussionen Bau- und Abbruchabfälle sowie Kunststoffe, insbesondere Kunststoffverpackungen. Die Kunststoffverpackungen stehen in der öffentlichen Diskussion durch die Problematik des Litterings – dem Verlust der Kunststoffe in die Umwelt und damit letztendlich einer Akkumulation in den marinen Ökosystemen – im Vordergrund.

**Bau- und Abbruchabfälle**

Bau- und Abbruchabfälle sind sowohl nach Masse als auch nach Volumen der größte Abfallstrom in Deutschland. Im Jahr 2019 wurden circa 88 Prozent dieses Abfallstroms verwertet. Obwohl diese Verwertungsquote relativ hoch ist, werden etwa drei Viertel der wiederverwerteten Abfälle nicht gleichwertig zu ihrer vorherigen Verwendung eingesetzt. Es bedarf daher Recyclinglösungen, die die weitere Verwendung und Nachfrage der er-

zeugten Sekundärmaterialien berücksichtigen. Nur so können zirkuläre Lösungen entwickelt werden, die über den gesamten Kreislauf hinweg ökologisch, ökonomisch und sozial vorteilhaft sind. Dieser Ansatz wird vom Lehrstuhl für Anthropogene Stoffkreisläufe im interdisziplinären Forschungsprojekt „Verbund.NRW“ verfolgt. Hier werden Konzepte für die mechanisch-technische Behandlung von betonhaltigen Verbundwerkstoffen mit Hilfe einer integrierten Bewertungsmethode, die ökologische, ökonomische und technische Aspekte einbezieht, entwickelt. In einem ersten Schritt steht die Integration von Qualitätsaspekten für eine Bewertung von Recycling im Vordergrund. Durch die Nutzung der Methoden Life Cycle Assessment und Life Cycle Costing werden Aufbereitungs- und Recyclingprozesse für Bau- und Abbruchabfälle näher untersucht.

**Kunststoffverpackungen**

Post-Consumer-Leichtverpackungsabfälle sind der mengenmäßig relevanteste Kunststoffabfallstrom in Deutschland. Die Erfassung erfolgt über den „gelben Sack“ bezie-

hungsweise die „gelbe Tonne“. Die entsorgten Verpackungen werden nach der Sammlung in Sortieranlagen behandelt, um Materialarten zu trennen und als Vorkonzentrate dem weiteren Recycling zuzuführen. Bei Kunststoffverpackungen reicht die Sortiertiefe bis auf die Kunststoffarten, da ein Recycling von Kunststoffen nur dann möglich ist, wenn diese sortenrein vorliegen. Die Ergebnisse des mechanischen Recyclings von Kunststoffverpackungen sind allerdings ernüchternd – nur 19 Prozent konnten 2019 in Rezyklate überführt werden und lediglich acht Prozent wurden für die Produktion von Neuware eingesetzt. Erhebliche Verbesserungen entlang der Wertschöpfungskette sind also erforderlich, um die Substitution von Primärrohstoffen zu erhöhen. Für Sortier- und Recyclingprozesse bedeutet das, insgesamt eine größere Menge zurückzugewinnen und höhere Produktqualitäten zu erzielen. Gerade die Digitalisierung der Sortierprozesse und Anlagentechnik, umgesetzt über den Einsatz von Sensortechnologien, bietet hier große Optimierungspotenziale. Sensorbasierte Sortiertechnologien werden heute standardmäßig für die Sortierung von





Bild 3: Für das Forschungsprojekt ReVis werden Stoffströme aus Sortieranlagen beprobt und händisch sortiert. So werden die Zusammensetzung der Stoffströme und das enthaltene Wertstoffpotenzial ermittelt.

Foto: Peter Winandy





Bild 4: Mit Hilfe eines NIR-Sensors werden Kunststoffe charakterisiert. Aus den gewonnenen Sensordaten kann beispielsweise die Zusammensetzung des Stoffstroms automatisiert ermittelt werden.  
Foto: Peter Winandy



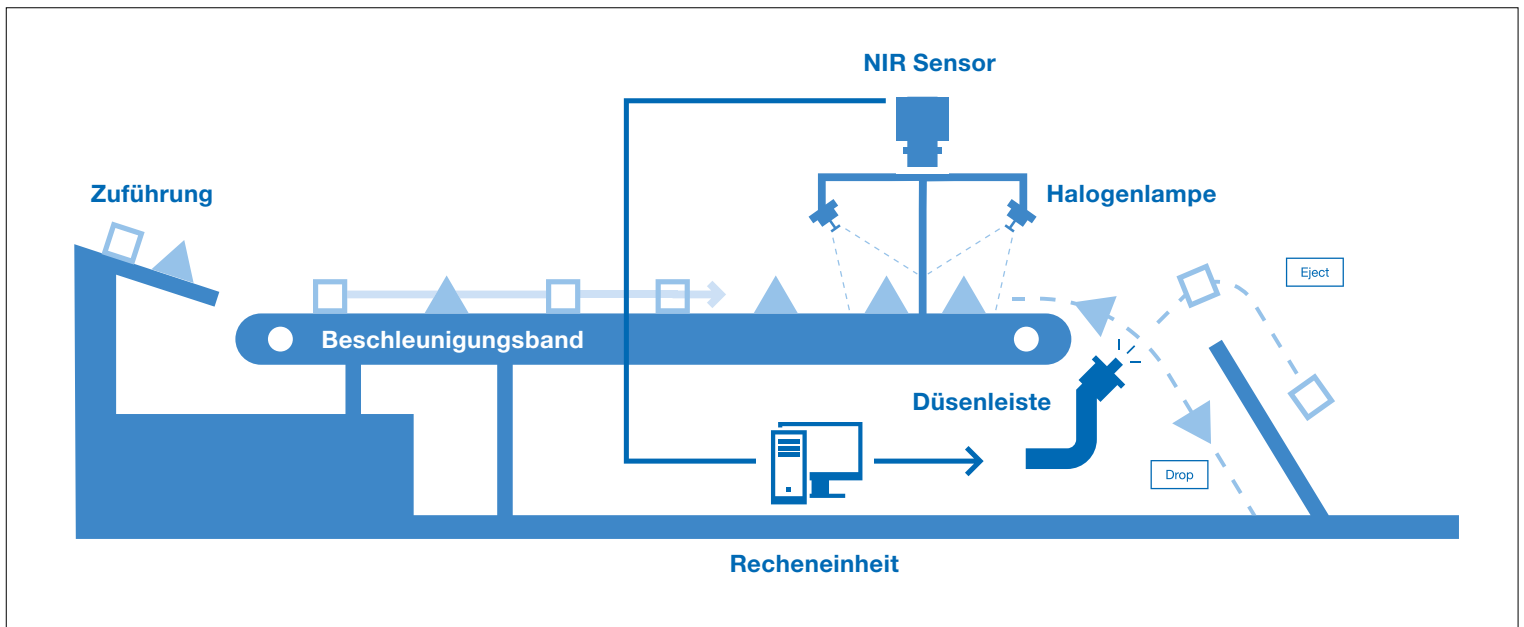


Bild 5: Die NIR-Sensorsortierung

Kunststoffverpackungen eingesetzt. Vorrangig handelt es sich hierbei um Nah-Infrarot-Sensoren (NIR), aber auch 3D-Sensoren oder Farbkameras können zum Einsatz kommen. NIR-Sortierer bestehen aus einem Emitter (meistens Halogenlampen), einem NIR-Sensor, einer computergestützten Recheneinheit zur Verarbeitung der Sensordaten, einem Beschleunigungsband und einer Trenneinheit. Über den Emitter wird Licht auf das Förderband und die darauf liegenden Abfälle gestrahlt. Ein Teil des Lichts wird von den Abfällen absorbiert, der andere Teil wird reflektiert. Der NIR-Sensor misst die Reflexion des Lichts und gibt die Daten an die Recheneinheit weiter. Da jede Kunststoffart ein charakteristisches Absorptionsspektrum aufweist, kann über die Reflexion ermittelt werden, ob es sich bei dem angestrahlten Abfallpartikel um einen Kunststoff handelt und welche Kunststoffart vorliegt. Wird der Kunststoff erkannt, wird dieser über eine Austrageinheit (meist eine Druckluftdüsenleiste) in die zugehörige Wertstofffraktion sortiert. In den Projekten „ReVise“ und „EsKorte“ werden Sensordaten aus NIR-, 3D-Sensoren und Farbkameras über die Sortierstrecke hinweg gesammelt, um den Abfallstrom in Echtzeit charakterisieren zu können. So kann zum einen der Sortierprozess selbst beispielsweise durch eine adaptive, das heißt sich an veränderte Stoffstromeigenschaften anpassende, Prozesssteuerung optimiert werden. Zum anderen können gewonnene Stoffstromdaten entlang der Wertschöpfungskette genutzt werden: Informationen über die Zusammen-

setzung des Verpackungsabfalls aus der Abfallsammlung ermöglichen Rückschlüsse auf das Trennverhalten einzelner Sammelgebiete, sodass die Öffentlichkeitsarbeit gezielt auf Sammelgebiete mit großem Optimierungspotenzial gelenkt werden kann. An der Schnittstelle zum nachgeschalteten Kunststoffrecycling könnten Informationen über die Zusammensetzung einzelner Kunststoffballen beispielsweise für innovative, qualitätsbezogene Preismodelle oder eine optimierte Prozessgestaltung sowie zur Bewertung ökologischer Potenziale genutzt werden. Mit solchen Stoffstromdaten können auch konkrete Empfehlungen für das Design von Kunststoffverpackungen abgeleitet werden. Dabei werden durch den Dialog mit Produzenten von Kunststoffverpackungen die Vorgaben an Produktqualität und -funktionalität berücksichtigt – so wird „Design for Recycling“ möglich! Die große Herausforderung der Circular Economy liegt in der Operationalisierung, also darin, das Konzept in Handlungen zu übersetzen. Durch den Fokus auf eine R-Strategie – das Recycling – trägt der Lehrstuhl für Anthropogene Stoffkreisläufe dazu bei, konkrete Ansätze zu entwickeln, die den Kreis „ins Laufen bringen“, ohne dabei die Komplexität des Systems, das hinter der Circular Economy steckt, außer Acht zu lassen. Recycling wird Teil eines Ganzen, das Schnittstellen zwischen Akteurinnen und Akteuren aus Entwicklung, Produktion, Nutzung und End-of-Life stärkt. Dieses Recyclingsystem und die daraus resultierenden Anforderungen unter-

scheiden sich jedoch für jeden Stoffstrom. Kreislaufschließung ist spezifisch, aber nie unabhängig. Es ist wesentlich, dass Gesamtsystem lebenszyklusübergreifend mit Blick auf die Potenziale für eine nachhaltige Zukunft zu betrachten.

## Autoren

Dr.-Ing. Xiaozheng Chen, Merle Hüsgen, M.Sc., Nils Kroell, M.Sc., und Dr.-Ing. Karoline Raulf sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Lehrstuhl für Anthropogene Stoffkreisläufe Univ.-Prof. Dr. Kathrin B. Greiff ist Inhaberin des Lehrstuhls für Anthropogene Stoffkreisläufe.



# Trennverfahren als Schlüsseltechnologie für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft

Wie die Entwicklung von innovativen Trennverfahren neue Möglichkeiten in Bioraffinerien eröffnet

Utilization of waste streams and their recycling back into the value chain is a necessity to achieve full circularity. In decentralized biorefineries, residual side and waste streams from the local food and agricultural industry can be upcycled to platform chemicals. This provides these industries with additional revenues and thus with a competitive advantage. Thereby, environmentally friendly processes in the sense of a circular economy can be combined with economic and industrial growth. However, the use of complex substrates holds multiple challenges like varying substrate quality, subsidiary compounds and salt accumulation.

The Chair of Fluid Process Engineering (AVT, FVT) tackle these challenges together with several partners by intensifying existing separation technologies. They also develop new, selective processes and unit operations with a low energy demand and increased overall process yields, thus tailoring them for their use in circular production processes.

Ziel der Bioökonomie ist der zunehmende Ersatz fossiler Ressourcen durch biomassebasierte Rohstoffe. Neue biobasierte Verfahren müssen als Voraussetzung für eine breite industrielle Implementierung allerdings auch wettbewerbsfähig sein. Insbesondere bei der Produktion von biobasierten Plattformchemikalien wie Carbonsäuren, Alkoholen oder Aminen, ist dies eine zentrale Herausforderung. In diesen Prozessen werden oft reine Zucker als Ausgangsstoffe für die mikrobielle Umsetzung eingesetzt. Diese sind im Vergleich zu erdölbasierten Grundstoffen teurer und primär für die Erzeugung von Lebensmitteln vorgesehen. In Kombination mit dem niedrigeren Reifegrad der Technologien können biotechnologische Verfahren bisher kaum mit etablierten petrochemischen Prozessen auf wirtschaftlicher Ebene konkurrieren. Daher lag der Marktanteil von biobasierten Chemikalien im Jahr 2018 bei nur 1,4 Prozent.<sup>[1,2]</sup>





Bild 1: Versuchsstand zur elektrochemischen Aufarbeitung  
Foto: Peter Winandy

Um die Rohstoffbasis der Bioökonomie zu erweitern und die Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern, können anfallende Reststoffströme der Landwirtschaft sowie der Lebensmittel- und Papierindustrie in flexiblen Bioraffinerien als Rohstoffquelle eingesetzt werden. Durch die Implementierung solcher Bioraffinerien wird eine zusätzliche Wertschöpfungsperspektive geschaffen. Folglich sind Bioraffinerien nicht nur ein Beispiel für eine kreislaufbasierte Wirtschaftsweise, sondern bieten auch die Möglichkeit zu wirtschaftlichem Wachstum.

Die Reststoffströme sind allerdings durch eine variierende Zusammensetzung und Verfügbarkeit gekennzeichnet, die bei der Prozessentwicklung berücksichtigt werden müssen. Neben der Entwicklung von Mikroorganismen und Online-Analytik sind selektive und nachhaltige Trennverfahren von zentraler Bedeutung.

### Herausforderungen für Trennverfahren in Bioraffinerieprozessen

Der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik der Aachener Verfahrenstechnik hat sich auf die Niedrig-Energie-Trennverfahren Extraktion, Kristallisation und Chromatografie spezialisiert. Diese Trennverfahren sind, wie auch Membranverfahren, selektiv und produkt-schonend und bieten das Potenzial, Zielprodukte auch aus sehr komplexen Stoffgemischen abzutrennen. Außerdem weisen sie im Vergleich zur Destillation einen reduzierten Energieverbrauch auf. Dadurch können nicht nur Produktionskosten gesenkt werden, auch die CO<sub>2</sub>-Freisetzung wird reduziert.<sup>[3]</sup> So erfüllen die Trennverfahren die grundlegenden Voraussetzungen zum Einsatz in Bioraffinerien. Sie müssen jedoch auf die biologisch bedingte Variabilität und Vielfalt der Biomasse angepasst werden. Daher werden diese Trennverfahren auf Basis von experimentellen



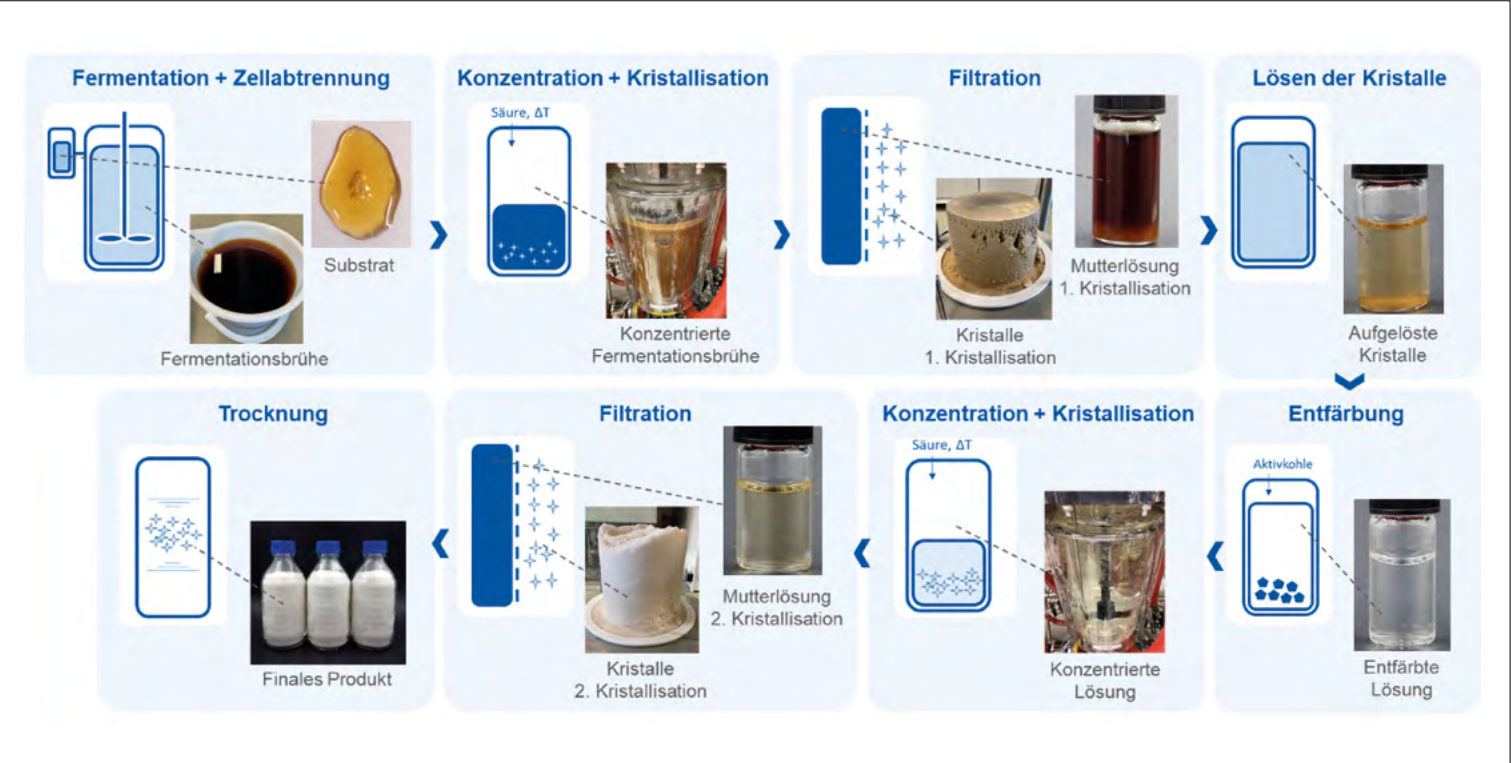


Bild 2: Aufarbeitung von Itaconsäure in der Bioraffinerie

und modellbasierten Untersuchungen der physikalischen und chemischen Zusammenhänge weiterentwickelt. Durch ein grundlegendes Prozessverständnis können innovative Verfahren entwickelt werden, welche Hilfsstoff-, Lösungsmittel- und Wasserströme vermindern und recyceln sowie Ausbeuten erhöhen.

#### Anwendungsbeispiel Bioraffinerie: Itaconsäure aus Dicksaft

In diesem Zusammenhang arbeitet der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik mit verschiedenen Projektpartnern im Projekt „UpRePP: Upcycling von Regionalen Reststoffen zur Produktion von Plattformchemikalien“ an der Herstellung von Plattformchemikalien aus regionalen Reststoffen der Lebensmittelindustrie. Das Projekt aus dem Themenfeld „Integrierte Bioraffinerie“ ist Teil des vom Bundesforschungsministeriums im Rahmen des Strukturwandels im Rheinischen Revier geförderten „Innovationsclusters BioökonomieREVIER“. Ziel der insgesamt 14 Forschungsvorhaben ist der Transfer erfolgversprechender Innovationsansätze aus der biobasierten Forschung in die Wirtschaft für

mehr Wertschöpfung und Nachhaltigkeit.<sup>[4]</sup> Im Projekt UpRePP wird derzeit die Herstellung von Carbonsäuren untersucht. Carbonsäuren wie beispielsweise Milchsäure sind aufgrund ihres breiten Anwendungsspektrums im Bereich Bioplastik wichtige chemische Bausteine in Bioraffinerien.<sup>[5]</sup>

In einer ersten Fallstudie wurde in der Bioraffinerie der Aachener Verfahrenstechnik im Center for Next Generation Processes and Products (NGP<sup>2</sup>) Dicksaft, ein Stoffstrom der Zuckerindustrie, im 100 Liter Maßstab mikrobiell zu Itaconsäure umgesetzt und aufgearbeitet, siehe Bild 2. Anhand dieser Fallstudie werden die zentralen Herausforderungen der Produktion von Carbonsäuren aus Rest- und Nebenströmen aufgezeigt und technische Lösungen entwickelt.

Die Aufarbeitung der Itaconsäure erfolgte durch mehrfache Kristallisation und einem zusätzlichen Trennschritt zur Entfernung der im Substrat enthaltenen Farbstoffe.<sup>[6]</sup> In vielen biotechnologischen Aufarbeitungsprozessen werden große Mengen an Hilfsstoffen verwendet und nicht rückgewonnen, sodass die Verfahren hohe Abwasser- und Abfallmengen verursachen, die häufig eine industrielle Um-

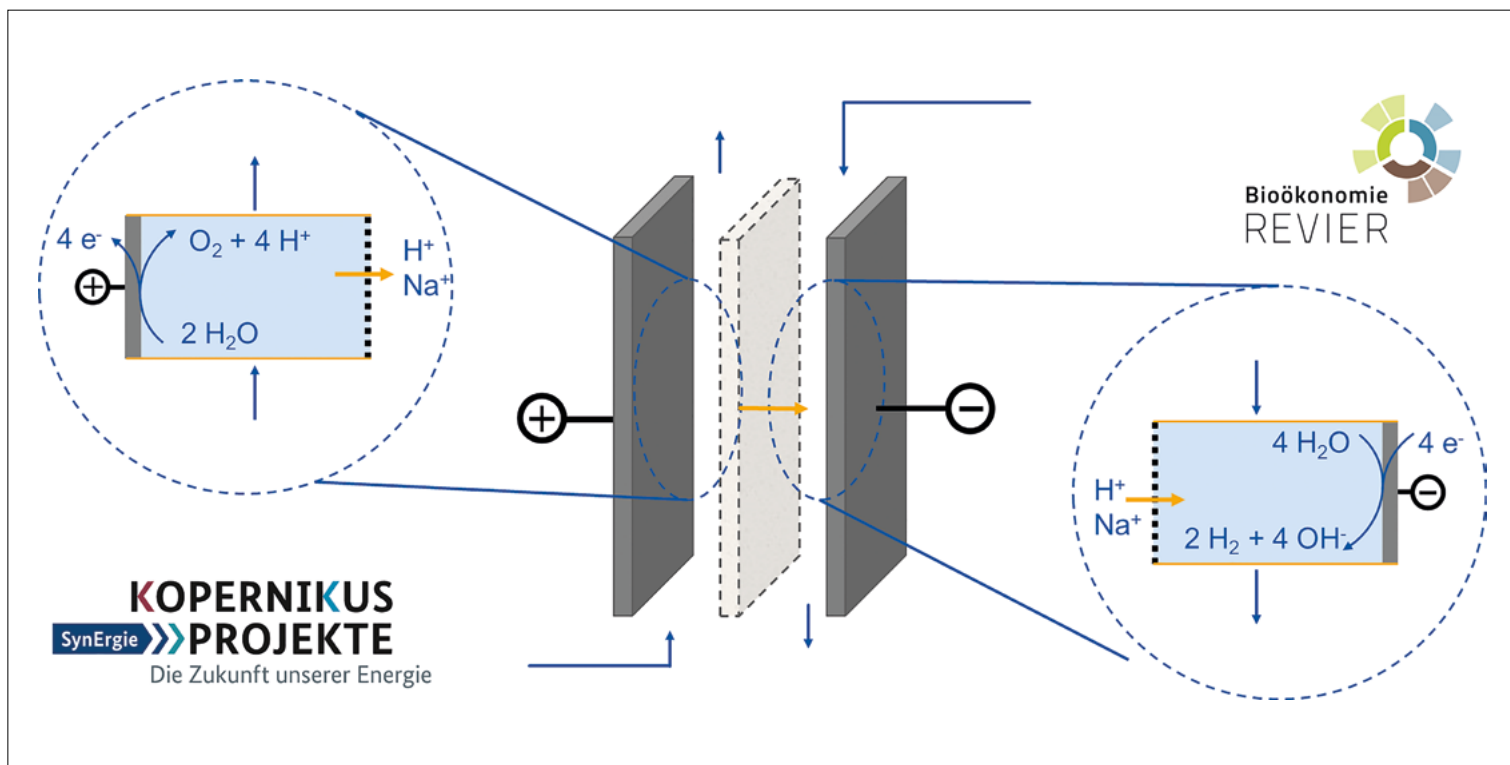


Bild 3: Grundprinzip der elektrochemischen pH-Wert-Einstellung

setzung verhindern. Bei der Produktion von Carbonsäuren liegt die Herausforderung in der hohen Salzfracht im Prozess. Diese resultiert aus den unterschiedlichen pH-Werten in Fermentation und Aufarbeitung. Wird bei neutralen pH-Werten fermentiert, werden durch Base- und Säurezugabe über den Prozess etwa so viele Salz- wie Carbonsäuremoleküle gebildet.<sup>[7]</sup> Dieses Salz muss kostenpflichtig entsorgt werden. Daraus leitet sich Forschungsbedarf von der Stammentwicklung bis zur Aufarbeitung ab. Im Projekt UpRePP wurde von Projektpartnern ein Mikroorganismus entwickelt, der bei niedrigen pH-Werten produziert<sup>[8]</sup>, sodass die notwendige Säuremenge in der Aufarbeitung reduziert wird.

#### Elektrochemische Trennverfahren zur Reduktion der Salzfracht

Um eine hohe Salzfracht im Prozess gänzlich zu vermeiden, entwickelt der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik – unter anderem in einem weiteren Projekt des Innovationsclusters BioökonomieREVIER, ZeTa und im Kopernikus-Projekt SynErgie – elektrochemische Trennverfahren, die ohne pH-Stellmittel auskommen. Hier wird der pH-Wert

durch Wasserelektrolyse eingestellt. An der Kathode wird der pH-Wert durch die Produktion von Hydroxidionen angehoben, während an der Anode Protonen zur Absenkung des pH-Werts erzeugt werden, siehe Bild 3. Mit diesem Verfahren fallen keine Salzemissionen an und Hilfsstoff-, Lösungsmittel- und Wasserströme können vermehrt recycelt werden.<sup>[7]</sup>

#### In-situ-Produktabtrennung für höhere Ausbeuten

Im Projekt UpRePP wurde außerdem eine grundlegende Herausforderung in der Produktion von Plattformchemikalien aus Reststoffen deutlich. Rest- und Nebenströme der Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie werden meist nicht entsorgt, sondern beispielsweise als Futtermittel verkauft. Für eine Verwendung in Bioraffinerieprozessen müssen die erzielbaren Gewinne höher sein. Je höher die Ausbeute, desto höher die Gewinnmargen und somit die Wettbewerbsfähigkeit. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Ausbeute liegt in der prozesstechnischen Umgehung der für die biotechnologische Produktion von organischen Säuren und Alkoholen



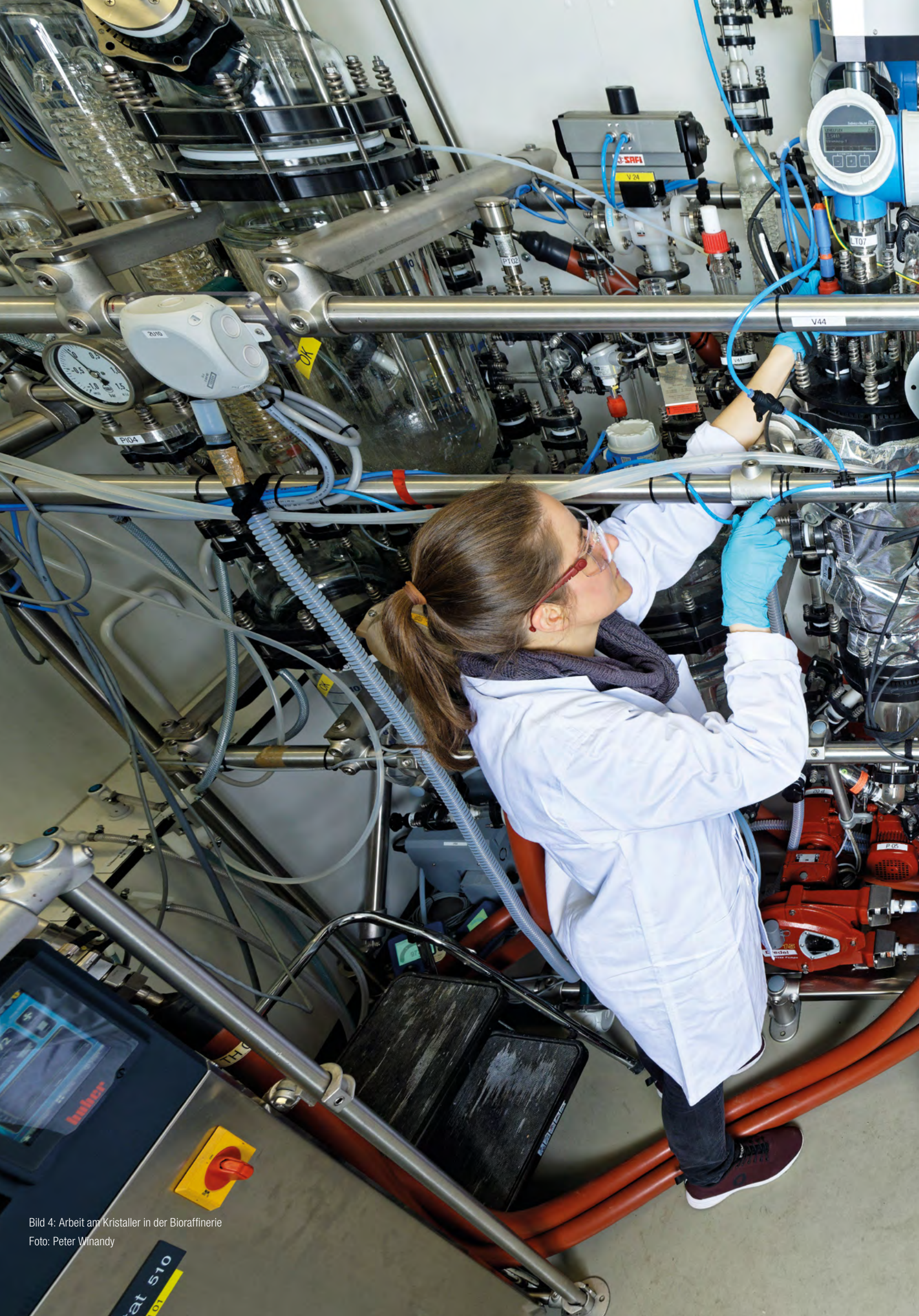


Bild 4: Arbeit am Kristaller in der Bioraffinerie  
Foto: Peter Wlhandy







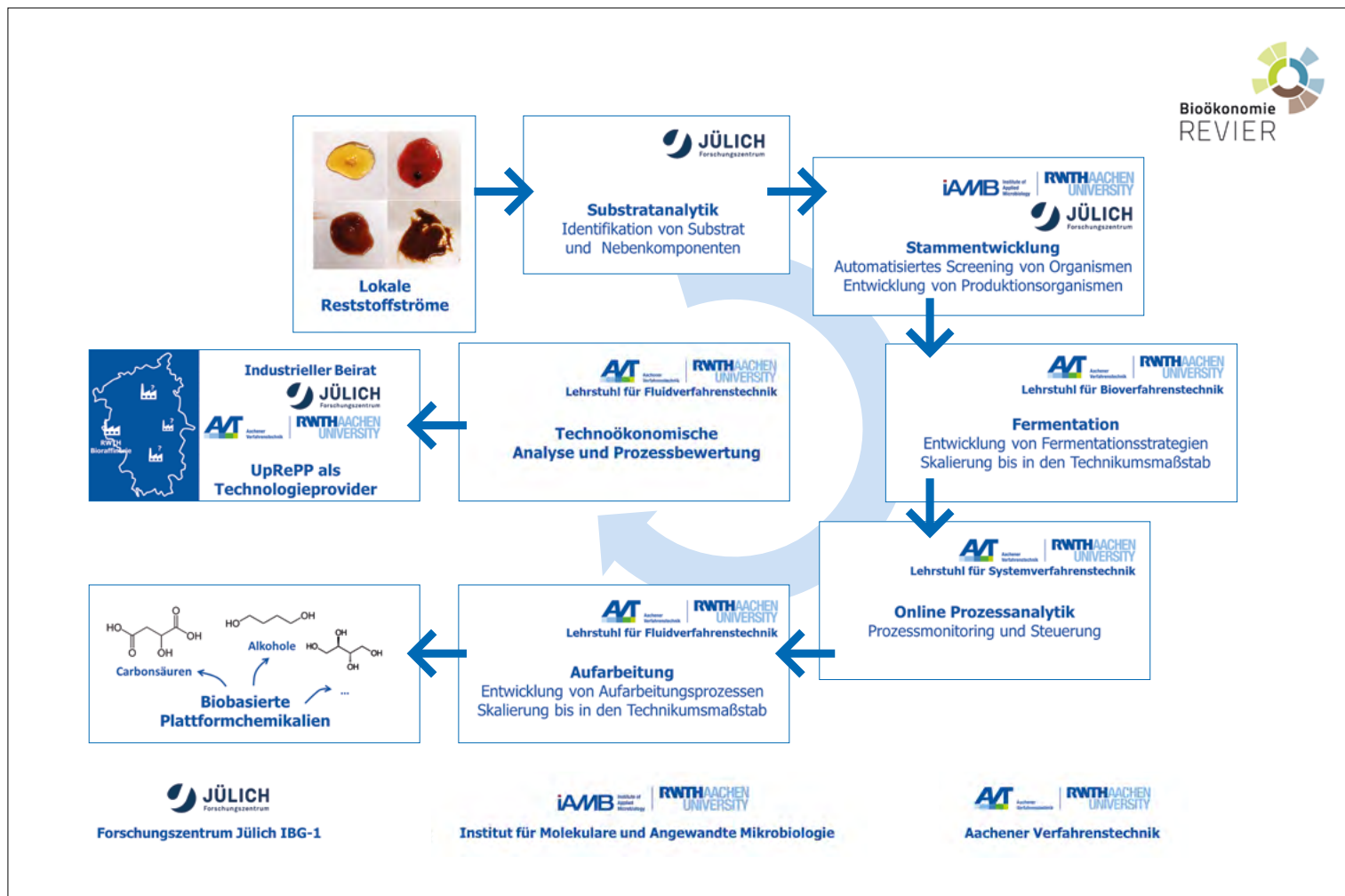


Bild 5: Interdisziplinäre Prozessentwicklung im BioökonomieREVIER-Projekt „UpRePP: Upcycling von Regionalen Reststoffen zur Produktion von Plattformchemikalien“

typischen Produktinhibition. Analog zur Weinherstellung stellen die Organismen ab einer gewissen Produktkonzentration die Produktion ein und müssen ersetzt werden. Dazu ist zusätzliches Substrat notwendig, welches nicht zur Produktbildung zur Verfügung steht. Durch eine kontinuierliche Produktabtrennung wird die toxische Produktkonzentration nicht erreicht, sodass die Zellen nahezu dauerhaft produzieren.<sup>[9]</sup> Gemeinsam mit den Lehrstühlen für Systemverfahrenstechnik (AVT.SVT) und für Bioverfahrenstechnik (AVT.BioVT) wird intensiv an der direkten Abtrennung des Produkts während der Fermentation als in-situ-Produktabtrennung gearbeitet. Insbesondere die Extraktion wird hier als Trennverfahren eingesetzt. Sie ist wie die Kristallisation pH-Wert-abhängig und kann mit elektrochemischen Trenntechniken verknüpft werden. Durch diese Integration von Stoffumwandlung und Trenntechnik in Kombination mit neuen Technologien zur Prozessintensivierung können Prozesse mit niedrigen Salzemissionen und hohen Ausbeuten realisiert werden.<sup>[7]</sup>

### Ganzheitliche Prozessentwicklung für ökonomische Kreislaufprozesse

Für die erfolgreiche Etablierung regionaler Wertschöpfungsnetzwerke der Kreislaufwirtschaft, die Reststoffströme der Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie nutzen, ist nicht nur die Entwicklung von Trennverfahren essenziell. Vielmehr müssen Mikroorganismen, Fermentation, Produktaufarbeitung und Prozessanalytik simultan entwickelt und auf die individuellen Reststoffströme abgestimmt werden. Daher sind im Projekt UpRePP Partner aus der RWTH Aachen und dem Forschungszentrum Jülich vertreten, siehe Bild 5. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler werden von einem industriellen Beirat aus Lebensmittelindustrie, Anlagenbau und Chemie beraten. Mittelfristig ist es das Ziel, eine Technologieentwicklungs- und Bewertungsplattform zu etablieren, die es ermöglicht, für unterschiedliche Biomasseströme innovative Prozesskonzepte für diverse hochwertige Produkte zu entwickeln und diese techno-ökonomisch zu bewerten.



Bild 6: Probenahme am Membranmodul zur elektrochemischen pH-Wert-Einstellung

Foto: Peter Winandy

Die Verfahrenstechnik ist daher eine Schlüsseldisziplin für die Entwicklung neuer Prozesse zur effizienten Rückgewinnung von Wertstoffen aus Reststoffen aller Art. So finden die im Netzwerk entwickelten Trennverfahren auch in anderen Bereichen der Kreislaufwirtschaft, wie im Metall- oder Polymerrecycling, Anwendung. Durch den Einsatz von Niedrig-Energie-Trennverfahren wird ein ressourcenschonendes und energieeffizientes Recycling ermöglicht.

#### Quellen

- [1] <https://www.statista.com/statistics/302081/revenue-of-global-chemical-industry/>
- [2] <https://www.marketresearchfuture.com/reports/bio-based-chemicals-market-5706>
- [3] Sholl, D.; Lively, R. (2016): <https://doi.org/10.1038/532435a>
- [4] <https://www.biooekonomierevier.de/innolabs>
- [5] Werpy, T.; Peterson, G. (2004): <http://www.osti.gov/bridge>
- [6] Saur, K.; Kiefel, R.; Niehoff, P.; et al. (2022): Publication in preparation
- [7] Gausmann, M.; Kocks, C.; Pastoors, J., et al. (2021): <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02194>
- [8] Hosseinpour Tehrani, H.; Saur, K.; Tharmasothirajan, A., et al. (2019): <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1266-y>
- [9] Kreyenschulte, D.; Heyman, B.; Eggert, A., et al. (2018): <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.04.014>

#### Autoren

Katharina Saur, M.Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Jupke ist Inhaber des Lehrstuhls für Fluidverfahrenstechnik der Aachener Verfahrenstechnik.



# Grüner Stahl mit rotem Problem

## Stahlrecycling im Kontext der Kreislaufwirtschaft

Responsible for more than 20% of industrial CO<sub>2</sub> emissions, steel production offers a potent lever on the way to a climate-neutral society. Of the 2 billion tons of crude steel produced each year, around 70% is produced via the primary route – reduction of oxidic iron ore with coking coal. This produces around 1.9 tons of CO<sub>2</sub> per tonne of pig iron produced. Technologies such as carbon capture and storage (CCS) or carbon capture and usage (CCU) in the chemical industry will not be able to compensate for the enormous quantities. There is therefore a broad consensus today that the future of iron production will lie in replacing coke reduction in the blast furnace with direct reduction using hydrogen. In the shaft furnace (e.g. MIDREX plant), the hydrogen binds off the oxygen of the iron ore in the solid state and porous sponge iron (DRI, direct reduced iron) is produced.

The production and transport of the enormous quantities of hydrogen required for this seem utopian; on the other hand, there is no alternative to this, and the great challenge for politics today is to create the necessary framework conditions, such as adaptation of the EU emission trading system, in order to secure the global competitiveness of Europe. CO<sub>2</sub> emissions can be reduced much more efficiently by expanding the secondary route. The melting of scrap (and/or DRI) in the electric arc furnace requires only 20% of the energy of the primary route and, depending on the electricity mix used, can already be carried out in a climate-neutral manner. Is this the royal path for a decarbonized steel industry?

In den letzten 100 Jahre gab es einen exponentiellen Anstieg bei der Stahlerzeugung, dieser knickte lediglich infolge von Wirtschaftskrisen – zuletzt 2008 – zeitweise ab. Der zum Recycling zur Verfügung stehende Stahlschrott reicht nicht aus, um den aktuellen Stahlbedarf nur annäherungsweise zu decken. Wie Bild 1 zeigt, liegt die Entwicklung des Schrottangebots durchschnittlich gut 20 Jahre hinter der Primärerzeugung. Insbesondere im Stahlbau, aber auch im Fahrzeugbau, verbleibt der Stahl zum Teil über Jahrzehnte und kommt entsprechend mit zeitlichem Verzug zu den Elektrostahlwerken. Mit einem zunehmenden Recyclinganteil wird sich ein Problem einstellen: Die allmähliche Anreicherung beziehungsweise Akkumulation von Verunreinigungen. Moderne Stähle enthalten neben den primären Legierungselementen, wie Kohlenstoff, Mangan, Chrom und Nickel, Verunreinigungen und Spuren-

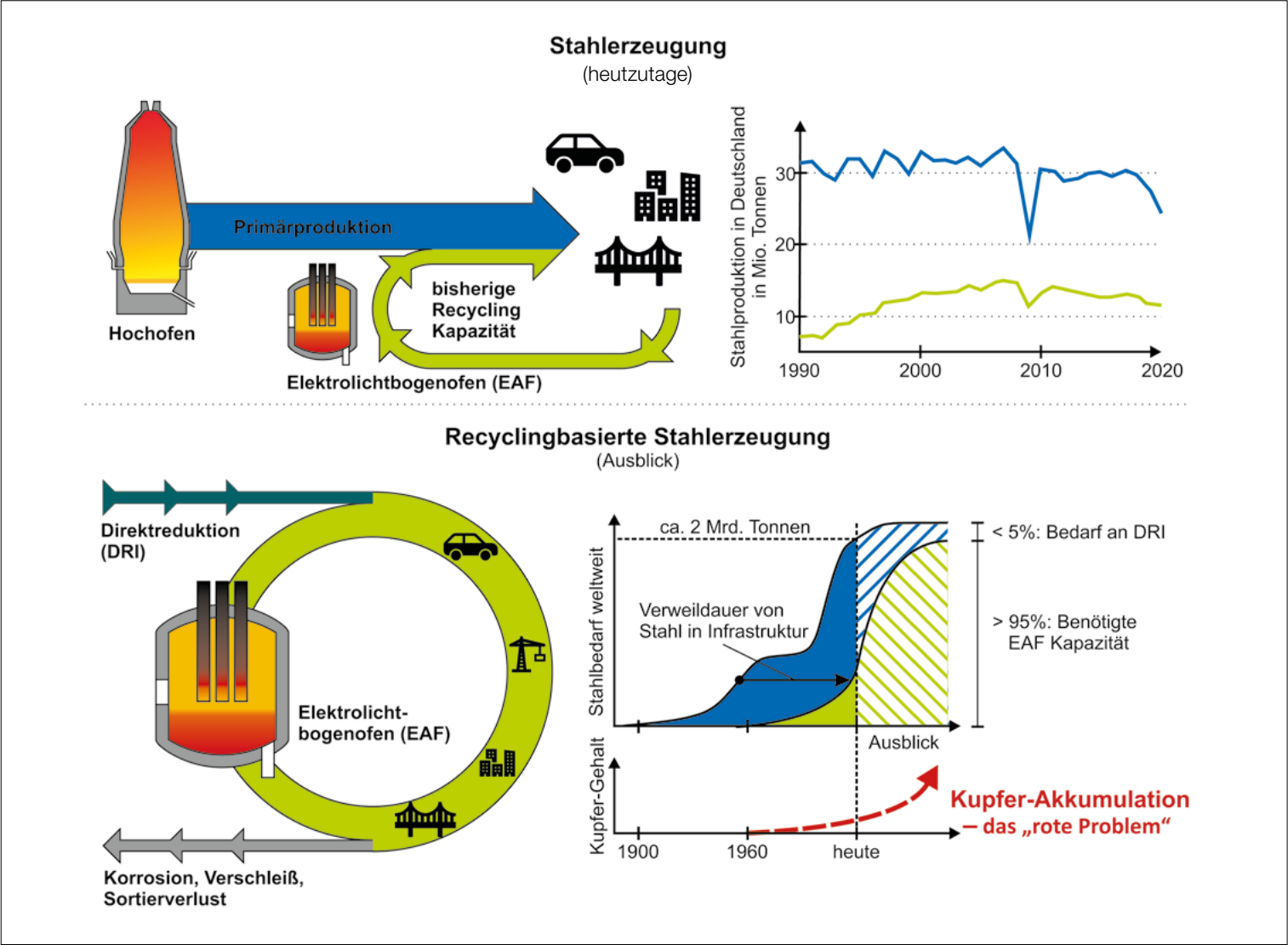


Bild 1: Vergleich der aktuellen Stahlerzeugung mit einer klimafreundlichen, recyclingbasierten Stahlerzeugung. Der Anstieg des akkumulierten Kupfergehalts im recycelten Stahl wird als das „rote Problem“ bezeichnet.

elemente, die sich zum Teil metallurgisch nur schwer entfernen lassen. So kann Kupfer als edles Element durch die Sauerstoffbehandlung nicht in die Schlacke überführt werden. Wenn es zukünftig keine kupferfreien Stähle zur Verdünnung mehr gibt, wird die allmähliche Akkumulation von rötlichem Kupfermetall zum „roten Problem“.<sup>[1]</sup> Überschreitet die Kupfer-Konzentration die Löslichkeitsgrenze, kommt es lokal zu Anreicherungen elementaren Kupfers mit einem gegenüber Stahl geringerem Schmelzpunkt. Solche Stellen sind gefürchtet, denn hier treten bei der Umformung Risse auf. Diese führen zu einer gravierenden Verschlechterung der mechanisch technologischen Eigenschaften. Das „rote Problem“ wird verschärft durch den zunehmenden Anteil an Kupfer im Stoffkreislauf, beispielsweise durch die Elektromobilität. Immer mehr Kupfer – durchaus auch komplette Elektromotoren – landen im

Schrott und später im Elektrolichtbogenofen, wo entweder mit kupferfreien Schrotten aus der Produktion verdünnt werden muss oder qualitativ minderwertige Produkte entstehen, wie etwa Bewehrungsstahl für Stahlbetonbau.

**Verunreinigungstolerante Stähle**

Am Institut für Eisenhüttenkunde beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler seit einigen Jahren mit der Entwicklung von Stählen, in denen Kupfer als Legierungselement zur Festigkeitssteigerung genutzt wird. Durch Zugabe von bis zu zwei Gewichtsprozent Kupfer in verschiedene Stähle beispielsweise Vergütungsstahl 42CrMo4 + Cu oder 21CuNi2-2 kann nicht nur eine Festigkeitssteigerung, sondern auch eine hohe Defekttoleranz bei schwingender Beanspruchung<sup>[1, 2]</sup> erreicht werden. Dazu wird der Stahl bei 900 °C in das Austenitgebiet überführt, wo die Kupfer-Löslichkeit



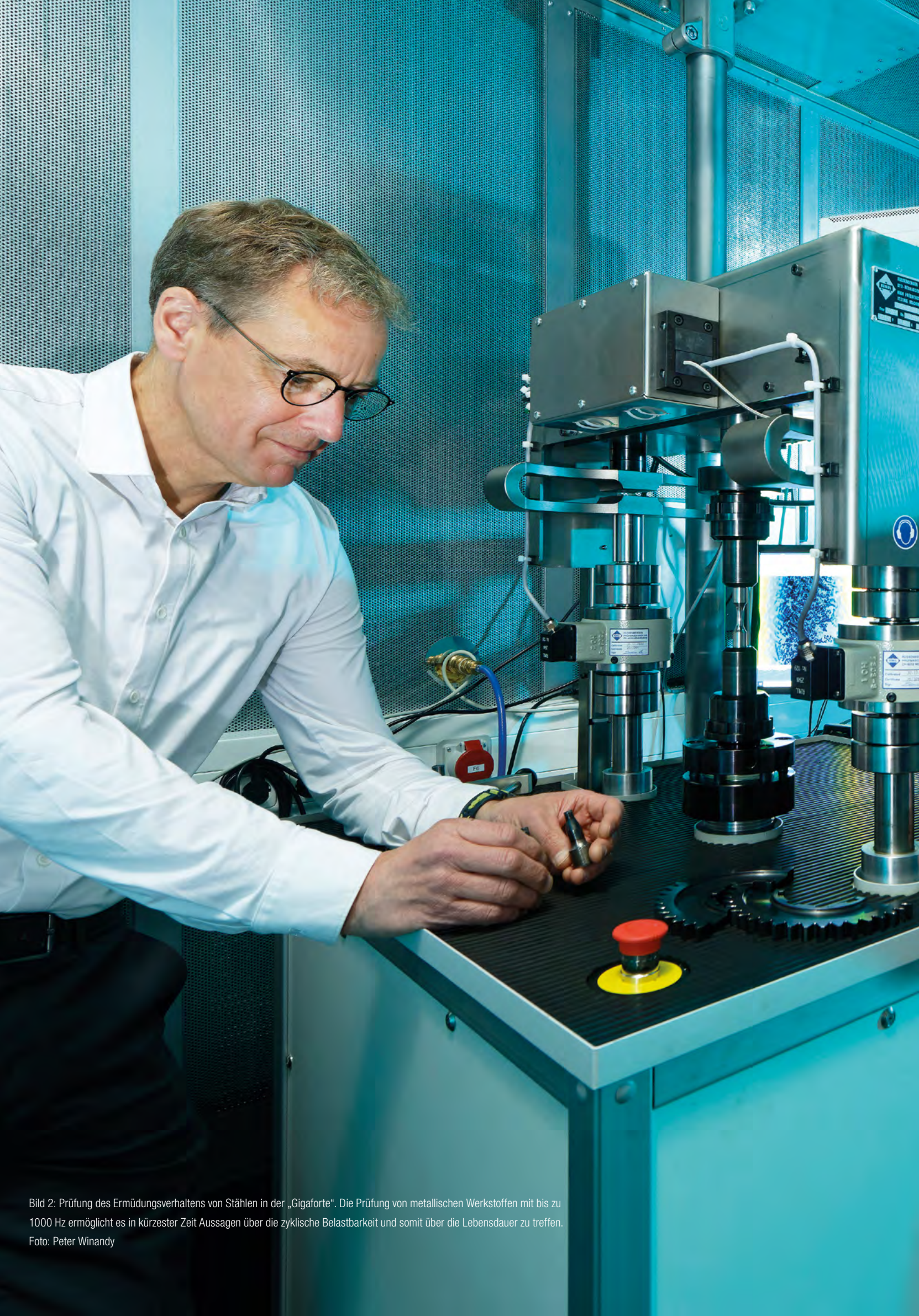
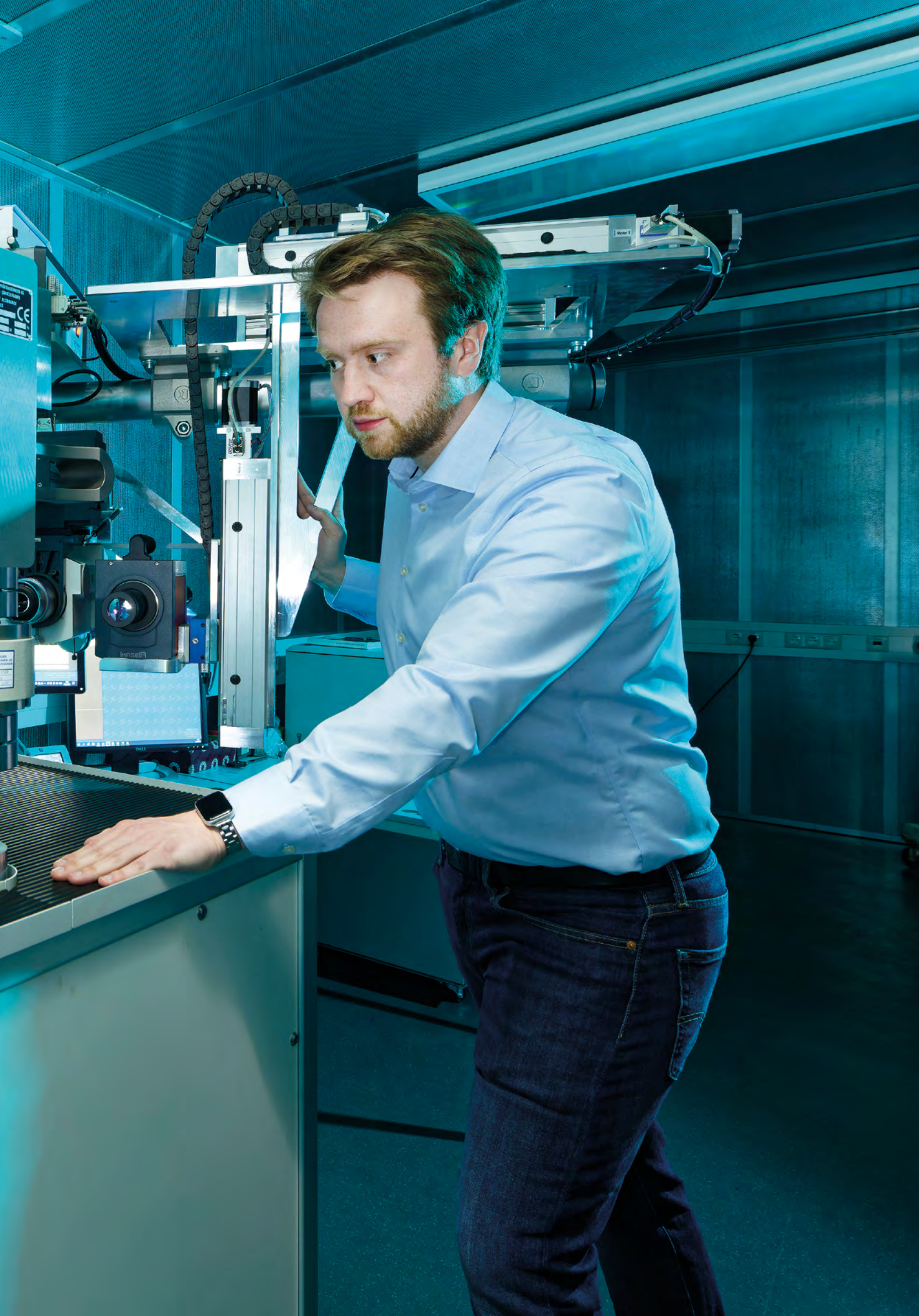


Bild 2: Prüfung des Ermüdungsverhaltens von Stählen in der „Gigaforce“. Die Prüfung von metallischen Werkstoffen mit bis zu 1000 Hz ermöglicht es in kürzester Zeit Aussagen über die zyklische Belastbarkeit und somit über die Lebensdauer zu treffen.  
Foto: Peter Winandy







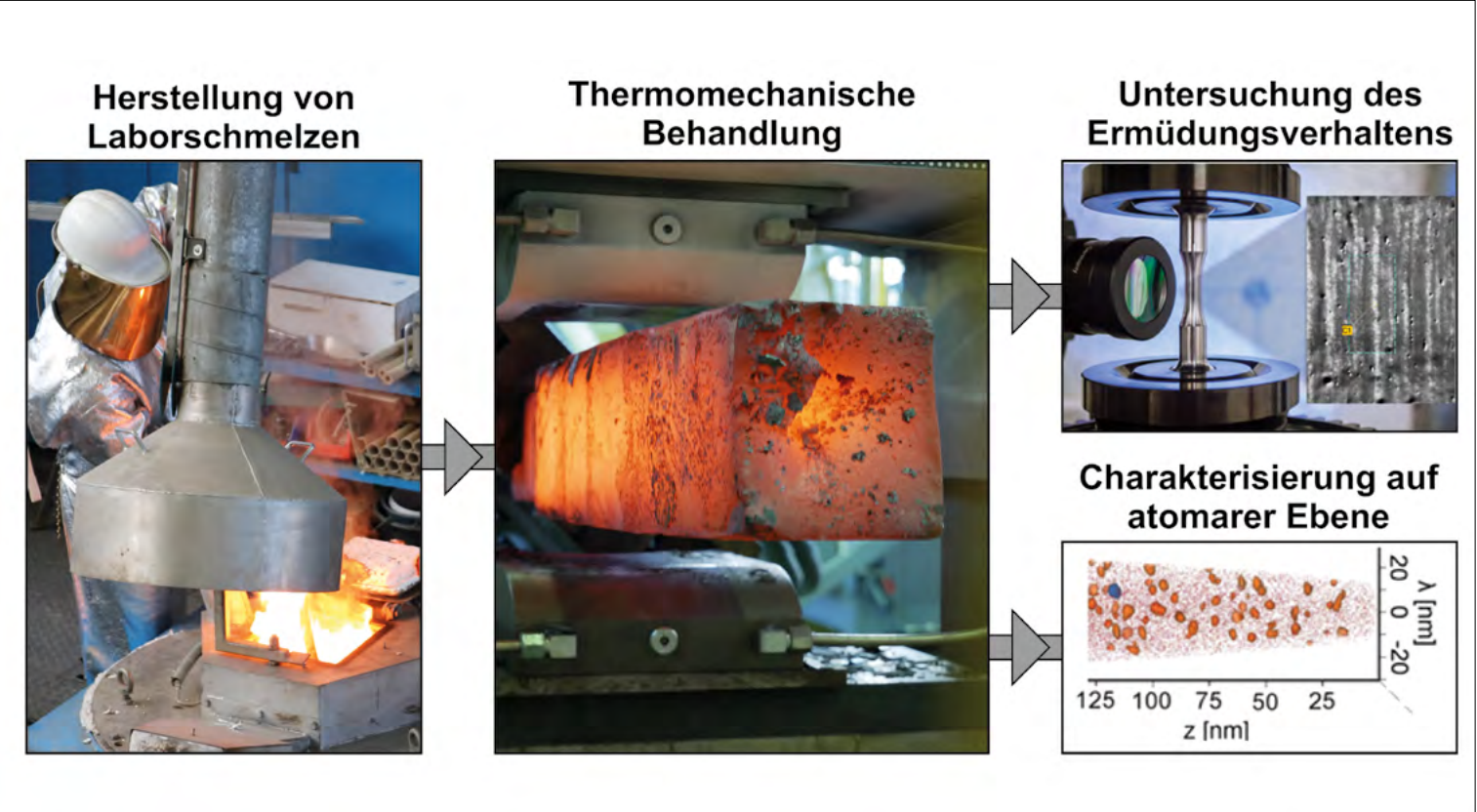


Bild 3: Workflow am Institut für Eisenhüttenkunde. Nach der gießtechnischen Herstellung und thermomechanischen Behandlung neu entwickelter Stähle werden unterschiedliche Charakterisierungsmethoden angewandt, um vom Ermüdungsverhalten bis zur Nanostruktur den Werkstoff zu beschreiben.

vergleichsweise hoch ist. Schreckt man den Stahl ab, bleibt das Kupfer zwangsgelöst. Erst infolge einer nachgeschalteten Auslagerungsbehandlung bei 550 °C werden die Kupferatome wieder beweglich und bilden nanoskalige Ausscheidungen. Mit Hilfe der 3D-Atomsondentomographie ist es möglich, die Entwicklung dieser Ausscheidungen bis in die atomare Längenskala nachzuverfolgen, siehe Bild 3.

Ein großes Potenzial für Anwendungen in der Mobilität oder hoch beanspruchte Infrastrukturkomponenten wie Brückenbauwerke oder Windkraftanlagen bieten Mittelmangan-Stähle, sogenannte Advanced High Strength Steels (AHSS) der dritten Generation. Mangan-Konzentrationen von vier Gewichtsprozent und mehr sorgen dafür, dass die Stähle mit einer verkürzten Prozesskette gefertigt werden können.<sup>[3]</sup> Wird der beim Härten erzeugte Martensit einem Glühen im Zweiphasengebiet Austenit/Ferrit unterzogen, wandelt sich ein Teil des Martensits in Austenit um, der sich mit Kohlenstoff anreichert. Beim Abkühlen entsteht ein ultrafeinkörniges Gefüge aus primärem und sekundärem Martensit mit feinverteiltem Restaustenit. Aktuelle Arbeiten<sup>[4]</sup>

weisen darauf hin, dass diese Stahlgüten eine hohe Toleranz gegenüber Kupfer aufweisen und Kupfer sogar zu einer Erhöhung des Widerstands gegenüber Wasserstoffversprödung führen kann.

**Kreislaufwirtschaft Stahl**

Verunreinigungstolerante Stahlqualitäten sind ein wichtiger Beitrag zur Lösung der Kupferproblematik. Ihr technisch relevanter Einsatz benötigt jedoch eine sorgfältige Abstimmung der Wertschöpfungsketten und der Stoffströme. Nicht alle Stahlanwendungsgebiete können auf verunreinigungstolerante Qualitäten umgestellt werden. Insbesondere Verpackungsstähle, die eine extrem hohe Umformbarkeit bis zu Wandstärken von 60 µm erfordern, werden auf die nur durch die Primärroute wirtschaftlich erzielbaren sehr hohen Reinheitsgrade angewiesen sein. Auch wenn ein stationäres Gleichgewicht zwischen Schrottrücklauf und Stahlneuproduktion erreicht sein wird, wird ein gewisser Anteil des erzeugten Stahls durch Korrosion, Verschleiß oder Nichttrennbarkeit nicht wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden können. Dieser Anteil kann durch Direktreduktion von

Eisenerz – das nicht als kritische Ressource gilt – dauerhaft kompensiert werden. Zu beachten ist, dass auch die Sekundär-route Stahlrecycling mit einem erheblichen Energiebedarf verknüpft ist. Knapp 2 GJ (550 kWh) und 10 m³ Erdgas werden heute zum Einschmelzen von einer Tonne Schrott benötigt. Daher sollte die Aufmerksamkeit auf die Erhöhung der Werkstoffeffizienz gerichtet werden. Konsequenter Leichtbau durch hochfeste Stahlgüten und Erhöhung der Lebensdauer bergen ein gewaltiges Potenzial zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks, insbesondere in einer Übergangszeit, in der noch ein großer Teil des Energiebedarfs durch nichtregenerative Energieträger gedeckt wird. Hochfeste Stähle werden seit Jahrzehnten am Institut für Eisenhüttenkunde erforscht. Die Bewertung der mikrostrukturellen Schädigung während schwingender Beanspruchung auch bei sehr hohen Zyklenzahlen ist ein vergleichsweise neues Arbeitsgebiet. Je präziser die Restlebensdauer von Maschinenelementen oder Stahlbausegmenten vorhergesagt werden kann, umso eher ist

eine Erhöhung der Einsatzlebensdauer oder eine Wiedernutzung möglich, siehe Bild 4. Der Einsatz hochauflösender Sensoren und die mikroskopische In-situ-Beobachtung von Proben während zyklischer Beanspruchung in Schwingprüfständen, die Frequenzen von bis zu 20.000 Hertz zulassen, zeigen den Zusammenhang zwischen Ermüdungsschädigung und lokaler Mikrostruktur.<sup>[5]</sup> Dies ermöglicht nicht nur das Design ermüdungs-resistenter Werkstoffe. Die Einstellung einer Schadenstoleranz, die gleichzeitig als Signatur für die eingebrachte Gesamtschädigung dient, ist Voraussetzung für die sichere Wiederinbetriebnahme gebrauchter Stahlstrukturen. Schlüssel ist der sogenannte TRIP-Effekt. TRIP (transformation-induced plasticity)-Effekt, wandelt sich metastabiler paramagnetischer Austenit infolge einer mechanischen Beanspruchung in ferromagnetischen Martensit um, der durch magnetische Messverfahren detektiert werden kann.<sup>[4]</sup> Der Re-Use- beziehungsweise Re-Manufacturing-Gedanke setzt eine radikale Umkehr von heutigen Geschäftsmodellen voraus, die

auf Tonnage und Produktindividualisierung mit hoher Funktionsintegration beruhen. Standardisierte und kodierte Einzelkomponenten mit „Schädigungsgedächtnis“ können die Basis für eine nachhaltige Produktion sein, die zunehmend auf Reparatur und Zerlegung in wiederverwendbare oder aufarbeitbare Einzelteile setzt. Dieser Aspekt der Kreislaufwirtschaft wirkt sich natürlich auch auf das zur Verfügung stehende Schrottangebot aus und unterstreicht die Bedeutung eines innovativen Stoffstrommanagements. Nicht nur Infrastruktur, Mobilität und Maschinenbau, sondern auch die Erreichung der globalen Klimaziele sind ohne den Konstruktionswerkstoff Stahl undenkbar. Aus technologischer Sicht sind Lösungen in Reichweite: Wasserstoff kann Kokskohle zur Reduktion von Eisenerz ersetzen. Dies erfordert jedoch nicht nur eine zuverlässige und kostengünstige Wasserstoffversorgung, sondern auch gewaltige Investitionen. Die Verknüpfung von Hochofen und Konverter im integrierten Hüttenwerk wird durch Schachttöfen, in denen fester Eisenschwamm erzeugt wird, abgelöst.

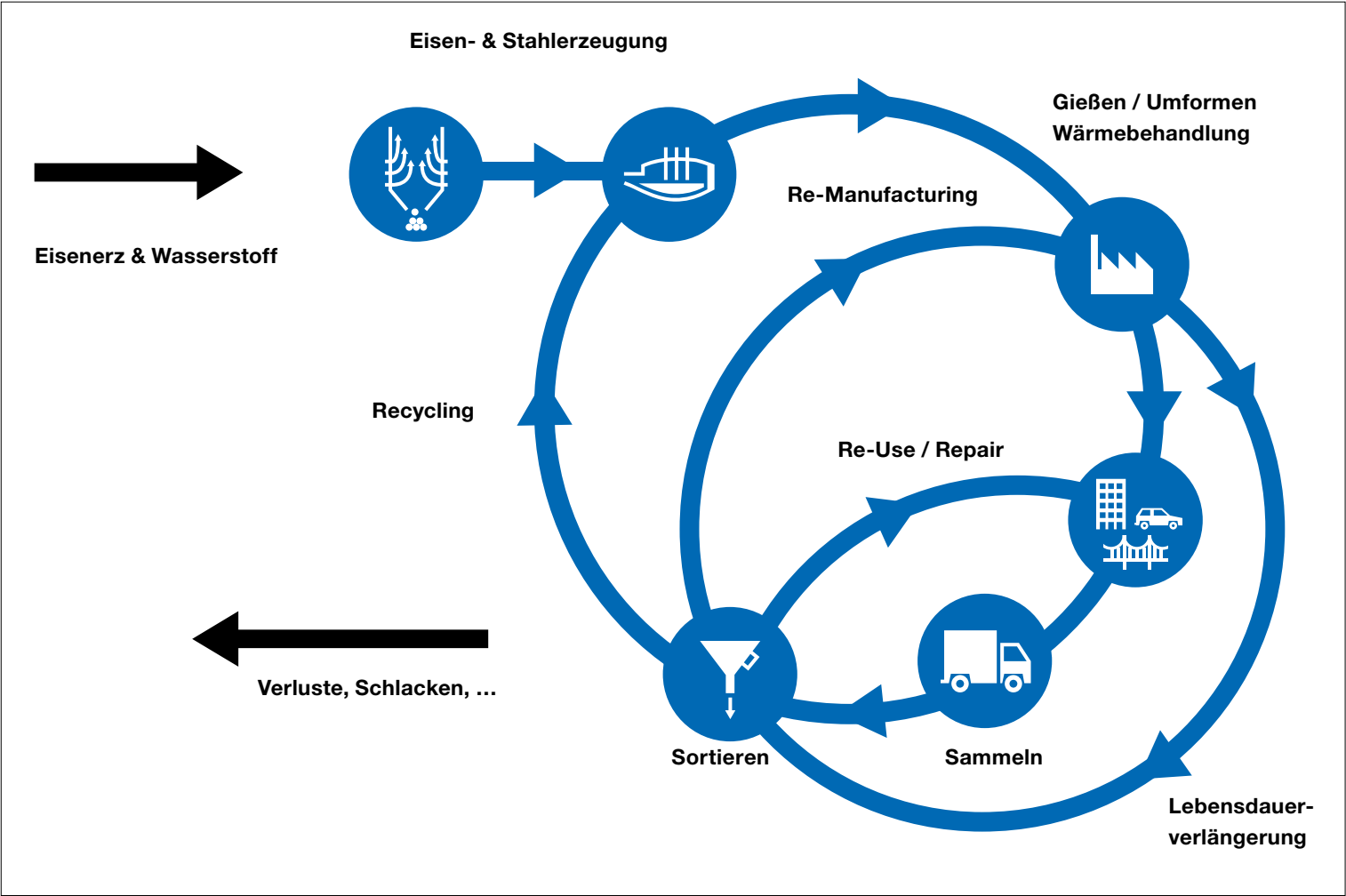


Bild 4: Die Kreislaufwirtschaft von Stahlprodukten. Unterschiedlicher Ansätze ermöglichen nachhaltiges Wirtschaften mit Stahlprodukten.





Bild 5: Bestimmung der Rissinitiation durch korrelative Mikroskopie und Thermographie.  
Foto: Peter Winandy

Dieser kann im Elektrostahlwerk durchaus dezentral und gemeinsam mit Schrott eingeschmolzen werden. Schätzungen gehen von Investitionen in Höhe von 278 Milliarden US-Dollar für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie bis zum Jahr 2050 aus.<sup>[6]</sup> Herausforderung ist neben der Wasserstoffinfrastruktur vor allem die metallurgische

Sicherstellung hoch qualitativer Stahlprodukte. Die bei der Direktreduktion entfallende Schlackenmetallurgie des Hochofens muss vom Elektrolichtbogenofen mitgetragen werden. Mit zunehmendem Schrottanteil an der Gesamtstahlerzeugung wird darüber hinaus die Akkumulation von Begleitelementen, insbesondere Kupfer, an Bedeutung gewinnen.





Hier gilt es durch bessere Verfahren zur Abtrennung beziehungsweise Vermeidung von Kupfer und die gleichzeitige Entwicklung verunreinigungstoleranter Stähle einen stationären Zustand einzustellen. Maßnahmen zur Erhöhung der Werkstoffeffizienz, Leichtbau und Lebensdauererhöhung, tragen dazu bei, den Werkstoff Stahl klimaneutral im Kreislauf

zu halten. Abgesehen von einigen wenigen korrosions- und verschleißbedingten Verlusten handelt es sich bei Stahl um einen unendlich und ohne Qualitätseinbuße einsetzbaren Werkstoff.

## Literatur

- [1] Hinrichs, T.: Untersuchung der mechanischen Eigenschaften eines nachhaltigen und verunreinigungstoleranten Vergütungsstahls: 42CrMo4 mit Cu-Zusatz. Master-Arbeit, (2021), Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen University, Aachen
- [2] Görzen, D., Schwich, H., Blinn, B., Wenwen, S., Krupp, U., Bleck, W., Beck, T.: Influence of Cu precipitates and C content on the defect tolerance of steels. *International Journal of Fatigue* 144 (2021) 4, S. 1-12, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106042
- [3] Gramlich, A., Schönborn, S., Schmiedl, T., Baumgartner, J., Krupp, U.: Lufthärtende duktile Schmiedestähle für zyklische Beanspruchung. *massivUMFORMUNG*, 2021 2, S. 64-69
- [4] Wan, D., Ma, Y., Sun, B., Mohammad, S., Razavi, J., Wang, D., Lu, X., Song, W.: Evaluation of hydrogen effect on the fatigue crack growth behaviour of medium-Mn steels via in-situ hydrogen plasma charging in an environmental scanning electron microscope. *Journal of Materials Science and Technology*, 85 (2021), S. 30-43, DOI:10.1016/j.jmst.2020.12.069
- [5] Krupp, U., Giertler, A., Koschella, K.: Microscopic damage evolution during very high cycle fatigue (VHCF) of tempered martensitic steel, *Fatigue Fract. Eng. M*, 40 (2017) 1731-1740, DOI: 10.1016/j.pro-eng.2016.08.885
- [6] Paßmann, T., (ed.): 278 Mrd. US-Dollar zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie. *Stahl & Eisen* 141 (2021) 11, S. 9.

## Autoren

Alexander Gramlich, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenhüttenkunde.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Krupp ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der Metalle und Leiter des Instituts für Eisenhüttenkunde.



# Alttextilien als Rohstoffquelle?

## Mechanisches und chemisches Recycling

So-called “fast fashion” has massively increased the volume of textile waste in recent years due to short fashion cycles and low-cost, low-quality clothing textiles. As a result, existing waste management options are reaching their limits. The Institut für Textiltechnik at RWTH Aachen University is addressing these challenges in numerous research projects.

Durch sogenannte „Fast-Fashion“ mit kurzen Modezyklen und kostengünstige Bekleidungstextilien niedriger Qualität hat sich das Aufkommen an Textilabfällen massiv erhöht. In der Folge gelangen die bisherigen Abfallbewirtschaftungsmöglichkeiten an ihre Grenzen. Die globale Faserproduktion betrug im Jahr 2019 fast 120 Millionen Tonnen<sup>[1]</sup>. Davon zählten mehr als zwei Drittel zu den Chemiefasern, welche auf Basis natürlicher oder synthetischer Polymere hergestellt werden<sup>[2]</sup>.

Diese Fasern umfassen vor allem Polyethylenterephthalat (PET), Polyamide (PA) und Viskose. Fasern werden in Bekleidungs-, Heim- sowie in technischen Textilien, etwa in der Medizintechnik oder im Fahrzeugbau, eingesetzt. Eine besondere Herausforderung stellt die kreislaforientierte Entsorgung dieser Textilien dar. Gründe sind insbesondere Materialmischungen von Faserstoffen, Additive und Farbstoffe sowie Multi-Lagen-Konstruktionen und mechanisch nicht trennbare Schichten.

Am Beispiel Altbekleidung werden diese Herausforderungen bereits bei der Sammlung und Sortierung deutlich: Die Sammlung erfolgt in Deutschland fast ausschließlich über Depotcontainer, die Sortierung fast ausschließlich manuell, da bei Secondhandkleidung modische Aspekte sowie die Tragbarkeit entscheidend für die Preisfindung sind. Eine solche Bewertung kann nicht von Ma-

schinen übernommen werden. Zunächst findet eine Vorsortierung statt, bei der sowohl nach der Art des Bekleidungstextils, als auch nach der Tragbarkeit unterschieden wird. Tragbare Altbekleidung wird nach Qualität und Mode für unterschiedliche Zielmärkte eingeteilt, bevor sie als Secondhandkleidung zur Wiederverwendung die Anlage verlässt. Nicht mehr tragbare Altbekleidung wird zu Produkten wie Putzlappen oder Dämmmaten recycelt. Nicht recycelbares Material wird exportiert oder verbrannt. Der Stand der Technik der Entsorgung von Altbekleidung ist daher eine lineare Entsorgungskette. Am Institut für Textiltechnik wird entlang der gesamten Prozess- und Recyclingkette geforscht. Im Fokus stehen mechanische und chemische Recyclingtechnologien.

### **Mechanisches Recycling**

Beim mechanischen Recycling lösen Reißmaschinen die Textilien bis zur Einzelfaser auf. Aktuell findet die mechanische Aufbereitung hauptsächlich im Downcycling zu minderwertigen Produkten, wie beispielsweise Dämmstoffen oder Kofferrauminnenverkleidung, Anwendung. Aufgrund des geringen Ressourcen- und Energieverbrauchs ist das mechanische Recycling für Fasermischungen und Naturfasern eine nachhaltige Verwertungsmöglichkeit.



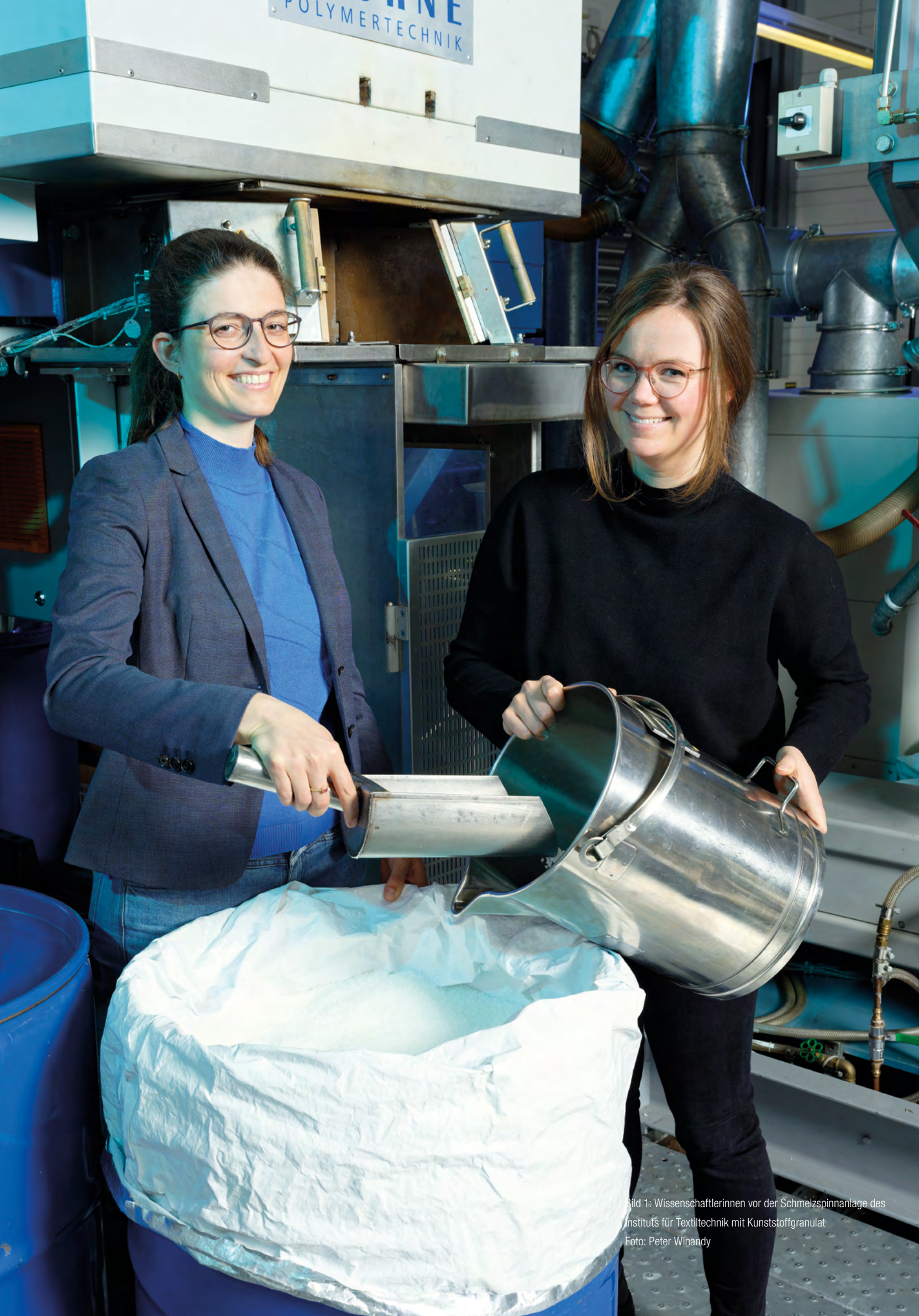


Bild 1: Wissenschaftlerinnen vor der Schmelzspinnanlage des  
Instituts für Textiltechnik mit Kunststoffgranulat  
Foto: Peter Winandy



Das Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH, das zur ITA Group der RWTH Aachen gehört, verfolgt den Ansatz eines Recyclingateliers. Zusammen mit Partnern aus der Textilindustrie wird eine Modellwerkstatt aufgebaut, in der die gesamte Prozesskette des mechanischen Recyclings abgebildet werden kann. Dabei wird die Entwicklung eines technisch, ökonomisch und ökologisch nachhaltigen Produktes für die vorhandenen Textilien in den Fokus gestellt, bevor dieses verfahrenstechnisch umgesetzt wird. In allen Teilschritten soll ein hochwertiges Endprodukt erreicht werden. Um das zukünftige Recycling der Produkte zu verbessern und den Lebenszyklus zu verlängern, setzt das Recyclingatelier Augsburg auf die Strategie „Design for Recycling“. Darüber hinaus werden dort einzelne Verfahrensschritte in öffentlichen Forschungsprojekten weiterentwickelt. Ziel des Forschungsprojektes „RecyCard“ ist die Erhöhung des Recyclingfaseranteils von Baumwolltextilien bei der Garnherstellung auf bis zu 50 Prozent, ohne eine Verschlechterung der Garn- und Produktqualitäten. Dies soll durch angepasste Krempeltechnologie ermöglicht werden.

Derzeit werden polyacrylnitrilhaltige Abfälle aus Produktion und End-of-use-Abfall einer thermischen Abfallbehandlung zugeführt, als Füllstoff verwendet oder zu oft minderwertigen Mischgarnen verarbeitet. Am RWTH-Institut für Textiltechnik werden unter dem Projektnamen „Industrial RePAN – Non-Downcycling-Verfahren für Polyacrylnitril aus Textilabfällen“, gefördert vom BMBF, Ansätze zum chemischen Recycling von Polyacrylnitril(PAN)-Fasern verfolgt. Hierzu wird ein lösungsmittelbasiertes Trennverfahren genutzt, bei dem einzelne Polymersorten aus einer Mischung herausgelöst werden. Diese Fasern sind somit 100 Prozent sortenrein und erfüllen bei einem Rezyklatanteil von 50 Prozent dieselben mechanischen Anforderungen wie Neuware. Am Institut für Textiltechnik wird die technische Machbarkeit des Verfahrens entlang der gesamten Prozesskette von der Polymerrückgewinnung über die Faserherstellung bis hin zum Endprodukt abgebildet.

### Chemisches Recycling

Zu den neuen Technologien der Abfallbehandlung gehört auch das chemische Recycling. Die Auswahl von wirtschaftlich nachhaltig nutzbaren End-of-Life-Szenarien in Abhängigkeit der Abfallstromqualität ist dabei eine Herausforderung. Ziel des Projektes „EOL Modell“, gefördert im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung, ist die Modellierung und Bewertung von End-of-Life-Szenarien für textile Abfallströme am Beispiel polyesterhaltiger Alttextilien mit unterschiedlichen Qualitäten. Das entwickelte Modell ermöglicht Unternehmen die Einordnung ihrer bereits vorhandenen oder zu entwickelnden Technologien und/oder textilen Abfallströme in den textilen Recyclingmarkt. Fünf ausgewählte am Markt bereits (teilweise) etablierte Verfahren werden mit drei chemischen Recyclingverfahren verglichen, die End-of-Life-Szenarien mittels ausgewählter Life-Cycle-Assessment-Methoden modelliert. Zudem untersucht der RWTH-Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik die vielversprechendsten chemischen Recyclingprozesse simulativ und experimentell auf ihre Sensitivität gegenüber textiltypischer Verunreinigungen.

Die Industry Research Group „Polymer Recycling“ ist ein Konsortium aus Unternehmen entlang der textilen Wertschöpfungskette sowie dem Institut für Textiltechnik. Ziel ist, technologische, wirtschaftliche und strategische Fragestellungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette einer textilen Kreislaufwirtschaft systematisch zu bearbeiten. Langfristige Ziele sind die Analyse und Erforschung von Methoden und Prozessen zur Gewinnung hochreiner Recyclingfraktionen aus verunreinigten und gemischten chemiefaserhaltigen Textilabfällen. Der Schwerpunkt liegt auf Alttextilien aus Polyethylenterephthalat (PET) und Polyamid (PA). Zur Zielgruppe gehören alle an der Bewirtschaftung textiler Abfälle interessierten Firmen, unabhängig von der Position in der Textil- oder Recyclingkette – vom Anlagenbauer über Material-, Faser-, Textil- und Endprodukthersteller sowie Aufbereiter. Interessierte können noch in das Projektkonsortium eintreten.

### Quellen

- [1] The Fiber Year Consulting: The Fiber Year 2020. World Survey on Textiles and Nonwovens. A.1 World Fiber Market: Supply. Freidorf, Schweiz: The Fiber Year GmbH, 2019, S. 325
- [2] The Fiber Year Consulting: The Fiber Year 2020. World Survey on Textiles and Nonwovens. A.11 Production of Manmade Fibers. Freidorf, Schweiz: The Fiber Year GmbH, 2019, S. 335

---

### Autoren

Amrei Becker, M.Sc., Stefan Schonauer, M.Sc., und Jan Thiel, M.Sc., sind wissenschaftliche Mitarbeitende am Institut für Textiltechnik.

Amon Krichel, M. Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH.

Univ.-Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries ist Inhaber des Lehrstuhls für Textilmaschinenbau und Leiter des Instituts für Textiltechnik.

Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlichter leitet das Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH, das zur ITA Group der RWTH Aachen gehört.

---





Bild 2: An der semi-industriellen Schmelzspinnanlage können mehrere Kilogramm Fasern pro Stunde produziert werden – auch aus recycelten Kunststoffen  
Foto: Peter Wmandy



# Narkosegase sind Klimagase!

## Narkosegas-Absorbtionssysteme im klinischen Alltag

On the one hand, climate change presents the biggest threat to global health in the 21<sup>st</sup> century. On the other hand, the health care sector itself is responsible for approximately 5% of global net emissions. Commonly used anesthetic gases are potent greenhouse gases with a global warming potential 130 to 2540 times higher than CO<sub>2</sub>. At the moment, most of these gases are emitted to the atmosphere where they remain for many years. The Department of Anaesthesiology at RWTH Aachen University is participating in a pilot project testing narcotic gas canisters with which anaesthetic gases can be absorbed, processed and reused. Many more steps need to follow to implement a circular economy in health care.

Der durch CO<sub>2</sub> und andere Treibhausgase verursachte Klimawandel stellt die größte Bedrohung für die globale Gesundheit im 21. Jahrhundert dar. Milliarden Menschen werden in den nächsten Jahrzehnten von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein oder sind es bereits. Wetterextreme, beispielsweise Hitzewellen, fordern heute schon viele Leben, insbesondere unter älteren Menschen. Das Risiko für Infektionskrankheiten und weitere Pandemien steigt. Die Luftverschmutzung trägt laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) maßgeblich zur Sterblichkeit bei Herz- und Lungenkrankheiten bei. Nicht zuletzt werden die nachgelagerten Auswirkungen des Klimawandels, wie Migration und Armut, einen erheblichen Einfluss auf die globale Gesundheit haben.

Auf der einen Seite muss der Gesundheitssektor die Folgen des Klimawandels abfangen, auf der anderen Seite trägt er einen erheblichen Teil zu den Gesamtemissionen bei. Dieser wird in westlichen Ländern auf fünf Prozent geschätzt – das ist mehr als der globale Flug- und Schiffsverkehr. Im OP-Bereich können insbesondere Narkosegase einen Großteil des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks verursachen, da Narkosegase als fluoriierte Kohlenwasserstoffe sehr potente Treibhausgase sind. Diese werden bisher über eine Narkosegasabsaugung und ein Abluftsystem unverändert an die Außenluft abgegeben. Je nach verwendetem Gas verbleiben sie bis zu 14 Jahre in der Erdatmosphäre und haben dabei einen mindestens 130 (beim Anästhetikum Sevofluran) bis zu 2540 (beim Anästhetikum Desfluran) höheren Treibhauseffekt als CO<sub>2</sub>.

In Deutschland wurden im Jahr 2012 bei etwa sieben Millionen Narkosen volatile Anästhetika eingesetzt. Daten zeigen, dass, je nach gewähltem Frischgasfluss, eine Narkose von einer Stunde mit dem Anästhetikum Desfluran einem CO<sub>2</sub>-Abdruck von 150 bis 1500 Kilometer Fahrt mit einem PKW entsprechen kann. Daher war es nicht verwunderlich, dass eine Studie den berufsbedingten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Anästhesistinnen und Anästhesisten mit 17 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent bezifferte. Im Vergleich liegt der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bei einem Durchschnittsbürger in Deutschland bei elf Tonnen.

Mit verschiedenen Maßnahmen ließe sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Bereich der Anästhesie reduzieren: So könnte bei fehlender Kontraindikation das weniger umweltbelastende Anästhetikum Sevofluran dem Anästhetikum Desfluran vorgezogen und gleichzeitig ein niedriger Frischgasfluss gewählt werden, damit weniger Inhalationsanästhetikum in die Umwelt gelangt. Auch sind Narkosemittel, die über eine Vene verabreicht werden, nicht so klimaschädlich wie Narkosegase. In einigen Fällen wäre eine rein örtliche Betäubung von Nerven möglich. Nichtsdestotrotz bleiben volatile Anästhetika eine wichtige Säule in der modernen anästhesiologischen Patientenversorgung und innovative Konzepte zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks sind gefragt. Eine Möglichkeit stellt die Wiederaufarbeitung und Wiederverwendung von Narkosegasen dar. Die Klinik für Anaesthesiologie der Uniklinik RWTH Aachen testet die schrittweise Einführung eines Systems, das die volatilen Anästhetika in einem Absorber auffängt, um

diese einem Wiederaufarbeitungsprozess zuzuführen. Das im Jahr 2020 auf den Markt gekommene System CONTRAfluran™ der Firma ZeoSys lässt sich an Narkosegeräte verschiedener Hersteller befestigen. Unter Umgehung der konventionellen Narkosegasabsaugung, die die Narkosegase sonst aus den OP-Sälen abführt, werden die Narkosegase im Absorber an Aktivkohle gebunden. Beim Hersteller werden die Gase später durch Destillation aus dem Absorber gelöst und können nach Sterilisation wieder zur Narkose verwendet werden. Eine Zulassung für wiederaufbereitetes Sevofluran besteht, eine entsprechende Zulassung für Desfluran ist beantragt. In den nächsten Monaten soll mit der Wiederaufarbeitung der zunächst eingelagerten Absorber begonnen werden. Insgesamt können durch diesen Prozess circa 90 Prozent der aufgefangenen Gasmenge wiedergewonnen, aufgereinigt und erneut verwendet werden.

In einem Pilotprojekt werden die Anwendung und Handhabung der Absorber im klinischen Alltag getestet, Erfahrungen zusammengetragen und wissenschaftliche Untersuchungen zur Sicherheit durchgeführt.

Die Anwendung von Narkosegasabsorbern und der Wiederaufarbeitung und Wiederverwendung von Narkosegas würde nicht nur die Umweltbelastung reduzieren, zusätzlich könnte durch den Gebrauch der Absorber das Betreiben einer Narkoseabsaugung entfallen.

In Settings, in denen keine Narkosegasabsaugung und Abluftsystem vorhanden ist, wie in der Intensivmedizin oder in ambulan-

ten Anästhesiepraxen, gibt es allgemeine Narkosegasabsorber schon seit einigen Jahren. Allerdings werden die dort etablierten Systeme der Verbrennung zugeführt.

Das vorgestellte System stellt daher eine erste Form der Kreislaufwirtschaft in der Anästhesiologie dar. Die Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin und der Berufsverband Deutscher Anästhesisten haben sich in einem Positionspapier 2020 zu Klimaschutz und Nachhaltigkeit bekannt. Der medizinische Sektor steht jedoch erst am Anfang der Auseinandersetzung mit der Nachhaltigkeit. Nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit können Lifecycle-Assessments verschiedener Materialien und Medikamente durchgeführt und medizinische Prozesse und Patientenabläufe beurteilt werden. Nachhaltigkeit und Klimaschutz schließen Patientensicherheit auf höchstem Niveau keinesfalls aus, sondern sind im Gegenteil für eine zukunftssichere Patientenversorgung unabdingbar. Über die Wiederverwendung von Inhalationsanästhetika hinaus müssen die Bereiche Materialien, Medikamente, Energie, Müll und Abwasser neu gedacht werden, damit Krankenhäuser klimaneutral werden können. Das Krankenhaus bietet zahlreiche Ansatzmöglichkeiten im Bereich der Circular Economy zu forschen, die Wiederaufarbeitung und Wiederverwendung von Narkosegasen ist ein erster Schritt in die richtige Richtung.

---

## Autoren

Dr.med. Linda Grüßer ist Assistenzärztin an der Klinik für Anästhesiologie.

Ina-Maria Kochendörfer ist Funktionsoberärztin der Klinik für Anästhesiologie.

Univ.-Prof. Dr.med. Rolf Rossaint ist Inhaber des Lehrstuhls für Anästhesiologie und Direktor der Klinik für Anästhesiologie der Uniklinik RWTH Aachen.

---



# Namen & Nachrichten

## **Förderung durch den Europäischen Forschungsrat**

Der Europäische Forschungsrat, kurz ERC, ist eine von der Europäischen Kommission eingerichtete Institution zur Finanzierung von grundlagenorientierter Forschung. Gefördert werden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aller Disziplinen, die Förderlinie ist abhängig von Karrierestand. Starting Grants gehen an Forschende in einem Zeitfenster von zwei bis sieben Jahren nach der Promotion, Consolidater Grants werden in einem Zeitfenster von sieben bis zwölf Jahren nach der Promotion vergeben. Advanced Grants erhalten erfahrene exzellente Forschende.

## **ERC Starting Grants**

Professor Michael Schaub, Juniorprofessor für Computational Network Science, Dr. Christoph Kuppe, Arbeitsgruppenleiter im Institut für Experimentelle Innere Medizin und Systembiologie, und Dr. Yang Shi, Gruppenleiter am Lehrstuhl für Experimentelle Molekulare Bildgebung, erhalten jeweils bis zu 1,5 Millionen Euro für ihre weitere Forschung.

## **Michael Schaub**

Komplexe Netzwerke sind in unserer Welt nahezu omnipräsent: von vernetzten Systemen wie dem Internet über neuronale Netzwerke im Gehirn bis hin zu sozialen Netzwerken. Schaub's Forschung beleuchtet aus theoretischer und praktischer Sicht insbesondere das Wechselspiel zwischen Struktur und dynamischen Prozessen, die sich in einem Netzwerk abspielen. Dazu kombiniert seine Arbeitsgruppe daten- und modellbasierende Methoden aus Feldern wie dem maschinellen Lernen und der Theorie dynamischer Systeme. Ziel ist, Methoden zu entwickeln, mit

deren Hilfe sich insbesondere Relationen zwischen mehreren Knoten besser verstehen lassen.

Schaub kam 2020 durch das NRW-Rückkehrprogramm als Tenure-Track-Juniorprofessor an die RWTH und hat eine Nachwuchsgruppe im Bereich „Computational Network Science“ aufgebaut. Er studierte Elektrotechnik und Informationstechnologie an der ETH Zürich sowie Biomedical Engineering am Imperial College London, wo er 2014 in Mathematik promovierte. Schaub forschte anschließend an der Université catholique de Louvain und der Université de Namur in Belgien sowie als Marie Curie Fellow am Massachusetts Institute of Technology und der University of Oxford.

## **Christoph Kuppe**

Nierenerkrankungen, vor allem im Rahmen eines Diabetes mellitus, sind weltweit ein zunehmendes Problem für die Gesundheitssysteme. Kuppe und sein Team erforschen neue pathophysiologische Grundlagen zu Krankheitsmechanismen der diabetischen Nephropathie. Ziel ist, neue patientenzentrierte Methoden einzusetzen, um neue Therapien zu entwickeln. Im ersten Schritt wird für jede Zelle der Niere eine „Landkarte“ der regulatorischen Genveränderungen erstellt, um ein besseres Verständnis der pathophysiologischen Veränderungen zu erhalten. Zudem werden diese Daten genutzt, um den Krankheitsverlauf besser vorhersagen zu können. Um letztlich neue Medikamente entwickeln zu können, werden „Mini Nieren“ (3D-Zellkulturmodelle) basierend auf humanen Stammzellen verwendet.

Kuppe studierte Medizin an der RWTH und promovierte dort 2011. Es folgten eine Fach-

arztausbildung in der Inneren Medizin und Nephrologie an der Uniklinik RWTH Aachen und ein Studium an der Universität Erlangen-Nürnberg zum Master of Health and Business Administration, MHBA. Er forschte in seiner Post-Doc-Zeit am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg und an der Erasmus Universität in Rotterdam. Kuppe ist Arbeitsgruppenleiter im Institut für Experimentelle Innere Medizin und Systembiologie und Funktionsoberarzt in der Medizinischen Klinik II.

## **Yang Shi**

Die Immuntherapie hat die Krebsbehandlung wesentlich vorangebracht. Dennoch kann Krebs weiterhin nur bei einem Bruchteil der Patientinnen und Patienten vollständig geheilt werden. Seit 2016 konzentrieren sich Shi und seine Forschungsgruppe auf die Entwicklung polymerer therapeutischer Systeme, um die Krebsimmuntherapie bei mehr Erkrankten wirkungsvoller zu gestalten. Dazu wurden bereits mehrere auf Biomaterialien basierende Strategien entwickelt, um die Krebsimmunität durch Aktivierung sogenannter antigenpräsentierender Zellen und T-Zellen zu stimulieren. Mit dem geförderten Projekt wird seine Gruppe neuartige Polymerbiomaterialien im Nano- bis Makrobereich einsetzen, um die Krebsimmuntherapie zu verstärken. Sie wollen ein besseres Verständnis davon gewinnen, wie B-Zellen, die die Bildung von Antikörpern verantworten, in der Krebsimmuntherapie moduliert und genutzt werden können. Shi kam 2016 an die RWTH und gründete die Forschungsgruppe Polymertherapeutika am Institut für Experimentelle Molekulare Bildgebung und dem Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik. Er promovierte 2014 an

der Universität Utrecht und war anschließend Associate Professor an der South China University of Technology. Er wurde bereits von der Deutschen Forschungsgemeinschaft als Principal Investigator gefördert und mit Preisen wie dem Theodore von Kármán Fellowship ausgezeichnet.

### ERC Advanced Grants

Die Advanced Grants richten sich an „führende Forscherinnen und Forscher in ganz Europa“. Martin Grohe ist Inhaber des Lehrstuhls für Informatik 7 (Logik und Theorie diskreter Systeme), Heinz Pitsch Inhaber des Lehrstuhls für Technische Verbrennung. Pitsch ist der erste RWTH-Wissenschaftler, der zum zweiten Mal mit einem Advanced Grant ausgezeichnet wird. Beide Professoren werden nun für fünf Jahre mit jeweils rund 2,5 Millionen für ihre Forschung und die dafür erforderliche Geräteausstattung gefördert.

### Martin Grohe

Die Forschungsthemen von Grohe umfassen Algorithmen und Komplexität, Logik, Datenbanktheorie, Graphentheorie und Maschinelles Lernen. Ziel ist, eine Theorie von sogenannter Graphähnlichkeit zu entwickeln und ihre Anwendbarkeit für praxisrelevante Probleme zu demonstrieren. Graphen sind vielseitige Modelle zur Darstellung komplexer Daten von chemischen Molekülen bis zu hin sozialen Interaktionen. Bei der Analyse von graphbasierten Daten ist es eine grundlegende Aufgabe, Graphen zu vergleichen und ihre Ähnlichkeit auf semantisch sinnvolle und algorithmisch effiziente Weise zu messen. Trotz ihrer Bedeutung in vielen Bereichen wurde die Ähnlichkeit von Graphen bislang lediglich für spezifische Anwendungen untersucht, teilweise wurden dieselben Techniken immer wieder neu entwickelt. Zentral ist in diesem Zusammenhang das sogenannte Graphisomorphieproblem, seit mehr als 50 Jahren eines der bekanntesten offenen Probleme in der Informatik. Es fragt nach einem Algorithmus, der entscheidet, ob zwei Graphen strukturell identisch sind. Im Rahmen seiner Ähnlichkeitstheorie wird Grohe mit seinem Team dieses Problem aus einem neuen Blickwinkel angehen.

Grohe hat an der Universität Freiburg Mathematik studiert, seit 2012 ist er RWTH-Professor für Informatik 7 (Logik und Theorie diskreter Systeme). Zuvor war er an der Humboldt-Universität zu Berlin, der University of Edinburgh, der University of Illinois, der Stanford University sowie der University of California in

Santa Cruz tätig. Seit 2017 ist er ACM Fellow, zuvor wurde er unter anderem mit einem Koselleck Grant der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert und mit dem Heinz Maier-Leibniz-Preis der DFG ausgezeichnet.

### Heinz Pitsch

Pitsch beschäftigt sich mit der Erforschung erneuerbarer Energieträger im Bereich der thermochemischen Energieumwandlung. Eine besondere Rolle kommt hier wasserstoffbasierten Brennstoffen zu, da diese keine klimaschädlichen Abgase verursachen und sehr gut für Speicherung sowie Transport der aus Solar- und Windkraftanlagen produzierten Energie eingesetzt werden können. Für die energetische Nutzung des Wasserstoffs bietet die Verbrennung große Vorteile, ist aber gleichzeitig mit Herausforderungen verbunden, die jetzt untersucht werden sollen. Im Gegensatz zu konventionellen Brennstoffen kommt es bei der Verbrennung mit Wasserstoff zu Flammeninstabilitäten. Diese können Verbrennungsraten und auch Emissionen von schädlichen Stickoxiden um ein Vielfaches erhöhen. Die Details dieser Vorgänge sind noch unklar. Ziel ist, mit experimentellen Untersuchungen und numerischen Simulationen Daten zu generieren, die zur Analyse physikalisch-chemischer Prozesse verwendet werden. Durch die Kombination von physikalischem Wissen mit künstlicher Intelligenz soll eine quantitative Beschreibung ableitbar werden. Die Ausnutzung der Instabilitäten optimiert die Prozesse in wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotoren und Industriebrennern.

Pitsch studierte und promovierte an der RWTH, im Anschluss absolvierte er einen Postdoc-Aufenthalt an der UC San Diego. Von 2003 bis 2013 war er Professor an der Stanford University, seit 2010 leitet er das RWTH-Institut. Bereits 2016 erhielt er einen ERC Advanced Grant. Mehrfach wurde er international ausgezeichnet, zum Beispiel mit dem Internationalen Preis der Japanese Combustion Society und 2020 als erster Wissenschaftler überhaupt mit dem Chaire Jaumotte der Belgischen Akademie der Wissenschaften.

### ERC Consolidator Grants

Consolidator Grants unterstützen in einer Phase der Konsolidierung des eigenen Forschungsteams oder -programms. Nachgewiesen werden muss dafür der bahnbrechende Charakter, der Ehrgeiz und die Durchführbarkeit des wissenschaftlichen Vorschlags.

Laura De Laporte und Rafael Kramann, werden für fünf Jahre gefördert. Beiden war es bereits gelungen, zuvor einen ERC Starting Grant zu erhalten.

### Laura De Laporte

Die Chemikerin De Laporte ist Professorin im Lehr- und Forschungsgebiet Advanced Materials for Biomedicine der RWTH und der Uniklinik RWTH Aachen sowie am DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien. Sie und ihr Team wollen mit traditionellen Methoden zur Herstellung von 3D-Biomaterialien brechen, indem eine Vielzahl einzigartiger vorprogrammierter, stabförmiger und interaktiver Mikrogele anstelle von molekularen Bausteinen zusammengesetzt und vernetzt werden. Ziel ist, makroporöse, ausgerichtete, aktivierbare und bei Bedarf abbaubare Konstrukte nach dem automatischen Mischen verschiedener Mikrogele und Stammzellen zu erreichen, was mit herkömmlichen Hydrogelen nicht möglich ist. Ein kompatibles Hochdurchsatzsystem wird verwendet, um die unzähligen Kombinationen von Designparametern zu durchforsten und systematisch (Stamm-) Zell-Material und Zell-Zell-Wechselwirkungen zu untersuchen, um komplexes Gewebe zu züchten. Dabei fokussieren sie sich auf die Verwendung interaktiver Bottom-up-Mikrogele-Anordnungen, um vaskularisiertes schlagendes Herzgewebe im Millimetermaßstab zu erzeugen.

Geklärt werden soll, wie Materialeigenschaften, Architekturen und eine durch externe Stimuli angeregte Bewegung der Mikrogele die Bildung und Vaskularisation des menschlichen Herzgewebes beeinflussen und wie sich das Konstrukt im Laufe der Zeit an das wachsende Gewebe anpassen muss, um die richtige extrazelluläre Umgebung zu schaffen. De Laporte hat Chemieingenieurwesen an der Universität Gent studiert. Sie promovierte an der Northwestern University (Evanston, USA) und forschte an der EPFL (Lausanne, Schweiz). Von 2013 bis 2018 leitete die Wissenschaftlerin eine Nachwuchsgruppe am DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in Aachen und wurde 2015 mit einem Starting Grant des Europäischen Forschungsrates ausgezeichnet. Im Oktober 2017 schloss De Laporte ihre Habilitation in der Fachgruppe Chemie der RWTH ab. Hier ist sie seit Dezember 2020 außerplanmäßige Professorin mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Advanced Materials for Biomedicine mit zusätzlicher Angliederung an die Uniklinik RWTH Aachen. 2018 war sie eine von fünf Wissen-



schaftlerinnen, die im Rahmen des Leibniz-Professorinnen-Programms gefördert wurden.

### Rafael Kramann

Kramann ist Leiter des Instituts für Experimentelle Innere Medizin und Systembiologie und Oberarzt der Klinik für Nieren- und Hochdruckkrankheiten, rheumatologische und immunologische Erkrankungen der Uniklinik RWTH Aachen. Ziel des Projekts ist, mit modernsten Methoden Nierenerkrankungen zu entschlüsseln und sowohl diagnostische als auch neue therapeutische Ansätze zu entwickeln. Chronische Niereninsuffizienz betrifft über zehn Prozent der Bevölkerung in Europa, und es gibt keine guten Biomarker, um Erkrankungsverlauf zu prognostizieren oder nicht invasiv spezifische Nierenerkrankungen zu diagnostizieren. Zudem gibt es keine guten Therapiemöglichkeiten. Kramann will mit seinem Team neue Biomarker sowie nicht invasive diagnostische Methoden und Therapien entwickeln. Die Forschung konzentriert sich dabei auf das Verständnis chronischer Nierenerkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Organfibrose. Integriert werden genetische Schicksalsverfolgung, Genbearbeitung, Einzelzell-, sogenannte Multi-Omics- und systembiologische Technologien mit klinischen Datensätzen, um Mechanismen zu enträtseln, neuartige therapeutische Ziele zu identifizieren und Therapeutika zu entwickeln. Kramann studierte Medizin an der RWTH und promovierte an der Medizinischen Fakultät der RWTH. Von 2011 bis 2015 forschte er an der Harvard Medical School. Seit 2015 baute er ein internationales Forschungsteam auf, parallel brachte er eine weitere naturwissenschaftliche Doktorarbeit an der Erasmus-Universität in Rotterdam zum Abschluss. Von 2017 bis 2020 hatte er die RWTH-Professur für Kardio-Nephrologie und die Leitung der Klinik für Nieren- und Hochdruckkrankheiten, rheumatologische und immunologische Erkrankungen (Medizinische Klinik II) inne. 2020 wurde Kramann auf den neuen Lehrstuhl für Experimentelle Innere Medizin und Systembiologie berufen und leitet das gleichnamige Institut als Gründungsdirektor. Neben seiner wissenschaftlichen Tätigkeit arbeitet er als Oberarzt und leitet eine Arbeitsgruppe an der Erasmus-Universität Rotterdam.

### Matthias Wessling in die Leopoldina aufgenommen

Professor Matthias Wessling wurde in die Nationale Akademie der Wissenschaften

Leopoldina aufgenommen. Die Leopoldina zählt zu den ältesten Wissenschaftsakademien der Welt. Sie vertritt seit 2008 als Nationale Akademie die deutsche Wissenschaft in internationalen Gremien, widmet sich wirtschaftlich und politisch unabhängig gesellschaftlichen Zukunftsthemen und vermittelt die Ergebnisse in Politik und Öffentlichkeit.

Wessling ist Inhaber des Lehrstuhls für Chemische Verfahrenstechnik, Prorektor für Forschung und Struktur und Mitglied der Wissenschaftlichen Leitung des DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien. Der Wissenschaftler kam 2010 mit einer Alexander von Humboldt-Professur an die RWTH. 2019 wurde er mit dem Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis ausgezeichnet.

### Sonja Herres-Pawlis ist Chemistry Europe Fellow

Professorin Sonja Herres-Pawlis, Inhaberin des Lehrstuhls für Bioanorganische Chemie, wurde in die Klasse der Chemistry Europe Fellow aufgenommen. Chemistry Europe ist ein Zusammenschluss von 16 chemischen Gesellschaften aus 15 europäischen Ländern. Mit dem Chemistry-Europe-Fellow-Programm werden herausragende Mitglieder geehrt, die durch ihre Unterstützung, Forschung, Kreativität und Innovation einen wesentlichen Beitrag geleistet haben.

Herres-Pawlis studierte Chemie an der Universität Paderborn und der Ecole de Chimie de Montpellier. Sie promovierte an der Universität Paderborn in Bioanorganischer Chemie und habilitierte in nachhaltiger Polymerisationskatalyse an der TU Dortmund. Bevor sie im Januar 2015 den RWTH-Lehrstuhl übernahm, war sie Professorin für Koordinationschemie an der Ludwigs-Maximilians-Universität München.

### Werner Siemens-Stiftung fördert Projekt von DWI und RWTH

Wachstum und Ersatz von beschädigtem Knorpelgewebe mithilfe einer bahnbrechenden 4D-Druck-Technologie: Danach strebt ein interdisziplinäres Team vom DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien und der RWTH. Die Werner Siemens-Stiftung stellt hierfür in den nächsten fünf Jahre eine Fördersumme von rund zehn Millionen Euro zur Verfügung. Im Projekt „TriggerINK“ – soll eine sogenannte Bio-Tinte mit besonderen Eigenschaften entwickelt werden.

Der menschliche Körper besteht aus einer Fülle unterschiedlich aufgebauter und teils

sehr komplexer Gewebe. Werden sie beschädigt, ist die Medizin vor große Herausforderungen gestellt, um ihre Funktion wiederherzustellen. Es gibt zwar Verfahren, um beispielsweise Reparaturen am Knorpel im Knie vornehmen zu können, jedoch führen solche Eingriffe nicht zu einer langfristigen Heilung, die das geschädigte Gewebe einschließlich seiner vollständigen Funktionen wiederherstellt. Entsprechend sind häufig mehrere Operationen notwendig, da eine Behandlung nicht zu einem stabilen, gesunden und funktionellen Knorpel führt.

Das Team will im Projekt eine Alternativtechnologie für den Ersatz von Gewebe entwickeln. Geleitet wird es von Laura De Laporte, Professorin für Advanced Materials and Biomedicine. Die Professoren Stefan Hecht, Andreas Herrmann und Matthias Wessling vervollständigen das Team. Zum Einsatz kommt das Prinzip des 4D-Drucks, für das eine spezielle Bio-Tinte konzipiert wird.

Der 4D-Druck ist eine Weiterentwicklung der 3D-Drucktechnologie: Beim gängigen 3D-Druck wird Schicht für Schicht eines Materials übereinander aufgetragen, sodass eine dreidimensionale Struktur entsteht. „Der zusätzliche Faktor beim 4D-Druck ist die ‚Zeit‘: So werden spezielle Komponenten in die Tinte eingebaut, die zu bestimmten Zeiten auf äußere Reize reagieren. So lässt sich das gedruckte Material mit Licht bewegen oder bioaktive Komponenten können bei Bedarf mit Ultraschall freigesetzt werden“, erklärt De Laporte.

Das Team will nun eine Methode für den Ersatz von beschädigtem Körpergewebe entwickeln: Mittels direktem Druck von 4D-Strukturen in die betroffene Wunde. Zur Erprobung der Technologie wurde Knorpel im Kniegelenk ausgewählt.

### DFG-Schwerpunktprogramme und Forschungsgruppen

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) richtet an der RWTH zwei neue Schwerpunktprogramme ein: „Greybox-Modelle zur Qualifizierung beschichteter Werkzeuge für die Hochleistungszerspanung“ (Koordination Professorin Kirsten Bobzin, Lehrstuhl für Oberflächentechnik) und „Ein Beitrag zur Realisierung der Energiewende: Optimierung thermochemischer Energiewandlungsprozesse zur flexiblen Nutzung wasserstoffbasierter erneuerbarer Brennstoffe durch additive Fertigungsverfahren“ (Koordination Professor Heinz Pitsch, Lehrstuhl für Technische Verbrennung). Zudem wird von der RWTH die

Forschungsgruppe „Strukturerhaltende numerische Methoden für Volumen- und Übergangskopplung von heterogenen Modellen“ koordiniert. Sie widmet sich der Modellierung und Simulation gekoppelter Systeme zur Beschreibung von magnetisierten Plasmen, komplexen Fluiden und elektrochemischen Prozessen. Sprecher ist Professor Manuel Torrilhon vom Lehrstuhl für Angewandte und Computergestützte Mathematik und Center for Computational Engineering Science (CCES).

### **Lieselotte-Templeton-Preis für Noah Nachtigall**

Die Deutsche Gesellschaft für Kristallographie hat Noah Nachtigall mit dem Lieselotte-Templeton-Preis ausgezeichnet. Dieser würdigt herausragende Abschlussarbeiten „in denen Methoden und Betrachtungsweisen der Kristallographie erfolgreich angewendet wurden“. Nachtigall studierte von 2015 bis 2021 Chemie an der RWTH. Seit Juli 2021 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anorganische Chemie unter Leitung von Professor Richard Dronskowski. Der Preis wurde im Rahmen der 30. Jahrestagung der Gesellschaft erstmals und pandemiebedingt virtuell verliehen. Insgesamt wurden drei Abschlussarbeiten prämiert.

### **NRW-Förderung für E-Learning-Formate**

Das Ministerium für Kultur und Wissenschaft unterstützt gemeinsam mit der Digitalen Hochschule NRW in der Förderlinie „OER-Content.nrw“ 18 Konzepte für digitale Lehr- und Lernformate. Die erfolgreichen Anträge, bei denen mindestens drei Hochschulen an E-Learning-Formaten zusammenarbeiten, werden mit bis zu 1,5 Millionen Euro gefördert. Sieben Projekte mit RWTH-Beteiligung wurden bewilligt, davon drei als Konsortialführung und vier als beteiligte Konsorte. Anträge mit RWTH-Konsortialführung sind:

- „FAIBLE: Fachdidaktik Informatik in Bausteinen für die Lehre“ vom Lehr- und Forschungsgebiet Informatik 9 (Lerntechnologien) gemeinsam mit den Universitäten Bonn, Münster, Paderborn und Duisburg-Essen
- „ANDI (Anatomie Digital) – eine virtuelle Lernapplikation für Studierende der Medizin und für medizinische Heilberufe“ vom Institut für Neuroanatomie gemeinsam mit den Universitäten Köln und Bonn
- „BioLabSim – Biologische Laborsimulationen“ des Instituts für Angewandte Mikrobiologie gemeinsam mit der Westfälischen

Hochschule und der Hochschule Rhein-Waal sowie dem CLS der RWTH

Als Konsorte ist die RWTH in folgenden Projekten:

- „ALFDyn – Adaptive Lernumgebung im Fach Dynamik als OER“ unter Konsortialführung der TU Dortmund
  - „Alepa“ unter Konsortialführung der FH Dortmund
  - „DiaMint“ unter Konsortialführung der Westfälischen Hochschule
  - Operations Research (OR) for Sustainability – Energy, Mobility, Industry“ unter Konsortialführung der Universität Duisburg-Essen
- OERContent.nrw ist die größte bundesweite Förderlinie für offene Bildungsressourcen. Von den E-Learning-Angeboten profitieren sowohl Lehrende als auch Studierende, da sie nach Abschluss der Projekte frei zugänglich auf dem Landesportal für Studium und Lehre ORCA.nrw (Open Resources Campus NRW) eingestellt werden. Hier können Lehrende freie Bildungsressourcen untereinander austauschen und Studierende diese im Selbststudium nutzen.

### **Stiftungsprofessur Quantencomputing**

Mit einem von der BMW Group geförderten Stiftungslehrstuhl „Quantum Information Systems“ wird die RWTH-Forschung an dieser Zukunftstechnologie forciert. Die BMW Group stellt über eine Laufzeit von sechs Jahren 4,5 Millionen Euro für Professur, Ausstattung und Mitarbeitende bereit. Eine Millionen Euro fließen zusätzlich in einen Vernetzungsfonds, der interdisziplinäre Forschungsprojekte in der RWTH und die Einbettung des Lehrstuhls in die universitäre Landschaft und mit dem Forschungszentrum Jülich fördert. Der Lehrstuhl wird in die Fachgruppe Informatik integriert sowie Teil des Profils „Information and Communication Technologies“ und stärkt damit das Forschungsspektrum zu modernen Informationstechnologien und Künstlicher Intelligenz.

### **Sonderforschungsbereiche mit RWTH-Beteiligung**

Der 2018 eingerichtete Sonderforschungsbereich/Transregio 219 – „Mechanismen kardiovaskulärer Komplikationen der chronischen Niereninsuffizienz“ wurde um eine zweite Phase verlängert. Sprecher ist nun Professor Joachim Jankowski vom Lehrstuhl für Molekulare Herz-Kreislaufforschung. Chronisch-niereninsuffiziente Patienten zeigen ein erhöhtes Risiko, kardiovaskulär zu erkranken. Daran leiden rund 50 Prozent dieser Patientinnen

und Patienten, kardiovaskuläre Todesfälle machen rund 40 bis 50 Prozent aller Todesfälle der Betroffenen aus. Dennoch wurden die molekularen Mechanismen und involvierten Mediatoren bisher nicht ausreichend untersucht. Forschungsziel ist die Analyse multifaktorieller Aspekte der durch Nierenerkrankung bedingten kardiovaskulären Mortalität.

Neu eingerichtet wird der Sonderforschungsbereich/Transregio 339 mit dem Titel „Digitaler Zwilling Straße – Physikalisch-Informatische Abbildung des Systems ‚Straße der Zukunft‘“. Sprecherhochschule ist die Technische Universität Dresden, Ansprechpartner seitens der RWTH ist Professor Jörg Blankenbach vom Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme. Geforscht wird mit Hilfe eines räumlich und zeitlich mehrdimensionalen, digitalen Abbilds aus Fahrzeug, Reifen und Fahrbahn, dem Realitätsmodell „Digitaler Zwilling Straße“. Es ist gekennzeichnet durch die intelligente Verknüpfung aller relevanten Informationen über das System „Straße der Zukunft“, einschließlich physikalischer Materialuntersuchungen, numerischer Simulationen sowie der informatischen und verkehrlichen Daten wie beispielsweise Geometrie- und Sensordaten oder Datenmodelle.

### **Podcast „Krautnah“ ausgezeichnet**

David Spencer, Caspar Langenbach und Laura Merx wurden für ihren Podcast „Krautnah“ ausgezeichnet. Dieser entsteht am Lehr- und Forschungsgebiet Biochemie und Molekularbiologie der Pflanzen und wurde über 15.000 Mal heruntergeladen. Die Aachener interviewen Expertinnen und Experten zu Themen rund um Pflanzenforschung und -züchtung, Landwirtschaft, Biotechnologie und Nachhaltigkeit. Das Konzept überzeugte im Hochschulwettbewerb zum Wissenschaftsjahr 2020|21 „Bioökonomie“. Studierende, Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler waren eingeladen, kreative und innovative Kommunikationsideen für ihre Forschungsthemen zu entwickeln. Fünf Projekte erhielten Urkunde, da sie die gesellschaftliche Bedeutung ihrer Forschung einer breiten Öffentlichkeit besonders gut vermitteln und zu einer gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit ihrem Forschungsthema anregen konnten.

### **Weltweit meist zitierte Forschende**

Professor Fabian Kießling und Professor Twan Lammers stehen auf der von Clarivate Analytics veröffentlichten Liste der „Highly



Cited Researchers“ 2021 im Bereich Pharmakologie und Toxikologie. Aufgenommen werden diejenigen, deren Publikationen zu dem einen Prozent der am häufigsten zitierten Veröffentlichungen in ihrem Fachbereich gehören. Zitationen dienen als Indikator für die Bedeutung von Publikationen und werden auch als Maßstab für die Qualität der Arbeiten gesehen.

Kießling ist seit 2008 Inhaber des Lehrstuhls für Experimentelle Molekulare Bildgebung. Zuvor leitete er am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg die Arbeitsgruppe Molekulare Diagnostik und die Juniorgruppe Molekulare Bildgebung. Kießling erforscht Bildgebungsverfahren und (Nano-) Diagnostika, um Krankheiten auf molekularem und physiologischem Niveau besser zu charakterisieren und hierdurch Therapien auf die Gegebenheiten in Patienten anpassen zu können. Hierbei gilt er als Pionier der volumetrischen Flächendetektor-Computertomographie, der Motion Model Ultrasound Localization Microscopy (Superresolution-Ultraschall) und der molekularen Ultraschallbildgebung. Alle genannten Verfahren erlauben eine detaillierte Charakterisierung des Bindegewebes und der Blutgefäße in Geweben, welche beispielsweise in bösartigen Tumoren kritische Barrieren für den Wirkstofftransport bilden und deren Überwindung für den Therapieerfolg oftmals entscheidend ist.

Lammers betreut das Lehr- und Forschungsgebiet für Nanomedizin und Theranostik. Er kam 2009 als Arbeitsgruppenleiter zum Institut für Experimentelle Molekulare Bildgebung und übernahm 2014 die Universitätsprofessur für Nanomedizin und Theranostik. 2012 erhielt Lammers einen ERC Starting Grant und 2019 einen ERC Consolidator Grant. Zudem wurden ihm 2015 und 2018 zwei ERC Proof of Concept Grants zugesprochen. Seine Schwerpunkte liegen auf dem Gebiet der pharmazeutischen Technologie, der Modulation des Tumormikromilieus, und des bildgestützten und tumorgerichteten Wirkstofftransports.

### **Joost-Pieter Katoen in NRW-Akademie der Wissenschaften und der Künste**

Professor Joost-Pieter Katoen ist ordentliches Mitglied der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften und der Künste. In diese werden exzellente Forschende und Kulturschaffende aufgenommen, die Mitglieder pflegen den Dialog mit Politik, Wirtschaft und Kultur sowie mit wissenschaftlichen Einrichtungen im In- und Ausland. Katoen, seit 2005

Inhaber des Lehrstuhls für Informatik 2 (Softwaremodellierung und Verifikation), gehört der Klasse für Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften an.

Die Forschungsbeiträge des Informatikers reichen von theoretischen und algorithmischen Leistungen bis zur Entwicklung von Softwarewerkzeugen und deren Anwendung im industriellen Bereich. Mithilfe mathematischer Modelle komplexer Systeme ermöglicht er das Auffinden von Fehlerverhalten in sicherheitskritischer Software. Katoen ist Ehrendoktor der Universität Aalborg, Mitglied der Academia Europea und der Koninklijke Hollandse Maatschappij der Wetenschappen. Darüber hinaus hat er einen ERC Advanced Research Grant, ist Fellow der Association for Computing Machinery und Distinguished Professor der RWTH. Er war Gastprofessor unter anderem an der University of Oxford, der Technischen Universität Wien, der IMT School for Advanced Studies Lucca und am Institute of Science and Technology – Austria. Auch lehrt an der University of Twente in den Niederlanden.





Als Aggregat für die pyrometallurgische Behandlung beim Lithium-Ionen-Batterie-Recycling wird im Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie ein Elektrolichtbogenofen eingesetzt.  
Foto: Peter Winandy





Mit Hilfe eines NIR-Sensors werden Kunststoffe charakterisiert.  
Foto: Peter Winandy

## 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: Mittels 3D-Lasertriangulation werden  
Abfallstücke wie beispielsweise Plastikfla-  
schen sensorgestützt erkannt und sortiert.  
Peter Winandy, Aachen

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

Gestaltung:  
Kerstin Lünenschloß, Aachen

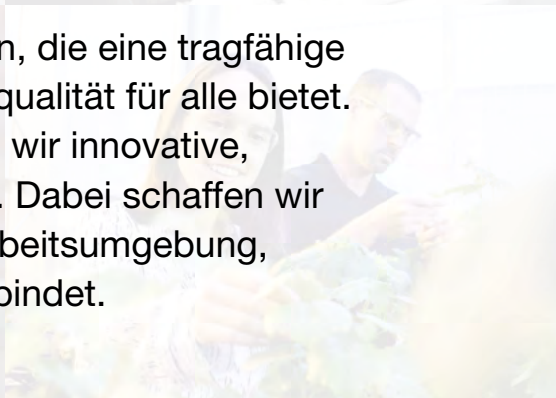
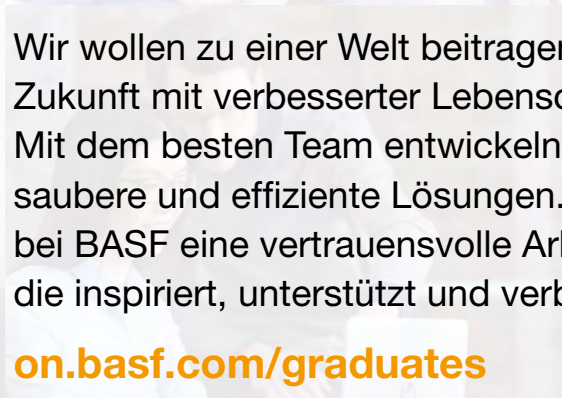
Druck:  
image Druck + MEDIEN GmbH, Aachen

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

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren  
verantwortlich.

ISSN-Nummer 0179-079X

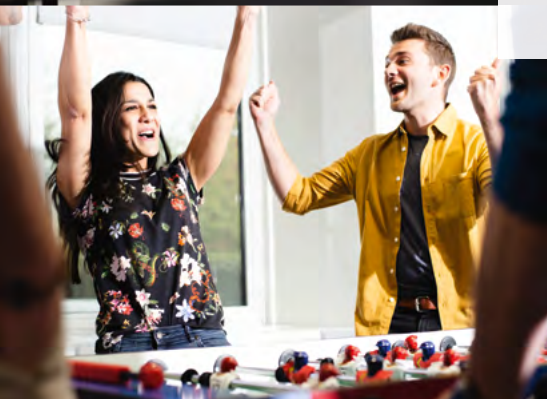




## Gemeinsam für eine nachhaltige Zukunft – bist du dabei?

Wir wollen zu einer Welt beitragen, die eine tragfähige Zukunft mit verbesserter Lebensqualität für alle bietet. Mit dem besten Team entwickeln wir innovative, saubere und effiziente Lösungen. Dabei schaffen wir bei BASF eine vertrauensvolle Arbeitsumgebung, die inspiriert, unterstützt und verbindet.

[on.basf.com/graduates](https://on.basf.com/graduates)





# Die neue Generation Stromspeicher

Stromverbrauch optimieren und nahezu unabhängig vom öffentlichen Stromnetz werden.

Vitocharge VX3 ist die ideale Lösung für viele Anwendungsfälle im Neubau oder in der Modernisierung.

Der modular nachrüstbare Hybrid-Stromspeicher kombiniert Photovoltaik- und Batterie-Wechselrichter mit Batterie-Modulen in einem Gerät.

Vitocharge VX3 ist nahtlos in die digitalen Services und Plattformen von Viessmann integriert.

Mit 5, 10 oder 15 kWh nutzbarer Speicherkapazität lässt sich das modulare System an den individuellen Strombedarf im Ein- oder Zweifamilienhaus anpassen.

Langlebige Lithium-Eisenphosphat-Zellen mit 10 Jahren Zeitwertersatzgarantie auf die Batteriezellen sichern die Investition nachhaltig ab.

[viessmann.de/vitocharge](https://viessmann.de/vitocharge)

Jetzt mit 3-phasiger Leistungsklasse und integriertem Energy Management.

