

# ELEMENTS

Forschen. Wissen. Zukunft.



## Wind of Change

**Wie Spezialchemie der Windkraft zum Durchbruch verhilft** → S.10

Recycling: Neues Leben für alte PU-Schaum-Matratzen → S.26

Effizienz: Mikroreaktoren aus dem 3D-Drucker → S.32

# Offshore

Vor der Küste

---

Offshore bezeichnet die Lage von Bauwerken auf offener See. Dabei handelt es sich häufig um Bohrseln für die Förderung von Öl oder Gas, aber auch um Windparks. Die Verlagerung aufs Meer bietet viele Vorteile: Bohrseln erweitern den Gewinnungsraum für Rohstoffe, Windräder profitieren von stetigem, starkem Wind und somit hohen Stromerträgen. Offshore-Windparks liegen in der Regel nicht mehr als 200 Kilometer vom Festland entfernt, da sie auf eine teure Anbindung durch Seekabel angewiesen sind. In Wassertiefen bis 50 Metern kommen meist Windräder zum Einsatz, die auf einem festen Fundament stehen. Bei größeren Wassertiefen eignen sich Modelle mit schwimmenden Fundamenten, die am Meeresboden verankert werden. Der weltweit größte Offshore-Windpark ist die Jiuquan Wind Power Base in China mit einer geplanten installierten Leistung von 20 Gigawatt.

---

**Windpark** Ansammlung von mehreren Windkraftanlagen an einem Ort

**Fundament** Sichert die Standfestigkeit der Windenergieanlage. Offshore-Fundamente können aus Beton sowie aus Stahlpfeilern oder Mehrbeinstrukturen bestehen

**Gigawatt** Maßeinheit für die Leistung eines Kraftwerks. Ein Gigawatt entspricht einer Milliarde Watt



## LIEBE LESERINNEN UND LESER,

das Wetttrüsten zwischen den USA, China und Europa ist in vollem Gange. Es geht um Höhe, um Länge und vor allem um die größte Power. Und zum Glück geht es nicht um Waffen.

Im Gegenteil: Es geht um Klimaschutz und um die Stromversorgung der Zukunft. Es geht um die nächste Generation der Windkraft. Was früher fast niedlich als Windrad oder Windmühle bezeichnet wurde, verdient heute eher den Namen Windkraftwerk. Weit über 200 Meter ragen diese Meisterwerke der Ingenieurskunst in den Himmel, einzelne Flügel messen mehr als 100 Meter.

Mit der Größe steigt nicht nur die Ausbeute an Strom. Auch die Kräfte, denen die Windräder selbst ausgesetzt sind, nehmen bedrohlich zu. Dies gilt ganz besonders für die Windparks auf hoher See. Ohne neue, innovative Lösungen aus der Spezialchemie könnte das Material dieser Dauerbelastung durch Wasser und Sturm nicht mehr standhalten.

Doch die Windräder halten stand – und liefern rund um die Uhr riesige Mengen Strom. Wie das geht und warum das Potenzial der Windkraft noch lange nicht ausgeschöpft ist, erklären wir in dieser Ausgabe.

Ach ja, warum alte Matratzen aus PU-Schaum künftig nicht mehr verbrannt werden müssen, sondern immer wieder neu geboren werden, erklären wir auch. Aber das ist eine andere Geschichte.

Ich wünsche Ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre.

**Matthias Ruch**

Chefredakteur

Sämtliche Artikel aus dem gedruckten Magazin sowie weitere aktuelle Inhalte finden Sie auch im Internet unter: [elements.evonik.de](http://elements.evonik.de)



Die Zukunft der Windenergie liegt auf dem Meer, wie hier vor der deutschen Ostseeküste.

## WINDKRAFT

### 10 **Seestärke**

Um das Klimaziel von Paris zu erreichen, spielen – neben Fotovoltaikanlagen und Windmühlen an Land – Offshore-Windparks eine wichtige Rolle. Spezialchemie macht die riesigen Kraftwerke vor den Küsten möglich

## DATA MINING

### 15 **Klar zur Wende**

Von Kohle bis Windkraft – wohin sich der Energiemarkt entwickelt

## INTERVIEW

### 20 **»Wir werden die Probleme gelöst bekommen«**

Der Ingenieurwissenschaftler Volker Quaschnig über die Herausforderungen der Energiewende und die Chancen, die sie für Wirtschaft und Gesellschaft bietet

Annegret Terheiden und Michael Ferenz forschen für Evonik an Verfahren zur Aufbereitung von Schaumstoff für Matratzen.

**RECYCLING**

**26 Schaumlösung**

Ein neuartiges Verfahren ermöglicht es, Matratzen zu 100 Prozent aus recyceltem Polyurethanschaum herzustellen, ganz ohne Qualitätsverlust

**MIKROREAKTOREN**

**32 Druck im Kessel**

Weniger Energieverbrauch, geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen, höhere Produktqualität – viele Argumente sprechen für die neuartigen Mikroreaktoren, die Evonik entwickelt und mithilfe von 3D-Druckern produziert

**SCHAUBILD**

**38 Kühle Reaktion**

Klassischer Rührkessel vs. moderner Mikroreaktor. Zwei Systeme im Vergleich

**NACHHALTIGKEIT**

**48 Rizinus statt Rohöl**

Regenerative und recycelte Rohstoffe lösen in der Chemie fossile Zutaten ab. Mithilfe der Massenbilanz lässt sich schon heute nachweisen, wie nachhaltig einzelne Produkte wirklich sind



Auf dem Weg zum Reaktor aus dem 3D-Drucker



6 **START-UP**

Circumfix nutzt Hochleistungspolymere, um nach OPs den Brustkorb von Patienten zu verschließen

8 **PERSPEKTIVEN**

Neues aus Wissenschaft und Forschung

40 **EVONIK-LAND**

**Belgien**

Von Comics bis zu Pralinen – eine Bilderreise durch das Land im Herzen Europas

54 **FORESIGHT**

**Die Klimaformer**

Wie Wissenschaftler mithilfe von Geo-engineering Katastrophen abwenden wollen

56 **IN MEINEM ELEMENT**

**Indium**

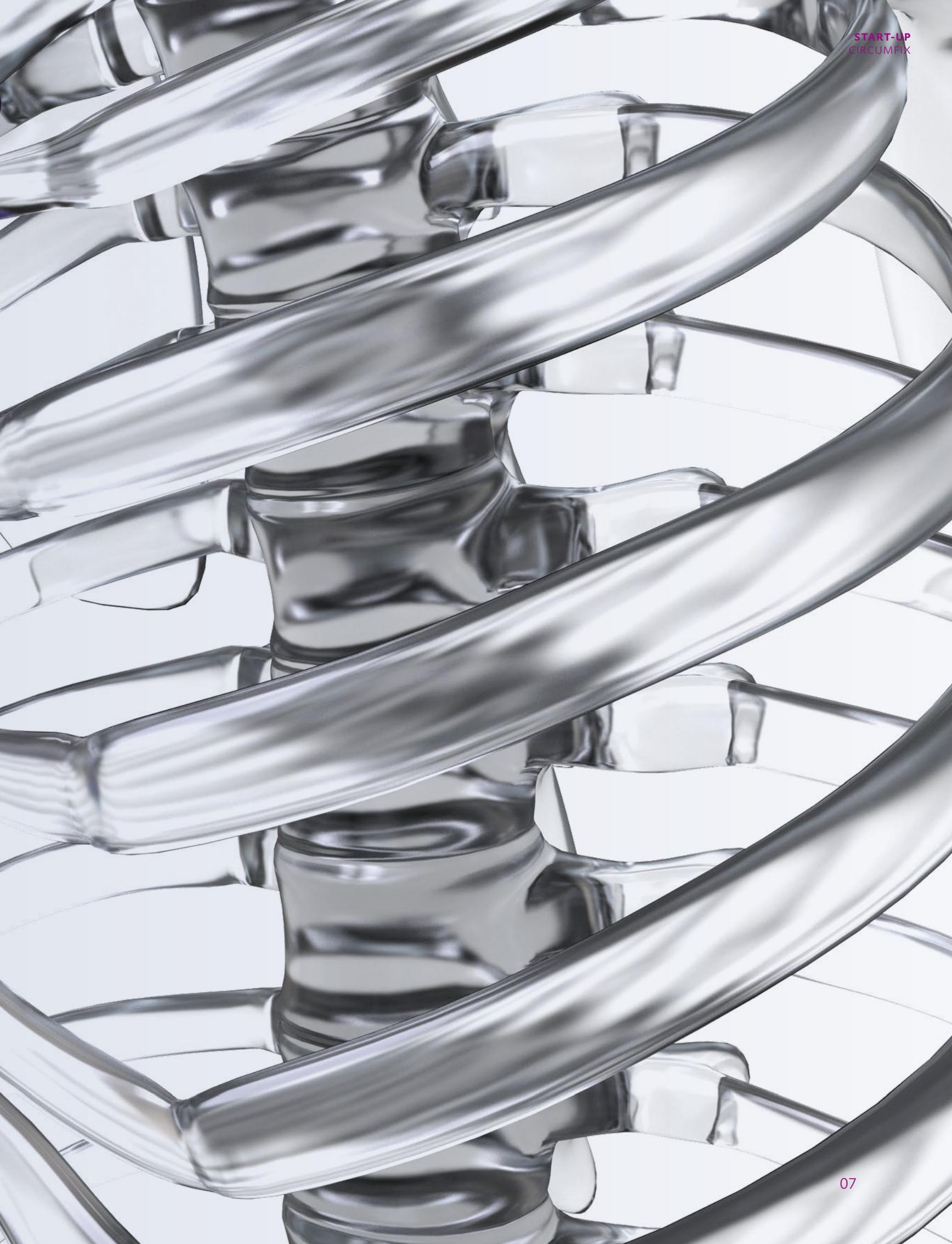
Recyclingforscher Daniel Goldmann gewinnt den wertvollen Rohstoff aus Elektroschrott

57 **IMPRESSUM**

## INNERE HALTUNG

Um während einer Operation an wichtige Organe wie Herz oder Lunge heranzukommen, müssen Chirurgen den Brustkorb des Patienten öffnen. Verschlossen wird dieser nach aktuellem Standard mit unterschiedlichen Metallkonstrukten, die das Brustbein zusammenhalten. Das US-Start-up Circumfix Solutions, an dem Evonik seit Kurzem beteiligt ist, hat dafür eine Alternative entwickelt: einen neuartigen Brustkorbverschluss aus Hochleistungspolymeren von Evonik. Das Medizinprodukt fördert die Genesung nach Operationen am offenen Brustkorb, indem es das Brustbein effektiv verschließt und dauerhaft stabilisiert. Die Circumfix-Verschlussvorrichtung ist ein sicheres und komfortables Implantat, das, im Gegensatz zu Metallverschlüssen, Knochen und Gewebe schont.





# Schutthaufen wird Geschichte

Ein Schweizer Start-up gewinnt aus Betonbruch hochwertigen Kalkstein, der zudem noch Kohlendioxid speichert.

Beton besteht zu einem Großteil aus Zement, dessen Herstellung für rund sieben Prozent der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Das Schweizer Start-up Neustark verbessert die schlechte CO<sub>2</sub>-Bilanz des allgegenwärtigen Baustoffs deutlich: Das Team um Johannes Tiefenthaler und Valentin Gutknecht hat eine Technologie entwickelt, mit der Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und in Betonbruch gebunden wird, der vor allem beim Abriss von Bauwerken entsteht. Durch die Reaktion des CO<sub>2</sub> mit dem im Beton enthaltenen Calciumhydroxid entsteht neuer, hochwertiger Kalkstein, der bei der Herstellung von Frischbeton neu gewon-

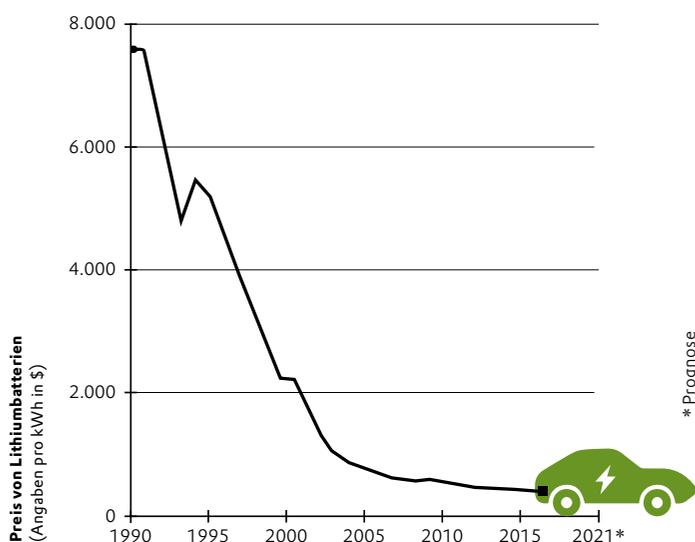


Recycelt oder frisch? Für die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Beton macht die Herkunft der Inhaltsstoffe einen großen Unterschied.

nenen Zement ersetzen kann. Mit diesem Verfahren gelang es dem vor drei Jahren aus der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich ausgegründeten Unternehmen, die Klimabilanz von Frischbeton um zehn Prozent zu verbessern. Der nächste Plan von Neustark: Bis 2025 soll klimaneutraler Beton Wirklichkeit werden.

BESSER IST DAS

## Unter Strom



Günstige Lithiumbatterien sorgen dafür, dass Elektrofahrzeuge billiger und gegenüber Autos mit Verbrennungsmotoren wettbewerbsfähiger werden. In den vergangenen drei Jahrzehnten fielen die Kosten für die Energiespeicher um 98 Prozent. Aktuell liegt der Preis bei rund 110 \$ pro Kilowattstunde. Interessant wird es, sobald die 100-\$-Marke geknackt ist: Dann könnten Elektroautos laut Analysefirma BloombergNEF zum selben Preis angeboten werden wie Benziner. Das wird Prognosen zufolge bereits 2024 möglich sein.

Quelle: BloombergNEF

# 84

PROZENT

des jemals weltweit produzierten Stahls ist heute noch im Einsatz – dank seiner Beständigkeit und der Materialzusammensetzung, die ihn ideal fürs Recycling macht. Stahl ist zu 100 Prozent und ohne Qualitätsverlust wiederverwertbar.

## DUROPLASTE ...

...sind Kunststoffe, die nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden können. Dazu gehören Harze und Klebstoffe, die zum Beispiel für den Fahrzeugbau wichtig sind. Duroplaste werden aus fossilen Rohstoffen hergestellt und können nur bedingt recycelt werden. Forscher der Universität Stockholm haben nun ein neues Material auf Basis von Lignin entwickelt, einem Abfallprodukt aus der Papierherstellung. Es verhält sich wie ein Duroplast, kann aber durch moderates Erhitzen wieder in den Ursprungszustand versetzt werden. Zudem lassen sich die Eigenschaften ändern, je nachdem, wie viel Lignin verwendet wird. Das erhöht die Vielseitigkeit.

# Der Natur auf der Spur

Kamelnasen inspirieren Forscher zur Entwicklung eines Sensors, mit dem sich Feuchtigkeitsquellen ermitteln lassen.

Kamele überleben dank einzigartiger Eigenschaften in den heißesten und trockensten Gebieten der Welt. Ihre feinen Nasen helfen unter anderem dabei, Wasserquellen aufzuspüren. Davon hat sich das Team um die chinesischen Forscher Weiguo Huang und Jian Song zur Entwicklung eines neuen Feuchtigkeitssensors inspirieren lassen. Bisherige Modelle reagieren nur wenig sensibel auf Wasservorkommnisse und sind sehr sonnenempfindlich. Um dies zu ändern, imitierten die For-

scher die große Oberfläche im Inneren der Kamel-nase mit einem porösen Polymernetzwerk. Darauf platzierten sie feuchtigkeitsanziehende Moleküle, sogenannte Zwitterionen, die ähnliche Eigenschaften besitzen wie der Nasenschleim der Tiere. Das Ergebnis: ein langlebiger Feuchtigkeitssensor, der Wasserquellen ermitteln hilft und darüber hinaus auch Schwankungen der Luftfeuchtigkeit in heißen Industrieabgasen und vom menschlichen Körper ausgehende Feuchtigkeit feststellen kann.

## MENSCH & VISION



»Künstliche Intelligenz wird ein Schlüssel für die Biotechnologie sein«

### DER MENSCH

In ihrer zweifach ausgezeichneten Masterarbeit zeigt Biotechnologin **Laura Helleckes** das Potenzial der künstlichen Intelligenz (KI) für eine effizientere Entwicklung von Bioprozessen auf. Ihre Faszination für mikrobielle Prozesse entwickelte die Forscherin bereits in der Schule, was sie zu einem Biotechnologiestudium an der RWTH Aachen bewegte. Wichtige Zwischenstationen ihres Werdegangs waren ein Auslandssemester in Helsinki sowie die Abschlussarbeit am Forschungszentrum Jülich. Dort führt sie als Mitarbeiterin des Microbial Bioprocess Lab diese Forschung in ihrer Promotion mit Fokus auf Laborautomation und Prozessmodellierung fort.

### DIE VISION

In einem Bioprozess werden Mikroorganismen oder deren Komponenten eingesetzt, um chemische oder biologische Produkte herzustellen. Diese Prozesse im Detail zu verstehen ist Helleckes wichtig. Die Lösung sieht die Forscherin in der **Digitalisierung**: »KI und vor allem der Teilbereich des maschinellen Lernens werden ein Schlüssel für die Biotechnologie sein.« Laborroboter liefern so viele Daten, dass eine manuelle Auswertung unmöglich wird. Mithilfe von KI lassen sie sich nun bereits im Verlauf eines Bioprozesses nutzen – nicht erst nach dessen Abschluss. Helleckes analysiert diese Daten mit ihren Modellen und nutzt dieses Wissen für optimierte Bioprozesse.

## GUTE FRAGE



»Werden wir unsere Autos bald mit Zucker betanken, Frau Dr. Wang?«

Der Schlüssel sind Olefine, ein Bestandteil von Benzin und unter anderem Vorprodukt für Polymere sowie Kunst- und Schmierstoffe. Bislang werden Olefine fast ausschließlich aus Erdöl gewonnen, doch mithilfe einer neuen Technologie stellen wir sie aus Glukose her, die auf natürliche Weise bei der Photosynthese entsteht. In einem zweistufigen Prozess verändern wir zunächst Kolibakterien, die im Dickdarm von Menschen und vielen Tieren leben, sodass sie Glukose in 3-Hydroxyoktansäure und Decansäure umformen. Im zweiten Schritt wird die 3-Hydroxyoktansäure mittels einer heterogenen Katalyse in Olefine umgewandelt. Ziel ist jetzt, die Methode so anzupassen, dass wir damit auch Alkane herstellen können, den Hauptbestandteil von Benzin.

*Dr. Zhen Wang ist Assistenzprofessorin für Biowissenschaften an der University at Buffalo (SUNY) und Mitverfasserin der Forschungsarbeit „A dual cellular-heterogeneous catalyst strategy for the production of olefins from glucose“.*



# OZEAN- RIESEN

# »Es ist uns gelungen, ein grünes Rotorblatt auf den Markt zu bringen.«

MARTIN GERHARDT, LEITER DES OFFSHORE-WIND-PRODUKT-MANAGEMENTS BEI SIEMENS GAMESA



Gigantische Windräder vor den Küsten sollen in aller Welt die Energiewende beflügeln. Materialien von Evonik öffnen den Weg zu neuen Dimensionen in der Stromerzeugung.

TEXT CHRISTOPH BAUER

**C**old Hawaii“, kaltes Hawaii, so nennen Windsurfer die 55 Kilometer lange norddänische Küste zwischen Hanstholm im Norden und Agger im Süden. Hier im Nationalpark Thy herrscht ein beständiger, kräftiger Westwind, den die Wassersportler lieben. 30 Kilometer östlich liegt ein Hotspot für Windfans der anderen Art: Im Testzentrum in Østerild stehen sieben gewaltige Windkraftanlagen, die hier für ihren Offshore-Einsatz erprobt werden. Die größte davon, ein Modell von Siemens Gamesa, misst exakt 271,40 Meter und hat die 254 Meter hohe Storebælt-Brücke als höchstes Bauwerk Dänemarks abgelöst. Seit November wird sie für ihren kommerziellen Einsatz ab 2024 vorbereitet.

Die drei Flügel der Rekordhalterin messen jeweils 108 Meter und überstreichen bei jeder Drehung eine Fläche von 39.000 Quadratmetern – das entspricht fast sechs Fußballfeldern. „Je größer der Rotor und damit die überstrichene Fläche, desto mehr saubere Energie liefert eine Anlage“, sagt Martin Gerhardt, Leiter des Offshore-Wind-Produkt-Managements bei Siemens

Gamesa. Lange wird der Rekord nicht wahren. Die vier Großen der Offshore-Windradbranche – neben dem deutsch-spanischen Unternehmen Siemens Gamesa sind das Vestas aus Dänemark, GE Renewable Energy aus den USA und Mingyang Smart Energy aus China – liefern sich einen harten Wettkampf um die mächtigste Mühle. Gewinner ist in jedem Fall die Umwelt. Zusammen mit Fotovoltaikanlagen und Wasserkraftwerken tragen die Windräder maßgeblich zur weltweiten Energiewende bei.

Die Leistungsdaten der aktuellen Anlagen waren vor ein paar Jahren noch undenkbar. Die Windmühle von Siemens Gamesa in Østerild leistet 14 Megawatt, in Spitzen sogar 15. Vestas will noch in diesem Jahr ein Modell vorstellen, das 15 Megawatt im Dauerbetrieb schafft. Doch um die riesigen Rotoren anzutreiben, braucht es sehr viel Wind – und den gibt es vor allem auf dem Meer. „Wir müssen die Offshore-Windkraft zum Rückgrat der Dekarbonisierung machen“, sagt Siemens-Gamesa-Manager Gerhardt. →

Auf See weht fast immer ausreichend Wind. Die neueste Generation von Offshore-Kraftwerken bringt es auf Leistungen von mehr als 14 Megawatt.

# 1990 an Land

Turmhöhe **37 m**

Rotordurchmesser **18 m**

Leistung **80 MW**

## Höher, größer, stärker

Von 1990 bis 2024 – wie sich die Leistungsdaten moderner Windanlagen entwickelt haben

— 200 m

— 150 m

— 100 m

— 50 m

— zum Vergleich:  
**Brandenburger  
Tor**

— 0 m



Mehr als 100 Meter lang sind die Formen, in denen wie hier bei Vestas in Dänemark die Rotoren der großen Windkraftanlagen gefertigt werden.

Das ist alles andere als leicht. Das hohe Gewicht der Anlagen, die gewaltigen Fliehkräfte und die raue Umwelt auf hoher See stellen enorme Anforderungen an Konstruktion und Materialien. Darüber hinaus müssen Offshore-Anlagen besonders robust sein. Reparaturen auf See sind kompliziert und sehr teuer. Am besten rotieren die Riesen wartungsfrei.

Solche Ansprüche lassen sich nur mit fundierter Forschungsarbeit bewältigen. „Nehmen Sie nur die Rotorblätter, sie werden immer größer“, sagt Christian Schmidt, der bei Evonik die Business Line Crosslinkers leitet. „Das bringt nicht erst bei Transport und Aufbau neue Herausforderungen mit sich, sondern schon in der Herstellung. Dafür haben wir maßgeschneiderte Produkte entwickelt.“

Rotorblätter sind inzwischen technische Hochleistungsprodukte aus verschiedenen Materialien. Die meisten von ihnen werden in zwei Halbschalen gefertigt. Die Blatthälften bestehen aus mit Vestamin IPD getränkten Glasfasermatten. Dieses Harz sorgt für die erforderliche mechanische Stabilität der Rotorblätter und für eine lange Lebensdauer im fertigen Flügel. Die Lebensdauer dieser Composite-Konstruktion lässt sich erhöhen, indem Siliziumdioxid-Partikel direkt auf die Matten aufgebracht oder dem Infusionsharz beigemischt werden. Legt man 2.500 dieser von Evonik entwickelten winzigen Teilchen namens Nanopox übereinander, sind sie so dick wie ein menschliches Haar. So verstärkt, werden die Rotorhälften mit Stegen aus Carbonfasern verbunden. Dabei entstehen



Giganten im Test:  
Im dänischen  
Østerild werden an  
Land die Offshore-  
Windanlagen  
verschiedener  
Hersteller  
mehrfährigen  
Prüfungen  
unterzogen.

Hohlräume, die ausgeschäumt werden. Entscheidend ist hier vor allem das Gewicht. Evonik hat den Strukturschaum Rohacryl entwickelt, der mit minimaler Harzaufnahme und geringer Dichte maßgeschneidert für die Anforderungen der Windindustrie ist und so Designs ermöglicht, die Gewicht einsparen.

Kleber ist bei den gigantischen Rotoren jede Menge im Spiel. Denn letztlich werden die beiden Hälften über die volle Länge verklebt. Bei Maßen von bis zu 200 Metern eine technische Hürde: „Früher wäre der zuerst aufgebrauchte Kleber schon ausgehärtet, während am anderen Ende noch aufgetragen wird“, sagt Evonik-Manager Schmidt. „Wir lösen dieses Problem, indem wir mit einem speziellen Härter die Gel-Phase verlängern, in der der Kleber noch nicht aushärtet.“ Extrem wichtig für die Haltbarkeit: Schließlich hält der Kleber nicht nur die beiden Hälften zusammen, sondern quetscht sich auch in produktionsbedingte kleine Spalten und Ritzen und dichtet den Rotor so hermetisch ab.

#### MIT 400 SACHEN DURCH DIE LUFT

Fehlt noch der Lack. Stürme, Hagel, Sand und Salz in der Luft – vor all diesen extremen Einflüssen sollen die Rotoren gut geschützt sein. Hier setzen viele Hersteller auf Lackierungen, in denen pyrogene Kieselsäuren von Evonik enthalten sind. Sie sorgen dafür, dass die schützende Farbe

gleichmäßig dick aufgetragen werden kann. Zudem kommen dort spezielle Vernetzer zum Einsatz, die die Trocknung der Lacke beschleunigen und sie unempfindlicher gegen Wettereinflüsse machen.

Vor allem Ecken und Kanten der Blätter sind kritische Zonen. Die in Drehrichtung vorn liegende Kante, die sogenannte Leading Edge, schneidet an der Spitze mit bis zu 400 Kilometern pro Stunde durch die Luft. Daher wird dort ein schaumstoffartiger Schutz aus Polyurethanpolstern aufgetragen. Additive aus dem Baukasten von Evonik sorgen für die richtige Struktur. Ohne die Schutzpolster wären die Rotorblätter in kürzester Zeit beschädigt. →



Logistische Meisterleistung: Das Rotorblatt eines Siemens-Windrads wird per Spezialtransporter zum Einsatzort transportiert.

# 2000 an Land

Turmhöhe \_\_\_\_\_ **89 m**  
 Rotordurchmesser \_\_\_\_\_ **59 m**  
 Leistung \_\_\_\_\_ **1 MW**

— 200 m

— 150 m

— 100 m

zum Vergleich:  
**Notre Dame**

— 50 m

— 0 m



Schwimmende Windkraftplattformen wie das TetraSpar sollen der Offshore-Windkraft zum weltweiten Durchbruch verhelfen.

Doch auch die sorgfältige und technisch anspruchsvolle Herstellung kann nicht vermeiden, dass die Rotoren extrem belastet werden. Ein mehr als 100 Meter langes Rotorblatt biegt sich bei einer Sturmbö um mehrere Meter. Dies geschieht über die vielen Jahre der Nutzung hinweg immer und immer wieder. „Es wäre der Anfang vom Ende eines Rotors, wenn bei solchen Biegungen die schützende Lackschicht rissig würde“, sagt Christian Schmidt. „Unser spezieller Vernetzer namens Vestanat IPDI steckt in vielen Lacken und gibt den Harzen gleichzeitig Stabilität und Flexibilität.“ Nur so können die neuen Größenrekorde bei den Rotoren umgesetzt werden, zeigen auch die Tests in Dänemark.

Nicht nur dort müssen die Offshore-Riesen funktionieren. Rund um den Globus entstehen zurzeit Windparks auf dem Meer. Allein 2021 stieg die weltweit produzierte Menge an Offshore-Windkraftstrom um mehr als 25 auf insgesamt 130,6 Terawattstunden. Die Siemens-Gamesa-Anlage, die derzeit in Dänemark getestet wird, soll im Windpark Sofia auf der Doggerbank vor der Nordostküste Großbritanniens zum Einsatz kommen. Von 2024 an werden hier insgesamt 100 Exemplare installiert mit einer Gesamtnennleistung von 1,4 Gigawatt – das entspricht der Leistung eines Atomkraftwerks. In unmittelbarer Nachbarschaft sollen auf dieser Untiefe, die Großbritannien mit dem europäischen Kontinent verbindet, weitere Projekte umgesetzt werden.

weiter auf Seite 16 →

# IM AUFWIND

Der Anteil erneuerbarer Energien an der weltweiten Stromerzeugung wächst. Eine wichtige Rolle spielen dabei Windkraftwerke an Land und auf See. Ein Blick in die Zahlen

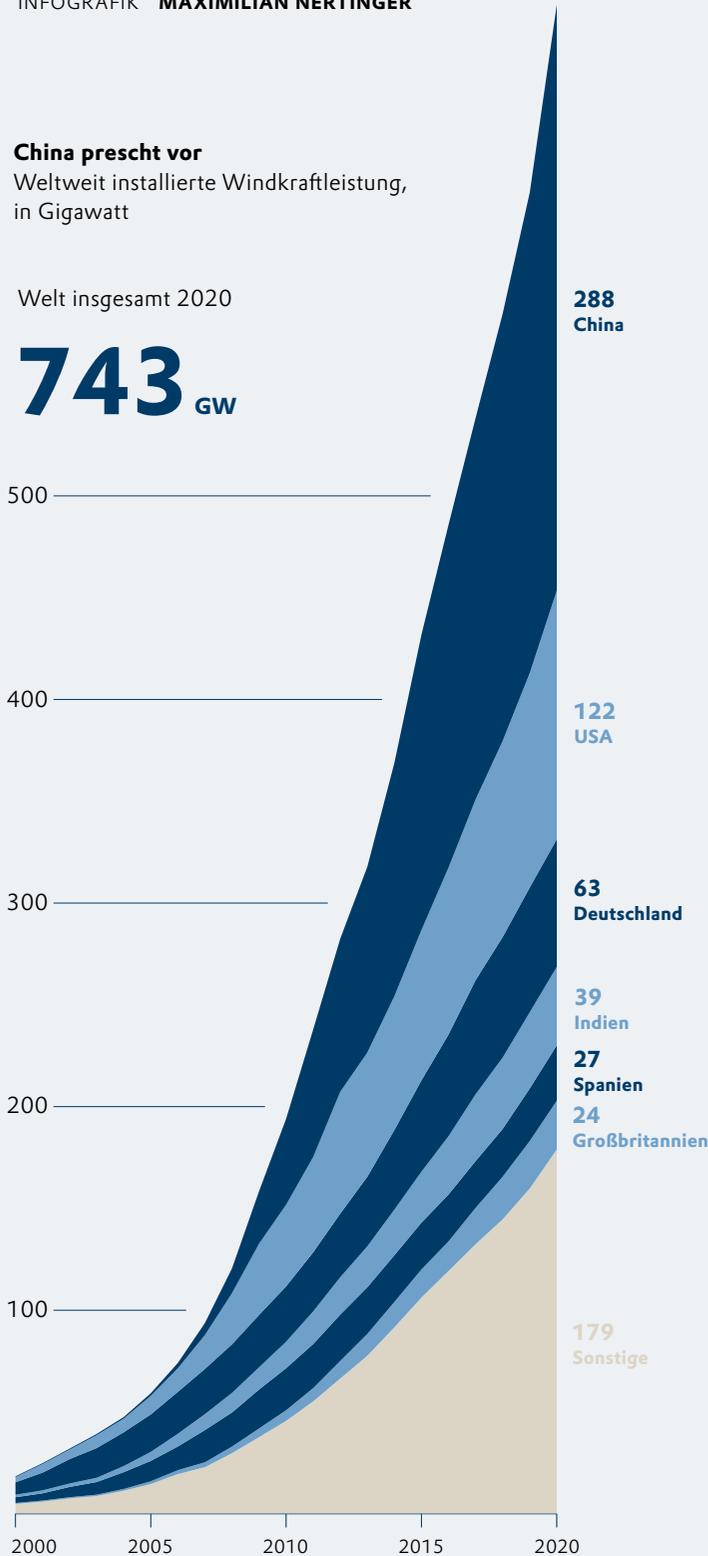
INFOGRAFIK **MAXIMILIAN NERTINGER**

## China prescht vor

Weltweit installierte Windkraftleistung, in Gigawatt

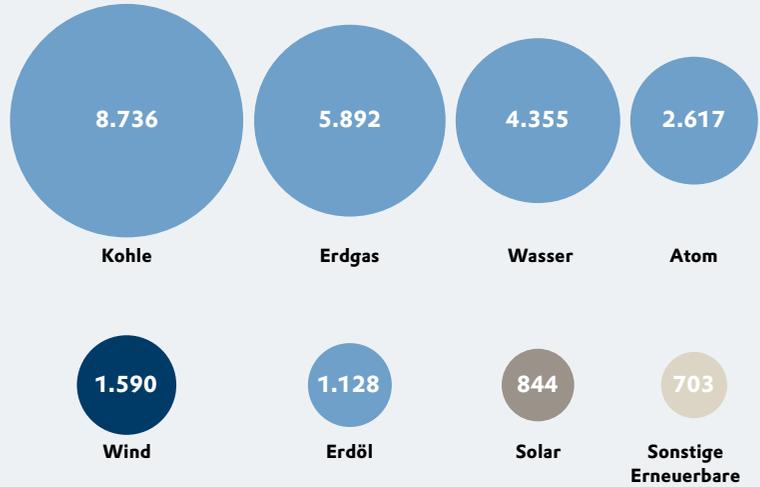
Welt insgesamt 2020

# 743 GW



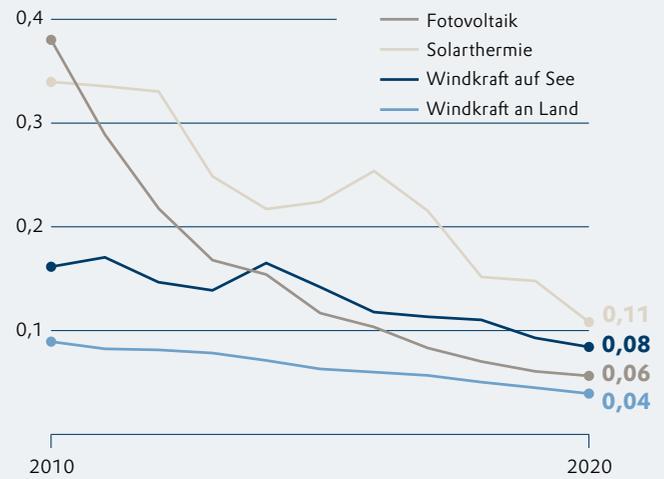
## Wind schlägt Erdöl

Weltweite Stromerzeugung nach Energieträger 2019, in Terawattstunden



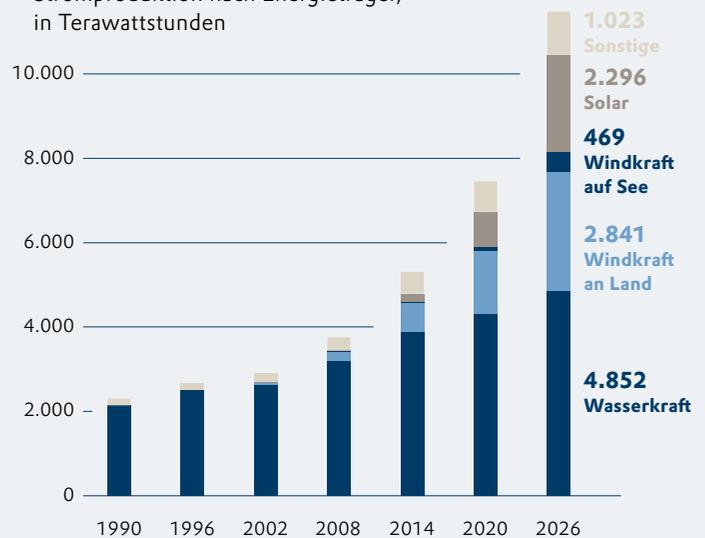
## Solarenergie wird günstiger

Durchschnittlicher Auktionspreis für eine Kilowattstunde Strom nach Energieträger 2020, in US-\$



## Luft nach oben

Stromproduktion nach Energieträger, in Terawattstunden



# 2010 an Land

Turmhöhe **135 m**

Rotordurchmesser **127 m**

Leistung **7,6 MW**

## »Größe bringt neue Herausforderungen beim Bau der Rotorblätter.«

CHRISTIAN SCHMIDT, LEITER DER EVONIK-BUSINESS-LINE CROSSLINKERS



### SCHWIMMENDE FUNDAMENTE

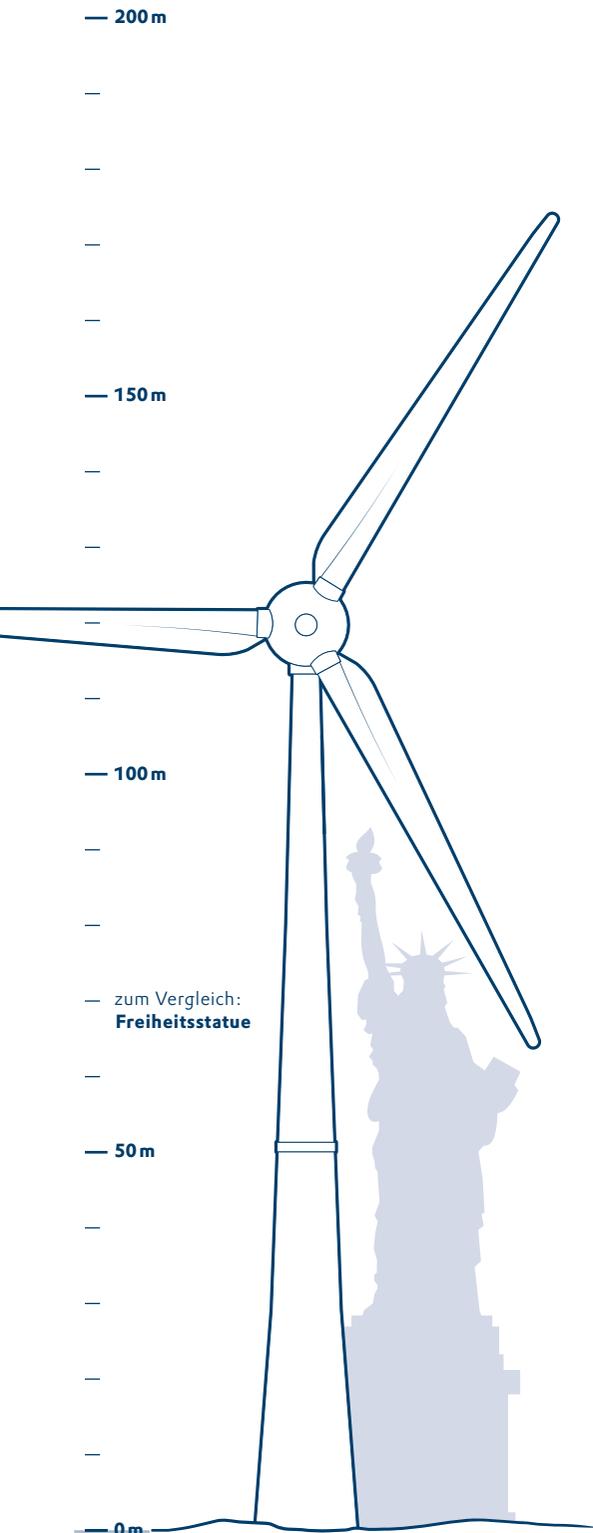
Solch vorteilhafte Bedingungen mit Wassertiefen von stellenweise nur 13 Metern sind global gesehen eher die Ausnahme und finden sich vor allem in Europa sowie vor der nordamerikanischen und chinesischen Ostküste. Anderswo fällt der Meeresboden meist steil ab, sodass schon in wenigen Kilometern Entfernung vom Land eine Tiefe von mehr als 60 Metern erreicht wird. Dies gilt als die Grenze, bis zu der ein Windrad mit herkömmlichem Fundament gebaut werden kann. „Diese Gebiete mithilfe von schwimmenden Anlagen zu erschließen wird der nächste große Schritt sein, um das Potenzial der Windkraft weltweit zu heben“, sagt Offshore-Experte Gerhardt.

Schwimmende Windräder? Eine Vorstellung, die angesichts der Höhe und des Gewichts der Giganten abstrus erscheint. Verschiedene Konzepte werden jedoch bereits erprobt: zum einen solche, bei denen jedes Windrad auf einer Art riesiger Boje unter Wasser steht. Diese ist im oberen Teil mit Luft gefüllt, um Auftrieb zu haben, und hat im unteren ein Gegengewicht zum Windrad. Solche Konstruktionen kommen seit gut vier Jahren in einem Windpark rund 25 Kilometer vor der schottischen Küste zum Einsatz. Aufgrund ihrer Größe lassen sie sich nur auf hoher See zusammenbauen.

Anderswo dienen als Grundlage relativ flache Auftriebsplattformen, die mit Drahtseilen am Meeresgrund befestigt werden. Sie sind bei der Montage allerdings instabil, und die Seile sind starken Belastungen ausgesetzt. Vielversprechend ist ein Projekt, das die Konzerne Shell aus den Niederlanden, Tepco aus Japan, RWE aus Deutschland und Stiesdal aus Dänemark in Norwegen vorstellten. Die Konstruktion namens TetraSpar besteht aus den gleichen stählernelementen wie die Windradmasten.

Diese sind günstig zu fertigen, lassen sich mit den vorhandenen Maschinen bearbeiten und können bestehende Logistikwege nutzen. Unter der schwimmenden Plattform befindet sich ein dreieckiges Gewicht, das erst am Bestimmungsort der Anlage abgesenkt und anschließend am Meeresboden verankert wird. So ist es möglich, das Windrad schon im Hafen aufzusetzen und fertig montiert an den Bestimmungsort zu schleppen. Seit Dezember läuft eine Versuchsanlage in 200 Meter tiefem Wasser vor Norwegen.

Im Normalbetrieb werden diese Stahlkonstruktionen viele Jahre im Salzwasser schwimmen, ohne einen neuen Anstrich zu bekommen. Ein Lackadditiv von Evonik dient daher in den Anstrichen als Barriere vor dem Salzwasser. „Anders als etwa ein Schiff, das ins Trockendock kann, müssen die Unterkonstruktionen von Windrädern für die gesamte Laufzeit der Anlage durchgehend im Wasser bleiben“, erklärt Christian Schmidt, „und das sind Jahrzehnte. Zugleich schützt die Beschichtung auch vor mechanischen Belastungen, wie sie etwa bei der Montage oder beim Anlegen von Serviceschiffen entstehen.“



## SCHWELLENLÄNDER PROFITIEREN

Die neuen Möglichkeiten bei Offshore-Anlagen machen die Nutzung der Windkraft auch für Staaten attraktiv, die bislang keinen Zugang zu erneuerbaren Energiequellen haben. Die Internationale Energieagentur (IEA) und die Internationale Agentur für erneuerbare Energien (IRENA) rechnen mit einer enormen Steigerungsrate bei der Stromerzeugung mittels Offshore-Windanlagen. Bis 2050 könnte die Kapazität weltweit auf 2000 Gigawatt anwachsen. Ende 2020 waren es nur etwas mehr als 35 Gigawatt.

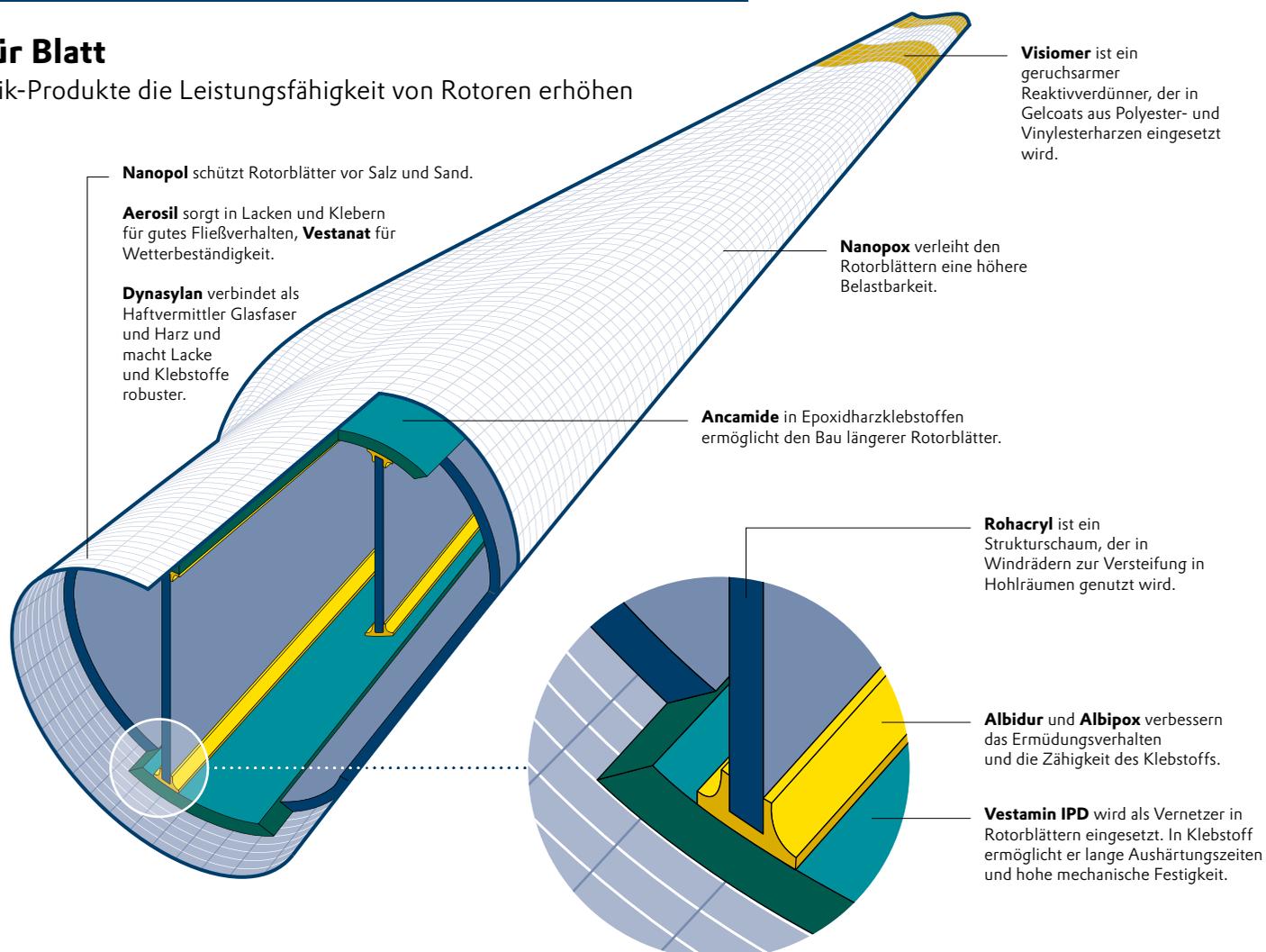
Als Treiber dieser Entwicklung werden insbesondere die schnell wachsenden Entwicklungs- und Schwellenländer gesehen, die sich vom Import fossiler Energieträger unabhängig machen und Strom günstiger als bislang erzeugen können. Der Global Wind Energy Council (GWEC), ein Zusammenschluss von 1.500 Akteuren des Windenergiemarkts aus 80 Ländern, sieht ein

großes Potenzial für die jeweilige regionale Wirtschaft. Denn Windkraftanlagen bestehen aus sehr großen Elementen, bei denen sich ein Transport über weite Strecken nicht lohnt. Bei der Montage vor Ort und später bei der Wartung entstünden somit viele qualifizierte Arbeitsplätze.

Doch natürlich haben auch die großen Wirtschaftsmächte die Zeichen der Zeit erkannt. In den Vereinigten Staaten kündigte im Oktober 2021 die Regierung ein Programm zum massiven Ausbau der Offshore-Windkraft an. Es soll grüne Energie für zehn Millionen Haushalte und 77.000 neue Jobs in der Windbranche bringen. Sowohl am Golf von Mexiko als auch an der US-Ost- und Westküste sollen insgesamt sieben riesige Offshore-Windparks entstehen und die Wirtschaftszentren entlang der Küste versorgen. „Wir stehen an einem Wendepunkt für die Entwicklung der heimischen Offshore-Windenergie“, sagt die amerika- →

## Blatt für Blatt

Wo Evonik-Produkte die Leistungsfähigkeit von Rotoren erhöhen



ab **2024** auf See

Turmhöhe **146 m**

Rotordurchmesser **231 m**

Leistung **15 MW**

— 200 m

— 150 m

zum Vergleich:  
**Tianning-Pagode**

— 100 m

— 50 m

— 0 m

# »Die Windkraft wird dynamische Auswirkungen auf die US-Wirtschaft haben.«



BONNIE TULLY, EVONIK NORDAMERIKA

nische Innenministerin Deb Haaland. „Wir müssen diesen Moment nutzen.“

Die Ziele gelten als ambitioniert. „In der westlichen Hemisphäre hat es bei Offshore-Windkraft noch nie etwas Derartiges gegeben“, sagte Mike Jacobs, Energieanalyst bei der Union of Concerned Scientists. Bis heute gibt es in Amerika ganze sieben Offshore-Windturbinen – fünf in einem Windpark vor Rhode Island und zwei weitere, die als Testanlagen in Virginia errichtet wurden. Bonnie Tully, die die Geschäfte von Evonik in den USA leitet, rechnet jetzt mit einem deutlichen Impuls für die größte Volkswirtschaft der Welt: „Die Windenergie wird ziemlich dynamische Auswirkungen haben. Sie hilft, die Kosten bei Lieferketten, Produktion und Bau niedrig zu halten.“

## AUFBRUCH IN CHINA

Die zweitgrößte Wirtschaftsmacht China setzt schon länger auf Windkraft, die installierte Leistung ist doppelt so hoch wie in den USA. Jahr für Jahr bricht die Volksrepublik neue Ausbaurekorde. Nach Berechnungen der Nachrichtenagentur Bloomberg baute China allein im Jahr 2020 rund 58 Gigawatt zusätzliche Windkraftleistung auf, das war mehr als die Hälfte aller weltweit neu in Betrieb gegangenen Anlagen. Entsprechend bedeutsam ist die heimische

Windkraftbranche. Sieben der größten zehn Windradbauer kommen aus dem Reich der Mitte.

Evonik reagierte früh auf das Wachstum und eröffnete 2014 eine Isophorondiamin-Anlage in Schanghai. Mit der Isophoron-Chemie hat das Unternehmen aber schon viel Erfahrung. Sie ist bereits seit 60 Jahren im Einsatz und die wesentliche technologische Grundlage dafür, dass die Materialien in den Windrädern nicht brüchig oder spröde werden. Heute stellt Evonik Isophoron-Produkte auf drei Kontinenten her: Außer in der Anlage in Schanghai werden sie an den deutschen Standorten Marl und Herne, im belgischen Antwerpen und am größten US-Standort in Mobile, Alabama, produziert – seit Kurzem erstmals auch auf Basis nachwachsender Rohstoffe: Evonik hat ein Verfahren entwickelt, bei dem daraus das Vorprodukt Aceton hergestellt werden kann. Dies gehört zu den „eliminate CO<sub>2</sub>“-Massenbilanzverfahren, mit denen bei Evonik fossile Kohlenstoffe durch regenerative oder recycelte ersetzt werden sollen (siehe Artikel ab Seite 48).

Iris Zhen, die für Evonik von Schanghai aus die Crosslinkers-Geschäfte für China und Südostasien leitet, erwartet weiteres Wachstum: „China will bis 2060 kohlenstoffneutral werden. Der erste Schritt dazu



Windpark in der Deutschen Bucht: Offshore-Anlagen ermöglichen eine bessere Windausbeute und beeinträchtigen die Umwelt weniger als Kraftwerke an Land.

ist, den Großteil des Stroms aus emissionsfreien und erneuerbaren Quellen zu erzeugen und so den Übergang zu nachhaltigen und sauberen Energiequellen und zu einer CO<sub>2</sub>-freien Wirtschaft zu schaffen.“ Auch sie rechnet damit, dass die Windenergie in einer sauberen Energiezukunft eine entscheidende Rolle spielt, und erwartet, „dass Asien, vor allem China, die weltweite Windenergiebranche weiterhin dominieren wird“.

#### EIN ZWEITES LEBEN FÜR ROTOREN

Dass CO<sub>2</sub>-frei erzeugter Strom aus Windkraft der Umwelt dient, steht außer Frage. Doch wie ist es um die Haltbarkeit der Windräder bestellt und um ihre Entsorgung? „Unsere Windturbinen werden für eine Lebensdauer von mindestens 25 Jahren ausgelegt“, sagt Siemens-Gamesa-Manager Gerhardt. Vor allem die Rotorblätter bestimmen, wie langlebig eine Anlage ist. „Hier haben wir mit neuen Konzepten und Werkstoffen Fortschritte gemacht, die die Haltbarkeit unter den harschen Offshore-Bedingungen erheblich verbessert haben.“

Das Recycling sei bei Stahl, Beton und Metallen schon heute kein Problem, so der Windexperte. Schwieriger gestaltet sich die Wiederverwertung beim Rotorblatt. Der Flügel besteht aus einem Materialmix aus Kunststoff- und Carbonfasern sowie Balsa-

holz, die sich schwer voneinander trennen lassen. „Vor Kurzem ist es uns jedoch gelungen, mit dem RecycableBlade erstmals ein wirklich grünes Rotorblatt für den Offshore-Bereich auf den Markt zu bringen“, sagt Gerhardt.

Die Creavis, die strategische Innovationseinheit von Evonik, arbeitet in dieselbe Richtung und bündelt jetzt die Expertise aus verschiedenen Geschäftsbereichen, um die Windkraft zum Teil der Kreislaufwirtschaft zu machen. Schon jetzt ist etwa der Strukturschaum Rohacryl wiederverwendbar. Martin Gerhardts Zukunftspläne könnten somit Realität werden: „Unser Ziel ist es, 2040 nur noch Turbinen zu bauen, die vollständig recycelbar sind.“ Dann würden sich nicht nur die riesigen Rotoren möglichst lange im Kreis drehen, sondern auch die Materialien, aus denen sie gemacht sind. —



**Christoph Bauer** ist Journalist. Er arbeitet in der Kommunikationsabteilung von Evonik.



# »Die Erneuerbaren sind die günstigste Art der Energieversorgung«

Der Umstieg von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien ist ein Kraftakt für Wirtschaft und Gesellschaft. Der Ingenieurwissenschaftler Volker Quaschnig erklärt, warum er trotzdem daran glaubt, dass der Umstieg auf Windkraft und Fotovoltaik gelingt.

INTERVIEW CHRISTOPH BAUER & CHRISTIAN BAULIG

**Herr Quaschnig, die USA sind unter Präsident Joe Biden wieder dem Pariser Klimaschutzabkommen beigetreten, China errichtet Jahr für Jahr Wind- und Sonnenkraftanlagen in Rekordtempo, und in Deutschland ist die neue Bundesregierung mit einer sehr ambitionierten Energiepolitik angetreten. Ist die Menschheit jetzt auf dem richtigen Weg?**

**VOLKER QUASCHNING** Es bewegt sich etwas, aber das Tempo stimmt leider immer noch nicht. Im Jahr 2100 werden wir so oder so 100 Prozent erneuerbare Energien haben. Die Frage ist nur: Haben wir bis dahin das Klima ruiniert, oder haben es wir vorher geschafft umzusteuern?

**Halten Sie eine rechtzeitige Umstellung unserer Energieerzeugung noch für möglich?**

Technisch ist das eine Herausforderung, aber es ist machbar.

**Und können wir das auch bezahlen?**

Die Erneuerbaren sind mittlerweile die günstigste Art der Energieversorgung. Weiter auf Kohlekraftwerke oder Benzin- und Dieselaautos zu setzen, ist der viel teurere Weg.

**Lassen sich die nötigen Veränderungen denn gesellschaftlich und politisch umsetzen?**

Ich hoffe, die Mehrheit der Menschen stimmt zu, dass wir eine Technologie, die uns vor dramatischen Folgen rettet und bezahlbar ist, auch einsetzen.

**Und was ist mit der Minderheit, die sich dagegenstemmt?**

Es ist viel die Rede davon, dass man „die Leute mitnehmen“ müsse. Manche sitzen aber zu Hause auf ihrem Sofa und wollen gar nicht mit. Wir leben in einer Demokratie, da sollte die Mehrheit entscheiden. Und eine sehr große Mehrheit wünscht sich den Klimaschutz. Wir können das nicht ausdiskutieren, bis der Letzte am Ende überzeugt ist. Das gilt auch für die Windkraft ...

**... bei der sich einige Menschen gerade aus Gründen des Naturschutzes gegen neue Anlagen wenden. Zum Beispiel, weil die Rotoren angeblich den Bestand von Greifvögeln gefährden.**

Wir haben eine Spaltung in der Gesellschaft. Viele haben begriffen, dass wir vor einem großen Problem stehen, und verfallen in Depressionen, weil die Gesellschaft immer noch so langsam handelt. Zugleich gibt es eine Minderheit, die das Problem negiert, nach dem Motto: Wenn wir schon unbedingt Klimaschutz machen müssen, dann bitte ohne Windkraftanlagen in meiner Nähe. Erstaunlicherweise erleben wir hierzulande die größten Widerstände gegen Windkraftanlagen dort, wo kaum welche stehen. →



Kampf gegen Windmühlen: Viele Gegner von Windkraftwerken führen Umweltschutzgründe an. Doch die größte Bedrohung der Natur ist der Klimawandel.

## »Wir können nicht diskutieren, bis der Letzte überzeugt ist.«

VOLKER QUASCHNING

### Wie können wir dieses Dilemma lösen?

Man muss die Menschen vor Ort an den Erträgen beteiligen. In Deutschland wurden zu Beginn Windkraftanlagen im Wesentlichen von Idealisten und Bürgergenossenschaften gebaut. In manchen Gemeinden stehen Dutzende von Windrädern, und es gibt überhaupt keinen Widerstand. Die Leute sagen sich: Wenn sich die Rotoren drehen, ist das keine Verschandelung der Landschaft, sondern jede Umdrehung bringt uns einen Euro. Eine Beteiligung kann auch über Modelle erfolgen, bei denen Anrainer von Windkraftanlagen beispielsweise zehn Prozent Rabatt auf ihre Stromrechnung erhalten.

### Oder man verlagert die Energieerzeugung auf hohe See, wo niemand wohnt und der Wind stetig bläst.

Tatsächlich haben wir dort weniger Diskussionen als an Land. Und in der Nordsee produzieren Windkraftanlagen fast doppelt so viel Strom wie an Land. Großbritannien könnte sich mit Offshore-Strom komplett selbst versorgen. Das ist jedoch international

eine Ausnahme. Generell können wir jenseits der Küsten nicht das kompensieren, was wir an Land an nötigen Anlagen verhindern. Offshore-Windenergie muss zudem mit der Fotovoltaik an Land konkurrieren. Wenn sie doppelt so teuer ist wie Solarstrom, wird der Erfolg überschaubar bleiben.

### Einige Erfinder propagieren Windkraftanlagen, bei denen sich der Rotor nicht auf einer horizontalen Achse dreht, sondern auf einer vertikalen. Diese Mühlen sollen leiser sein als herkömmliche. Was halten Sie davon?

Die Technologie ist nicht neu und hat sich in all den Jahrzehnten nicht durchgesetzt. Der Wirkungsgrad ist schlechter und die mechanische Belastung größer. Heutige Vertikalachsen sind zudem meist relativ klein. Gegen eine Fünf-Megawatt-Anlage dieser Bauart gäbe es an Land vermutlich auch Widerstand.

### Auch wegen angeblich mangelnder Nachhaltigkeit geraten Windkraftanlagen immer wieder unter Beschuss. Insbesondere die unzureichende Recyclingfähigkeit wird kritisiert. Zu Recht?

Die Betonfundamente, den Turm und den Generator kann man gut recyceln. Die Herausforderung sind die Rotorblätter, die häufig aus Verbundstoffen bestehen. Im Idealfall sollte man bei der Produktion dieser Bauteile künftig nicht mehr erdölbasierte Kunststoffe einsetzen – und wie bei fast allen Produkten müssen wir auch hier in die Kreislaufwirtschaft einsteigen. Für dieses Problem werden Ingenieurinnen und Ingenieure aber sicherlich Lösungen finden.

### **Von welchen Ländern können wir uns etwas abschauen in puncto Energiewende?**

Norwegen ist in der Elektromobilität führend, Frankreich lässt in Paris bald keine Verbrenner mehr in die Stadt, und Dänemark macht sehr viel bei der Windenergie. Aber kein Land ist perfekt. Im Klimaschutz-ranking von Germanwatch, bei dem Deutschland übrigens im Mittelfeld liegt, sind die ersten drei Plätze unbesetzt, weil kein Land auf dem Weg ist, ausreichende Maßnahmen umzusetzen. Aber es gibt auch Staaten ohne große Klimaschutzambitionen, die bei der Energiewende Erfolge vorzuweisen haben.

### **Zum Beispiel?**

Nehmen Sie Texas. In den USA ist das der Bundesstaat, der am meisten für die Windenergie tut. Ein Ölstaat, der seit je von den Republikanern geführt wird! Dort hat man erkannt, dass Windenergie Big Business bedeutet. Klimaschutz ist da Nebensache.

### **Wie wichtig ist die Wirtschaft beim Umsteuern in der Energiefrage? Großverbraucher wie die Stahlbranche oder die chemische Industrie haben ja einen enormen Hebel, um Entscheidungen zu forcieren.**

Das Mindset hat sich bei vielen Unternehmen in den vergangenen Jahren komplett verändert. Man versucht, ökologische Standards zu etablieren, und hat erkannt, dass man mit der neuen Welt gute Geschäfte machen kann. Ich habe mir die Augen gerieben, als der Bundesverband der Deutschen Industrie nach der Klimakonferenz in Glasgow kritisierte, die Ergebnisse seien unbefriedigend, und man hätte sich mehr gewünscht. Dass Unternehmen versuchen, den nötigen Wandel positiv zu gestalten, freut mich. Viele haben verstanden, dass ein Industriestandort wie Deutschland nur mit solchen neuen Technologien groß und stark bleiben kann.

### **Besteht nicht die Gefahr, dass energieintensive Unternehmen abwandern in Länder, die weiter mit alten, abgeschriebenen Kohlekraftwerken arbeiten?**

Definitiv nein. Kohle ist ja gar nicht billig, vor allem im Vergleich zur Fotovoltaik. In sonnigen Ländern kostet eine Kilowattstunde Solarstrom weniger als zwei Cent. Dafür kann ich am Weltmarkt derzeit nicht einmal die nötige Kohle kaufen. Wer abgeschriebene alte Kraftwerke betreibt, ist natürlich im Vorteil. Wenn es jedoch um Neuansiedlungen geht, sind selbst in Ländern wie Indien Solarkraftwerke günstiger. Was durchaus geschehen kann: dass energieintensive Branchen dorthin gehen, wo billig Solar- und Windenergie erzeugt werden kann. Wird es in Deutschland in 30 Jahren noch die gleichen Stahlwerke geben wie heute? Ich denke, nein.

### **Wir könnten doch günstigen Solarstrom aus begünstigten Regionen importieren, zum Beispiel in Form von Wasserstoff, der mithilfe von Solar- oder Windkraft klimaneutral produziert wird.**

Die Frage ist doch: Was ist billiger? Sogenannten grünen Wasserstoff nach Europa zu bringen oder das Stahlwerk oder zumindest die energieintensiven Teile davon nach Marokko? Ich würde sagen: Letzteres. Sicher – dadurch gehen hierzulande in traditionellen Branchen Arbeitsplätze verloren. Auf der anderen Seite entstehen durch die Energiewende so viele Jobs, dass wir uns eher Gedanken machen sollten, wo wir all die Arbeitskräfte hernehmen.

### **Evonik macht Spezialchemie. Die können Sie nicht leicht verlagern, denn dafür ist Know-how notwendig, das Sie nicht überall auf der Welt finden.**

Genau, das ist ja auch eine Kostenfrage. Entfallen 70 Prozent der Produktkosten auf Energie, wird man über eine Verlagerung nachdenken. Bezieht sich jedoch der Großteil der Kosten aufs Know-how, wird die Produktion weiterhin in Deutschland stattfinden. Und dafür brauchen wir auch Wasserstoff, das ist vollkommen klar.



### **Im Solargeschäft ist das europäische Jobwunder Geschichte. Hiesige Unternehmen spielen kaum noch eine Rolle. Die Produktion findet vor allem in China statt. Droht uns dieses Schicksal auch bei der Windkraft?**

China hat früh auf Technologien wie Solar- und Windenergie gesetzt und so dazu beigetragen, dass die Preise sehr stark gefallen sind. Ohne China wäre Fotovoltaik auf dem Weltmarkt wahrscheinlich um den Faktor drei teurer. Bei Windkraftanlagen ist →

Ob Solar oder Wind – die Volksrepublik China hängt alle anderen Staaten beim Ausbau der erneuerbaren Energien ab. Zugleich investiert der Staat weiterhin in Kohlekraftwerke.

der Effekt nicht so groß, denn die Anlagen lassen sich weniger leicht transportieren. Ein Rotorblatt passt nicht in einen Eurocontainer. Da Transportkosten tendenziell steigen, wird es sich zukünftig nicht rechnen, alles in China zu produzieren.

**Beim Ausbau für eigene Zwecke ist China mit Abstand die Nummer eins. Mehr als 50 Prozent aller Windkraftwerke wurden zuletzt in China gebaut.**

Ja, der Ausbau beeindruckt. Allerdings ist der chinesische Energiehunger auch sehr groß. Der Ausbau reicht also nicht, um die Kohle zurückzudrängen. Eigentlich müssten die Chinesen ihre Ambitionen noch mal verdoppeln.

**Die Preisdegression bei der Fotovoltaik in den vergangenen zehn Jahren war gewaltig. Zugleich ist die Leistungsfähigkeit der Module enorm gestiegen. Wird sich diese Entwicklung fortsetzen – und womöglich dazu führen, dass Windkraft an Bedeutung verliert?**

Auch bei der Windkraft werden die Kosten weiter sinken, schon allein wegen der Skaleneffekte: Wenn ich statt 1.000 Windrädern 20.000 baue, kann ich jedes einzelne billiger herstellen. Temporär können die Preise aber auch steigen, weil die Nachfrage zurzeit stark ansteigt und es eine Weile dauert, bis die Produktionsseite nachgezogen hat. Bei der Fotovoltaik rechne ich in den kommenden Jahren nicht mehr mit signifikant sinkenden Preisen, nicht zuletzt wegen höherer Personalkosten bei der Installation.

**Und wie viel Luft ist noch bei der Leistung drin?**

Bei der Windenergie sind wir nah am physikalischen Limit. Theoretisch können wir knapp 60 Prozent Wirkungsgrad erreichen, und gute Windräder erreichen heute schon mehr als 50 Prozent. Bei der Fotovoltaik liegt der theoretische Wirkungsgrad über 80 Prozent, und da sind wir in der Serie gerade einmal bei 20 Prozent. Grundsätzlich stehen wir jedoch vor dem Problem, dass die Fotovoltaik im Winter kaum Strom liefert, die Windkraftanlage hingegen schon. Deswegen wird es immer einen Markt für Windenergie geben.

**Manch Skeptiker befürchtet, dass die Sicherheit der Stromversorgung in Gefahr ist, wenn sämtliche konventionellen Kraftwerke vom Netz gegangen sind. Ist da etwas dran?**

Na ja, wenn Leute glauben, dass unsere jetzige Energieversorgung unverwundbar ist, müssen wir ihnen diesen Zahn ziehen. Wenn zwei oder drei große Kraftwerke gleichzeitig ausfielen, hätten wir heute einen flächendeckenden Blackout. Die erneuerbaren Energien hingegen arbeiten viel kleinteiliger. Wenn Sie drei Windkraftanlagen umsägen, passiert gar nichts. Zudem sind manche Annahmen ziemlich weit hergeholt. Sicher, wenn alle ihr Elektroauto gleichzeitig laden, wird es dunkel. Doch so etwas wird nicht passieren.



Was tun, wenn Sonne und Wind ausbleiben? Neben Batterien von Elektroautos dienen Pumpspeicherkraftwerke wie dieses im thüringischen Goldisthal als Puffer bei schwankender Stromproduktion.

**Volker Quaschnig** wurde 1969 in Leonberg geboren und ist seit 2004 Professor für das Fachgebiet Regenerative Energiesysteme an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Gemeinsam mit seiner Frau Cornelia Quaschnig ist er auf verschiedenen Social-Media-Plattformen aktiv, um über die Chancen der erneuerbaren Energien zu informieren. Er ist Autor zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen, darunter des erstmals 1998 erschienenen Fachbuchs „Regenerative Energiesysteme“, das in mehrere Sprachen übersetzt wurde und kontinuierlich aktualisiert wird. Anfang 2022 erschien „Energierévolution jetzt!“, in dem das Ehepaar Quaschnig anschaulich Fakten zur aktuellen Diskussion rund um die erneuerbaren Energien erläutert.



**Trotzdem werden wir in der neuen Energiewelt stärkere Schwankungen bei den Produktionsmengen haben und mehr Speicherkapazitäten benötigen.**

Richtig. Aber ich mache mir wenig Sorgen, dass wir das nicht gelöst bekommen. Allein die Elektroautos in Deutschland, die im vergangenen Jahr zugelassen wurden, haben durch ihre Batterien eine Speicherkapazität, die größer ist als das größte deutsche Pumpspeicherkraftwerk.

**Elektroautos allein werden das Problem nicht lösen. Bergen die Speicher nicht ein enormes Kostenrisiko?**

Die Batterietechnologie ist heute vielleicht da, wo die Fotovoltaik vor zehn oder 15 Jahren war. Gerade bei den Lithiumbatterien werden Automatisierung und Rationalisierung die Kosten noch runterbringen.

**Sie selbst betreiben auf dem Dach Ihres Hauses eine Fotovoltaikanlage. Spielen Sie mit dem Gedanken, sich für den optimalen Energiemix auch noch ein privates Windrad anzuschaffen?**

Ich halte Anteile an einem Windpark, denn Kleinwindkraftanlagen ergeben keinen Sinn. Bei der Fotovoltaik ist es egal, ob ich die bei mir aufs Dach stelle oder in Brandenburg auf den Acker – da kommt immer das Gleiche pro Quadratmeter heraus. Bei einer Windkraftanlage ist das nicht der Fall. Der Wind nimmt mit der Höhe deutlich zu. Die Erträge, die man auf dem eigenen Dach erzielen kann, sind sehr gering. Zudem riskiert man Ärger mit dem Nachbarn, der sich beschwert, das Ding mache Krach. —



Keine Hochstapelei:  
Das Recyclingprojekt, an dem  
Annegret Terheiden und  
Michael Ferez arbeiten, könnte  
bald schon Tausende Tonnen  
Müll vermeiden.

# DER TRAUM VOM SCHAUM

Evonik hat eine innovative Methode gefunden, um Schaum-Matratzen zu recyceln. Das neue Verfahren erzielt eine sehr hohe Ausbeute und spart dadurch viel Energie und fossile Rohstoffe. Nun soll eine Pilotanlage entstehen.

TEXT JOHANNES GIESLER

**E**twa alle fünf bis zehn Jahre wirft jeder von uns im Schnitt seine ausrangierte Matratze weg. Und daraus ergibt sich ein riesiges Umweltproblem: Allein in der EU kommen Jahr für Jahr 40 Millionen Schlafunterlagen zusammen, die entsorgt werden müssen. Würde man sie aufeinanderlegen, ragte der Stapel 8.000 Kilometer in die Höhe. Dies entspricht einer Abfallmenge von rund 600.000 Tonnen – davon sind mehr als 300.000 Tonnen Polyurethanschaum. Bislang landen die Matratzen zum meist auf der Mülldeponie oder werden „thermisch verwertet“ – sprich in Kraftwerken beziehungsweise Müllverbrennungsanlagen verheizt. Umweltschonend ist das nicht: Mit jeder ausgedienten Matratze gehen die Rohstoffe und die Energie, die für Produktion und Transport verbraucht wurden, in Rauch und Wärme auf.

Das will Annegret Terheiden ändern. Die promovier- te Chemikerin hat zusammen mit Kollegen der Creavis, des Business Incubators von Evonik, vor gut drei Jahren ein Recyclingprojekt angestoßen. Ihr Ziel ist es, ausgediente Matratzen in ihre chemischen Bestandteile zu zerlegen und wiederverwertbar zu machen. Der Prozess soll so gut sein, dass das Rezyklat mit konventionellen Rohstoffen mithalten kann. Dieses Ziel scheint nun er-

reicht. Mehr als das: Vor wenigen Wochen haben Evonik-Kollegen aus dem Life Cycle Management den ökologischen Fußabdruck des neuen Recyclingprozesses eingehend untersucht. Ihr Ergebnis: Der Prozess senkt im Vergleich zur Matratzenproduktion mit fossilen Rohstoffen den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck um über die Hälfte. „Und das wollen wir noch weiter verbessern“, sagt Terheiden.

An einem trüben, eisigen Januarmorgen arbeiten Terheiden und andere Forscher aus dem Projektteam am Standort Essen-Goldschmidtstraße an dem Prozess. Das Gebäude E-18 – roter Backstein außen, grelles Neonlicht innen – ist die Heimat der Geschäftseinheit Comfort & Insulation, in der sich vieles um Schaumstoffe dreht. „Unser Recyclingprojekt war zunächst ein kleines Spin-off-Thema“, erzählt Terheiden, hervorgegangen aus ihrem Hauptjob, der Entwicklung von Additiven für die Schaumindustrie. Darum kümmert sich die 50-jährige Managerin, seit sie 2006 zu Evonik gekommen ist. „Ich übersetze die Anforderungen unserer Kunden, wir nennen sie Verschäumer, ins Chemische.“

Terheiden ist fachlich verantwortlich für die technische Kundenbetreuung sowie die Entwicklung neuer Additive. Die präzise zugeschnittenen Zugaben sollen schließlich die gewünschten Anforderungen der Kunden erfüllen: Autositze werden durch sie formstabil, Matratzen und Sofapolster besonders komfortabel. Mittlerweile betreut Terheiden für Evonik weltweit den technischen Bereich für die sogenannten Weichschäume. →



Um seinen Fünftliter-Hydrolysereaktor mit den Reaktanden zu befüllen, muss Michael Ferenz kräftig kurbeln.



„Den Recyclingprozess neu zu entwickeln, das war komplettes Neuland für uns“, sagt Terheiden. „Bei den Additiven arbeiten wir mit uns bekannten Molekülen. Darin sind wir erfahren, darin sind wir mit unserem Geschäftsbereich Weltmarktführer. Unsere Kompetenzen in der Creavis ermöglichen es jedoch, auch ganz neue Innovationsprojekte anzugehen.“

2018 ist die Zeit für ihre Idee günstig: Evonik beschließt, sich verstärkt der Themen Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Produktion anzunehmen. Neue Produkte, aber auch solche aus dem vorhandenen Portfolio sollen fortan nicht nur durch ihren konkreten Nutzen, sondern auch in Nachhaltigkeitsanalysen überzeugen. Zusätzlich bestärkt wird Terheiden durch ein Treffen mit Fachleuten der Einrichtungskette Ikea, eine der mächtigsten Stimmen in der Schaumbranche. „Sie sagten uns damals, dass all ihre Matratzen von 2030 an vollständig aus zurückgewonnenen und erneuerbaren Rohstoffen hergestellt sein sollen. Das war provokativ und hat uns aufgerüttelt“, erinnert sich Terheiden.

#### LANGLEBIG – UND SCHWER ZU TRENNEN

Das Material, mit dem sie sich dabei am meisten auseinandersetzt, ist Polyurethan (PU). Es wird zur Herstellung unter anderem von Matratzen oder Polstermöbeln genutzt. Typische PU-Schäume für Matratzen entstehen aus der Reaktion von Isocyanat (TDI) mit Polyetherpolyol und Wasser und unter Zugabe diverser Additive (siehe Infografik auf Seite 30). Als Nebenprodukt wird CO<sub>2</sub> frei, es lässt das Gemisch aufbrodeln wie eine heiße Quelle. Anstatt danach wieder in sich zusammenzustürzen, behält PU seine weitmaschige Netzstruktur. PU-Verbindungen sind verschleißfest, was der Lebensdauer des Endprodukts zugutekommt. Fürs Recycling ist diese Eigenschaft jedoch hinderlich, denn dafür müssen diese Verbindungen aufgebrochen werden.

#### POLITIK FORDERT RECYCLINGLÖSUNG

Die bis dahin kommerzialisierten Verfahren erlauben es nicht, PU wieder vollständig in Polyol und Isocyanat aufzuspalten. Statt einzelner Moleküle entstehen in ihnen Mischungen kurzkettiger Oligomere, die zu weit schlechteren Schaumeigenschaften führen als die ursprünglichen Zutaten. Maximal 20 Prozent fossiles Polyol lassen sich mit diesen Verfahren bei der Herstellung neuer Matratzen ersetzen, da sonst die Produkteigenschaften leiden. Terheiden will ein besseres Ergebnis erzielen. Bereits Anfang 2019 beginnt die Forschungsarbeit. Von Anfang an dabei ist die Creavis. Sie ist dafür zuständig, in neuartigen Themenfeldern und Märkten Geschäftsideen für Evonik auszuarbeiten. Terheiden kann sich damit auf die Chemie und die Anwendung im Endprodukt konzentrieren.

Bevor die Hydrolyse startet, müssen alle Leitungen überprüft und die Sensoren kalibriert werden.



## »Das ist ein Meilenstein auf dem Weg hin zur Kreislaufwirtschaft.«

IAN W. ROBB, CEO VITA GROUP



Als „Weichschäumerin“, wie sich Chemikerinnen in diesem Fachbereich selbst nennen, weiß sie, dass die Regulierung der Europäischen Union eine Recyclinglösung für PU-Schäume erfordert. Die „Richtlinie 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt“ – kürzer als „Plastik-Richtlinie“ bekannt – schreibt vor, dass viele Kunststoffprodukte ab 2025 zu einem Viertel aus Rezyklat bestehen müssen. Hersteller müssen zudem einen Plan vorlegen, wie ihre Produkte am Ende der Nutzungszeit wiederverwertet werden. „Noch wird PU nicht so streng gesehen wie Einwegplastik“, sagt Terheiden. „Es geht aber nicht darum, ob das passieren wird, sondern nur, wann.“

In ihrem Büro an der Goldschmidtstraße zieht sich die Chemikerin einen weißen Laborkittel über und macht sich auf den Weg zum Labor von Michael Ferenz. Der Chemiker ist vor einem Jahr zum Recyclingprojekt gestoßen und verantwortet seit vorigem Sommer die Experimente im Labor in Essen. Hinter einer hochgefahrenen Sicherheitsscheibe steht eine mannshohe silbrig glänzende Apparatur: ein Hydrolysereaktor mit fünf Liter Fassungsvermögen. „Darin trenne ich mithilfe von Zusatzstoffen die PU-Schäume auf“, sagt Ferenz.

Die Zutatenliste wird dauernd optimiert. „Zuerst haben wir fein gemahlene PU-Schnee genommen“, erzählt Ferenz. „Dieser hat jedoch eine sehr niedrige Schüttdichte, was die Befüllung des Reaktors deutlich erschwert hat. Daher wird jetzt an anderen Darreichungsformen gearbeitet.“

Nach der Beladung stellt der Experimentalchemiker die Parameter für die Versuchsanordnung ein. Auf einem Laptop, der mit dem Reaktor verkabelt ist und bunte Kurven vom letzten Versuch nachzeichnet, kann er alles steuern und kontrollieren. Rot ist die Temperatur in der Ummantelung zu sehen, orange die Temperatur im Reaktor und blau der Druck. Die letzte Kurve zeigt die Drehzahl des Rührers. Er sorgt dafür, dass alle Reaktanden gut vermischt werden.

Wer Ferenz fragt, was genau in diesem Überdruckkochtopf passiert, erhält eine Kurzauffrischung in Chemie: Kugelschreiber, klick, Zettel, los geht's. Was er aufzeichnet, ist der Schlüssel zum Recyclingerfolg. Er wurde bei einer Recherche entdeckt und nutzt mit der Hydrolyse eine der fundamentalen Reaktionen in der organischen Chemie, indem ein Katalysator verwendet wird. „Ganz genau wissen wir noch nicht, wie es →



Bei der Hydrolyse entsteht eine dunkelbraune Flüssigkeit, in der Polyol und Toluylendiamin gelöst sind.

funktioniert“, räumt Ferenz ein. „Die Arbeitshypothese lautet, dass die Katalysatoren unsere Reaktanden besser zusammenbringen.“

#### ANGRIFF AUF DIE URETHANFUNKTION

Für die Polyurethanspaltung nutzen Ferenz und seine Kollegen ein katalytisches System. Durch die Verwendung eines Katalysators kann die Reaktion unter milderen Bedingungen ablaufen. Der Katalysator sorgt dafür, dass die nötigen chemischen Bindungen schnell

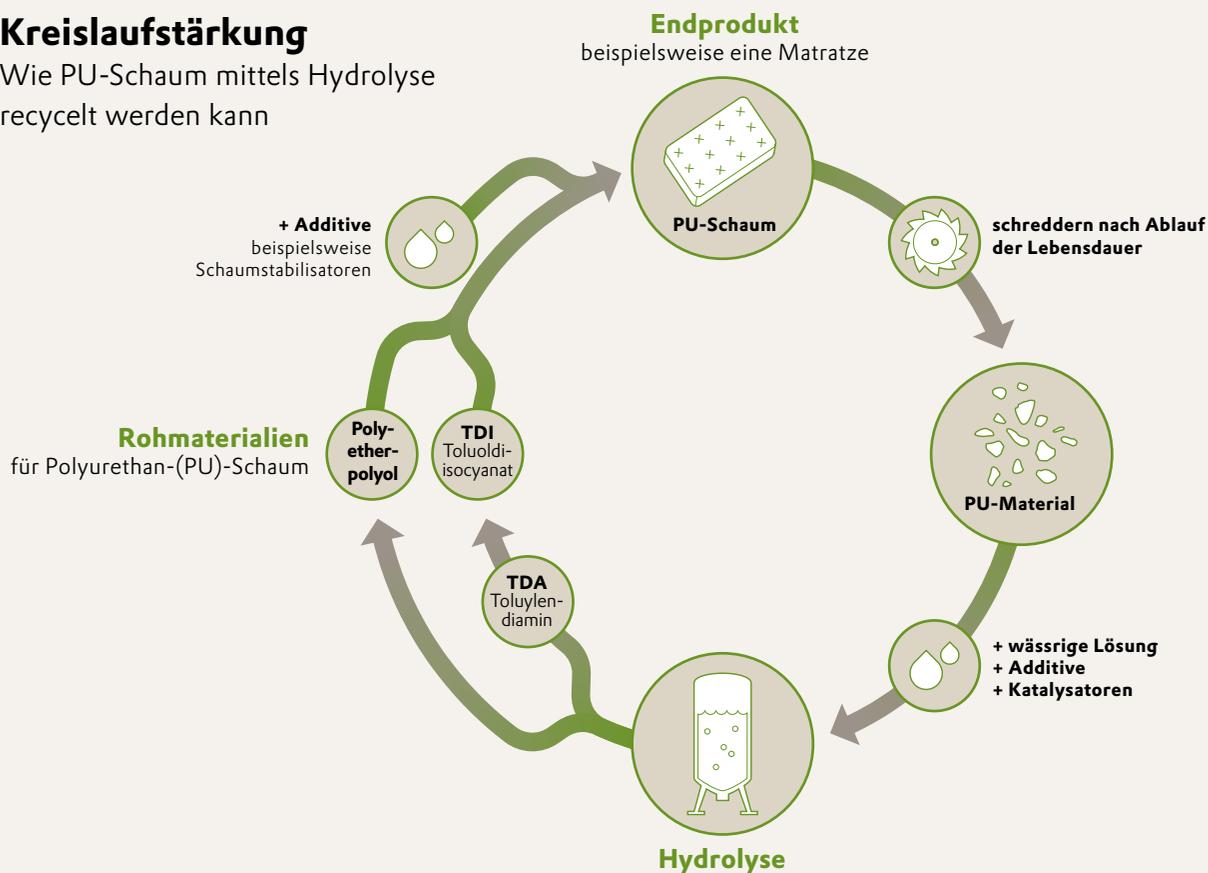
und effizient gebrochen werden und die Reaktion überhaupt in einem akzeptablen Zeitraum ablaufen kann.

Wie das Ergebnis aussieht, zeigt Ferenz in einem Fläschchen. Es enthält, was nach erfolgreicher Hydrolyse von PU-Schaum übrig bleibt: eine tiefbraune Flüssigkeit, in der sich reines Polyol und ein Amin (TDA) befinden. Letzteres lässt sich in einer Folgereaktion zum Isocyanat TDI umsetzen, und so werden ebenjene Stoffe, die für die Produktion von Polyurethan benötigt werden, zurückgewonnen. Damit die Moleküle wieder zum Aufschäumen taugen, müssen sie sauber voneinander getrennt werden. „Es hat lange gedauert, bis wir so weit gekommen sind“, sagt Ferenz. Unzählige Versuchsanordnungen lieferten unbrauchbare Parameter. Jede Menge Katalysatoren und Additive erwiesen sich als untauglich. Forscheralltag eben. Mittlerweile ist der Proof of Concept gelungen: ein vollständig geschlossener Kreislauf, ohne Zugabe von frischem Polyol.

Das war der Startschuss für viele Experten von Evonik, insbesondere der Verfahrenstechnik: Partikeltechniker klären, wie Matratzen besser geschreddert werden können, Fluidverfahrenstechniker suchen nach einer Lösung, die dunkelbraune Flüssigkeit schneller und sauberer in ihre Bestandteile aufzutrennen, Digitalisierer, Mess- und Regeltechniker, Umwelttechniker,

## Kreislaufstärkung

Wie PU-Schaum mittels Hydrolyse recycelt werden kann



## »Den Recyclingprozess zu entwickeln war komplettes Neuland für uns.«

ANNEGRET TERHEIDEN, WELTWEIT TECHNISCH VERANTWORTLICH FÜR DIE PRODUKTLINIE COMFORT

Sicherheitstechniker, sie alle lösen Probleme rund um den Prozess. Ganz perfekt ist das Ergebnis noch nicht. Zwar verhalten sich die Schäume aus den recycelten Molekülen tadellos, sie sind aber bräunlich gefärbt. Aus fossilen Quellen gewonnenes Polyol ist anders als sein recycelter chemischer Zwilling farblos.

### MEILENSTEIN FÜR DIE SCHAUMBRANCHE

Partner aus der Industrie sind trotz dieser Herausforderungen von dem Prozess sehr angetan – zum Beispiel der englische Weichschaumproduzent The Vita Group, der hochwertige Matratzen produziert und eng mit Evonik zusammenarbeitet. „Wir haben recycelte Polyole von Evonik in mehreren unserer Weichschaumformulierungen getestet, und die Resultate waren sehr positiv“, sagt Vita-Chef Ian W. Robb. Die Firma betrachtet sich als Pionier der umweltfreundlichen Produktion von Matratzen. Die hervorragende Ökobilanz des Recyclingprojekts ist für Robb daher ein entscheidender Faktor. „Wir wollen bei der Entwicklung umweltfreundlicher Technologien Vorreiter sein. Das ist ein Meilenstein auf dem Weg hin zur Kreislaufwirtschaft.“

Bei Evonik gleicht das Recyclingprojekt mittlerweile einem gewaltigen Mosaik, an dem in mehreren Standorten parallel gearbeitet wird. Geschäftsbereiche jenseits der Schaumexperten von Comfort & Insulation unterstützen das Projekt. So haben zum Beispiel im Chemiepark Marl die Kollegen aus dem Bereich Crosslinker ihre Anlagen zur Verfügung gestellt. Das große Bild soll aber schon in wenigen Monaten in Hanau zu sehen sein. Dort entsteht eine Pilotanlage, in der die Bestandteile von Polyurethan in größeren Mengen gewonnen werden sollen. Dafür zuständig ist Andree Blesgen. Der Projektleiter der Verfahrenstechnik stieß 2020 zum Projekt. Statt fünf Litern, wie in den bisherigen Reaktoren, soll in der neuen Anlage ein Vielfaches herauskommen. „Wir hoffen, noch 2022 in Betrieb zu gehen und mit der neuen Anlage in den Tonnenbereich vorzustoßen“, sagt Blesgen.

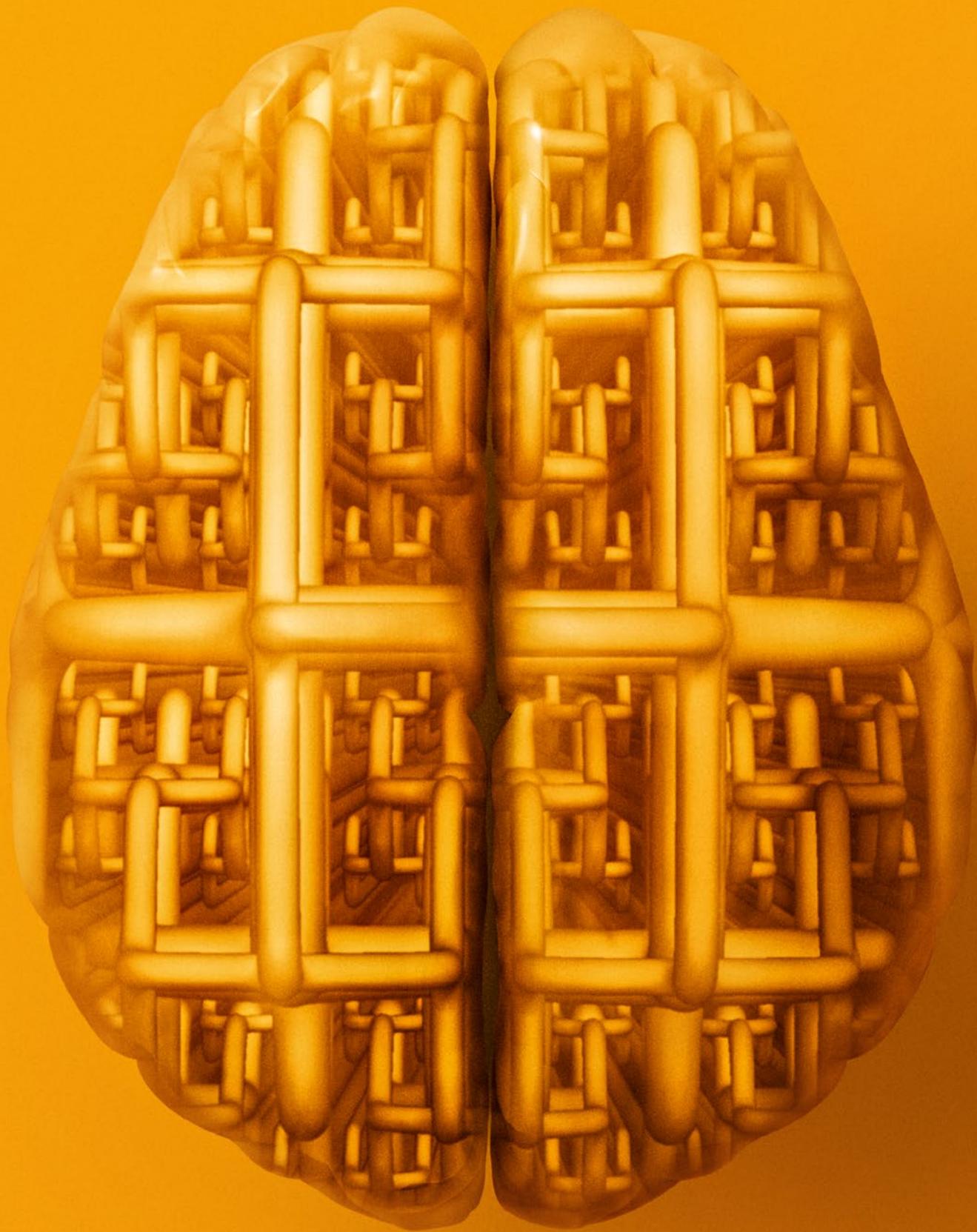


Annegret Terheiden im Technikum der Schaumstoffspezialisten am Standort Essen-Goldschmidtstraße

Das wäre extrem flott. „Von der Patentrecherche bis zur Miniplant in drei Jahren, das ist richtig sportlich“, sagt Blesgen. Verantwortlich sei dafür nicht zuletzt die Begeisterung im Unternehmen für die Sache. „Es macht einfach riesigen Spaß, etwas ökologisch so Sinnvolles zu machen. Und daraus wächst eine unglaubliche Teamleistung“, sagt er. Selbst zu Hause zahlt sich für den 45-jährigen Familienvater das Projekt aus: „Wenn ich sonst von meinem Job erzählt habe, waren die Kinder eher mäßig interessiert – dass ich jetzt dabei mitwirke, Matratzen wiederverwertbar zu machen, finden sie richtig spannend.“



Johannes Giesler arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Leipzig. Dank dieser Recherche weiß er nun endlich, was eine gute Matratze ausmacht.



# SCHLAU LÖSUNG

Wie lassen sich chemische Reaktionen so nachhaltig und effizient wie möglich durchführen? Daran forscht ein Evonik-Team gemeinsam mit externen Partnern. Und macht sich dabei die Möglichkeiten des 3D-Drucks zunutze

TEXT **KARL HÜBNER**

**G**eht es nach Dr. Senada Schaack, ist der chemische Reaktor der Zukunft klein, maßgefertigt und selbst gemacht. „Er ist disruptiv anders“, sagt die Verfahrenstechnik-Ingenieurin, die für Evonik in Hanau an einer neuen Generation von Minireaktoren forscht. Der metallene Apparat ist klein wie ein Schuhkarton, verspricht aber große Fortschritte. Von außen sieht man ihm seine Fähigkeiten nicht an. Sein Innenleben ist jedoch darauf ausgerichtet, dass eine chemische Synthese möglichst wenig Energie benötigt und geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Einige Reaktoren enthalten hauchdünne Röhrchen, durch die im Betrieb die Reaktionsmischung oder ein Kühlmedium gepumpt werden kann. Andere bestehen im Innern aus feinen Verästelungen, mit deren Hilfe man Ströme von einem auf mehrere Röhrchen aufteilt.

„Wenn wir das gut machen, erzielen wir eine hohe Reinheit des gewünschten Produkts und sparen Energie, die bisher für Kühlung oder aufwendige Stofftrennungen, etwa per Destillation, aufgewendet werden muss“, erklärt Schaack, die das Kompetenzzentrum „Simulation and Additive Manufacturing“, kurz SAM 3D, leitet. Gemeinsam mit ihren Mitarbeitern entwickelt sie Konzepte für das Design von Reaktoren – und stellt diese dann mittels 3D-Druck aus Edelpulver her.

Die Reaktoren könnten in vielen Anwendungen zum Einsatz kommen, zum Beispiel bei der Herstellung von Methanol für die Speicherung von Solar- oder

Windenergie. Gerade arbeitet das Team an einem neuartigen Reaktor für einen Syntheseschritt, der häufig bei der Herstellung pharmazeutischer Wirkstoffe eine Rolle spielt, die sogenannte Ortholithierung. „Wir haben den Apparat so designt, dass er das Produkt nicht nur in höherer Reinheit liefert, sondern dass die Reaktion auch mit weniger Kühlaufwand auskommt als der herkömmliche Prozess“, sagt Schaack.

Diese Entwicklung ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projekts „3D-Process“ (siehe Seite 37). Darin wird an disruptiven Reaktorkonzepten gearbeitet, wobei die Apparate digital geplant, in 3D-Druckern hergestellt und mithilfe von Prozessdaten aus der Praxis sowie künstlicher Intelligenz optimiert werden. „Wir denken die Prozesse in der Verfahrenstechnik völlig neu“, sagt Schaack. Gemeinsam mit den Projektpartnern hat sie sich zum Ziel gesetzt, die chemische Produktion nachhaltiger zu machen.

Das Potenzial dafür erscheint gewaltig. Im Vorcorona-Jahr 2019 verbrauchte die Chemiebranche allein in Deutschland 200 Terawattstunden Energie in Form von Erdgas, Mineralölprodukten, Kohle und Strom – acht Prozent des gesamten Bedarfs.

## KÜHL STATT EISKALT

Die Ortholithierung, für die das 3D-Process-Team in Hanau einen Reaktor entwickelt, ist ein typischer Fall, dass sich mithilfe eines besseren Designs eine Menge Energie einsparen lässt. Bei diesem Syntheseschritt wird vorübergehend ein Lithium-Atom in ein organisches Molekül eingebracht. Das setzt so viel Wärme frei, dass der Reaktionskessel auf mindestens minus 50 Grad Celsius heruntergekühlt werden muss. Dafür verwendet man flüssigen Stickstoff, dessen Herstellung viel Energie verbraucht. Beim neuen Ansatz mit dem kleinen Metallblock könnte eine Kühltemperatur von minus 20 Grad Celsius ausreichen. Die Kühlung ließe →

Hirn trifft Strom: Die Anordnung der gekühlten Reaktionsröhrchen im gedruckten Mikroreaktor wird mit Unterstützung künstlicher Intelligenz optimiert.



Senada Schaack inspiziert die Apparatur für die Ortholithierung. Bald sollen die Leitungen in den ersten selbstgedruckten Testreaktor führen.

## »Der Mikroreaktor soll Produkte in höherer Reinheit liefern und weniger Kühlaufwand verursachen.«

SENADA SCHAACK, LEITERIN DES KOMPETENZZENTRUMS SAM 3D BEI EVONIK

sich mit einer elektrisch temperierten Flüssigkeit durchführen, was den Energieverbrauch gegenüber der Stickstoffvariante um 80 Prozent senken würde.

Ermöglicht wird die enorme Ersparnis durch die neuartige Konstruktion des Reaktors. Er unterscheidet sich deutlich vom herkömmlichen in der Chemiebranche üblichen Kesselreaktor. Bei diesem wird die Reaktionswärme durch Kühlschlangen im Innern oder in

der doppelwandigen Außenwand abgeführt. Weil die Kühlfläche im Verhältnis zum Reaktorvolumen relativ klein ist, muss das Kühlmedium sehr kalt sein. Der neue Reaktor ist ein deutlich kleinerer sogenannter Durchflussreaktor. In ihm wird das Reaktionsgemisch im einfachsten Fall durch ein linear verlaufendes Reaktionsröhrchen geleitet, in dessen Ummantelung sich das Kühlmedium befindet. Das Verhältnis von Kühlfläche und Reaktorvolumen ist deutlich größer – das Medium muss nicht so kalt sein. Und noch effektiver wird die Wärmeabfuhr, wenn man das Reaktionsgemisch nicht nur durch ein Röhrchen leitet, sondern es auf mehrere Kanäle verteilt.

### KOMPLEXE STRUKTUREN IM VORTEIL

Genauso haben die Evonik-Experten ihre Konstruktion des Mikroreaktors designt. „Im ersten Prototyp verteilen wir den Fluss des Reaktionsgemischs auf insgesamt 256 Röhrchen“, erklärt Dr. Hendrik Rehage, Verfahrenstechniker in Senada Schaacks Team. Die Vorteile liegen auf der Hand: Mehr Röhrchen erhöhen die Durchflussrate – und das bei zugleich effizienterer Kühlung, denn jedes der Röhrchen ist von eigenen Kühlkanälen umgeben (siehe Schaubild Seite 38). Die Versuche sollen zeigen, ob die am Computer kalkulierte Kühltemperatur von minus 20 Grad Celsius tatsächlich ausreicht.

Die 256 Reaktionskanäle sind mit einem Durchmesser von jeweils 0,8 Millimetern ausgelegt. Mit herkömmlichen Verfahren der Metallverarbeitung wäre das ein immenser Aufwand oder gar nicht erst zu realisieren. Anders beim 3D-Drucker. „Da ist es völlig egal, ob wir einen Reaktor mit einem oder mit 256 Kanälen herstellen“, erklärt Rehage, warum die additive Fertigung auch sehr komplexe Reaktorgeometrien zugänglich macht. Der entscheidende Vorteil des 3D-Drucks gegenüber der klassischen Fertigung von Mikroreaktoren liegt in der Formfreiheit. Zum Glück funktioniert diese längst auch mit Metallen wie Aluminium, Titan oder Edelstahl. Dabei wird das Metall in fein pulverisierter Form zugeführt, von einem Laserstrahl geschmolzen und dann Schicht für Schicht auf dem herzustellenden Werkstück abgedruckt.

„Die Maße und auch der strukturelle Aufbau des Versuchsreaktors sind das Ergebnis der Simulationen, die wir vorgeschaltet haben“, sagt Rehage. Die Experten spielten durch, wie sich unterschiedliche Geometrien und Prozessparameter darauf auswirken, wo im Reaktor es wie heiß wird und wie schnell die Wärme

abgeführt wird. Viele der mathematischen Beschreibungen geben die Wirklichkeit allerdings nur näherungsweise wieder. Daher bleibt das spätere Experiment wichtig.

#### SELBSTOPTIMIERENDES SYSTEM

So wie beim ersten Prototyp für die Ortholithierung. Die Möglichkeiten des 3D-Drucks will das Team nutzen, um in die Bauteile gleich Anschlüsse zu integrieren, in die Sensoren eingebaut werden sollen. Diese erfassen während des Betriebs Temperatur, Druck, Flussraten und Stoffkonzentrationen. „Mit diesen Daten erkennt das System, ob es irgendwo im Reaktor zu heiß wird oder ob unerwünschte Nebenprodukte entstehen“, erklärt Rehage. Beides wollen die Ingenieure unbedingt vermeiden, denn es schmälert Ausbeute und Produktreinheit. Muss das Produkt mühsam von anderen Molekülen getrennt werden, erhöht dies zudem den Energieaufwand.

Um die Parameter zu ermitteln, bei denen Ausbeute und Reinheit möglichst hoch und der energetische Kühlaufwand möglichst gering sind, setzt das 3D-Process-Team Verfahren der künstlichen Intelligenz ein. „Auf Basis der Sensordaten ist das System in der Lage, die Prozesssteuerung zu justieren und sich so schrittweise und selbstlernend den optimalen Bedingungen anzunähern“, erklärt Schaack. Lässt sich dieses Optimum mit dem vorhandenen Reaktor nicht erreichen, liefern die Daten Hinweise, wie das Design geändert werden müsste, so die Verfahrenstechnikerin.

## »Bei jeder neuen Idee können wir den Reaktor innerhalb von zwei Tagen herstellen.«

CHRISTOPH KLAHN, EXPERTE FÜR ADDITIVE FERTIGUNG FÜR DIE VERFAHRENSTECHNIK BEIM KIT



Von solchen Visionen ist auch Dr. Stefan Randl begeistert. Als Forschungsleiter im Geschäftsgebiet Health Care verfolgt er die Versuche mit dem Testreaktor mit großer Spannung. Die Ortholithierung sieht er als „modellhaftes Beispiel für viele weitere Synthesen im Pharma-Umfeld, die bisher mit viel Energieaufwand gekühlt oder erwärmt werden müssen“.

Evonik produziert für externe Auftraggeber pharmazeutische Wirkstoffe und deren Vorstufen. Immer wieder kommt es dabei vor, dass Randls Team den Syntheseprozess erst noch entwickeln muss. Wo immer möglich, versucht man dabei, einen kontinuierlichen Prozess in einem kleinen Durchflussreaktor zu realisieren: „In der Branche gibt es derzeit einen Trend weg von der klassischen Chargenproduktion in großen Rührkesseln“, berichtet Randl. Bei kontinuierlichen →

Mit dem 3D-Drucker für Kunststoffbauteile macht das Team Probedurchläufe, ehe die Bauteile in Edelstahl gedruckt werden. Der Monitor zeigt ein Versuchsdesign für die Ortholithierung.



Prozessen in Mikroreaktoren lassen sich Temperatur, Druck und Sicherheit viel besser kontrollieren. Die miniaturisierten Prozesse kommen überdies mit weniger Lösungsmittel aus, weil höher konzentrierte Flüssigkeiten eingespeist werden. Außerdem kann man den für die Reaktion benötigten Katalysator viel feiner pulverisiert einsetzen, was wiederum zu einer besseren Produktausbeute führt.

„Für uns ist es immer wichtig, neue Prozesse möglichst schnell und zuverlässig zu entwickeln“, sagt Randl, „und zwar so, dass sie wirtschaftlich sind und den Kunden in der Pharmaindustrie Produkte in höchster und gleichbleibender Qualität bieten.“ Dass man Reaktorkonzepte im Vorfeld theoretisch durchspielen kann und am Ende denjenigen Reaktor druckt, der sich für eine Anwendung am besten eignet, ist da eine große Hilfe.

#### METHANOL AUS GRÜNEM WASSERSTOFF

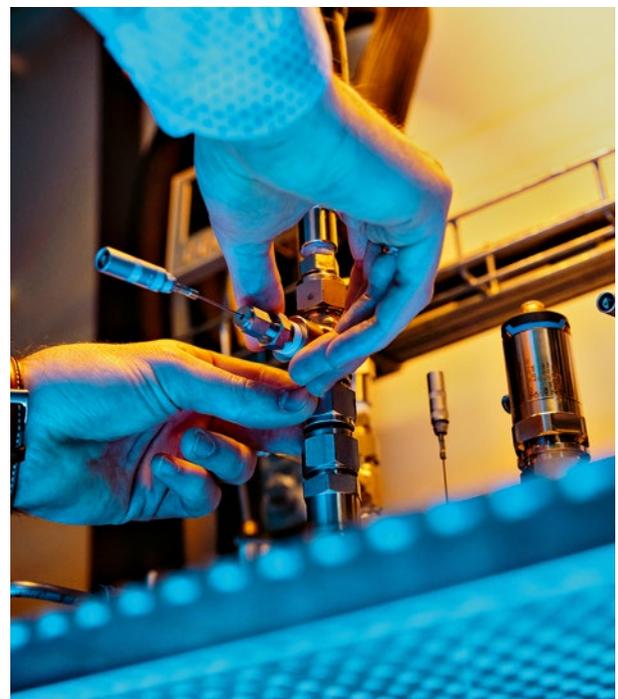
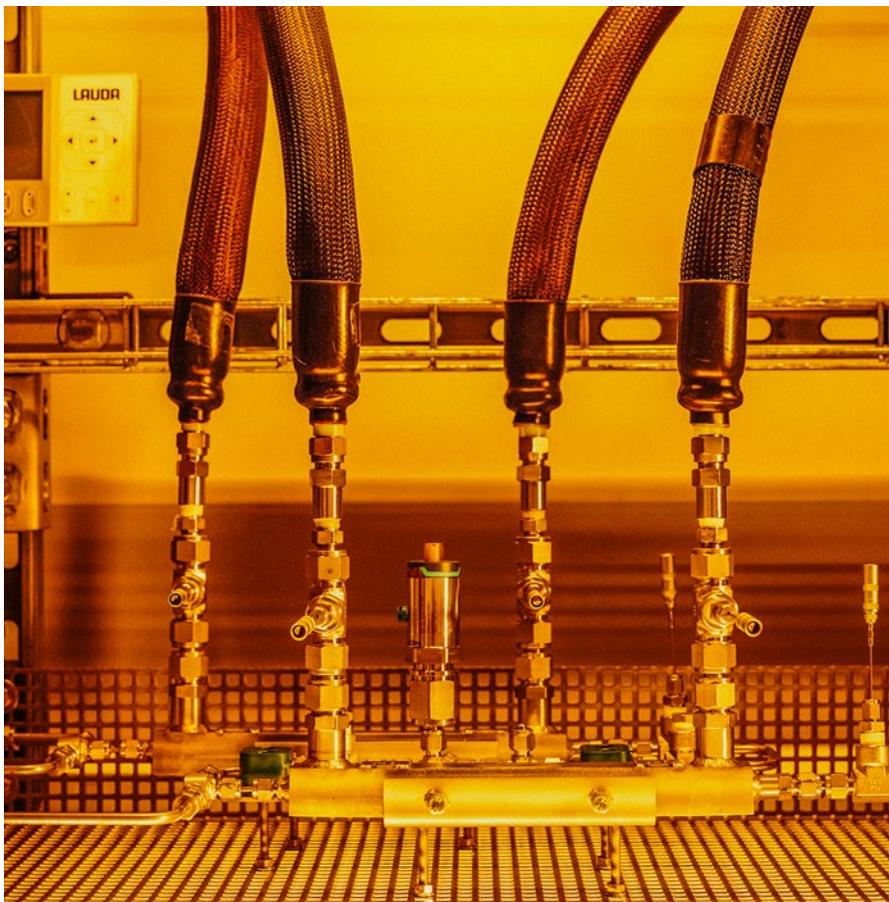
Ihre disruptiven Eigenschaften sollen die gedruckten Mikroreaktoren jedoch auch in anderen Bereichen zur Geltung bringen. So arbeitet Evonik in einem weiteren Projektstrang von 3D-Process auch mit Forschern vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT), von Siemens Technology und dem Unternehmen Ineratec zusammen.

Dabei geht es um einen Reaktor für die Umsetzung von Wasserstoff und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zu Methanol oder Dimethylether. Beide Substanzen sind wichtige Basischemikalien und können auch als Kraftstoffe eingesetzt werden. Während das CO<sub>2</sub> aus Biogas oder Abgasen stammt, kann der Wasserstoff durch Wasserelektrolyse gewonnen werden – bevorzugt dann, wenn überschüssiger erneuerbarer Strom zur Verfügung steht.

„Unser Ziel sind aus standardisierten Modulen aufgebaute, dezentrale Anlagen, die man zum Beispiel neben einem Windpark oder einer größeren Solaranlage aufstellen kann“, sagt Professor Dr. Roland Dittmeyer vom KIT-Institut für Mikroverfahrenstechnik. Ein entsprechender Reaktor muss einfach aufgebaut und robust sein und zudem etliche Anforderungen erfüllen. Eine ist es, das entstehende Methanol direkt aus der Reaktionsmischung abzutrennen. Tatsächlich erlaubt der 3D-Druck definiert poröse Strukturen in der Reaktorwand, mit denen dies in Verbindung mit einer geeigneten Temperaturführung nun gelingen könnte.

#### VON DER IDEE ZUM REAKTOR

Die ersten Versuche mit einem Testreaktor verliefen vielversprechend. Wenn alle Untersuchungen in kleinem Maßstab abgeschlossen sind, wird sich das Konsortium



Das Herzstück der Testapparatur:  
An die Stelle des vorderen  
waagerechten Rohrs (l.) tritt in  
Kürze die 3D-gedruckte Version.

### 3D-Process

Das Projekt „Disruptive Reaktorkonzepte durch additive Fertigung: Vom digitalen Design in die industrielle Umsetzung – 3D-Process“ startete im Juni 2021 und wird im Mai 2024 enden. Es hat ein Volumen von 9,8 Millionen € und wird als Verbundvorhaben vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert unter dem Förderkennzeichen 03EN2065A-E. Konsortialführer des Projekts ist Evonik. Weitere Partner sind Siemens, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit seinen Instituten für Katalysatorforschung und -technologie, für Technische Chemie und Polymerchemie und für Mikroverfahrenstechnik sowie das Unternehmen Ineratec.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

Ziel ist es, prozesstechnische Bauteile für energieeffizientere chemische Prozesse zu entwickeln, die weniger Emissionen verursachen und nachhaltiger sind.

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

daranzumachen, Designregeln zu erarbeiten, um den Reaktor in einen Industriemaßstab zu überführen. Professor Dr. Christoph Klahn, der sich am KIT mit der additiven Fertigung in der Verfahrenstechnik beschäftigt, lobt die Beschleunigung des Entwicklungsprozesses. „Dank der gut vorbereiteten Design- und Fertigungs-Workflows können wir bei jeder neuen Idee den entsprechenden Versuchsreaktor innerhalb von zwei Tagen herstellen.“

Die Softwaremodule für diese durchgängigen Workflows stammen von Siemens und umfassen Simulation, Design und die digitale Ansteuerung der 3D-Drucker zur zuverlässigen Fertigung der feinen Strukturen. Für Dr. Christoph Kiener, bei Siemens Principal Key Expert Functional Design, ist das Forschungsprojekt 3D-Process ein wichtiger Beitrag zur Energiewende. Und er sieht durch die neuen Möglichkeiten schon den Begriff des Chemiereaktors im Wandel: „Bislang ist das der Ort für eine chemische Reaktion. Künftig können wir alle wichtigen Prozessschritte, also Mischen, Reagieren, Trennen und so weiter, durch Simulation maßgeschneidert in einem Apparat so bündeln, dass sie dann in jeweils definierten Zonen hocheffizient erfolgen.“ Der Testreaktor, in dem nun Synthese und Abtrennung des Methanols auf engstem Raum vereinigt werden, gibt eine Ahnung davon, was möglich ist.

Das Bild von Chemieparcs könnte sich künftig wandeln, wenn statt großer Kessel zunehmend kleine Durchflussreaktoren zum Einsatz kämen. Aber liefern diese Minianlagen überhaupt ausreichende Mengen?



Verfahrenstechniker  
Hendrik Rehage ist bei  
Evonik Projektmanager  
im Projekt 3D-Process.

„Im Umfeld pharmazeutischer Wirkstoffe auf jeden Fall“, sagt Stefan Randl von Evonik. Mit einem Durchsatz von einem Liter pro Minute kämen die kleinen Reaktoren auf zwei- bis dreistellige Tonnenzahlen pro Jahr. Zudem sei das Konzept „gut skalierbar“. Je nach gewünschter Produktmenge könne man die nötige Anzahl an Reaktoren parallelschalten.

Selbst in der großtechnischen chemischen Produktion taugt das Konzept als Alternative, sagt Senada Schaack. Sie sieht das Potenzial für radikal geschrumpfte Anlagen und Prozesse, die dank präziserer Daten, besserer Simulation und exakter Steuerung mit weniger Stahl, weniger Lösungsmittel und letztlich mit weniger Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen auskommen. Das wäre in der Tat disruptiv. Und würde eine nachhaltigere Chemie ermöglichen. —



**Karl Hübner** ist promovierter  
Chemiker und Journalist.  
Er arbeitet nebenberuflich als  
freier Autor und schreibt  
häufig über Forschungsthemen.

# Kühle Reaktion

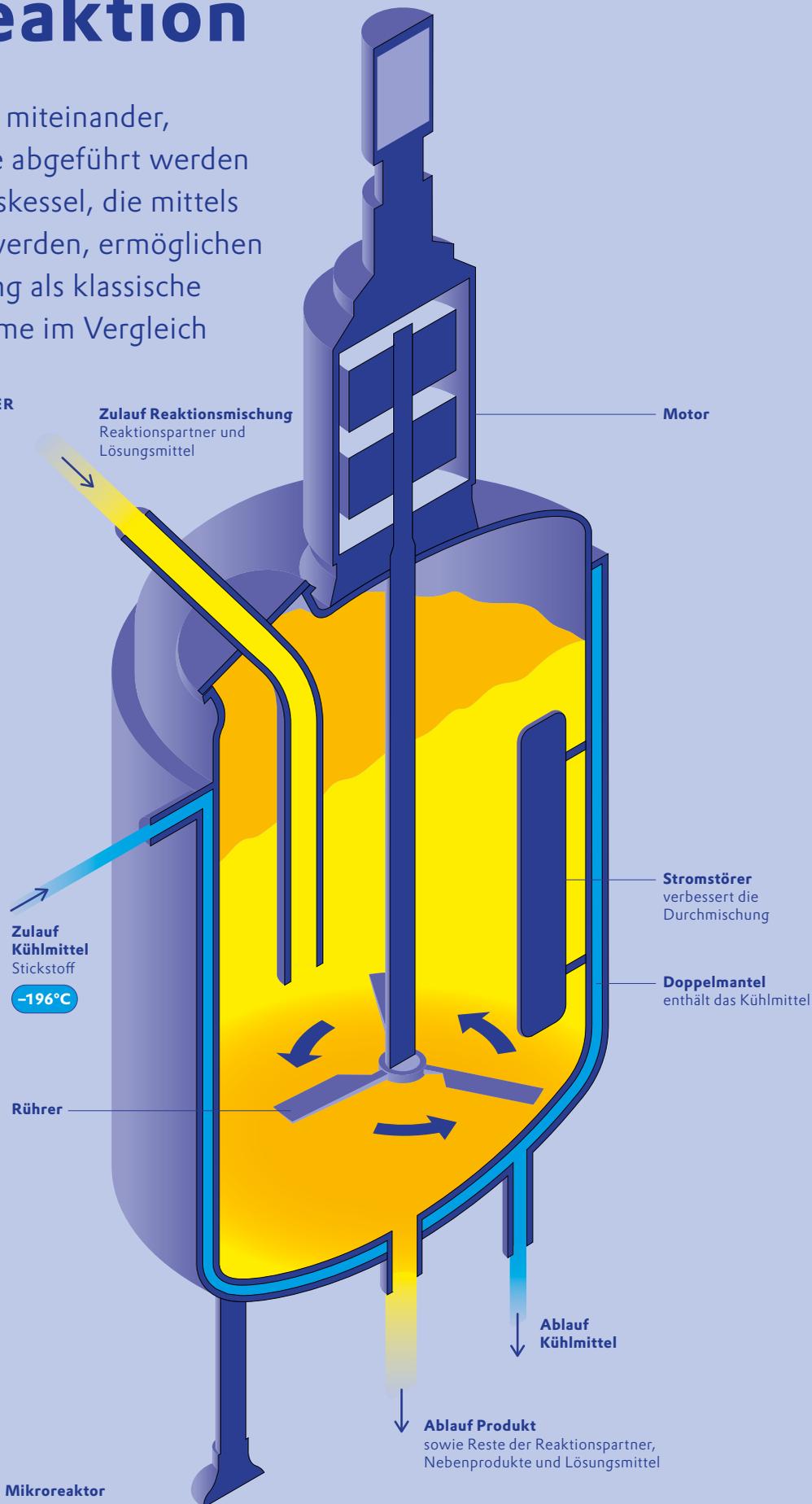
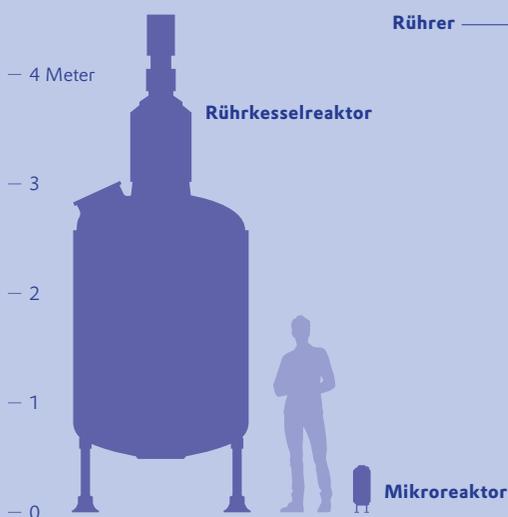
Reagieren Chemikalien miteinander, entsteht oft Wärme, die abgeführt werden muss. Kleine Durchflusskessel, die mittels 3D-Druck hergestellt werden, ermöglichen eine effizientere Kühlung als klassische Rührkessel. Zwei Systeme im Vergleich

INFOGRAFIK **MAXIMILIAN NERTINGER**

## RÜHRKESSELREAKTOR

Das große Reaktorvolumen sorgt für eine starke Wärmeentwicklung. Damit es nirgendwo im Kessel zu heiß wird, muss ein sehr kaltes Kühlmittel ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  kalter Stickstoff) durch die Reaktorummantelung gepumpt werden.

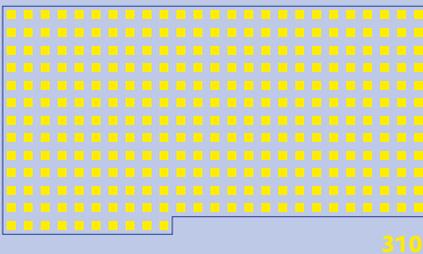
## Größenvergleich



## Effizienzvergleich der Reaktortypen\*

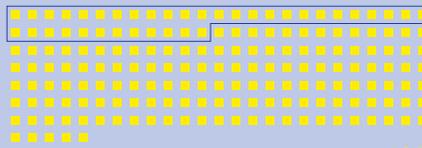
Mikroreaktor    Rührkesselreaktor

Energieverbrauch in MWh



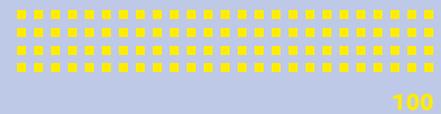
□ = Ø Jahresstromverbrauch von 100 deutschen Haushalten: **310**  
Quelle: destatis.de

CO<sub>2</sub>-Ausstoß in t



□ = CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines Airbus A320 auf dem Flug von München nach Berlin: **37**  
Quelle: atmosfair.de

Platzbedarf in m<sup>2</sup>



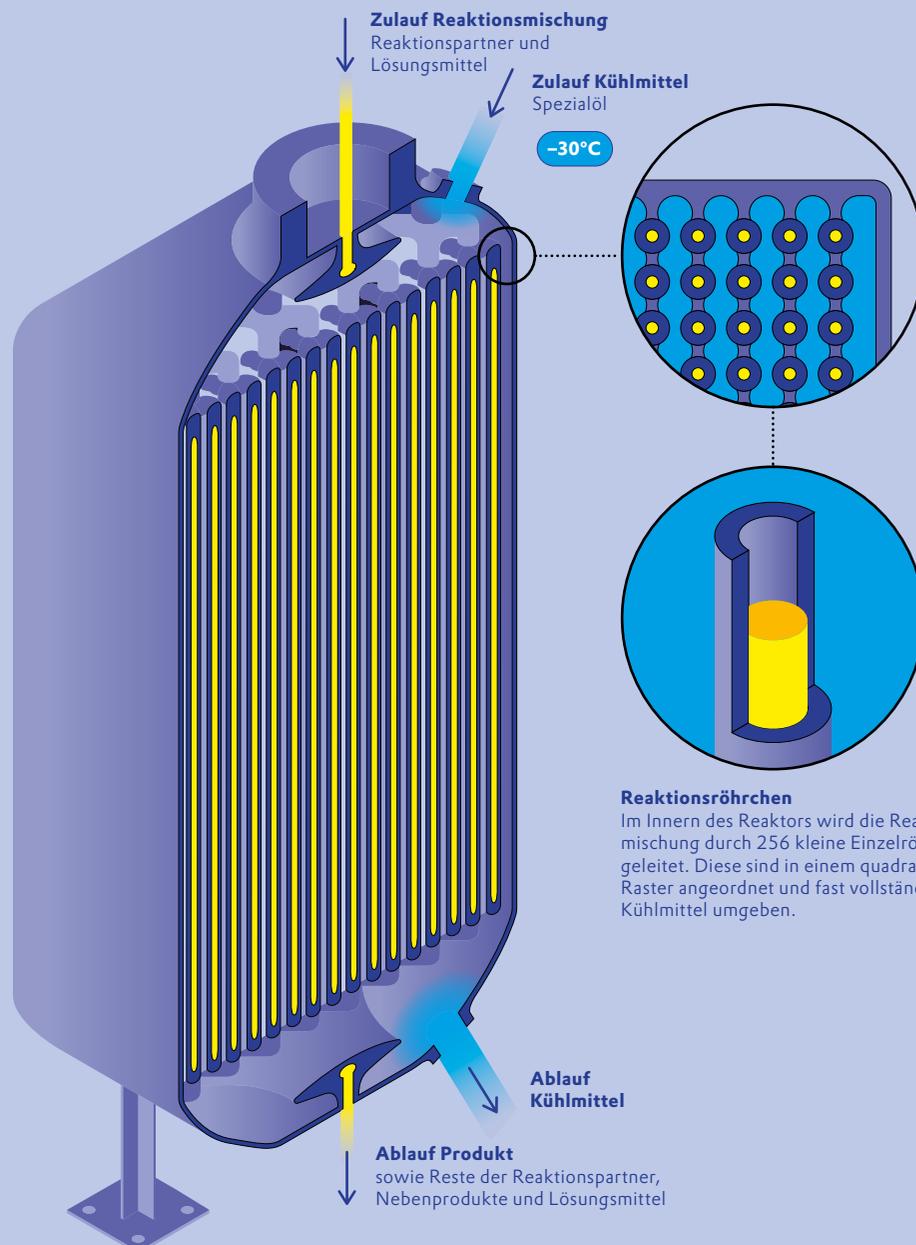
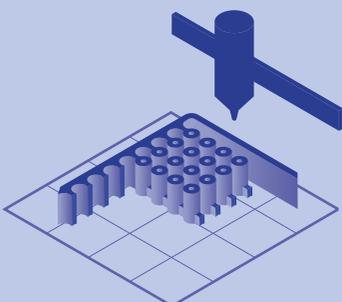
\* bezogen auf den Kühlaufwand für eine Produktionsmenge von ... jährlich 150.000 Tonnen bei der Ortholithierung

## MIKROREAKTOR

Viele dünne Reaktor­röhrchen sorgen dafür, dass die punktu­elle Temperatur­entwicklung geringer ist. Weil alle Röhrchen von Kühlmedium umgeben sind, wird die Wärme zudem besser abgeführt.

### Neues Produktionsverfahren

Durch 3D-Druck können Reaktor­bauteile in Formen gefertigt werden, die bei herkömmlichen Produktionsverfahren wie etwa Spritzguss nur mit großem Aufwand hergestellt werden können.





# Ankerplatz für Traditionen

---

In Belgien treffen Politiker, Händler und Touristen aus aller Welt aufeinander – und das nicht nur wegen der köstlichen Pralinen. Das Land beeindruckt mit seiner dreisprachigen Kultur, seinen historischen Städten sowie als Zentrum der europäischen Politik. Belgien mag klein sein, doch gelebte Traditionen gepaart mit Weltoffenheit eröffnen dem Land einzigartige Perspektiven.

TEXT PAULINE BRENKE



Wie ein Kreuzfahrtschiff thront der glänzende Überbau auf der früheren Feuerwehrekaserne am Antwerpener Hafen. Das vom Architekturbüro Zaha Hadid Architects entworfene Havenhuis ist heute Hauptsitz der Hafengesellschaft Antwerpen. Es symbolisiert zugleich Historie und Zukunft des zweitgrößten Hafens in Europa. Auf 25 Quadratkilometer Fläche werden hier Waren aus aller Welt umgeschlagen, was die Stadt im Norden Belgiens zu einem Zentrum des Handels und außerdem zu einem exzellenten Chemiestandort macht – wovon auch Evonik profitiert. Die große Produktionsstätte mitten im Hafen ist über den Seeweg nicht nur global vernetzt, sondern durch die Binnenschifffahrt auch mit Marl in Deutschland verbunden, dem größten Standort von Evonik. Beide gehören zum standortübergreifenden C4-Verbund. C4 sind Nebenprodukte der Rohölverarbeitung, die von Evonik in hochwertige Chemikalien verwandelt werden.



Handwerkliche Präzision und Liebe zum Detail: Belgische Pralinen sind für ihre hohe Qualität und den exzellenten Geschmack bekannt. Der weltgrößte Umschlagplatz für Schokolade liegt denn auch vor den Toren der Hauptstadt am Brüsseler Flughafen: Pro Minute wurden dort zuletzt rund 1,5 Kilogramm Schokolade und Pralinen an Reisende verkauft. Um den hohen Standard der kleinen Köstlichkeiten zu wahren, setzen die Chocolatiers unter anderem Kaliumkarbonat von Evonik ein. Dadurch erhält die Schokolade ihre perfekte Konsistenz und intensive Farbe.







■ Hommage an Blondin und Cirage: Seit 1991 werden in Brüssel zahlreiche Fassaden und Hauswände bekannten Comichelden gewidmet. Insgesamt 50 Kunstwerke lassen sich bei einem Spaziergang auf der Comicstrip-Route bestaunen. Bilder- geschichten für Kinder wie für Erwachsene sind ein wichtiger Bestandteil der belgischen Identität. Weltberühmte Serien wie „Les aventures de Tintin“ (in Deutschland bekannt als „Tim und Struppi“), „Les Schtroumpfs“ („Die Schlümpfe“) oder „Lucky Luke“ sind der Fantasie belgischer Comiczeichner zu verdanken. Aber was wären die Lieblingscharaktere der Kindheit ohne ihr farbenfrohes Aussehen? Evonik liefert Produkte für hochwertige Druckfarben und Wasserstoffperoxid zum Bleichen des Papiers.

Ein Pommes-Imbiss ist in Brüssels Straßen nie weit entfernt. Von der kleinen Bude bis zum exklusiven Sternerestaurant – die hiesige Gastronomie wäre kaum denkbar ohne die berühmten belgischen Frites (das ist das französische Wort, bei den Flamen heißen sie Frietjes). Das Geheimnis hinter dem einzigartigen Geschmack der Spezialität liegt in der Wahl der Kartoffelsorte, der Verwendung von Rinderfett und im zweifachen Frittieren. Und wenn das Fett seine Aufgabe bei der Zubereitung der knusprigen Kartoffelstäbchen erfüllt hat? Dann sorgt Evonik mithilfe von Alkoxid-Kaliummethylat dafür, dass es als Biokraftstoff eine neuen Einsatzzweck erhält.





„De Ronde van Vlaanderen“ – die Flandernrundfahrt – ist ein Radsportklassiker. Jedes Jahr im April werden Profi-Radsportler (in einem späteren Rennen auch motivierte Amateure) auf der 230 Kilometer langen Strecke von Antwerpen nach Oudenaarde herausgefordert: durch nahezu unbefahrbares Kopfsteinpflaster oder Strecken mit 20 Prozent Steigung. Evonik ist häufig mit unterwegs, zum Beispiel mit Kieselsäure der Marke Ultrasil für eine ideale Beschaffenheit der Reifen oder dem Strukturschaum Rohacell in Leichtbauteilen. Das Fahrrad ist in Belgien jedoch nicht nur Sportgerät, sondern auch beliebtes Verkehrsmittel: Etwa ein Viertel der Evonik-Mitarbeiter kommt mit dem Rad zur Arbeit.



### GROSSE VIELFALT

Der Evonik-Standort in Antwerpen ist der größte ausländische Produktionsstandort des Konzerns. Seit 1968 nutzt Evonik das 109 Hektar große Werksgelände und beherbergt dort elf Produktionseinheiten. So groß wie der Standort selbst ist auch dessen Produktvielfalt, die von Rohstoffen für die Elektro- und Kommunikationsindustrie über Bindemittel für Farben und Lacke bis hin zu umweltschonenden Herbiziden reicht.



#### Evonik-Standorte

- 1 Antwerpen
- 2 Brüssel
- 3 Ostende
- 4 Löwen

An

4

Standorten arbeiten

1.128

Mitarbeiter.



# HAUPTSACHE KOHLENSTOFF

TEXT TOM RADEMACHER



## »Energie und Mobilität kann man dekarbonisieren, aber die Chemie niemals.«

JEROEN VERHOEVEN, BEREICHSLEITER WERTSCHÖPFUNGSKETTEN  
KUNSTSTOFF & CHEMIE BEI NESTE

Das C-Atom ist für die Chemie unersetzlich. Die fossilen Quellen hierfür sind es nicht. Zunehmend kommt erneuerbarer Kohlenstoff zum Einsatz, dessen Anteil in den Produkten sich nun auch exakt nachweisen lässt.

**E**nergie und Mobilität kann man dekarbonisieren, aber die Chemie niemals“, sagt Jeroen Verhoeven. Zu wichtig sei Kohlenstoff als Baustein für chemische Verbindungen. Kaum ein Produkt, das ohne C-Atome auskäme.

Verhoeven arbeitet für Neste. Das finnische Unternehmen ist weltweit der größte Hersteller von Diesel und Flugzeugtreibstoff aus erneuerbaren Quellen und hat bereits gemeinsam mit Evonik Schmierstoff-Formulierungen entwickelt. Durch seine Produkte hat Neste nach eigenen Angaben allein 2021 den Ausstoß von rund elf Millionen Tonnen Treibhausgasen verhindert. Seit einigen Jahren wendet sich das Unternehmen verstärkt alternativen Kohlenstoffquellen für die Chemie zu.

Der Bedarf ist gewaltig. Laut einer Studie des Nova-Instituts, eines deutschen Thinktanks, stecken in den weltweit pro Jahr produzierten Chemieprodukten rund 450 Millionen Tonnen Kohlenstoff. Bis 2050 wird sich diese Menge mehr als verdoppeln.

Umso dringender sucht die Branche nach Alternativen zu Erdgas und Erdöl. Von A wie Altreifen bis Z wie Zelluloseabfällen wird alles Mögliche herangezogen, was Kohlenstoff im Umlauf hält und verhindert, dass neuer aus der Erde geholt werden muss.

Evonik hat ein Material aus erneuerbaren Quellen entwickelt: Trogamid myCX eCO ist ein transparentes Polyamid speziell für Brillengläser. Die Marke Boss bringt gerade die erste Sonnenbrillenkollektion damit heraus. Das Kürzel eCO steht für eliminate CO<sub>2</sub>, „Kohlendioxid ausmerzen“. Die klimafreundliche Innovation verursacht nur halb so viel Kohlendioxidemission wie herkömmliches Polyamid, da bei der Herstellung regenerative Energie eingesetzt wird und 40 Prozent der fossilen Rohstoffe durch erneuerbare ersetzt werden. „Rohstoffe machen den größten Anteil unseres CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks aus“, sagt Dr. Florian Hermes, verantwortlicher Experte im Evonik-Geschäftsgebiet High Performance Polymers.

Branchenweit stammen heute 85 Prozent des Kohlenstoffs in Chemieprodukten aus fossilen Quellen – gut drei Viertel davon aus Erdöl und ein Viertel aus Erdgas. Biobasiert ist nur ein Zehntel, recycelt ein Zwanzigstel der Gesamtmenge. Bis 2050 muss sich dieser Mix fundamental ändern. Mehr als die Hälfte allen Kohlenstoffs sollte laut Nova-Institut dann aus dem Recycling stammen, der Rest vom Feld und direkt aus der Luft.

Das klingt nach Revolution – doch die Veränderungen werden sukzessive stattfinden. Globale Industrien wie die Chemie mit ihren komplexen Stoffströmen und gigantischen Produktionsverbänden komplett neu aufzubauen wäre kaum praktikabel. Ökologisch →



**Nachwachsende Rohstoff** Pflanzen sind Teil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs. Den Kohlenstoff, den Raps, Rizinus und andere Nutzpflanzen enthalten, haben sie zuvor selbst aus der Atmosphäre geholt. Sie als chemischen Rohstoff zu nutzen, kann also Vorteile fürs Klima bieten. Ob ein fertiges Produkt tatsächlich klimafreundlich ist, hängt von weiteren Faktoren ab, etwa von der Quelle der bei der Herstellung eingesetzten Energie.

sinnvoll wäre es auch nicht. Der Wandel muss mit vorhandenen Anlagen gestemmt werden, indem erneuerbare Rohstoffe in immer größerem Maße in die bestehenden Prozesse einfließen.

Eine wichtige Methode auf dem Weg dorthin heißt Massenbilanzverfahren. Demnach kann erneuerbarer Kohlenstoff, der am Anfang einer chemischen Wertschöpfungskette über einen Rohstoff eingespeist wird, an deren Ende einem bestimmten kohlenstoffhaltigen Produkt zugerechnet werden. Stark vereinfacht geht das so: Eine Tonne Pflanzenöl, die in der Raffinerie eine Tonne Erdöl ersetzt, wird buchhalterisch einer Tonne fertigem Kunststoff gutgeschrieben, der aus den Raffinerieprodukten hergestellt ist. Dabei müssen Pflanzenöl und Erdöl nicht getrennt bleiben. Die Massenbilanzierung erlaubt es, Fossiles und Erneuerbares zusammen zu verarbeiten. Abgerechnet wird am Schluss.

#### ATOMMASSEN STATT KILOWATTSTUNDEN

Der Vergleich mit dem Ökostrom liegt nahe. Windkraftträder und Fotovoltaikanlagen speisen elektrische Energie ins selbe Stromnetz ein wie Kohle- und Gaskraftwerke. Wer für Ökostrom bezahlt, weiß nicht, woher die Elektronen aus seiner Steckdose wirklich stammen. Er zahlt aber dafür, dass auf Versorgerseite die verbrauchte Menge Strom aus erneuerbaren Quellen eingespeist wurde.

In der Chemie ist all das etwas komplizierter. Statt Kilowattstunden gilt es Atommassen zu verfolgen. Und das durch viele komplexe und oft als Betriebsgeheimnis gehütete Reaktionen hindurch. Um zu gewährleisten, dass dies korrekt und transparent geschieht, sind verbindliche Regeln und internationale Standards nötig. Einer dieser Standards heißt ISCC-Plus.

ISCC steht für International Sustainability and Carbon Certification, eine Organisation mit Sitz in Köln. Ihr Plus-Standard gewährleistet, dass in den Berechnungen exakt so viel Kohlenstoff im Produkt als erneuerbar deklariert wird, wie in den Prozess eingespeist wurde – mögliche Prozessverluste werden dabei berücksichtigt.

Bei Biokraftstoffen sind Standards wie ISCC-EU seit Langem gesetzlich bindend. ISCC-Plus wurde unter anderem für die Chemie entwickelt. Noch handelt es sich um eine freiwillige Selbstverpflichtung. Die Zahl der

gültigen ISCC-Plus-Zertifikate hat sich jedoch zuletzt Jahr um Jahr verdoppelt. Große Konsumgüterhersteller drucken das ISCC-Plus-Label bereits auf die Verpackungen von Babyschnullern, Kartoffelchips und Shampoo. So steigt die Nachfrage entlang der Lieferkette.

**CRACK-C4 AUS NACHHALTIGEN QUELLEN**

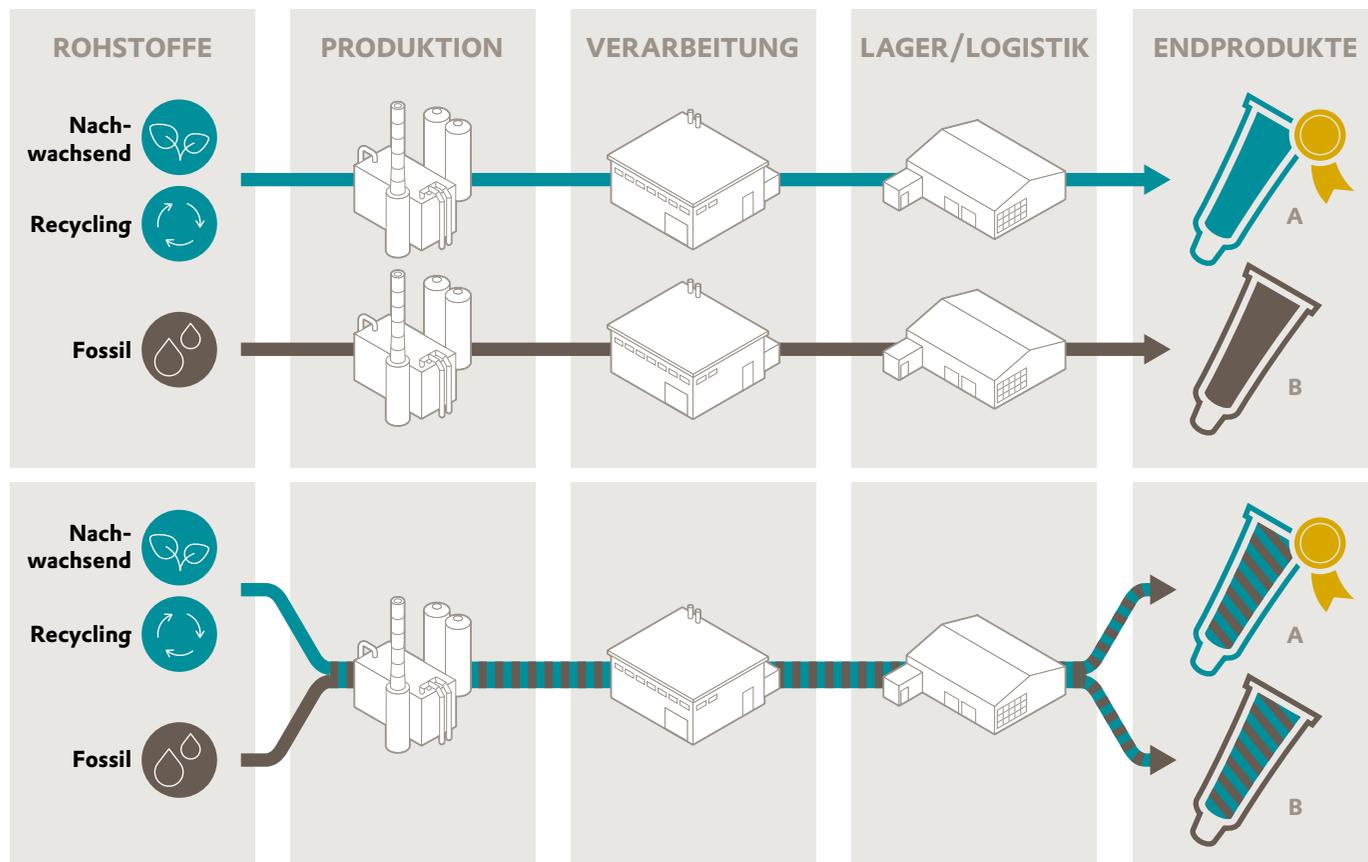
Seit November 2021 sind Anlagen von Evonik in Marl und Antwerpen nach ISCC-Plus zertifiziert. Sie gehören zum Geschäftsgebiet Performance Intermediates, das unter anderem Weichmacher, Additive und Zwischenprodukte für alles vom Waschmittel bis zur Schuhsohle herstellt – pro Jahr rund zwei Millionen Tonnen. Wichtigster Rohstoff dafür ist sogenanntes Crack-C4. Die Moleküle mit vier Kohlenstoffatomen fallen beim Aufspalten von Rohölprodukten an. Künftig soll mehr und mehr davon aus erneuerbaren Raffinerie-Restströmen kommen. Ob Butadien für Gummianwendungen oder

Buten für Kunststoffe – diese Stoffe lassen sich chemisch identisch aus nachwachsenden oder recycelten Quellen gewinnen. Nachgewiesen wird dies durch das Massenbilanzverfahren. „Die Zertifizierung nach ISCC-Plus erlaubt es uns, den Anteil der nachhaltigen Produkte so hochzufahren, wie Verfügbarkeit und Nachfrage steigen“, sagt Hendrik Rasch, im Geschäftsgebiet verantwortlich für Business & Sustainability Transformation.

Auch im Konzern selbst steigt bei derart zertifizierten Produkten die Nachfrage. Butadien und Buten werden etwa im Geschäftsgebiet Coatings & Adhesive Resins verarbeitet. Das erste eCO-Produkt aus einem defossilierten Cracker-Produkt ist schon am Markt: Vestoplast eCO wird in Heißschmelzklebern – im Fachjargon Hotmelts – verarbeitet, die etwa Windeln zusammenhalten. Sichere Klebung ist da ein Muss und zunehmend auch Nachhaltigkeit. „Millennials haben heute Wickelkinder und achten auf Ökolabels“, →

**Sauberer Nachweis**

Wie das Massenbilanzverfahren die Verwendung erneuerbarer Rohstoffe erleichtert



Während bei herkömmlichen Produktionsverfahren (obere Grafik) fossile und alternative Rohstoffe in der Wertschöpfungskette getrennt bleiben müssen, erlaubt das Massenbilanzverfahren (untere Grafik) die Durchmischung unterschiedlicher Ströme. So lässt sich Mehraufwand in Produktion, Verarbeitung und Logistik vermeiden. Trotzdem können erneuerbare Rohstoffe am Ende rechnerisch sauber den Produkten zugeordnet werden.



## »Wir wollen dazu beitragen, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Evonik zu verkleinern.«

FLORIAN HERMES, HIGH PERFORMANCE POLYMERS, EVONIK

sagt Dr. Sabrina Mondrzyk, Leiterin des Technical Marketing für Hotmelts. In der Möbelproduktion, bei der Herstellung von Getränkekartons und im Automobilbau wird genauso geklebt. Und Unternehmen wie Ikea verlangen selbst bei Klebern den Einsatz von Recyclingprodukten. „Abstriche bei Haftverhalten und Verarbeitung macht trotzdem keiner“, sagt Mondrzyk. Vestoplast eCO ist denn auch chemisch identisch mit der herkömmlichen Variante, basiert aber massenbilanziert zu 97 Prozent auf erneuerbaren Rohstoffen.

Auch das Evonik-Geschäftsgebiet Crosslinkers ist bereit für die Herstellung von eCO-Produkten. Die Sparte für sogenannte Vernetzer, die zum Beispiel Lacke, Industriefußböden und Faserbauteile aushärten lassen, hat im März den kompletten Produktionsstrang in Herne zertifizieren lassen. Alle Erzeugnisse gibt es künftig als eCO-Variante. Denn das Aceton, auf dem alle dortigen Produkte letztlich basieren, kann massenbilanziert zu 100 Prozent aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden (siehe Bericht ab Seite 10).



**Fossile Rohstoffe** Erdöl, Erdgas und Kohle sind derzeit die mit weitem Abstand wichtigsten Energie- und Rohstoffquellen in der chemischen Industrie. Der darin enthaltene Kohlenstoff wurde über Jahrmillionen biologisch gebunden und in unterirdische Schichten eingeschlossen. Erst die Nutzung dieser Vorkommen brachte das moderne Industriezeitalter in Gang. Auf dem Weg in die Klimaneutralität sollen fossile Rohstoffe im Boden bleiben.

**Zirkuläre Rohstoffe** Was heute noch Müll ist, kann schon bald als wertvoller Rohstoff für neue Produkte dienen – dank verbesserter und neuer Verfahren zur Aufbereitung beziehungsweise Wiederverwertung. Neben dem mechanischen Recycling kann das chemische Recycling von Kunststoffen künftig eine deutlich größere Rolle spielen.



An den Anlagen muss für die Verarbeitung der erneuerbaren Rohstoffe nichts geändert werden. Die technologischen Hürden beim Ersatz des fossilen Kohlenstoffs liegen vielmehr am Anfang der Wertschöpfungskette. Welche Rohstoffe verfügbar sind und wie man sie chemisch identisch in die gängigen Vorprodukte umwandelt – solche Fragen müssen Unternehmen wie Neste beantworten. „Nicht alles ist jetzt schon technisch oder wirtschaftlich machbar“, sagt Verhoeven. „Aber vieles geht schneller, als selbst wir das erwartet haben. Und man muss Raum für Innovation lassen.“

#### ZUKUNFTSPROJEKT PYROLYSE

So nutzt Neste heute viele verschiedene erneuerbare Rohstoffe. Waren es früher vor allem Pflanzenöle, machen heute Reststoffe und Abfälle mehr als 90 Prozent der Ausgangsmaterialien aus. In den Niederlanden etwa kooperiert das Unternehmen mit McDonald's. Deren altes Frittieröl wird zu Biodiesel für Trucks, die die Burgerkette beliefern.

Holzreste, Restmüll, Klärschlamm – je minderwertiger die Abfälle, desto besser kann die Ökobilanz ausfallen. Zudem bilden solche erneuerbaren „Rohstoffe der zweiten Generation“ keine Konkurrenz zu der Nahrungsmittelproduktion. Kunststoffabfälle werden künftig eine deutlich größere Rolle spielen. Ein Weg

dazu heißt Pyrolyse. Dabei wird Kunststoffmüll, der sich für mechanisches Recycling nicht ausreichend trennen lässt, auf mehrere Hundert Grad Celsius erhitzt. Unter Sauerstoffausschluss entsteht dabei eine dicke schwarz-braune Flüssigkeit. Sie sieht nicht nur aus wie Rohöl, sie lässt sich auch ganz ähnlich verarbeiten.

Neste hat 2021 in ein amerikanisches Recyclingunternehmen mit eigener Verflüssigungstechnologie investiert. Bis 2030 wollen die Finnen jährlich mehr als eine Million Tonnen Kunststoffabfall verarbeiten. Shell baut in Singapur eine Anlage zur Aufbereitung von Pyrolyseöl. Total hat die erste industrielle Pyrolyse Frankreichs angekündigt. BP prüft die Ansiedlung einer Pyrolyse in Deutschland: Die Raffinerie in Gelsenkirchen ist per Pipeline mit dem nahegelegenen Chemiepark Marl von Evonik verbunden – eine Perspektive dafür, den Kreislauf für erneuerbaren Kohlenstoff zu schließen. —



**Tom Rademacher** ist freier Journalist in Köln. Er schreibt unter anderem über Wissenschafts- und Industriethemen.



# REGEN AUF KNOPFDRUCK

TEXT BJÖRN THEIS

## Niederschläge durch Elektroschocks? Mikroalgen, die Kohlendioxid binden und als Basis für Treibstoffe dienen? Derzeit wird intensiv an einer Vielzahl von Geoengineering-Technologien geforscht, denn sie könnten für die Menschheit überlebenswichtig werden.

**S**eit Beginn der industriellen Revolution verändern wir Menschen globale Systeme wie das Klima oder die Erdoberfläche stärker als je zuvor. Wir setzen beispielsweise Treibhausgase frei und bringen menschengemachte langlebige Materialien wie Aluminium oder Kunststoffe in die Umwelt ein. Der Chemiker und Nobelpreisträger Paul Crutzen und der Biologe Eugene Stoermer gaben dem Zeitalter, in dem der Mensch zum größten Einflussfaktor für die Entwicklung der biologischen, geologischen und klimatischen Bedingungen der Erde geworden ist, um die Jahrtausendwende einen eigenen Namen: Anthropozän.

Die gravierenden Folgen unseres Tuns beschreibt auch der Weltklimarat der Vereinten Nationen (IPCC). Der Rat stellte im August 2021 einen Bericht vor, der nach Auswertung von rund 14.000 Studien zu dem Schluss kommt, dass der Mensch eindeutig Schuld an dem Klimawandel hat und hierdurch schwere klimatische, wirtschaftliche und soziale Verwerfungen zu erwarten sind. Um dies zu verhindern, müssten nicht nur die Emissionen deutlich reduziert werden, so die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des IPCC, nötig seien auch Innovationen auf dem Gebiet des Geoengineerings.

### KÜHLER DANK REFLEXION

Dieser Begriff bezeichnet Technologien, die einen großräumigen Eingriff in die geo- und biochemischen Kreisläufe der Erde ermöglichen. Schon Crutzen sah die Notwendig-

keit für solche Technologien: 2006 schlug er vor, Schwefeldioxid in der Stratosphäre zu verteilen. Dabei, so seine Idee, bilden sich Sulfatpartikel, die groß genug sind, um das Sonnenlicht zu reflektieren und somit die Erderwärmung zu reduzieren.

Auf Reflexion setzen auch Forscherinnen und Forscher der Purdue-Universität in den USA, die im vorigen Jahr das weißeste Weiß der Welt präsentierten. Die von ihnen entwickelte Farbe wirft mehr als 98 Prozent des einfallenden Lichts zurück – Dachflächen, die damit gestrichen werden, kühlen ein Gebäude effektiver als stromfressende Klimaanlage.

### GRIFF NACH DEN WOLKEN

Andere Technologien wollen Wolken nutzbar machen. Beim Cloud Seeding etwa wird mithilfe von Flugzeugen, Kanonen oder Raketen meist Silber- oder Kaliumjodid in die Wolken eingebracht. Diese Chemikalien dienen als Kondensations- oder Eiskerne, um Niederschlag einzuleiten. In China ließ man es 2008 mancherorts gezielt regnen, um die Spielstätten der Olympischen Sommerspiele trocken zu halten. In Zukunft möchte man die Wolken gar per Laser oder durch Elektrostöße zum Regnen bringen.

### ATMOSPÄRENPUTZER

Ein weiterer wichtiger Geoengineering-Ansatz ist die sogenannte Carbon Capture and Utilization. Das Ziel: Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen. Beim „Direct Air Capture“ wird etwa Luft angesaugt und das CO<sub>2</sub> daraus abgeschieden. Andere Initiativen setzen auf Mikroalgen: Das deutsche Start-up Carbon Biotech will sie dazu verwenden, Kohlendioxid auf biologische Weise zu binden und dann in Lebensmittel oder Treibstoffe umzuwandeln. Nach Angaben des Unternehmens ist eine Tonne seiner Spirulina-Bakterien in der Lage, 1,8 Tonnen CO<sub>2</sub> zu absorbieren.

Bei Evonik verfolgt das Foresight-Team der Creavis im Rahmen des Fokusthemas „Sustainable Food Futures 2040“ Geoengineering-Ansätze, die bei der Produktion von Lebensmitteln zum Einsatz kommen könnten. Der Creavis-Inkubationscluster Defossilation beschäftigt sich unter anderem mit dem Thema Carbon Capture.

Noch stehen viele dieser Technologien am Anfang. Umwelt-, Energie- und Kosteneffizienz sowie die Auswirkungen eines großflächigen Einsatzes sind noch unklar. Es wird jedoch immer deutlicher, dass sie wohl unverzichtbar sein werden. Und wer weiß, vielleicht gibt es ja eines Tages Sonnenschein oder Schnee auf Knopfdruck – dann stimmen endlich auch alle Wettervorhersagen. —



**Björn Theis** leitet die Abteilung Foresight der Evonik-Innovationseinheit Creavis. Seine ELEMENTS-Kolumne erscheint regelmäßig auf [elements.evonik.de](https://elements.evonik.de).



# » Fürs Recycling von Indium brauchen wir Masse «

PROTOKOLL **KAROLINA FÖST**  
FOTOGRAFIE **RAMON HAINDL**

**A**ls Professor für Recycling halte ich meine Augen ständig offen nach Stoffen, die wir wiederverwerten können. Vor etwa zehn Jahren fiel mein Blick auf Indium, ein seltenes, silberweißes, weiches Schwermetall, das in der Erdkruste etwa so häufig vorkommt wie Silber. Damals war Indium auf dem Weltmarkt knapp – und zugleich stieg die Nachfrage. Denn Indium hat in Verbindung mit Zinn zwei besondere Fähigkeiten: Es ist leitend und transparent zugleich. So wird es zum hoch-effizienten Halbleiter für LCD-Flachbildschirme, die um die Jahrtausendwende ihren Siegeszug feierten. Heute steckt es in fast allen Fernsehgeräten, Computerbildschirmen und Touchscreens. Auch in Smartphones kommt es zum Einsatz.

Mit der Verknappung von Indium stiegen die Preise, und ich erhielt von dem damals führenden Flachbildschirmhersteller und einem großen Elektroschrott-Recycler den Auftrag, ein Verfahren für die Rück-

gewinnung zu entwickeln. Technisch ist uns das gelungen, kommerziell angewandt wird es dennoch nicht. China, der größte Indiumlieferant, warf auf einmal drei Weltjahresproduktionen auf den Markt – rund 2.000 Tonnen.

Die Preise gingen in den Keller und mit ihnen die Bereitschaft, in unsere Recycling-technologie zu investieren. Ich bin mir dennoch sicher, dass Indium künftig recycelt wird. Die Frage ist nur, wann dies wirtschaftlich ist.

**Dr. Daniel Goldmann** ist Professor an der Technischen Universität Clausthal. Er leitet das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik und hat sich mit seinem Team mit der Rückgewinnung von Indium befasst.

Der Bedarf wird in den kommenden Jahren voraussichtlich steigen. Immer mehr Lebensbereiche werden „smart“, der Bedarf an Bildschirmen steigt. Auch in den neuesten Fotovoltaikanlagen wird Indium eingesetzt. Im Moment fehlt es jedoch noch an Altgeräten. Wir brauchen Masse, damit sich das Verfahren lohnt.

Bisher werden in Deutschland erst 45 Prozent des Elektroschrotts wiederverwertet, international liegt die Quote noch geringer. In meinen mehr als 35 Jahren in der Recyclingforschung habe ich mich mit vielen Aspekten der Wiederverwertung beschäftigt. Jetzt bin ich bei der Verhaltenspsychologie angekommen: Wie können wir die Menschen dazu motivieren, ihre alten Elektrogeräte abzugeben?

# Impressum

---

**HERAUSGEBER** Evonik Industries AG | Christian Schmid | Rellinghauser Straße 1–11 | 45128 Essen |  
**BERATUNG UND KONZEPT** Manfred Bissinger |  
**CHEFREDAKTION** Matthias Ruch (V.i.S.d.P.) |  
**CHEF VOM DIENST** Inga Borg, Deborah Lippmann, Christoph Bauer | **TEXTCHEF** Christian Baulig, Jörg Wagner | **ONLINE-REDAKTION** Pauline Brenke |  
**BILDREDAKTION** Nadine Berger | **LAYOUT** Wiebke Schwarz (Art Direction), Victor Schirner (Grafik) |  
**ANSCHRIFT DER REDAKTION** KNSK Group | An der Alster 1 | 20099 Hamburg | **DRUCK** Neef+Stumme premium printing, Wittingen |  
**COPYRIGHT** © 2022 by Evonik Industries AG, Essen. Nachdruck nur mit Genehmigung der Agentur. Der Inhalt gibt nicht in jedem Fall die Meinung des Herausgebers wieder. Fragen zum Magazin ELEMENTS: Telefon +49 201 177-3315 | E-Mail [elements@evonik.com](mailto:elements@evonik.com) |  
**BILDNACHWEISE** Cover: Alex Broeckel/Die Illustratoren | S. 3: Kirsten Neumann | S. 4–5: Paul Langrock/laif, Henning Ross, Ramon Haindl | S. 6–7: Cirumfix Solutions/Fernandini Design & Concepts | S. 8–9: Neustark AG, Jim Stamos, Forschungszentrum Jülich/Ralf-Uwe Limbach; Infografik: KNSK GROUP | S. 10–19: Getty Images (2), Siemens Gamesa, Vestas Wind Systems A/S (2), Arnt Vad Jensen/BMS, Tetra-Spar Demonstrator ApS (2), Evonik Industries (2); Infografiken: Maximilian Nertinger (6); Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlage von Karsten Bootmann/Evonik Industries | S. 20–25: Silke Reents (2), action press, picture alliance/AP Images, ddp | S. 26–31: Henning Ross (6), Dave Kowall; Infografik: Maximilian Nertinger, Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlage von Hamid Sadeghi | S. 32–37: Andreas Doria/Upfront mit Motiven von Getty Images und Evonik Industries, Ramon Haindl (5), privat; Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlage von privat | S. 38–39: Infografik: Maximilian Nertinger | S. 40–47: Peter Knoop, Getty Images, Ludovic Maisant/hemis.fr/laif, imago images/agefotostock, imago images/Mario Stiehl | S. 48–53: Illustrationen: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss (4), Neste, Evonik Industries; Infografik: Maximilian Nertinger; Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlage von Stefan Eisenburger | S. 54–55: Getty Images; Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlage von Karsten Bootmann/Evonik Industries | S. 56: Ramon Haindl

[elements.evonik.de](https://elements.evonik.de)

# »» Von allen Kräften der Natur ...

... hat der Wind meiner Meinung nach die größte Antriebskraft“,  
bekundete Abraham Lincoln 1858 – wenige Jahre vor seiner ersten  
Amtszeit als Präsident der Vereinigten Staaten und rund drei  
Jahrzehnte bevor in Amerika und in Europa erste Windkraftanlagen  
zur Stromerzeugung aufgestellt wurden.

Der vielseitig gebildete Autodidakt Lincoln erkannte schon damals,  
dass Windkraft neben fossilen Brennstoffen eine wichtige Energie-  
quelle darstellt. ELEMENTS zeigt, welchen Beitrag moderne  
Materialien und Prozesse dazu leisten, das Potenzial von Windrädern  
optimal zu nutzen.

1/2022 **Windkraft**