

ELEMENTS

Forschen. Wissen. Zukunft.



Das kommt dabei raus

2/2020

Wie Wasserstoff die Wirtschaft nachhaltiger macht → S. 10

Tenside: Neue Zutaten für biologisch abbaubare Spülmittel → S. 36

Traumreaktion: Effizienzsprung in der Kohlenstoffchemie → S. 52

Wasserstoff

Allgegenwärtiges Leichtgewicht

Wasserstoff (H) ist nicht nur das Element mit der geringsten Dichte im Periodensystem, sondern auch das am häufigsten vorkommende im Universum: Mehr als 90 Prozent aller Atome im Kosmos sind H-Atome. Unter irdischen Normalbedingungen kommt das Element, 1766 von Henry Cavendish entdeckt, hingegen nicht als atomarer, sondern als molekularer Wasserstoff (H₂) vor – ein farb- und geruchloses Gas, das durch Druckgas-speicherung sowie in chemischen Verbindungen, zum Beispiel Metallhydriden, aufbewahrt werden kann. Durch Abkühlung auf minus 253 Grad Celsius kann es darüber hinaus verflüssigt und in speziellen Tanks gespeichert werden. Bei Experimenten ist Vorsicht geboten: Wasserstoff ist extrem leicht zu entzünden, die entstehende Flamme aber kaum sichtbar.

Henry Cavendish Britischer Naturwissenschaftler, 1731–1810

Molekularer Wasserstoff (H₂) Verbindung von zwei Wasserstoffatomen

Metallhydride Verbindungen von Metallen mit Wasserstoff und einer Untergruppe der Hydride



LIEBE LESERINNEN UND LESER,

kennen Sie den Energieträger der Zukunft? Unsere Experten sind sich einig: Es ist Wasserstoff. Die Heizung im Keller, der Linienbus, die Raffinerie und selbst das Stahlwerk – sie alle könnten sich künftig emissionsfrei betreiben lassen, denn elementarer Wasserstoff, der sich im Periodensystem hinter dem Symbol H verbirgt, verbrennt zu nichts als Wasser. Er hinterlässt weder Ruß noch Kohlendioxid noch Stickoxide. Klingt das nicht wunderbar?

Zu schön, um wahr zu sein, sagen Kritiker. Schließlich steht Wasserstoff schon seit Jahrzehnten kurz vor dem Durchbruch. Warum sollten gerade jetzt all die Träume wahr werden, auf deren Erfüllung wir bislang vergebens warten? Die Antwort ist ganz einfach: Innovation macht's möglich. Wo stehen Forschung und Entwicklung aktuell? Was unterscheidet grünen von grauem Wasserstoff? Wer treibt die neuen Technologien voran, und was kann Evonik zu dieser Entwicklung beitragen? Das sind die Fragen, denen wir in dieser Ausgabe auf den Grund gehen, in der Chemie und weit darüber hinaus.

Dass Innovationen nicht über Nacht gelingen, gilt auch für die nächste Generation von Tensiden. Ohne Tenside wären Shampoos oder Spülmittel weitgehend wirkungslos. Europa ist der wichtigste Standort für deren Entwicklung und Produktion – und Evonik ein wichtiger Schrittmacher. Gemeinsam mit dem Konsumgüterkonzern Unilever haben unsere Spezialisten ein neuartiges Biotensid entwickelt, das nicht nur vollständig biologisch abbaubar ist, sondern auch aus nachwachsenden Rohstoffen produziert wird. Wir erzählen Ihnen die Geschichte hinter der Geschichte.

Und dann begeben wir uns noch ins Reich der Träume. Denn auch Chemie-professoren träumen, sogar bei der Arbeit. Sie suchen nach sogenannten Dream Reactions, also nach Lösungen für chemische Probleme, an denen bereits seit Jahrzehnten getüftelt wird. Einem Team um Prof. Dr. Robert Franke, Leiter der Hydroformylierungsforschung bei Evonik, ist es nun gelungen, einen solchen Traum wahr werden zu lassen.

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

TITEL: WASSERSTOFF

- 10 REPORT
Gas für morgen
 Wasserstoff hat das Zeug dazu, die Wirtschaft grundlegend zu verändern. Von der Erzeugung über die Verteilung bis hin zur Weiterverarbeitung spielt Evonik eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der Zukunftstechnologie
- 20 SCHAUBILD
Sauberes System
 Die Wasserstoffwirtschaft im Überblick
- 22 STREITGESPRÄCH
Grün oder blau?
 Die Wasserstoffexperten Hans-Josef Fell und Jorgo Chatzimarkakis über den besten Weg zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft
- 28 REPORT
Wasser-Kraft
 Mit seinen Membranen trägt Evonik dazu bei, die Elektrolyse industriell nutzbar zu machen

BIOTENSIDE

- 36 REPORT
Spülkameraden
 Gemeinsam mit Unilever macht Evonik den Abwasch umweltfreundlicher
- 41 DATA MINING
Mehr als Schaum
 Der Markt für Tenside
- 42 INTERVIEW
»Leistung muss sein«
 Konsumgüter-Experte Bert Nijhuis darüber, was Kunden weltweit wichtig ist

EFFIZIENZ

- 52 REPORT
Traumhafte Lösung
 Wie ein Forscherteam mit Evonik-Beteiligung eine Reaktion entdeckte, die die Wissenschaft seit Jahrzehnten herbeisehnt

ELEMENTAR

- 6 START-UP
- 8 PERSPEKTIVEN
- 34 MEINUNG
Wir brauchen einen Sustainable Future Deal
 Evonik-Chef Christian Kullmann über die Konsequenzen aus der Pandemie
- 44 EVONIK-LAND
China
 Das Reich der Mitte will an die wirtschaftlichen Erfolge vor Corona anknüpfen
- 58 CORPORATE FORESIGHT
Kampf den Viren
 Wie Hygiene Krankheiten verhindern hilft
- 60 IN MEINEM ELEMENT
- 61 IMPRESSUM

Grüner geht's kaum:
 Rhamnolipide in Spülmitteln werden aus natürlichen Rohstoffen hergestellt, reinigen gründlich und sind vollständig abbaubar.



10

Lichtblick: Von der Elektrolyse über Pipelinesysteme bis hin zu Tankstellen (wie hier in Kalifornien) – weltweit investieren Unternehmen und Regierungen Milliarden, um Wasserstoff als Energieträger, Speichermedium und industriellen Rohstoff voranzubringen.



IMMER FLÜSSIG

Damit Pflanzen in großen Foliengewächshäusern, hier im spanischen Valencia, optimal gedeihen, werden sie ständig bewässert. Die dafür nötigen Schläuche müssen regelmäßig gereinigt werden, damit sie nicht verstopfen. Das funktioniert besonders umweltfreundlich mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2), dessen einziges Nebenprodukt Wasser ist. Im Gewächshaus wurde es dennoch lange Zeit kaum verwendet, wegen hoher Transport- und Lagerkosten. Das Start-up HPNow, an dem Evonik seit 2017 beteiligt ist, hat einen Ausweg aus diesem Dilemma gefunden: Ein modularer Generator produziert H_2O_2 elektrochemisch, direkt vor Ort und ganz nach Bedarf.



BLICK IN DIE WELT

Innovationen aus Wissenschaft und Forschung

Sichere Kraft für das All

Mittels chemischer Reaktionen wollen US-Forscher die Energieversorgung von Weltraummissionen verlässlicher machen.



Weltraummissionen benötigen viel Energie. Der Bedarf wird normalerweise mit Solarkraft gedeckt, doch die hat einen gravierenden Nachteil: Da sie von der Intensität der Sonnenstrahlung abhängt, ist sie nicht verlässlich verfügbar. Ein Forscherteam der University of Central Florida arbeitet deshalb an einem Back-up: Energie, die mittels chemischer Reaktionen gewonnen wird und daher stabil verfügbar ist. Eine Verbindung von Silizium mit mindestens einem weiteren Element wird unter Hinzugabe von Sauer-

stoff langsam verbrannt – die gewonnene Energie kann gut gespeichert werden und liefert Wärme sowie Strom auch in sehr kalten Umgebungen.

Von dieser Technologie profitieren künftig womöglich nicht nur Raumfahrtmissionen, sie könnte auch die Basis für die Energieversorgung von Weltraumkolonien liefern. Die US-Raumfahrtbehörde NASA sieht in dieser Idee großes Potenzial und fördert das Projekt seit vergangenem Jahr mit 550.000 \$.

MENSCH & VISION

»Dieses Tattoo unterstützt beim Sonnenschutz«



DER MENSCH

So ganz wollte sich Carson Bruns nie entscheiden zwischen Kunst und Forschung. Während seiner Kindheit in Colorado mixte er am Esstisch Lebensmittel wie Tomatensoße und Saft zusammen und beobachtete, wie sich die Farbe der Mischung änderte – der Forschergeist war geweckt. Als Jugendlicher entdeckte er dann die Malerei für sich. Die Kunst begleitete ihn weiterhin, auch wenn er sich beruflich der Forschung zuwandte, vor allem der Chemie. Heute forscht Bruns als Assistant Professor der University Colorado an einem Bereich, der seine beiden großen Leidenschaften verbindet: der Tätowiertechnik.

DIE VISION

Carson Bruns hat ein Tattoo entwickelt, das als UV-Sensor für die Haut dient: Es färbt sich blau, wenn die menschliche Haut ultravioletter Strahlung ausgesetzt ist. Für diesen Effekt sorgen Mikrokapseln mit integrierter Farbe. Sie signalisieren dem Träger, wann er seine Haut besser schützen sollte, und helfen somit, langfristigen Schäden wie Hautkrebs vorzubeugen. Derzeit befindet sich das Sonnenschutz-Tattoo noch im Teststadium. Bruns denkt jedoch schon weiter: Der 34-jährige Forscher arbeitet bereits an einem Tattoo, das die UV-Strahlung nicht nur anzeigt, sondern die Haut aktiv davor schützt.

Botanischer Stresstest

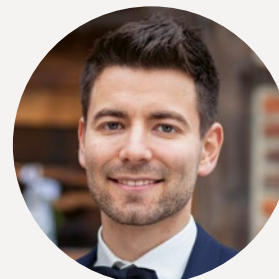
Um in Notsituationen zu überleben, besitzen Pflanzen einen besonderen Selbstschutzmechanismus: Werden sie angegriffen oder durch Umwelteinflüsse geschädigt, versorgen sie die Blattzellen mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2) – eine Art Notrufsignal. Die Zellen bauen daraufhin rechtzeitig chemische Verbindungen auf, die Feinde wie Insekten und Schnecken abwehren sowie Schäden reparieren.

Um genauer zu verstehen, wie dieses effektive Frühwarnsystem in der Natur funktioniert, haben Ingenieure des Bostoner MIT spezielle Sen-

soren aus Kohlenstoff-Nanoröhren entwickelt. In die Blätter eingebettet, registrieren die Sensoren die H_2O_2 -Alarmsignale und können präzise nachverfolgen, wie verschiedene Pflanzentypen mit Stressfaktoren wie Verletzungen, Infektionen oder Lichtschäden umgehen.

Die Ergebnisse sind vor allem für die Landwirtschaft interessant: Agrarwissenschaftler können auf Basis dieser Daten zukünftig Strategien entwickeln, die die angebauten Pflanzen bei der Stressbewältigung unterstützen – und die Ernteerträge damit optimieren.

GUTE FRAGE



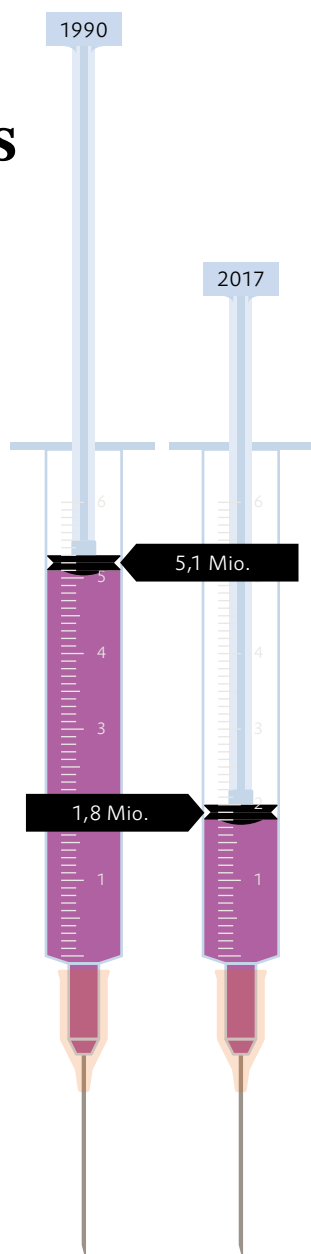
»Herr Sandfort, sagt KI künftig Ergebnisse chemischer Reaktionen vorher?«

Wenn die Daten es zulassen, ja. Chemische Reaktionen hängen von verschiedenen Faktoren ab. Wie gut sie funktionieren, ist schwierig vorherzusagen – was zu vielen, mitunter „unnötigen“ Experimenten führt. Meine Kollegen und ich haben deshalb ein auf maschinellem Lernen basierendes KI-Modell entwickelt, das aus zahlreichen Versuchsanordnungen diejenigen herausfiltert, bei denen es am wahrscheinlichsten ist, dass sie funktionieren. Künstliche Intelligenz wählt zum Beispiel den optimalen Katalysator aus. Bisher mussten Forscher dafür erst eine Reihe von Katalysatoren herstellen und testen. Außerdem kann sie Selektivitäten – die Anteile des gewünschten Stoffs im Endprodukt – und Ausbeuten, also Produktmengen, vorhersagen. Aktuell ist das Modell auf einzelne Anwendungen beschränkt. Damit sich das ändert, benötigen wir mehr geeignete Daten sowie eine Kombination von KI und Robotik.

Frederik Sandfort, Doktorand am Organisch-Chemischen Institut der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, ist einer der Autoren der Studie „A Structure-Based Platform for Predicting Chemical Reactivity“.

BESSER IST DAS Piks fürs Leben

In den vergangenen 30 Jahren ist die weltweite Kindersterblichkeit um fast zwei Drittel gesunken. Impfstoffe spielen dabei eine zentrale Rolle. Starben 1990 noch 5,1 Millionen Kinder infolge von Krankheiten, die sich mit einer Impfung bekämpfen lassen, waren es zuletzt noch 1,8 Millionen. Haupttreiber dieses Fortschritts sind die Impfstoffe DTP gegen Diphtherie, Tetanus und Keuchhusten sowie MMR gegen Masern, Mumps und Röteln. Beim Tod aufgrund von Krankheiten, gegen die es keine Impfmöglichkeit gibt, fiel der Rückgang der Fallzahlen hingegen moderater aus.



Quelle: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME)

19

PROZENT

jährlich beträgt die Wachstumsrate des Markts für 3D-Druckmaterialien laut einer Prognose des Marktforschungsinstituts Research and Markets bis 2024. Vor allem der medizintechnische Bereich, zum Beispiel die Herstellung von Implantaten, ist ein wichtiger Treiber dieser Entwicklung.

AUTONOME HEILUNG

Die Coronakrise zeigt: Unterbrochene Lieferketten können mitunter zu Versorgungsengpässen führen. Bei Medikamenten ist das besonders riskant. Forscher am Potsdamer Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung haben eine mögliche Lösung gefunden: ein autonomes, computergesteuertes Labor, das organische Substanzen schnell und direkt vor Ort produziert, darunter Grundstoffe für Arznei.



H wie Hoffnung

TEXT TOM RADEMACHER

Heißes Eisen:
Thyssenkrupp produziert in
seinen Werken jährlich fast
zwölf Millionen Tonnen
Rohstahl. Statt Kohlenstaub
soll in den Hochöfen künftig
Wasserstoff für die nötige
Betriebstemperatur sorgen.



Er verbrennt zu nichts als Wasser, die
Vorräte sind unerschöpflich, die
Verwendungsmöglichkeiten vielfältig:
Wasserstoff hat das Zeug, die Wirt-
schaft grundlegend zu verändern. Evonik
leistet an vielen Stellen einen Beitrag
dazu, dass eine Vision Wirklichkeit wird.



In Duisburg-Bruckhausen ist alles gigantisch. Auf einer Fläche, 22-mal so groß wie der Vatikan, produziert Thyssenkrupp Steel Europe hier etwa jede vierte Tonne deutschen Stahls – rund 11,5 Millionen Tonnen im Jahr. Die Hochöfen des Werks ragen mehr als 100 Meter in den Himmel. Seit Jahrzehnten spucken sie jede Stunde Hunderte Tonnen glühendes Eisen aus.

Ganz klein und unsichtbar hat jedoch ein Wandel begonnen, der diese scheinbar unverrückbaren Riesen komplett verändern soll. Mit Förderung des Landes Nordrhein-Westfalen probiert Thyssenkrupp den ersten Schritt in Richtung klimaneutraler Stahlproduktion. Statt Kohlenstaub wird dazu Wasserstoff in einen Hochofen geblasen – zunächst testweise „in homöopathischen Mengen“, wie es beim Unternehmen heißt. Wenn aber alles gut läuft, soll bis Ende 2021 der erste Hochofen umgestellt werden. Weil Wasserstoff nicht zu Kohlendioxid, sondern zu Wasserdampf verbrennt,

könnte Thyssenkrupp damit gut drei Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr einsparen – mehr, als alle deutschen Inlandsflüge verursachen. Und das ist erst der Anfang.

Wasserstoff soll der Energieträger der Zukunft werden, nicht nur in der Stahlbranche. Wirtschaft und Politik in aller Welt treiben die Entwicklung mit Hochdruck voran. In der Europäischen Union könnte deren „Hydrogen Roadmap“ zufolge bis 2050 knapp ein Viertel des EU-weiten Energiebedarfs mit Wasserstoff gedeckt werden. Bis zu 5,4 Millionen Jobs sollen entstehen in einer Wasserstoffwirtschaft, die das geruchslose Gas mit dem Elementsymbol H in allen möglichen Bereichen nutzt. Von der Heizung im Keller über den Linienbus bis hin zu Raffinerien und Stahlwerken – all das ließe sich klimaneutral betreiben, dank grünem Wasserstoff, hergestellt mittels erneuerbarer Energie aus Wind und Sonne. Die meisten Puzzlestücke dieser Zukunftsvision sind bereits vorhanden. Es scheint, →

Grauer Wasserstoff: In einem Steam Reformer wie dieser Evonik-Anlage in Marl werden Kohlenwasserstoffe (meist Methan) aufgespalten in Wasserstoff und Kohlendioxid.



als müssten sie nur noch zusammengesetzt werden. Doch noch sind viele Fragen zur Umsetzung offen. Einige Antworten darauf will auch Evonik geben.

„Das Wasser ist die Kohle der Zukunft“, schrieb Jules Verne vor fast 150 Jahren. Die Energie von morgen sei Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt werden könne: in Wasserstoff und Sauerstoff. Ihre Faszination hat diese Idee nie verloren. Ende der 1980er-Jahre hießte das Nachrichtenmagazin Spiegel die „Energie der Zukunft“ auf den Titel. Solarenergie und Wasserstoff würden erfüllen, was die Kernenergie versprochen, aber nie gehalten habe.

Und auch heute sind die Hoffnungen, die sich mit dem H verbinden, groß. „Wir müssen die Produktion und den Einsatz von Wasserstoff so schnell wie möglich vorantreiben“, sagt Bundesumweltministerin Svenja Schulze. „Wir dürfen beim Thema Wasserstoff nicht

noch mehr Zeit verlieren“, drängt Bundesforschungsministerin Anja Karliczek. Und Kabinettskollege Peter Altmaier aus dem Wirtschaftsressort fordert, Deutschland müsse „bei Wasserstoff die Nummer 1 werden!“.

Die Begeisterung hat gute Gründe. Die Qualitäten des Wasserstoffs klingen angesichts unserer Klimasorgen fast wie Utopie: Er verbrennt zu nichts als Wasser. Kein Ruß, kein Kohlendioxid, keine Stickoxide bleiben übrig – theoretisch zumindest löst Wasserstoff auf einen Schlag wesentliche Probleme des Erdölzeitalters. Zudem sind die Vorräte praktisch unerschöpflich. Neun von zehn Atomen im gesamten Universum sind Wasserstoffatome. Auf der Erde ist der Stoff vor allem im Meerwasser enthalten. Der Rest findet sich chemisch gebunden in praktisch allen fossilen und biologischen Rohstoffen. Wirtschaftlich wird das Potenzial des Wasserstoffs jedoch kaum genutzt.

WICHTIGER BAUSTEIN FÜR DIE CHEMIE

Bedeutendster Nutzer bislang ist die chemische Industrie, die damit Moleküle baut. Mehr als die Hälfte des weltweit produzierten Wasserstoffs wird zu Ammoniak verarbeitet, vor allem für Düngemittel. Auch Raffinerien brauchen immense Mengen, etwa zum Aufspalten (Cracken) und Entschwefeln von Erdölprodukten.

Evonik nutzt Wasserstoff zur Herstellung zahlreicher Produkte, vor allem aber zur Synthese von Wasserstoffperoxid (H_2O_2). Das wird unter anderem als umweltschonendes Bleichmittel in der Papier- und Zellstoffproduktion eingesetzt, dient aber auch zum Sterilisieren von Getränkeverpackungen oder als Treibstoff in der Raumfahrt. Mit mehr als einer Million Tonnen Jahreskapazität



»Wir dürfen beim Thema Wasserstoff nicht noch mehr Zeit verlieren.«

ANJA KARLICZEK,
BUNDESFORSCHUNGSMINISTERIN

ist Evonik einer der größten Hersteller von H_2O_2 weltweit. Eine wichtige Rolle spielt Wasserstoff außerdem in der Aminosäureproduktion für Tierfutter sowie in den Herstellungsprozessen für Silane, pyrogene Kieselsäure und Spezialoxide – vielseitige Produkte, die etwa in Klebstoffen, Kunststoffen oder Autobatterien zum Einsatz kommen. Nicht selten fällt Wasserstoff auch als Neben- oder Koppelprodukt an und wird anderswo im Verbund weiterverwendet.

Künftig will das Unternehmen in allen Gliedern der Wasserstoff-Wertschöpfungskette – von der Gewinnung über die Verteilung bis zur Nutzung – vertreten sein. „Wer die Energiewende will, kommt an der Sektorkopplung mittels Wasserstoff nicht vorbei“, sagt Oliver Busch, Leiter Sustainable Businesses bei der Creavis, der strategischen Innovationseinheit von Evonik, die an neuen Geschäften in Sachen Nachhaltigkeit tüftelt. „Und wenn wir's richtig machen, auch nicht an uns.“ Gemeinsam mit Axel Kobus, dem Leiter des Geschäftsgebiets Verfahrenstechnik und Engineering bei Evonik, will Busch das Thema Wasserstoff vorantreiben. „Wir als Unternehmen haben besonders viele Berührungspunkte“, sagt Kobus. So stellt Evonik Wasserstoff für zahlreiche Anwender her und betreibt Wasserstoffpipelines für die Versorgung verschiedener Industrieunternehmen. Der Konzern liefert zudem innovative Prozesstechnologien und Produkte, die Lücken in der Wasserstoffökonomie schließen könnten. Kobus und Busch sind sich einig: „Hier können wir als Lösungsanbieter einen wesentlichen Mehrwert leisten.“

GRÜN IST DIE HOFFNUNG

Wie vielseitig Wasserstoff bereits heute eingesetzt wird, zeigt sich im Chemiepark Marl besonders deutlich. „Der Stoff kommt auf dem Gelände mit knapp 20 Unternehmen in fast jedem Labor und jeder Anlage zum Einsatz – nicht immer in großen Mengen, aber fast immer bei entscheidenden Prozessen“, sagt Swen Fritsch. Fritsch ist Betriebsleiter für den Wasserstoffbetrieb am Standort. Dessen sogenannter Steam Reformer liefert mehrere 10.000 Kubikmeter reinen Wasserstoff pro Stunde. Der Großteil der Produktionsmenge deckt den Bedarf vor Ort, einen Rest zapfen Industriegasversorger aus der Region an eigenen Abfüllstationen direkt ab. Marl besitzt die größte Wasserstofftankstelle Europas.

Steam Reformer wie der in Marl decken heute mehr als 95 Prozent des weltweiten Wasserstoffbedarfs. Mittels Hitze, Druck und Katalysatoren gewinnen sie Wasserstoff aus fossilen Quellen wie Erdgas. Dabei entsteht Kohlendioxid (CO_2) – rund zehn Tonnen pro Tonne Wasserstoff. Der Internationalen Energieagentur (IEA) zufolge verursachte die Wasserstoffproduktion zuletzt den Ausstoß von weltweit etwa 830 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr – das entspricht etwas mehr als den Emissionen des Ver-

einigten Königreichs, Frankreichs und Tschechiens zusammen. Keine gute Bilanz für den Hoffnungsträger der Energiewende.

Doch es ginge auch anders. Wasserstoff lässt sich per Elektrolyse direkt aus Wasser gewinnen. Das Prinzip ist altbekannt und simpel: Eine Spannung zwischen zwei Elektroden spaltet Wasser in seine chemischen Bausteine Sauerstoff und Wasserstoff. In der Brennstoffzelle wird der Prozess umgekehrt: Wasserstoff und Sauerstoff aus der Luft reagieren verbrennungsfrei zu Wasser. Dabei entsteht elektrischer Strom und etwas Abwärme. In diesem Kreislauf ist Wasserstoff das Speichermedium für elektrische Energie. Es ist dieser potenziell klimaneutrale Kreislauf, der die Energiewende beflügeln soll und derzeit genauso viel Aufmerksamkeit wie Kapital anzieht. →

»Wer die Energiewende will, kommt an der Sektorkopplung mittels Wasserstoff nicht vorbei.«

OLIVER BUSCH, LEITER SUSTAINABLE BUSINESSES BEI DER CREAVIS



Grüner Wasserstoff: Künftig soll mehr Wasserstoff mittels Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt werden.





Grundstoff für die Industrie: Wasserstoff dient als chemische Basis für zahlreiche Produkte, darunter Silane für die Reifenfertigung, Wasserstoffperoxid für die Zellstoffbleiche oder Ammoniak für die Herstellung von Dünger.



Das Zauberwort heißt „Sektorkopplung“ oder „Power-to-X“: Es gilt, „grünen“ Strom zu speichern, transportabel zu machen und vielseitig zu nutzen. Wasserstoff macht das möglich. Er lässt sich direkt dort gewinnen, wo erneuerbare Energie billig zu produzieren ist. Er lässt sich gut speichern und durch Rohre zu weit entfernten Verbrauchern fördern. Und er kann nach Belieben verheizt, stofflich verwendet oder wieder in Strom umgewandelt werden.

HUNGRIGER MARKT

Die Einsatzmöglichkeiten für Wasserstoff sind vielfältig. Personenwagen mit Brennstoffzellen etwa fahren bereits heute mit einer Tankfüllung weiter als die meisten Batterieautos und lassen sich – anders als Plug-in-Fahrzeuge – in wenigen Minuten volltanken. Bislang ist der kommerzielle Erfolg jedoch ausgeblieben: In den USA waren nach letzter Zählung ganze 6.558 Wasserstoffautos unterwegs, in Deutschland weniger als 400. Noch fehlt das Tankstellennetz, noch ist die Technik zu teuer und zu klobig für den Massenmarkt. Moderne Materialien könnten helfen, das zu ändern. So lassen sich dank speziellen Vernetzern von Evonik sichere Wasserstoffspeichertanks für Fahrzeuge und Tankstellen aus faserverstärktem Kunststoff herstellen, die deutlich leichter und günstiger als heutige Gasbehälter sind.

Schneller als bei Pkw dürfte sich die Technik bei Nutzfahrzeugen durchsetzen. Linienbusse zum Beispiel fahren immer dieselbe Tankstelle an, wiegen voll besetzt an die 20 Tonnen und kosten in der Anschaffung ohnehin mehr als 200.000 €. Da fallen heutige Nachteile der Brennstoffzelle weniger ins Gewicht. Ähnlich auf der Schiene: Vor allem auf langen Nebenstrecken ohne Oberleitung seien Wasserstoffzüge erste Wahl, um Dieselloks zu ersetzen, befindet eine Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Rund um Cuxhaven verkehrt bereits regulär Deutschlands erster Wasserstoffzug. Schiffswerften proben ebenfalls den Einsatz der Technik. Norwegen will seine vielen Fähren auf Brennstoffzellen umrüsten. Und selbst die Luftfahrt hofft auf Wasserstoff, der entweder Brennstoffzellen oder, weiterverarbeitet zu Methanol und dann zu Kerosin, normale Turbinen antreiben soll.

Große Brennstoffzellen zur Rückverstromung sind derweil interessant als Puffer fürs Stromnetz, und gleich mehrere Heizungshersteller haben kleine Aggregate, die gleichzeitig Strom und Wärme liefern, für den Hausgebrauch im Angebot.

Den größten Wasserstoffhunger melden indes Industrieunternehmen an – allen voran die Stahlhersteller. Bis 2050, heißt es beim Branchenverband, könne die deutsche Stahlerzeugung komplett CO₂-neutral laufen. Das muss sie wohl auch, wenn steigende Strafzahlungen für den Ausstoß von Kohlendioxid sie nicht vom Weltmarkt drängen sollen. Thyssenkrupp will die Emissionen seiner Hochöfen mit Wasserstoff mindern und die restlichen Abgase für chemische Produkte nutzbar machen. Carbon2Chem heißt ein Entwicklungsprojekt, an dem Evonik

weiter auf Seite 16 →



Weltweite Vorreiter

Während in manchen Staaten Wasserstoff nur punktuell zum Einsatz kommt, werden anderswo ambitionierte Masterpläne entwickelt. Sechs Länder, sechs Strategien



JAPAN

Japan gilt seit Langem als einer der ambitioniertesten Verfechter der Wasserstoffzukunft – allen voran im Mobilitätssektor. Die Regierung will den Preis für Wasserstoff bis 2050 um 90 Prozent senken, sodass er billiger ist als Erdgas. Maßgeblich dazu beitragen soll ein Projekt, bei dem in Australien Wasserstoff aus Braunkohle gewonnen werden soll, das entstehende CO₂ unterirdisch verpresst und der Wasserstoff per Schiff nach Japan verfrachtet wird. Das an fossilen Rohstoffen arme Japan importiert schon heute mehr als 90 Prozent seines Energiebedarfs.



SAUDI-ARABIEN

In Erdöl und Erdgas fördernden Ländern wie Saudi-Arabien ist die Produktion von grauem Wasserstoff aus Erdgas besonders günstig. Auch blauer Wasserstoff, bei dem entstehendes Kohlendioxid im Erdreich verpresst wird, lässt sich hier laut Internationaler Energieagentur billiger produzieren als irgendwo sonst. Der Erdöl-multi Saudi Aramco hat Mitte 2019 seine erste Wasserstofftankstelle im Land eröffnet.



NIEDERLANDE

Angesichts des für 2022 beschlossenen Ausstiegs aus der Erdgasförderung bringen die Niederlande ihre Nordregion rund um Groningen als künftiges „Hydrogen Valley“ Europas in Stellung. Mit grünem Strom aus Offshorewindparks in der Nordsee soll genügend Wasserstoff für die Industrie, die Region und für den Export entstehen. Der vormals größte Erdgaslieferant der EU könnte über frei gewordene Leitungen auch seine Nachbarn versorgen.



USA

In den Vereinigten Staaten gibt vor allem Kalifornien hohe Ziele in Sachen Klimaschutz und Energiestandards vor. Und so werden dort auch die ambitioniertesten Pläne in Sachen Wasserstoffwirtschaft geschmiedet: Der Bundesstaat im Südwesten will allein bis 2030 mindestens 1.000 Wasserstofftankstellen eröffnen und eine Million Wasserstofffahrzeuge zulassen – so viele, wie ganz China bis dahin anstrebt. Grauer Wasserstoff ist in den USA dank der heimischen Schiefergasproduktion billiger als in vielen anderen Ländern, was den Wechsel zu grünem Wasserstoff ohne politische Preiseingriffe weniger attraktiv macht.



NORWEGEN

Vor allem Lastwagen und Fähren sollen in Norwegen bald mit Wasserstoff laufen. Das Land könnte zudem eine international bedeutsame Rolle beim blauen Wasserstoff spielen: Die Regierung in Oslo treibt den Aufbau von CO₂-Lagerstätten in großem Stil voran. Nach jahrzehntelanger Förderung hat der Öl- und Gasexporteur große unterirdische Kapazitäten, die sich bestens eignen, um große Mengen Klimagas aus ganz Europa einzuspeichern.



SÜDKOREA

Seoul hat im vorigen Jahr besonders ambitionierte Ziele vor allem für den Mobilitätssektor vorgelegt: Bis 2030 will Südkorea führender Hersteller von Brennstoffzellen und Wasserstoffautos werden. Und 2035 sollen laut Verkehrsministerium bereits alle Nutzfahrzeuge im Land auf Wasserstoffantrieb umgestellt sein. Zur Versorgung soll in der Hafenstadt Ulsan die größte Flüssigwasserstoffanlage der Welt entstehen.



»Unsere Kunden wollen konkrete Antworten, wenn es um den CO₂-Rucksack geht, den unsere Produkte mitschleppen.«

AXEL KOBUS, LEITER DES GESCHÄFTSGEBIETS
VERFAHRENSTECHNIK UND ENGINEERING
BEI EVONIK

beteiligt ist und das Wege aufzeigen soll, wie sich aus verbranntem Kohlenstoff chemische Vorprodukte gewinnen lassen. Langfristig setzen allerdings praktisch alle Stahlproduzenten auf die sogenannte Direktreduktion, die dank Wasserstoff ganz ohne Kohlenstoff und Koks auskommt.

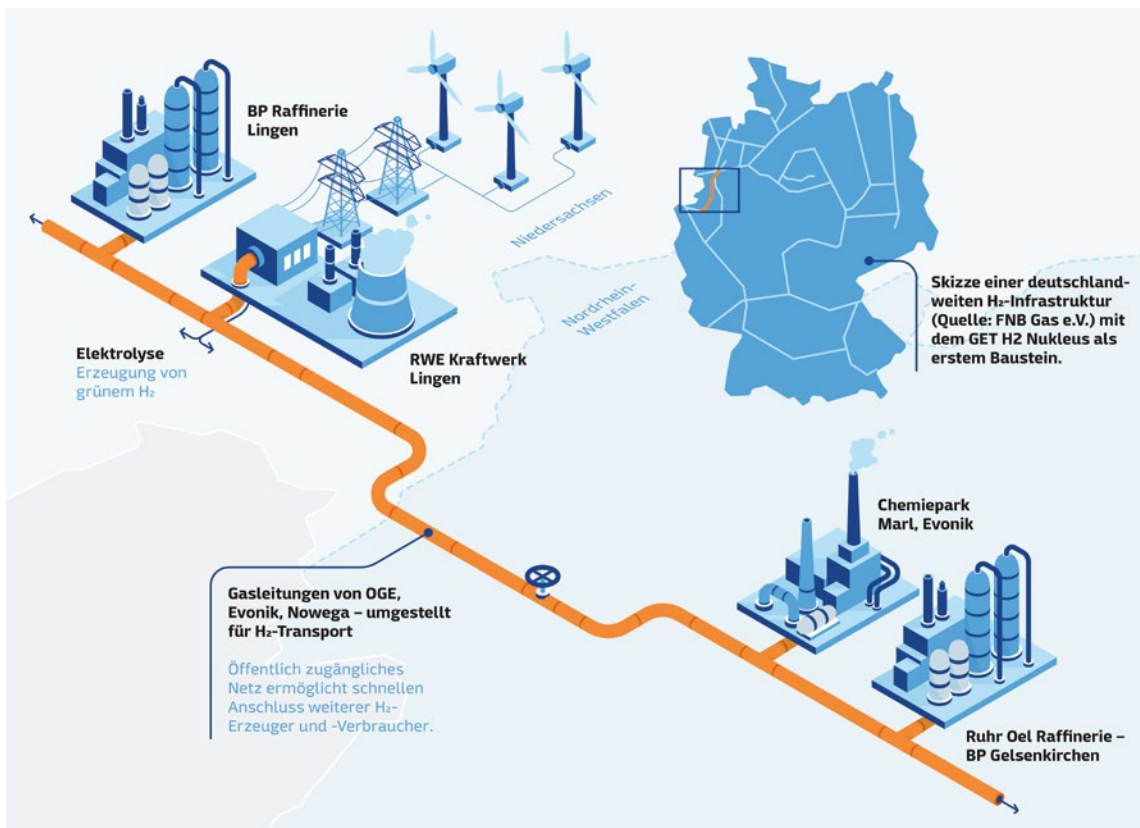
Dieser Technologiewandel wird Thyssenkrupp in den kommenden Jahrzehnten rund zehn Milliarden € kosten, heißt es in Duisburg. Und die dazu erforderlichen Wasserstoffmengen sind gewaltig: „Um 2050 wer-

den wir jährlich rund acht Milliarden Kubikmeter Wasserstoff benötigen“, sagt Jens Reichel. Er leitet bei dem Duisburger Konzern den Bereich Nachhaltige Produktion. Um die Menge per Elektrolyse zu produzieren, seien 40 Terawattstunden Energie nötig, etwa so viel, wie acht der größten Erdgaskraftwerke vom Typ Irching 5 oder rund 3.800 Offshorewindkraftträder der Drei-Megawatt-Klasse liefern.

ANSCHUB FÜR DIE ELEKTROLYSE

Ein enormer Ansporn für die Entwickler effizienter Elektrolyseverfahren. Die älteste und bislang am häufigsten verwendete Technologie der Wasserstoffproduktion mittels Strom ist die alkalische Elektrolyse. Eine neuere Technologie namens Proton-Exchange-Membrane- oder kurz PEM-Elektrolyse ist seit etwa zwei Jahrzehnten auf dem Vormarsch. Weitere Verfahren wie die sogenannte Solid-Oxide-Elektrolyse versprechen noch mehr Effizienz, sind aber derzeit erst Gegenstand der Forschung. Auch Evonik arbeitet an Schlüsselmaterialien für neue Verfahren (siehe Artikel Seite 28).

Laut IEA stammen derzeit weniger als 0,1 Prozent des weltweit produzierten Wasserstoffs aus Elektrolysen. Der Ausbau der Kapazitäten hat zwar begonnen, die Datenbank der IEA zählt seit dem Jahr 2000 mehr als 300 Wasserstoffprojekte in Bau oder Planung, die meisten davon in Deutschland. Im Schnitt verfügten



KERN-GESCHÄFT

Unter dem Namen Nukleus treibt die Initiative GET H₂ unter Beteiligung von Evonik ein Projekt voran, bei dem mit Windenergie erzeugter Wasserstoff über eine 130 Kilometer lange bestehende Pipeline zu verschiedenen Industrieabnehmern transportiert werden soll.



Wüstentraum: Künftig könnte Wasserstoff in großem Stil in sonnenreichen Regionen wie Nordafrika produziert und dann per Pipeline oder Tankbehälter zu den Verbrauchern transportiert werden.

neue Elektrolysen aber zuletzt gerade einmal über eine Leistung von einem Megawatt. In Wesseling bei Köln baut Shell gerade die weltweit größte Elektrolyse mit zehn Megawatt. Die nächste Generation soll laut IEA schon 100 Megawatt und mehr liefern. Aber von diesen Anlagen brauchte man zehn, um ein einziges Stahlwerk mit Wasserstoff zu versorgen. Nicht wenige Experten sind daher skeptisch, ob Deutschland seinen prognostizierten Wasserstoffbedarf schnell genug mittels Elektrolyse decken können.

Zu den technischen Hürden kommen die wirtschaftlichen hinzu: Derzeit ist grüner Wasserstoff in Mitteleuropa noch etwa dreimal so teuer wie der sogenannte graue aus Erdgas. Weil moderne Steam Reformer wie in Marl effizient und verlässlich Wasserstoff liefern, der gerade beim Aufbau der Netze unerlässlich ist, werden sie in den Augen vieler Branchenexperten mittelfristig noch eine entscheidende Rolle spielen müssen. Das dabei entstehende Kohlendioxid ließe sich einfangen und einlagern. Man spricht in diesem Zusammenhang von „blauem“ Wasserstoff. Großtechnisch geht das etwa in unterirdischen Hohlräumen, die nach der Förderung von Erdgas zurückbleiben. Die sind aber nur in wenigen Regionen zu finden, zudem ist die Technik umstritten (siehe Streitgespräch Seite 22).

Eine andere Möglichkeit ist es, das ausgestoßene CO₂ einzufangen und weiterzuarbeiten. So könnte der Steam Reformer in Marl statt Wasserstoff und Kohlendioxid auch Synthesegas, eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, produzieren – ein gängiges Vorprodukt für die Chemie. Evonik selbst arbeitet in einer ganzen Reihe von Forschungsprojekten, um in kleinen, modularen Anlagen aus Industrieabgasen wertvolle Zwischen- und Spezialprodukte für die Che-



mie zu gewinnen. So verfolgt das Unternehmen mit dem Kraftwerksbetreiber STEAG und der Universität Duisburg-Essen unter dem Projektnamen Vulcanus die Entwicklung einer neuen Prozesskette, bei der aus Kohlendioxid und Methan höhere Alkohole zur Produktion von Hochleistungskunststoffen gewonnen werden.

KALT GEPRESST

Mehr und günstigeren Wasserstoff aus regenerativen Quellen könnten Industriestaaten künftig womöglich auch importieren, zum Beispiel aus Nordafrika. Dort hat man vor gut zehn Jahren das Projekt Desertec ins Leben gerufen. Ursprünglich sollte Sonnen- und Windstrom aus der Sahara über Gleichstromtrassen durchs Mittelmeer nach Europa gelangen. Daraus wurde nichts. Die neue Hoffnung: Als grüner Wasserstoff könnte der Saharastrom per Pipeline oder per Schiff zu den Verbrauchern geliefert werden.

Der Transport von Wasserstoff ist zwar im Prinzip einfach, aber nicht auf jedem Weg effizient. Wegen der extrem geringen Dichte des Gases können selbst 40 Tonnen schwere Lkw mit ihren imposanten →

weißen Hochdrucktanks teilweise nur etwa 300 Kilogramm Wasserstoff laden. Das ist etwas mehr als die erlaubte Zuladung eines Smart. Sogar die größten verfügbaren Tankwagen transportieren bei 500 Bar Druck maximal lediglich 1,1 Tonnen Wasserstoff.

Auch beim Speichern von Wasserstoff bereitet die geringe Dichte Probleme. Während sich in Chemieparks wie Marl überall Gasometer und große Druckbehälter mit Sauerstoff, Stickstoff, Methan oder Ethylen finden, sucht man große Wasserstofftanks vergebens. Wasserstoff lässt sich nur unter immensem Druck zu wirtschaftlichen Tankvolumina verdichten. In großem Stil kann Wasserstoff zwar in unterirdischen Hohlräumen gespeichert werden, die nach der Förderung von Salz oder Erdgas zurückbleiben. Aber die sind ebenso wie natürliche CO₂-Lager nur in wenigen Gegenden zu finden. Flüssig und damit besonders kompakt speichern lässt sich Wasserstoff erst bei minus 253 Grad Celsius. Dazu sind viel Kühlenergie und eine aufwendige Isolierung nötig.

Für unterwegs: In Norddeutschland rollen Wasserstoffzüge bereits im Linienbetrieb. 2016 hob erstmals der Versuchsflieger HY4 mit einem Brennstoffzellenantrieb ab.



„Wirklich effizient lässt sich Wasserstoff eigentlich nur per Rohrleitung verteilen“, sagt Thomas Basten. Er leitet bei Evonik das Logistikgeschäft mit Pipelines für allerhand Gase und Flüssigkeiten in der Industrie. Der Konzern betreibt gut 2.000 Kilometer davon in ganz Deutschland, drei Viertel davon im Auftrag anderer Unternehmen. In dieser Funktion beteiligt sich Evonik auch an einer Initiative namens GET H2, die ein öffentliches Wasserstoffnetz für Deutschland plant. Den „Kern“ soll zunächst eine 100 Megawatt große Elektrolyse bilden, die der Stromkonzern RWE in Lingen plant – daher der Projektname Nukleus. Dort im Emsland, unweit zahlreicher Windparks auf dem Land und in der Nordsee, soll Wasserstoff mittels Windstrom entstehen.

In Form von grünem Wasserstoff will RWE die Windenergie per Pipeline zu Industrieverbrauchern fördern. Einer davon ist die Raffinerie von BP vor Ort, weitere finden sich in Nordrhein-Westfalen – im Chemiepark Marl (siehe Grafik Seite 16). Ein 130 Kilometer langes Stahlrohr könnte leicht bis zu 100.000 Kubikmeter Wasserstoff pro Stunde liefern und Verbraucher in der Region mitversorgen. Das Beste daran: Eine solche Verbindung besteht bereits, zum Teil wird sie von Evonik betrieben. Es handelt sich um Leitungen, die teilweise durch den Ausstieg der Niederlande aus dem Erdgasgeschäft frei werden und sich auf Wasserstoff umstellen lassen.

WASSERSTOFF IM HUCKEPACK

„Das Pipelinegeschäft ist nichts für arme Leute“, sagt Basten. Pipelines zu verlegen sei schon immer teuer gewesen. Vor allem der bürokratische Aufwand verschlinge jede Menge Ressourcen. Bestehende Leitungen zu nutzen hat da eine Menge Charme. Deutschland verfügt heute über rund 50.000 Kilometer Hochdruckleitungen für Erdgas. Teile dieser Infrastruktur könnten zusätzliche Stromtrassen überflüssig machen, wenn grüner Strom in Form von Wasserstoff darin fließt.

Diesen Gedanken entwickelt man bei Evonik weiter: Dank einer konzerneigenen Membrantechnologie ließen sich auch die 500.000 Kilometer des deutschlandweit verzweigten Erdgasverteilnetzes teilweise nutzen. Im handelsüblichen Erdgas sind schon heute einige Prozent Wasserstoff enthalten. Gewissermaßen huckepack könnten aber problemlos auch größere Mengen in der Leitung mitfließen. Dann ließe sich mit den Sepuran-Membranen von Evonik an verschiedenen Punkten im Netz Wasserstoff abtrennen, um etwa Tankstellen oder andere Verbraucher zu versorgen.

Damit die Vision von der Wasserstoffökonomie nach 150 Jahren endlich Wirklichkeit wird, muss viel zusammenkommen. Das Netz, die Versorgung, die Nachfrage, die Technologie – alles muss sich parallel entwickeln, und zugleich muss der Preis für grünen Wasserstoff sinken. Hier sind nicht zuletzt Regierungen gefragt.



Für zu Hause: Der Automobilkonzern Daimler entwickelt die Brennstoffzellentechnologie für stationäre Energieanlagen weiter.



»Das Pipeline-geschäft ist nichts für arme Leute.«

THOMAS BASTEN, LEITER DES LOGISTIK-GESCHÄFTS MIT PIPELINES BEI EVONIK

„Alle warten auf die nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung“, sagt Basten. „Sie müsste die Wasserstoffelektrolysen von der EEG-Umlage befreien, das Energiewirtschaftsgesetz so ändern, dass Wasserstoff in öffentlichen Netzen transportiert werden kann, und auf der Verbraucherseite Anreize für grünen Wasserstoff setzen.“ Wichtig ist es, nationale Planungen und internationale Kooperationen zu koordinieren. Auch Evonik will seine zahlreichen Aktivitäten in Sachen Wasserstoff unter eine umfassende Strategie stellen. Die Experten im Konzern spüren den wachsenden Druck des Markts: „Unsere Kunden wollen konkrete Antworten, wenn es um den CO₂-Rucksack geht, den unsere Produkte mit-schleppen“, sagt Verfahrenstechnik-Ingenieur Axel Kobus, in dessen Verantwortungsbereich auch das sogenannte Lifecycle-Management zu Hause ist.

Allen voran die Wasserstoffperoxid-Sparte des Konzerns evaluiert deshalb, wann und wie grüner Wasserstoff zu marktfähigen Preisen bezogen werden kann – und wie man bis dahin die Kohlendioxid-emissionen der eigenen Steam Reformer einfängt und weiterverwertet.

Anders als in der Stahlbranche und in der Energiewirtschaft gehe es in der Chemie aber nicht darum, den Kohlenstoff aus den Prozessen zu verbannen. Er sei ein Grundbaustein für Chemieprodukte und schon deshalb viel zu wertvoll, um ihn verbrannt in den Himmel zu blasen, sagt Oliver Busch. „Das Ideal, an dem wir in der Chemie arbeiten, sind geschlossene Stoffkreisläufe“, so der Creavis-Manager. „Wasserstoff bietet die einmalige Chance, Stoff- und Energiekreisläufe gleichzeitig zu schließen.“ Man muss nur noch alle Puzzleteile zusammensetzen. —

FARBENLEHRE DES WASSERSTOFFS



GRÜNER WASSERSTOFF

Wird Wasserstoff zum Beispiel per Elektrolyse mit erneuerbarem Strom gewonnen, entsteht kein CO₂.



GRAUER WASSERSTOFF

Im Steam Reformer und aus fossilen Energieträgern wie Erdgas gewonnen, fallen pro Tonne Wasserstoff rund zehn Tonnen Kohlendioxid an.



BLAUER WASSERSTOFF

Das Kohlendioxid aus dem Steam Reformer lässt sich einfangen und in unterirdische Kavernen – meist alte Erdgaslagerstätten – pressen. Das Verfahren ist umstritten.



TÜRKISER WASSERSTOFF

Bei der sogenannten Methanpyrolyse wird Bio- oder Erdgas in einem Reaktor mit Flüssigmetall gespalten. Neben Wasserstoff entsteht dabei nur fester Kohlenstoff, der sich einlagern oder verwerten lässt. Noch wird an dieser Methode geforscht.

System für morgen

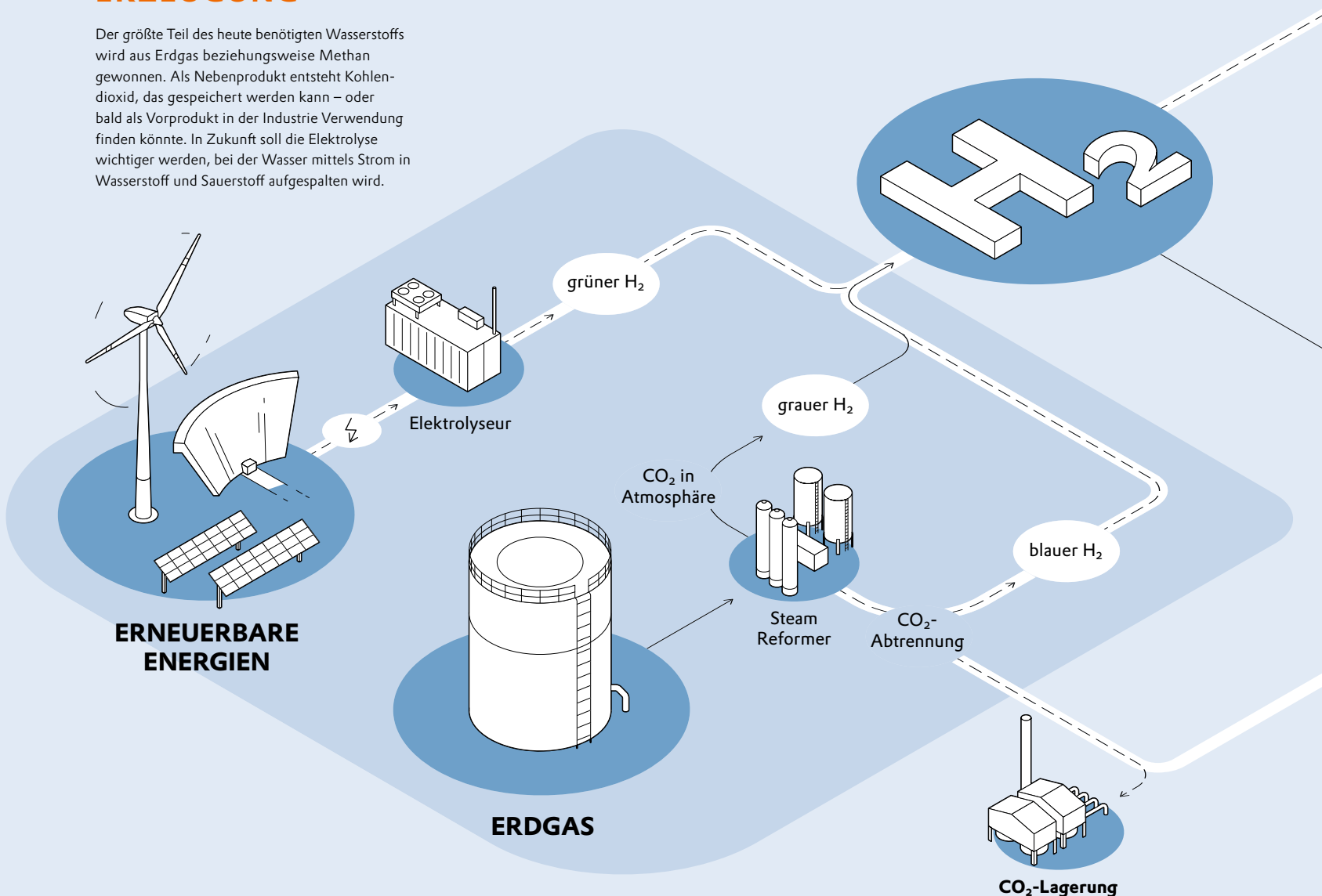
Bereits heute kommt Wasserstoff in der Energiewirtschaft, in der Industrie und in Antriebskonzepten zum Einsatz – manchmal in großem Stil, oft jedoch noch im Rahmen von Tests und Kleinserien. Diese Übersicht zeigt, welches Potenzial das Gas in der Wirtschaft entfalten könnte – von der Erzeugung über die Aufbereitung bis hin zur Verwendung.

INFOGRAFIK MAXIMILIAN NERTINGER

WASSERSTOFF-ERZEUGUNG

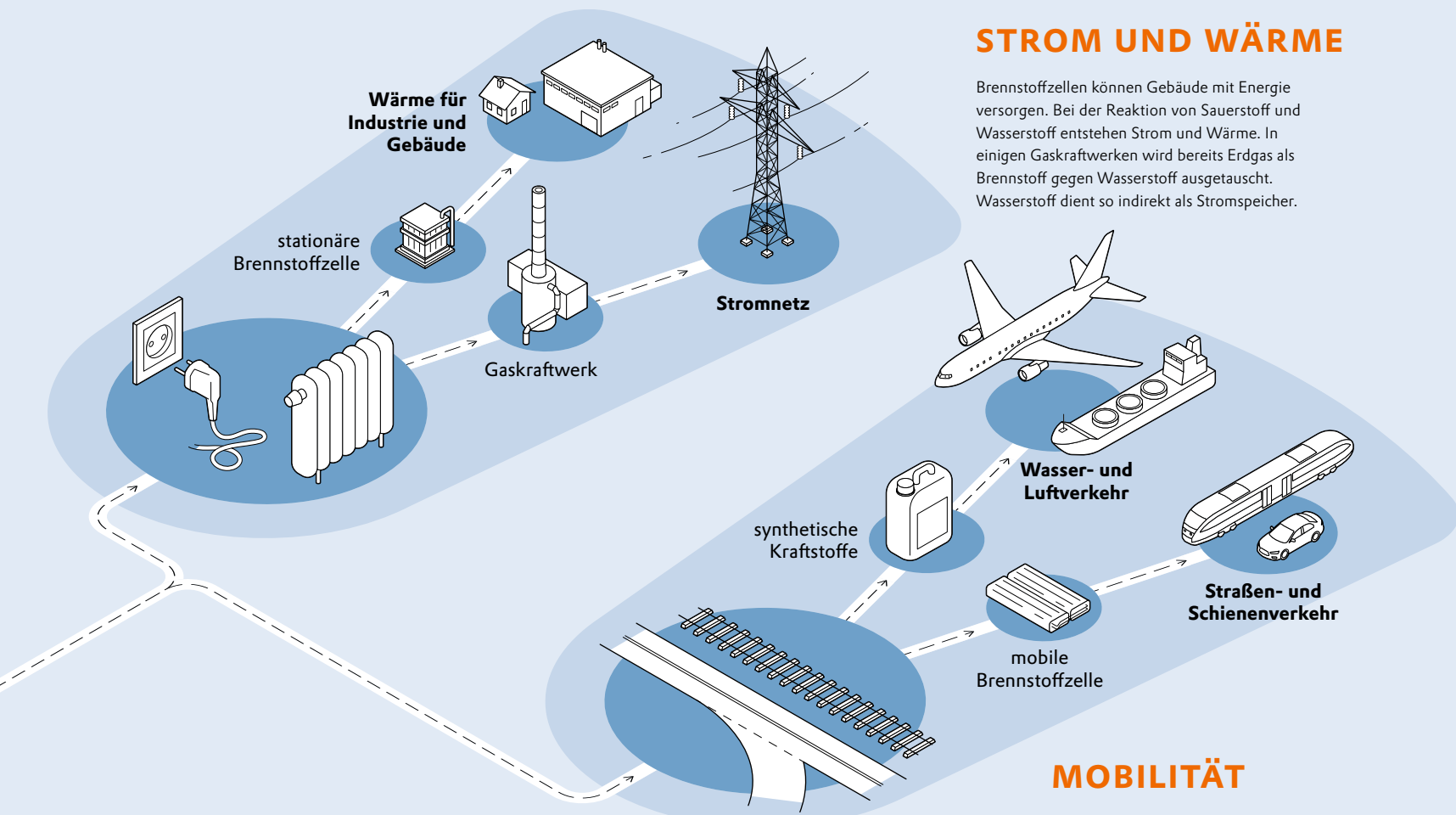
Der größte Teil des heute benötigten Wasserstoffs wird aus Erdgas beziehungsweise Methan gewonnen. Als Nebenprodukt entsteht Kohlendioxid, das gespeichert werden kann – oder bald als Vorprodukt in der Industrie Verwendung finden könnte. In Zukunft soll die Elektrolyse wichtiger werden, bei der Wasser mittels Strom in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird.

- > heutige wichtige Verbindungen
- - -> heutige weniger wichtige Verbindungen
- zukünftige Verbindungen / zukünftig wichtiger werdende Verbindungen



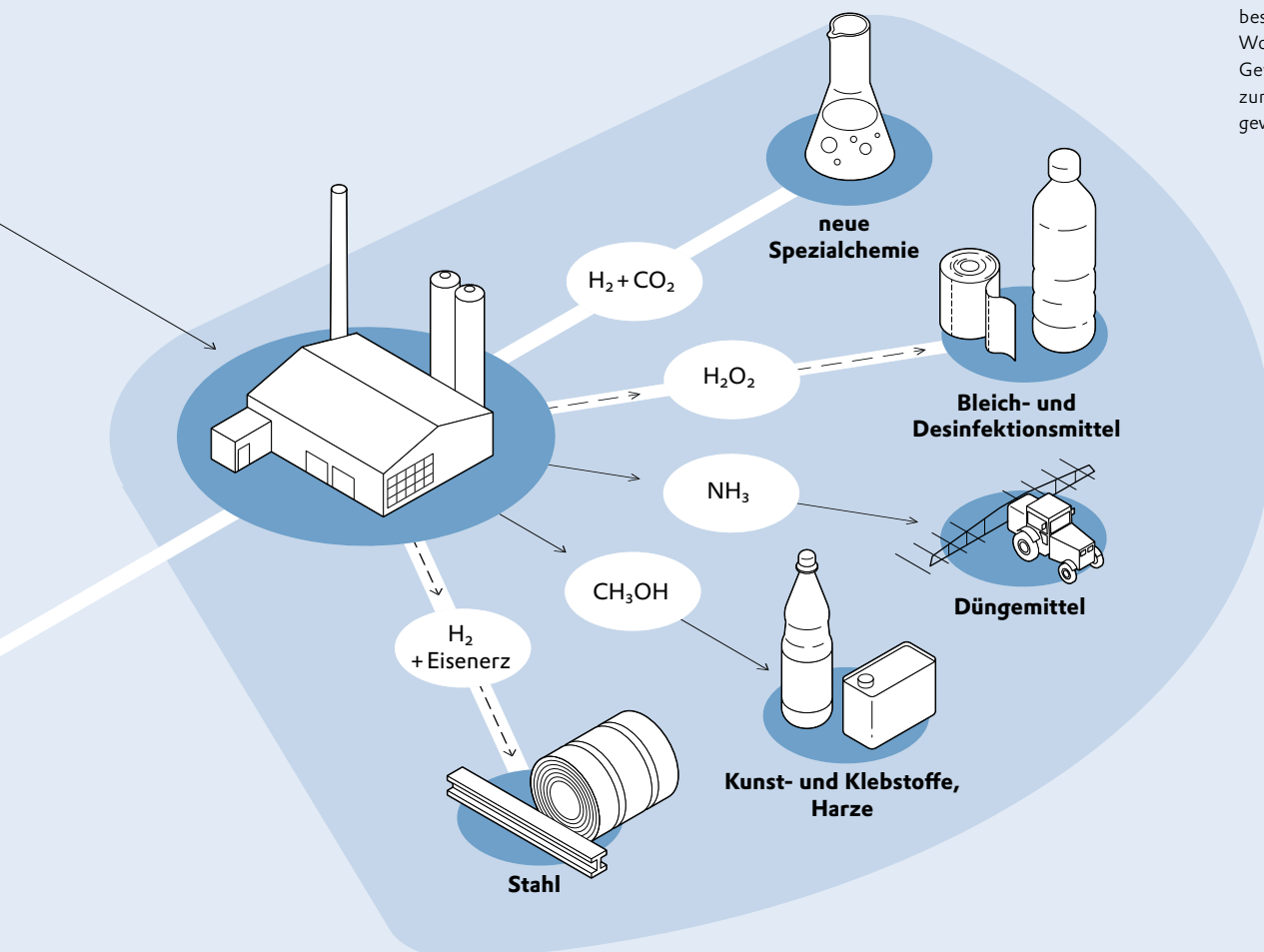
STROM UND WÄRME

Brennstoffzellen können Gebäude mit Energie versorgen. Bei der Reaktion von Sauerstoff und Wasserstoff entstehen Strom und Wärme. In einigen Gaskraftwerken wird bereits Erdgas als Brennstoff gegen Wasserstoff ausgetauscht. Wasserstoff dient so indirekt als Stromspeicher.



MOBILITÄT

In Fahrzeugen erzeugt die Brennstoffzelle Strom für einen Elektroantrieb. Dies funktioniert besonders gut bei Zügen, Lkw oder Bussen. Wo es, wie in der Luftfahrt, auf niedriges Gewicht ankommt, können Kraftstoffe zum Einsatz kommen, die aus Wasserstoff gewonnen werden.



INDUSTRIE

Wasserstoff wird bereits für die Herstellung von Ammoniak (NH_3) oder Methanol (CH_3OH) verwendet, die in zahlreichen Produkten Anwendung finden. Eine wachsende Rolle spielen Wasserstoffperoxid (H_2O_2) sowie der Einsatz bei der Reduktion von Eisenerz in der Stahlindustrie und – in Kombination mit Kohlendioxid (CO_2) – in der Spezialchemie.



**»Wir müssen
die Emissionen
so schnell wie
möglich auf
null bringen«**

HANS-JOSEF FELL, PRÄSIDENT DER ENERGY WATCH GROUP

**»Ideologische
Vorgaben
bringen uns nicht
weiter«**

JORGO CHATZIMARKAKIS, GENERALSEKRETÄR HYDROGEN EUROPE

Der Präsident der Energy Watch Group, Hans-Josef Fell, fordert, konsequent auf grünen Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen zu setzen. Jorgo Chatzimarkakis, Generalsekretär des Industrieverbands Hydrogen Europe, hält dies für nicht ausreichend. Ein Streitgespräch

INTERVIEW
TOM RADEMACHER, JÖRG WAGNER
ILLUSTRATION
ORIANA FENWICK

Herr Chatzimarkakis, Herr Fell, die Internationale Energieagentur hat vor nicht allzu langer Zeit den Durchbruch beim Einsatz von Wasserstoff vorhergesagt. Heute sprechen wir fast nur noch über die Auswirkungen der Coronapandemie auf Wirtschaft und Gesellschaft. Machen Sie sich Sorgen, dass die Vision einer Wasserstoffwirtschaft von der politischen Agenda rutscht?

HANS-JOSEF FELL Die Meldungen, dass Wasserstoff kurz vorm Durchbruch steht, höre ich seit 25 Jahren. Um das Jahr 2000 herum gab es den letzten großen Hype. Leider ist nicht viel passiert. Und ich bin gerade jetzt skeptisch, ob es so schnell klappt, wie wir es bräuchten. Bei relativ niedrigen Ölpreisen besteht noch weniger Anreiz, auf andere Energieformen umzusteigen. Zumal auch die Preise für Emissionszertifikate in den Keller gegangen sind.

JORGO CHATZIMARKAKIS Ich glaube, dass diese Krise die Chance bietet, den Systemwechsel hin zum Wasserstoff zu beschleunigen. Wir hatten gerade eine Onlinekonferenz mit dem Vizepräsidenten der EU-Kommission, Frans Timmermans. Herausgekommen ist ein sehr konkreter Plan für 80 Gigawatt Kapazität zur Produktion von grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Stromquellen: 40 Gigawatt in Europa

und 40 Gigawatt in Afrika. Dieser Plan wäre wohl nicht so schnell zustande gekommen ohne den großen Post-Corona-Marshallplan, der gerade in Brüssel zusammengestellt wird. In der Tat: Von einigen früheren Hype-Höhepunkten sind wir ganz schön runtergepurzelt. Aber inzwischen ist die Technologie reif. Ich selbst fahre im Alltag ein Wasserstoffauto.

Welche Rolle kommt Wasserstoff bei der künftigen Energienutzung zu?

FELL Grüner Wasserstoff wird eine wichtige Rolle spielen beim Umbau auf eine 100-prozentige Versorgung mit erneuerbaren Energien, insbesondere für die Sektorenkopplung, also die Verbindung von Ökostromerzeugung mit Wärme, Verkehr und Industrie. Wir brauchen ihn als Langzeitspeicher für Ökostrom und zur Dekarbonisierung von Industrien. Der Kern für den Klimaschutz und für eine Null-Emission-Ökonomie ist die rasche komplette Umstellung auf erneuerbare Energien, was im Endeffekt 90 Prozent Ökostrom bedeutet. Leider wird dessen Ausbau in Deutschland politisch massiv behindert, vor allem durch die Bundesregierungen unter Angela Merkel.

CHATZIMARKAKIS Herr Fell, ich stimme Ihnen zu, dass wir uns damit beeilen müssen, die Emissionen auf null zu bringen. Ich habe aber ein Problem mit der ideologischen Vorgabe von 90 Prozent Ökostrom. Die Erneuerbaren wurden doch nicht vernachlässigt, schon gar nicht in Brüssel. Wir decken aber unseren Energiebedarf heute in Europa zu 20 Prozent mit Elektronen und zu 80 Prozent mit Molekülen, sprich fossilen Stoffen. Das einfach mal umzudrehen setzt voraus, dass wir massiv in Leitungen und Batterien investieren, also Dinge, die wir derzeit einfach noch nicht haben – von der politischen Genehmigungs- →

»Wenn wir blauen Wasserstoff verbieten, verwehren wir der Industrie den Weg zur Dekarbonisierung.«

JORGO CHATZIMARKAKIS

struktur ganz zu schweigen. Lassen Sie uns also den Erneuerbaren neue Kanäle eröffnen, indem wir sie in Moleküle, nämlich Wasserstoff, verwandeln und über bestehende Gasleitungen transportieren.

FELL Eine Energieerzeugung, die vollständig durch erneuerbare Quellen erfolgt, hat mit Ideologie nichts zu tun, Herr Chatzimarkakis, das ist Naturwissenschaft. Die US-Weltraumbehörde NASA hat im Januar mitgeteilt, dass sich das Erdklima bereits um 1,2 Grad Celsius erwärmt hat. Wir werden also schon 2032 die 1,5-Grad-Marke gerissen haben. Dann können wir uns keine weiteren Emissionen in die Atmosphäre leisten. Ich bin ein großer Freund davon, vorhandene Infrastrukturen für erneuerbare Energien zu nutzen. Die Erdgasinfrastruktur gehört dazu. Aber es darf nicht sein, dass wir die fossile Wirtschaft, zum Beispiel über blauen Wasserstoff, weiter betreiben. Denn damit erreichen wir keinen Klimaschutz – im Gegenteil.

Blauer Wasserstoff wird aus Erdgas gewonnen. Das dabei freigesetzte CO₂ wird eingefangen und unterirdisch verpresst, zum Beispiel in alten Erdgaslagerstätten. Herr Fell, warum ist so dekarbonisierter Wasserstoff für Sie keine klimafreundliche Lösung?

FELL Weil aus Erdgas hergestellter Wasserstoff immense Methanemissionen in der sogenannten Vorkette mit sich bringt – zum Beispiel durch Leckagen bei Förderung und Transport. Und Methan wirkt in der Atmosphäre 80-mal intensiver als Kohlendioxid. Wir haben mit der Energy Watch Group kürzlich die Emissionen eines neuen Gaskraftwerks mit denen eines Kohlekraftwerks verglichen. Den Methanausstoß eingerechnet, ist das Erdgaskraftwerk kein bisschen sauberer als das Kohlekraftwerk. Stammt das Gas aus Fracking, steigen die Klimagasemissionen sogar um

40 Prozent. Wenn wir Erdgas für blauen Wasserstoff nutzen, brauchen wir über Klimaschutz gar nicht mehr zu reden.

CHATZIMARKAKIS Die Methanleckagen können wir in den Griff bekommen. Dummerweise entstehen sie vor allem dort, wo EU-Recht nicht greift, nämlich in Russland und den USA. Aber über eine Einfuhrabgabe für Produkte mit hoher CO₂-Belastung könnten wir den nötigen Druck auf die Lieferländer ausüben, um das abzustellen. Herr Fell, Sie haben eben zur Eile gemahnt angesichts der drohenden Klimakatastrophe. Dabei hilft uns blauer Wasserstoff. Stahlunternehmen könnten mit Wasserstoff statt Kokskohle ihre Produktion zu 95 Prozent, wenn nicht sogar komplett dekarbonisieren. Mit erneuerbaren Energien hergestellt ist dieser Wasserstoff heute aber noch nicht verfügbar. Wenn wir blauen Wasserstoff verbieten, verwehren wir der Industrie – übrigens auch der Chemie – den Weg zur Dekarbonisierung.

Hat blauer Wasserstoff dann nicht zumindest als Brückentechnologie eine Berechtigung, Herr Fell?

FELL Keine Investition in emittierende Technologien leistet einen Beitrag zum Klimaschutz. Sie bekommen mit blauem Wasserstoff keine Dekarbonisierung hin wegen der Methanbelastung in der Vorkette. Außerdem müssen Sie auch in die CO₂-Verpressung investieren. Da wird wahnsinnig viel Geld hinausgeworfen für etwas, das letztlich emittierende Branchen wie die Erdgaswirtschaft länger am Leben hält. Konzentrieren wir doch lieber alles auf die Investitionen in Null-Emission-Technologien! Das wird einen ungeheuren Innovationsschub auslösen. Dann brauchen wir diese sündteure Übergangslösung nicht.

CHATZIMARKAKIS Selbst der Weltklimarat IPCC sagt in seinem neuesten Report: Es bleibt keine Zeit, auf die Erneuerbaren zu warten. Wir müssen jetzt alle verfügbaren Technologien anwenden – die CO₂-Verpressung wird ausdrücklich genannt. Wenn man diese Technik jetzt anwendet und große Unternehmen in die Wasserstoffwirtschaft einsteigen, kommen schnell signifikante Mengen ins System.



Georgios „Jorgo“ Chatzimarkakis wurde 1966 in Duisburg geboren. Der Agrar- und Politikwissenschaftler hat neben dem deutschen auch einen griechischen Pass. Chatzimarkakis saß unter anderem zehn Jahre lang für die FDP im Europäischen Parlament. Während der griechischen Finanzkrise 2014 fungierte er kurzzeitig als Sonderbotschafter der Regierung in Athen. Nach eigener Aussage brachte ihn 1986 die Tschernobyl-Katastrophe zur Politik. Seit 2016 ist Chatzimarkakis Generalsekretär von Hydrogen Europe, einem Verband mit rund 160 Mitgliedern aus zahlreichen Branchen, darunter Automobilhersteller, Technologiekonzerne und Energieunternehmen. Chatzimarkakis ist verheiratet, hat vier Töchter und fährt selbst ein Wasserstoffauto.

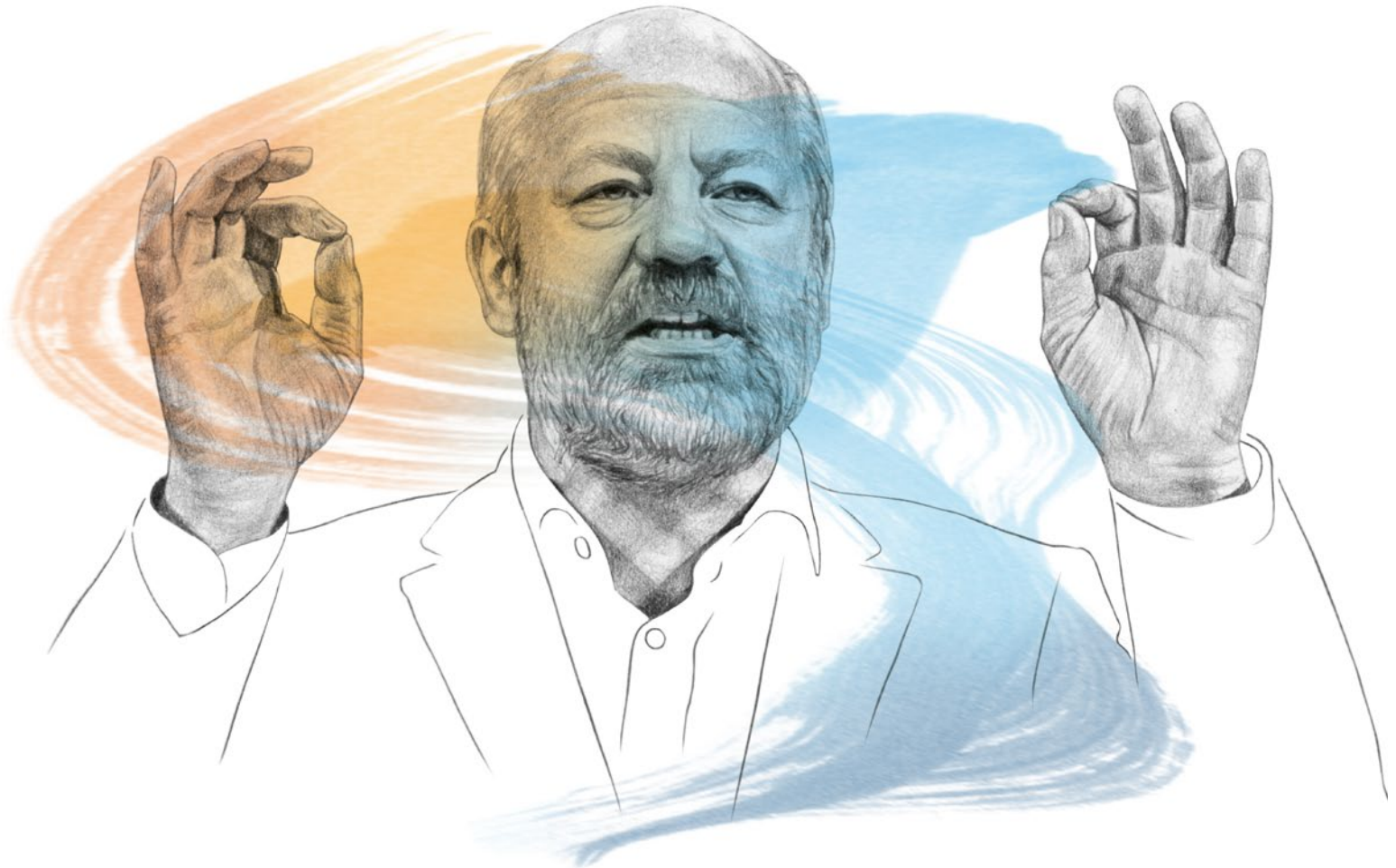
Norwegen will Kohlendioxid in großem Stil in alte Erdgaslagerstätten verpressen, Japan blauen Wasserstoff aus australischer Kohle importieren. Laufen andere Länder Deutschland den Rang ab, weil sie weniger Bedenken vor blauem Wasserstoff haben?

FELL Japan ist auf einem Irrweg, nicht nur wegen der Klimaentwicklung. Sie begeben sich hier in ein System, das für Förderung, Transport und Weiterverarbeitung riesige Kapitalströme und Energiemengen benötigt. Bislang verfolgen nur wenige Länder eine Agenda für Null-Emissionen inklusive grünem Wasserstoff. Also sehe ich auch nicht, dass uns hier jemand den Rang ablauft.

CHATZIMARKAKIS Da bin ich anderer Meinung. Ich sehe sehr wohl die Gefahr, dass andere Länder an uns vorbeiziehen. Die Chinesen etwa machen jeden Tag größere Ankündigungen, was etwa die Umstellung auf Fahrzeuge mit Brennstoffzellen angeht. Asiatische Länder vollziehen den Systemwechsel jetzt – zur Not mit blauem oder grauem Wasserstoff. Wir Europäer gucken da dumm aus der Wäsche. Das Gleiche könnte passieren mit Power-to-Gas ...

... also der Speicherung von Energie mittels Wasserstoff.

CHATZIMARKAKIS Genau. Da sind wir heute noch Weltmarktführer. Wir müssen aber aufpassen, dass wir mit gut gemeinter Politik nicht zu Verzögerern und Verhinderern werden, weil wir eine Technologie ver-teufeln, die uns beim Markthochlauf helfen kann. →



Hans-Josef Fell wurde 1952 im unterfränkischen Hammelburg geboren und war 20 Jahre lang Gymnasiallehrer für Physik und Sport. Von 1998 bis 2013 saß Fell für Bündnis 90/Die Grünen im Deutschen Bundestag – lange Jahre als forschungspolitischer und energiepolitischer Sprecher. Er gilt als einer der Väter des Erneuerbare-Energien-Gesetzes. 2006 gründete Fell die Energy Watch Group (EWG), ein unabhängiges, weltweites Netzwerk von Wissenschaftlern und Parlamentariern, das Studien zu Energiethemen in Auftrag gibt. Seit 2014 leitet er die EWG als Präsident. Fell ist verheiratet, hat zwei Söhne und eine Tochter. Er lebt in einem Holzhaus, das komplett mit erneuerbarer Energie versorgt wird. Die Autos der Familie Fell laufen mit Solarstrom und Sonnenblumenöl.

Wenn blauer Wasserstoff nur für den Übergang taugt, Herr Chatzimarkakis, wie sieht dann Ihre Strategie für den Exit aus?

CHATZIMARKAKIS Herr Fell hat völlig recht, wenn er sagt, dass die Dekarbonisierung des blauen Wasserstoffs viel Geld kostet. Womöglich wird sie künftig sogar noch teurer. Diese Progression können wir sogar politisch festschreiben, ebenso wie die Degression der Kosten für grünen Wasserstoff. Irgendwann würde die Industrie aus ökonomischem Interesse wechseln.

FELL Meine Erfahrung sagt mir etwas anderes. Nämlich dass die emittierenden Technologien die Oberhand bekommen und den Ausbau von Alternativen hintertreiben.

Wie sieht denn eine kluge Politik aus, die den richtigen Wasserstoff fördert, Herr Fell?

FELL Das Wichtigste sind Rahmenbedingungen, die dazu führen, dass die private Wirtschaft ihr Kapital gewinnbringend in Null-Emission-Technologien investiert. Vorbild sind das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz und die feste Einspeisevergütung. Das hat Investitionen beflügelt. Erst kamen Privatleute mit ihren Solaranlagen, dann Genossenschaften mit Windrädern, und dann hat die Industrie nachgezogen.

Was haben Sie gegen eine Steuer auf den Ausstoß von Kohlendioxid, wie sie etwa in Deutschland beschlossen wurde? Sie würde doch helfen, die externen Kosten fürs Klima einzupreisen.

FELL Wenn der Ölpreis wie in diesem Frühjahr stark nach unten geht, ist eine CO₂-Steuer nichts wert, und wenn sie Methan nicht erfasst, schon gar nicht. Eine Bepreisung von Kohlendioxid kann in einzelnen Fällen sinnvoll sein, aber die Wirkung ist auch immer abhängig vom übrigen Marktgeschehen. Darum sollte sie nicht unser Hauptwerkzeug sein.

»Ich habe in der Vergangenheit immer wieder erlebt, dass sich Ölkonzerne ein grünes Mäntelchen umhängen.«

HANS-JOSEF FELL

CHATZIMARKAKIS Der deutsche CO₂-Preis ist tatsächlich ein Witz. Die Schweiz macht es besser: Dort investieren die beiden großen Einzelhandelsketten jetzt in 1.600 Wasserstofflastwagen, und zwar aus freien Stücken, weil es für sie billiger ist, als die CO₂-Abgabe zu bezahlen.

FELL Ja, die Schweizer haben seit Langem ihre CO₂-Steuer, die überall gelobt wird. Trotzdem werden sie ihr selbst gestecktes Emissionsreduktionsziel nicht erreichen – und das liegt bei gerade einmal 20 Prozent.

Herr Chatzimarkakis, Ihr Verband vertritt auch klassische Energiekonzerne. Haben diese wirklich ein Interesse am Ausbau der Wasserstoffwirtschaft?

CHATZIMARKAKIS Shell war einer der ersten starken Akteure im Bereich Wasserstoff. Die brauchen ihn selbst für ihre Raffinerien und andere Prozesse. BP genauso. Aktuell treibt Shell im sogenannten NorthH2-Projekt eine Zehn-Gigawatt-Offshore-Produktion von Wasserstoff aus Windenergie voran – für eine Investitionssumme von 15 Milliarden €.

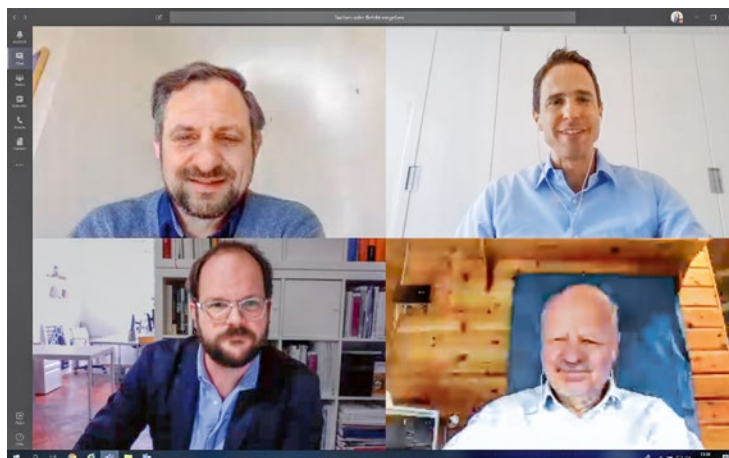
Herr Fell, so viel zum Argument, dass die fossilen Industrien sich darauf verlassen, der blaue Wasserstoff werde ihre Zukunft sichern.

FELL Ich bin froh über das grüne Wasserstoffprojekt von Shell. Aber ich habe in der Vergangenheit immer wieder erlebt, dass sich die Ölkonzerne ein grünes Mäntelchen umgehängt haben. Auch wenn es 15 Milliarden € teuer ist, bleibt es ein Mäntelchen. Denn im Kern halten die Unternehmen fest an ihrem Geschäftsmodell, das auf fossilem Kohlenstoff basiert. Kommt dann die Krise, wie jetzt mit Corona, dann kommen auch die Rufe, dem erst einmal alles unterzuordnen. Der Wirtschaftsrat der Union hat in Deutschland gerade gefordert, die Klimaschutzziele zu reduzieren.

CHATZIMARKAKIS Da bin ich mit Ihnen absolut einer Meinung. Die Rufe, die Klimaschutzziele jetzt zurückzudrehen, finde ich verstörend. Wer das fordert, macht sich schuldig gegenüber künftigen Generationen. Aber das Großprojekt der EU-Kommission, der Green Deal, wird in Brüssel gesteuert. Ich lade Sie herzlich ein, Herr Fell, uns zu besuchen und sich anzuschauen, was hier auf die Schiene gesetzt wird. Aber dazu müssen wir erst mal wieder reisen können. —

Ein Ferngespräch

Wie streitet es sich per Videokonferenz? Ganz passabel, wie sich gezeigt hat. Das Gespräch zwischen Jorgo Chatzimarkakis und Hans-Josef Fell fand Mitte April statt, auf dem vorläufigen Höhepunkt der Coronapandemie in Europa. Was eigentlich in Essen als Diskussion in kleiner Runde geplant war, verlegten die ELEMENTS-Reporter Tom Rademacher (unten links) und Jörg Wagner (oben rechts) in den virtuellen Besprechungsraum. Eine Erfahrung, die in diesen Wochen Millionen Menschen teilen, die Kollegen, Familie und Freunde nur auf dem Monitor ihres Laptops sehen können. Ruckeliges Bild, abgehackter Ton, Einblicke in fremde Arbeitszimmer, Kindergeschrei im Hintergrund – das bleibt wohl hängen von der Arbeitswelt 2020. Am Ende wurde es eine spannende Diskussion zwischen zweien, die ein gemeinsames Ziel auf sehr unterschiedlichen Wegen anstreben. Und die Umstände des Gesprächs machten allen Beteiligten klar, dass wir trotz Meinungsverschiedenheiten doch alle im selben Boot sitzen.



UNTER STROM

Für ein nachhaltiges Wirtschaftssystem werden enorme Mengen an grünem Wasserstoff benötigt. Evonik arbeitet mit Partnern an einer neuen Membran, die die umweltfreundliche Wasserelektrolyse konkurrenzfähig machen soll.

TEXT **GEORG DAHM**

Zum Energieunternehmer ist Sebastian-Justus Schmidt rein zufällig geworden. Seit 2014 versorgt der Inhaber einer IT-Firma sein auf Nachhaltigkeit angelegtes Anwesen in Thailand mit Wasserstoff aus grünem Strom – hergestellt mit einem Elektrolyseur des italienischen Start-ups Acta. Das hat wunderbar funktioniert, doch dann ging 2017 dessen deutsche Mutterfirma in die Insolvenz. „Also haben wir die Technologie gekauft, das Team übernommen und unser eigenes Start-up Enapter gegründet“, erzählt Sohn Jan-Justus, Chief Operating Officer des jungen Familienunternehmens.

Mit diesem Schritt haben die Schmidts nicht nur die Stromversorgung ihrer Immobilie abgesichert, sondern eine führende Rolle in einer Technologie übernommen, mit der in den kommenden Jahrzehnten ganze Branchen kohlenstoffneutral werden könnten. Experten trauen der AEM-Elektrolyse (kurz für Anion Exchange Membrane, Anionenaustauschmembran) zu, die Wasserelektrolyse aus regenerativem Strom massentauglich zu machen.

„Die Technologie kombiniert die Vorteile bisheriger Wasserelektrolyseverfahren“, sagt Oliver Conradi, der bei der Creavis für das Innovationsfeld Membranen

»Die Technologie kombiniert die Vorteile bisheriger Elektrolyseverfahren.«

OLIVER CONRADI, CREAVIS



verantwortlich ist. Die strategische Innovationseinheit von Evonik arbeitet gemeinsam mit Enapter in einem EU-geförderten Forschungsprojekt an neuen Membranmaterialien für die AEM-Elektrolyse. „Wenn das so funktioniert, wie wir es jetzt schon im Labor sehen, machen wir die industrielle Herstellung von umweltfreundlichem Wasserstoff wirtschaftlich tragfähig“, sagt Conradi.

Das Ziel des Verbundprojekts namens CHANNEL, an dem neben Evonik und Enapter der Energiekonzern Shell, das Forschungszentrum Jülich und das norwegische Forschungsinstitut SINTEF beteiligt sind: bis 2022 einen Demonstrator zu bauen, der die →

Wasserstoffbläschen in
einem Standardelektrolyseur
für Schulexperimente. Für
größtechnische Anwendungen
ist Hightech gefragt.





Noch fertigt Enapter seine Elektrolyseurmodule in Italien, die Serienproduktion soll in Deutschland anlaufen.

Leistungsfähigkeit von AEM beweist. Herzstück des Projekts ist eine neue ionenleitende Membran von Evonik, die in den Anlagen von Enapter getestet wird.

„Wir haben gelernt, dass es wahnsinnige Vorteile bietet, mit kleinen Firmen wie Enapter zusammenzuarbeiten, weil sie flexibel sind und sehr schnell Dinge ausprobieren können“, sagt Conradi. „Außerdem ist der unmittelbare Kontakt zu den handelnden Personen sehr hilfreich, wenn man eine Technologie validieren und implementieren möchte.“

Enapters AEM-Elektrolyseure sind keine Großanlagen – sie ähneln eher Serverschränken mit übereinander angeordneten Einschüben. Jeder davon bildet eine eigene Einheit, die einen halben Kubikmeter Wasserstoff pro Stunde produziert. „Das macht die Technik so gut skalierbar“, sagt Jan-Justus Schmidt, der Luft- und Raumfahrttechnik studiert hat und derzeit die Serienproduktion in Deutschland aufbaut.

In einer Wasserelektrolyse wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Der meiste Wasserstoff wird heute jedoch noch per Steam Reforming aus kohlenstoffbasierten Quellen wie Methan erzeugt – nicht zuletzt, weil das traditionelle Verfahren erheblich günstiger ist (siehe Artikel zur Wasserstoffwirtschaft Seite 10). „Das liegt zum einen an den relativ hohen Strompreisen“, erklärt Creavis-Experte Conradi. „Zum anderen erfordern Elektrolyseaggregate sehr hohe Investitionssummen.“ Evonik will die Kosten der Aggregate durch eine neuartige Membrantechnologie reduzieren helfen.

BEWÄHRTE TECHNIK MIT SCHWÄCHEN

Das Arbeitspferd unter den bisher üblichen Verfahren ist die alkalische Elektrolyse (AEL), die den Schulbuchbildern am nächsten kommt: Zwei Elektroden werden



Die Elektrolyseure können nach Bedarf zu größeren Anlagen kombiniert werden.

in eine stark konzentrierte Kalilauge gehalten (reines Wasser wäre nicht leitfähig genug). An der Kathode spalten sich Wassermoleküle in Wasserstoff- und Hydroxidionen. Der Wasserstoff steigt als Gas auf, die Hydroxidionen wandern durch die Lauge zur Anode, wo sie zu Wasser und Sauerstoff reagieren. Damit die Reaktionsprodukte getrennt bleiben und nicht mit einem großen Knall wieder zusammenfinden, trennt eine poröse Membran, ein sogenanntes Diaphragma, die Anoden- und die Kathodenseite des Elektrolyseurs.

„Das ist eine robuste Technik, die mit recht günstigen Zellmaterialien auskommt“, sagt Conradi. In den Katalysatoren, die an den Elektroden dafür sorgen, dass die Reaktionen in Gang kommen, wird zum Beispiel Nickel, Kobalt oder Eisen verbaut, in den Gehäusekomponenten Edelstahl. Pro Kilowatt Leistung fallen so etwa 800 € Investitionskosten an, bis 2025 erwarten Experten einen Rückgang auf bis zu 600 €.



In Thailand kommt AEM-Technologie bereits in einer Wohnanlage zum Einsatz.

Ein Problem der AEL-Elektrolyse: Da das Diaphragma porös ist, also Gase durchlässt, können die Anlagen nur eingeschränkt unter Druck betrieben werden. Der Wasserstoff muss also unter hohem Energieaufwand komprimiert werden, damit er gespeichert und weitertransportiert werden kann. Die poröse Membran kann außerdem nur bei geringen Stromdichten betrieben werden: Maximal 600 Milliampere pro Quadratcentimeter Membranfläche hält das Diaphragma aus. Mehr als dreimal so viel, nämlich 2.000 Milliampere pro Quadratcentimeter Membranfläche, schafft das andere etablierte Verfahren, die PEM-Elektrolyse (kurz für Proton Exchange Membrane). Was in der Praxis bedeutet: Für die gleiche Menge Wasserstoff genügt ein deutlich kleinerer Elektrolyseur.

Bei der PEM-Elektrolyse fungiert die Membran nicht einfach nur als Trennschicht. Sie ersetzt vielmehr das gesamte Bad, weil sie aus einem elektrisch leitfähigen Polymer besteht, durch das Ionen wandern können. Die Elektroden liegen direkt auf der Membran auf. Das zu spaltende Wasser fließt über die Anode, die freigesetzten Wasserstoffionen wandern von der Anode durch die Membran auf die Kathodenseite, wo sie sich zu Wasserstoffmolekülen vereinen. Ein PEM-Elektrolyseur wird nicht nur bei höheren Stromdichten betrieben als eine AEL-Anlage, er hält auch größere Lastschwankungen aus. Und da er unter Druck betrieben werden kann, wird nachher weniger Energie für die Wasserstoffkompressoren benötigt.



»Unsere Technik ist gut skalierbar.«

JAN-JUSTUS SCHMIDT, COO ENAPTER

So groß die technischen Vorteile sind – die hohen Investitionskosten für eine PEM stellen eine erhebliche Markteintrittshürde dar: „PEM-Zellen arbeiten im sauren Milieu, erfordern also sehr robuste Materialien“, sagt Conradi. „Für die Katalysatoren benötigt man Edelmetalle wie Platin und Iridium, für die Zellen Titan oder sogar platinisiertes Titan. Beim Stand der Technik rechnet man pro Kilowatt Leistung Investitionskosten von mindestens 1.000 €.“

MEHR LEISTUNG, WENIGER KOSTEN

Hier kommt der Hoffnungsträger AEM ins Spiel: 500 bis 600 € pro Kilowatt nennt Evonik als mittelfristiges Entwicklungsziel. Die Bauweise einer AEM-Zelle entspricht der einer PEM-Zelle, auch sie kann unter Druck und mit hoher elektrischer Leistung betrieben werden. Auch hier ist das Herzstück eine Membran aus einem ionisch leitfähigen Kunststoff, Ionomer genannt. Auf beiden Seiten liegen Elektroden auf, auch sie bestehen aus einem Ionomer und sind mit Katalysatorpartikeln durchsetzt. „Aber bei der AEM können wir dafür signifikant günstigere edelmetallfreie Materialien wie Nickel verwenden“, sagt Conradi. Denn das Verfahren arbeitet im alkalischen Milieu: Die Wasserspaltung findet wie beim AEL-Verfahren auf der Kathodenseite statt. Aus zwei H_2O -Molekülen entstehen ein Wasserstoffmolekül und zwei Hydroxidionen (OH^-); das Hydroxidion wandert durch die Membran zur Anode und reagiert dort zu Sauerstoff und Wasser (siehe Grafik Seite 33).

Diese Kombination zu realisieren bedeutet eine Herausforderung. „Auch eine alkalische Umgebung ist aggressiv“, sagt Alejandro Oyarce Barnett vom norwegischen Forschungsinstitut SINTEF, das die Partner für CHANNEL ausgesucht hat und das Konsortium koordiniert. „Es ist nicht trivial, eine Membran zu →



Erst fest, dann flüssig, dann flexibel:
Im Creavis-Labor wird Polymerpulver
komponiert (rechts oben), das dann
in gelöster Form (rechts) zu Endlos-
membranen (oben) gegossen wird.

entwickeln, die unter diesen Bedingungen arbeitet. Weltweit können das nur sehr wenige Firmen, und Evonik spielt hier ganz vorn mit.“

SINTEF arbeitet ähnlich wie die deutsche Fraunhofer-Gesellschaft: Nur ein Teil des Etats kommt aus Staatsmitteln, das Geschäftsmodell beruht auf Kooperationen und Förderprojekten, bei denen wirtschaftlich verwertbares geistiges Eigentum entsteht. SINTEF will nun den Bau einer Zwei-Kilowatt-Anlage vorantreiben. Ein erster Schritt, so Barnett: „Wenn die funktioniert, dann ist es nur logisch, an eine 100, 200 oder sogar 500 Kilowatt starke Anlage zu denken.“

Zwar übertreffen die Membranen aus dem Creavis-Labor bereits jetzt die meisten selbst gesteckten Zielwerte, aber noch arbeiten die Teams mit Prototypen etwa im DIN-A4-Format. Bevor das Material serienmäßig in Endlosbahnen produziert werden kann, muss das Creavis-Team unter anderem noch das Beschichtungsverfahren optimieren: In einer Pilotanlage wird noch in diesem Jahr getestet, wie im Rolle-zu-Rolle-Verfahren eine gleichbleibend hohe Qualität gesichert werden kann. Seit einigen Jahren forscht die Creavis gemeinsam mit den Experten des Bereichs High Performance Polymers an ionenleitenden Membranen für die Elektrochemie und konnte umfassendes Know-how in diesem Gebiet aufbauen. „Das Wissen um die Polymerchemie auf diesem Gebiet ergänzt hervorragend unsere Kenntnisse bei Membranen zur Gas- und Flüssigkeitstrennung“, sagt Goetz Baumgarten, bei Evonik für das Innovationswachstumsfeld Membranen verantwortlich.

In der Entwicklungsphase wurde viel Vorarbeit geleistet. So arbeitet die Creavis bereits seit einer Weile an ionenleitenden Membranen für die Elektrochemie, ein weiteres zukunftssträchtiges Feld neben den Hohlfaser-membranen, die bisher das Geschäft prägten. „Man braucht hier zum Beispiel ganz neue Methoden und Kompetenzen, um die Eigenschaft der Membranen zu messen“, sagt Conradi.

ENTWICKLUNGSZIEL IST EIN SYSTEM

Noch geht es darum, die Formulierung der Membran zu optimieren. „Ein wichtiger Faktor für den Wirkungsgrad ist zum Beispiel der Kontaktwiderstand zwischen der Membran und der Elektrode“, sagt Conradi. „Damit dieser möglichst klein wird, brauchen wir eine gute ionische Verbindung zwischen den beiden. Wir müssen also nicht nur die Polymerformulierung für die Membran weiter optimieren, sondern auch eine maßgeschneiderte Elektrodenpaste entwickeln, die auf diese Membran aufgebracht wird.“ Das Ziel: ein ganzes System zu entwickeln, mit dem Elektrolyseurhersteller wie Enapter beliefert werden können.

Projektleiter Barnett rechnet damit, dass eine Reihe von Membran- und Elektrodenformulierungen erprobt werden muss, bis die optimale Kombination gefunden ist – inklusive der richtigen Katalysatorsysteme, die vom Forschungszentrum Jülich und der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens (NTNU) entwickelt werden. Wenn die neue Membrantechnologie in die kommerzielle Serienproduktion geht, würden weitere Katalysatorgenerationen von Evonik-Experten entwickelt werden.

„Bei der Formulierung der Elektrodenpasten hilft uns sehr, dass die Evonik-Kollegen über ein großes Wissen über Polymere und deren Eigenschaften verfügen“, sagt Barnett. Das Team fängt also nicht bei null an, sondern kann aus erprobten Bausteinen schnell neue Materialien entwickeln und testen.

Jede neue Formulierung der Membran-Elektroden-Einheit (Membrane Electrode Assembly, kurz MEA) wirkt sich wieder auf die Konstruktion der Zelle aus, von denen am Schluss fünf zu einem sogenannten Stack kombiniert werden sollen. Da sind zum Beispiel die

Bipolarplatten, massige Metallkonstruktionen, die die Membran-Elektroden-Einheit von beiden Seiten umschließen und den Zu- und Abfluss von Flüssigkeit und Gasen lenken. Oder die porösen Transportschichten auf den Elektroden, durch die das Gas abgeleitet wird. „Das ist eine Schlüsselkomponente, die es derzeit nicht auf dem Markt gibt“, sagt Barnetts Kollegin Thulile Khoza. „Wir bauen zwar auf den Erfahrungen aus dem Bau von PEM-Zellen auf, aber wir arbeiten mit ganz anderen Materialien und müssen hier ständig Leistung und Kosten abwägen.“

Getestet werden die neuen Module in Enapter-Anlagen. „Wir können neue Materialien im kleinen Maßstab testen und dann schnell in größerem Stil einsetzen“, sagt Jan-Justus Schmidt. So könnte aus einer privaten Technikspielerei ein Produkt entstehen, das die Welt erobert. —

Die AEM-Wasserelektrolyse

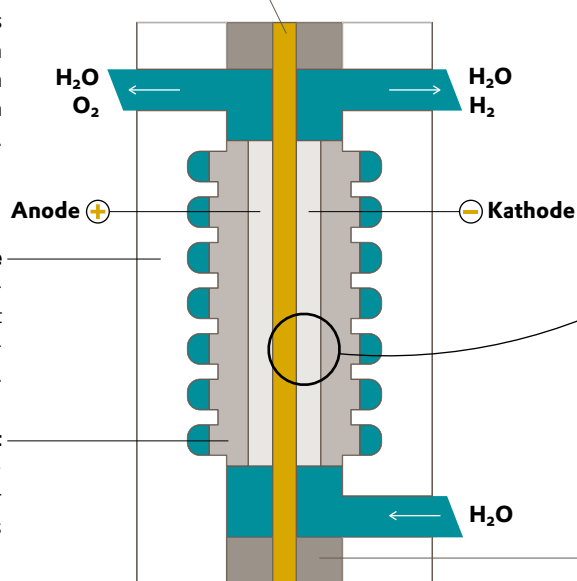
Hoher Druck und eine aggressive Umgebung: Das AEM-Verfahren stellt enorme Anforderungen an das Material. Damit die Wasserstoffproduktion unter kontrollierten Bedingungen stattfinden kann, bestehen Elektrolyseure aus vielen einzelnen Zellen, die zu Stacks (engl. für Stapel) in Reihe geschaltet werden. In diesen Zellen findet die eigentliche Reaktion statt, bei der Wasserstoff und Sauerstoff abgespalten werden.

Die Reaktion in der Elektrode

Die Elektrodenschicht besteht ebenfalls aus einem ionenleitenden Polymer, in das metallische Katalysatorpartikel eingearbeitet sind.

Ionenleitende Membran

Das Herzstück des Elektrolyseurs ist die Membran aus einem Polymer, das Hydroxidionen durchlässt, nicht aber den entstehenden Wasserstoff.



Anode ⊕

⊖ Kathode

Bipolarplatte

umschließt die Membran-Elektroden-Einheit und ist mit Kanälen für den Wasser- und Gastransport durchzogen.

Gasdiffusionsschicht

Die Gase, die an den Elektroden entstehen, werden über eine Schicht porösen Materials abgeleitet.

Dichtung

stellt sicher, dass Gas und Wasser nur durch die vorgesehenen Kanäle ein- und austreten.



Christian Kullmann ist Vorsitzender des Vorstandes von Evonik.

Die Krise als Chance nutzen

Von Christian Kullmann

Die Folgen der Coronapandemie erfordern eine Neujustierung der europäischen Wirtschaftspolitik. Um die Krise zu bewältigen, benötigen wir keinen Green Deal, sondern einen umfassenden Sustainable Future Deal.

Selbstverständlichkeiten sind plötzlich nicht mehr selbstverständlich. Was gerade noch alltäglich war, ist auf einmal verboten. Die Leichtigkeit des Seins weicht der Verunsicherung, der Angst vor Infektion, der Angst vor Arbeitslosigkeit, Abstieg und Insolvenz. Unsere Gesundheit und unser Wohlstand werden bedroht von einem neuartigen Virus, das weltweit binnen weniger Wochen bereits mehrere Hunderttausend Todesopfer gefordert hat. Und das noch lange nicht überwunden ist.

Der Corona-Frühling 2020 hat uns die Augen geöffnet, in vielerlei Hinsicht. Er zeigt, zu welchen Leistungen Menschen und Unternehmen in der Lage sind, wenn sie in der Not über sich hinauswachsen, um anderen zu helfen. Er offenbart, wie schnell Regierungen entscheiden und handeln können, wenn es gilt, das Schlimmste abzuwenden. Und er legt schonungslos offen, wie robust unsere Unternehmen und Volkswirtschaften wirklich sind – oder wie fragil.

Ob in Asien, in Europa oder in Amerika: Die Wirtschaft stürzt in die Rezession, unzählige Unternehmen werden pleitegehen, viele Millionen Menschen ihre Arbeit verlieren. Die Probleme sind global, den Kampf dagegen aber führt jedes Land zunächst einmal für sich allein: national.

Internationale Institutionen, die uns in guten Zeiten so wichtig erschienen, werden jetzt bloßgestellt in ihrer aktuellen Machtlosigkeit. Zum Teil ist ihre Lage strukturellen Defiziten geschuldet, zum Teil werden die Institutionen von zentralen Akteuren weiter gezielt geschwächt. Das Ergebnis bleibt das gleiche: Weder dürfte die Weltgesundheitsorganisation WHO künftig in der Lage sein, weltweit eine faire Verteilung eines Covid-19-Impfstoffs zu gewährleisten. Noch ist die Welthandelsorganisation WTO befähigt, ihre Funktion als Schiedsrichter in internationalen Handelskonflikten auszufüllen. Die eingeübten Mechanismen globaler kooperativer Konfliktbewältigung sind leider oft nur noch Muster ohne Wert.

Der internationale Wettbewerb wird sich also nach Corona nicht entspannen, im Gegenteil: Er wird an Härte zunehmen. Jedes Industrieland, jeder große Wirtschaftsraum wird nun mit allen Mitteln versuchen, die eigene Wirtschaft zu stützen. Das könnte in den USA zu noch mehr Protektionismus führen. Asiatische Länder werden in einem gnadenlosen Wettbewerb mit Europa und Amerika versuchen, sich Zukunftsinvestitionen zu sichern und strategisch wichtige Märkte und Wertschöpfungsketten zu dominieren.

Die Verantwortung zum Handeln liegt jetzt bei den Nationalstaaten – oder starken regionalen Bündnissen. Für die Europäische Union, die schon vor Corona in einer tiefen Krise steckte, geht es jetzt ums Ganze. Das Virus zwingt uns, endlich verbindlich Farbe zu bekennen: Wollen wir eine starke und in schweren Krisen handlungsfähige EU? Oder wollen wir uns im Ernstfall weiter darauf verlassen, dass die deutschen Probleme in Berlin, die italienischen in Rom und die schwedischen in Stockholm gelöst werden?

Was sich in der akuten Bewältigung der Infektionswelle ausgezahlt hat, trifft für den ökonomischen Neustart umso mehr zu: Nur gemeinsam können wir als Europäer die

»Wir brauchen jetzt ein Wachstumsprogramm, in dem neben ökologischen Zielen auch soziale und ökonomische Aspekte berücksichtigt werden.«

Kraft aufbringen, diese schwere Krise durchzustehen. Besinnen wir uns auf den europäischen Geist und auf die ursprüngliche Idee eines geeinten Europas, in dem nie wieder Kriege geführt oder Rohstoffe einander vorenthalten werden – eines Europas, in dem die Menschen in Frieden, Freiheit und Wohlstand leben.

Was wäre gewonnen, wenn einzelne Länder im Norden ihre relative Stärke ausspielen würden, um ihre Wirtschaft durch die Krise zu bringen, und Staaten im Süden und im Osten nicht wieder auf die Beine kämen? Nichts wäre gewonnen, im Gegenteil: Europa wäre faktisch am Ende. Und das würde kein Land härter treffen als Deutschland.

Nutzen wir diese Krise, um Europas Handlungsfähigkeit zu verbessern! Nutzen wir die Krise, um gemeinsam erfolgreicher zu werden. Der Wiederaufbau bietet dazu Gelegenheiten. Wann immer der Staat riesige Mengen Geld investiert, ergibt sich Gestaltungsmacht. Wie soll unsere Wirtschaft, wie soll unsere Industrie in Zukunft aussehen? Welche Modelle, welche Technologien sollen systematisch gefördert werden?

KEINE WEITEREN BELASTUNGEN!

Ohne Wachstum ist alles nichts. Natürlich bleibt der Klimaschutz ein Leitmotiv des gezielten Aufbaus. Hier setzt der Green Deal der Europäischen Kommission den Trend. Er springt allerdings, nach allem, was bisher bekannt ist, viel zu kurz. Das gilt gerade im Hinblick auf die Coronapandemie: Wir brauchen jetzt ein echtes, nachhaltiges Wachstumsprogramm, in dem neben den berechtigten ökologischen Zielen auch soziale und ökonomische Aspekte gleichrangig berücksichtigt werden. Ein Programm, das Wachstum möglich macht und das zusätzliche Belastungen für Unternehmen in dieser Zeit konsequent unterbindet.

Europa braucht jetzt Unternehmertum, Wachstumsimpulse, nicht Dirigismus, Verbote und zusätzliche Regulierung. Entwickeln

wir den Green Deal weiter: zu einem Sustainable Future Deal. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Energie. Die Dekarbonisierung der Stromproduktion ist der Schlüssel zum Klimaschutz. Zugleich benötigen Industrieunternehmen enorme Mengen Energie, und das bleibt auch so, trotz aller Effizienzsteigerungen. Dieser Industriestrom muss in Europa verfügbar und bezahlbar bleiben. Sonst können die für die wirtschaftliche Erholung wichtigen Schlüsselbranchen nicht überleben.

Um ökologischen, ökonomischen und sozialen Anforderungen gerecht zu werden, brauchen wir Anreize und Zielvorgaben im europäischen Maßstab. Die Förderung klimafreundlicher Erzeugungsarten muss hierzu verbunden werden mit Zielpreisen, die den Unternehmen Investitionssicherheit bieten. Bei Themenfeldern, die im grenzüberschreitenden Verbund viel leichter zu lösen sind, etwa dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, muss die Infrastruktur gleich im europäischen Maßstab geplant werden. Das senkt Anlaufkosten und erhöht die Durchschlagskraft.

Entscheidende Beiträge zur Dekarbonisierung unserer Energieversorgung leistet die Chemieindustrie schon heute: Kein Windrad dreht sich ohne Leichtbau-Rotoren, keine Solaranlage kommt ohne Chemieprodukte aus. Zugleich leisten der Maschinen- und Anlagenbau wertvolle Beiträge. Wenn wir diese Kompetenzen und diese Expertise bündeln und der Kreativität unserer Ingenieure freien Lauf lassen, werden wir zu Lösungen kommen, die voll auf unsere Nachhaltigkeitsziele einzahlen: im ökologischen Sinne ebenso wie im ökonomischen und im sozialen.

Zu einem solchen Umbau der europäischen Wirtschaft gehören klare Zeitpläne. Den Rahmen geben aus ökologischer Perspektive die Maßstäbe des Pariser Klimaschutzabkommens vor. Dazu bekennen wir uns bei Evonik ausdrücklich. Wir werden unsere absoluten CO₂-Emissionen von 2008

bis 2025 halbieren. Die chemische und die pharmazeutische Industrie haben gerade in den vergangenen Monaten ihre Fähigkeit, kurzfristig auf neue Herausforderungen zu reagieren, unter Beweis gestellt: als Produzent und Lieferant von Desinfektionsmitteln, als Hersteller von Schnelltests und pharmazeutischen Wirkstoffen und nicht zuletzt als Entwickler eines hoffentlich zeitnah vorliegenden Impfstoffs. Gemeinsam werden wir Covid-19 besiegen. Chemie hilft.

KLIMASCHUTZ IST PROFITABEL

Eine wirklich nachhaltige Neuausrichtung wird aber nur gelingen, wenn die Unternehmen nicht überstrapaziert werden. Der aktuelle Einschnitt durch Corona ist beispiellos. Das volle Ausmaß der Krise wird uns erst in den kommenden Monaten und Jahren vor Augen geführt werden. Ein wirklich nachhaltiger Neustart kann daher nur gelingen, wenn weder Bürger noch Unternehmen mit dem Tempo oder mit neuen Belastungen überfordert werden.

Eins ist klar: Nachhaltigkeit ist für die chemische Industrie nicht erst seit gestern ein wichtiges Prinzip der Unternehmenssteuerung. Im Sinn eines Dreiklangs zielen wir darauf, gesellschaftlichen Wohlstand mit wirtschaftlichem Wachstum zu ermöglichen, für sozialen Ausgleich zu sorgen und die natürlichen Lebensgrundlagen für künftige Generationen zu erhalten. Wir tun dies aus der Überzeugung, dass sich im Sinn eines volkswirtschaftlichen Nutzens Umweltschutz, Nachhaltigkeit, Wachstum und Profitabilität wechselseitig bedingen. Ökologie und Ökonomie sind eben kein Widerspruch! Klimaschutz kann hochprofitabel sein, und zwar in jeder Hinsicht. Das wissen wir.

Wenn dieses Verständnis auch den Geist des europäischen Neustarts bildet, mit dem wir die Zeit der Verunsicherung hinter uns lassen wollen, werden wir die Krise nicht nur meistern, sondern als Union gestärkt aus ihr hervorgehen. —



SCHAUM- HOCHZEIT

Ohne Tenside wären Spülmittel, Duschgels oder Shampoos wirkungslos. Gemeinsam mit Unilever hat Evonik nun ein besonders effizientes Tensid auf Basis von Rhamnolipiden entwickelt – aus biologischen Quellen und vollständig abbaubar. Großen Bedarf sehen Experten vor allem in Schwellenländern.

TEXT CHRISTOPH BAUER

Was die meisten als lästige Küchenarbeit erleben, ist für Testspüler eine Arbeit mit wissenschaftlichem Anspruch. Geschirr, Gläser und Töpfe werden aufwendig präpariert, um alltägliche Herausforderungen am Spülbecken zu simulieren: Müslireste in der Schüssel, angetrockneter Reis im Topf, erkaltetes Bratfett in der Pfanne. Dann werden die Proben unter identischen Bedingungen mit verschiedenen Spülmitteln gereinigt und die Ergebnisse verglichen.

Ein wichtiger Aspekt dabei ist die „Mileage“, ein Wert, der bei Autos die Reichweite mit einer bestimmten Menge Treibstoff beziffert. Im Spüllabor bezieht er sich auf die Menge Geschirr, die die Tester spülen können, bevor der Schaum auf dem Spülwasser verschwunden ist. „Je früher der Schaum zusammenbricht, desto eher wechselt der Konsument das Spülwasser“, sagt Dr. Hans Henning Wenk, Leiter der Forschungsabteilung im Bereich Care Solutions von Evonik. Das bedeutet zusätzlichen Verbrauch von Wasser, Energie und Spülmittel.

Verantwortlich für den Schaum sind Tenside. Sie machen je nach Marke und Typ zwischen fünf und 30 Prozent des Inhalts einer Spülmittelflasche aus. Sie sind entscheidend für die Effizienz des Produkts und für seine Umweltfreundlichkeit. Wirkungsvolle Tenside sind somit ein wichtiger Faktor für den Verkaufserfolg eines Reinigungsmittels.

Der jährliche Umsatz mit Tensiden auf Basis biologischer Rohstoffe liegt weltweit bei mehr als vier Milliarden US-\$. Für 2022 rechnen Experten mit einem Anstieg auf 5,5 Milliarden \$ (siehe Data Mining, Seite 41). Getrieben wird diese Steigerung sowohl vom Verbraucher, der zunehmend Wert auf umweltfreundliche Lösungen legt, als auch von den Behörden, die deutlich höhere Anforderungen an die biologische Abbaubarkeit von Reinigungssubstanzen stellen. Europa ist ein wichtiger Produktionsstandort von Tensiden – und Evonik ist



»Biotenside sind Gamechanger in der Haushaltsreinigung und darüber hinaus.«

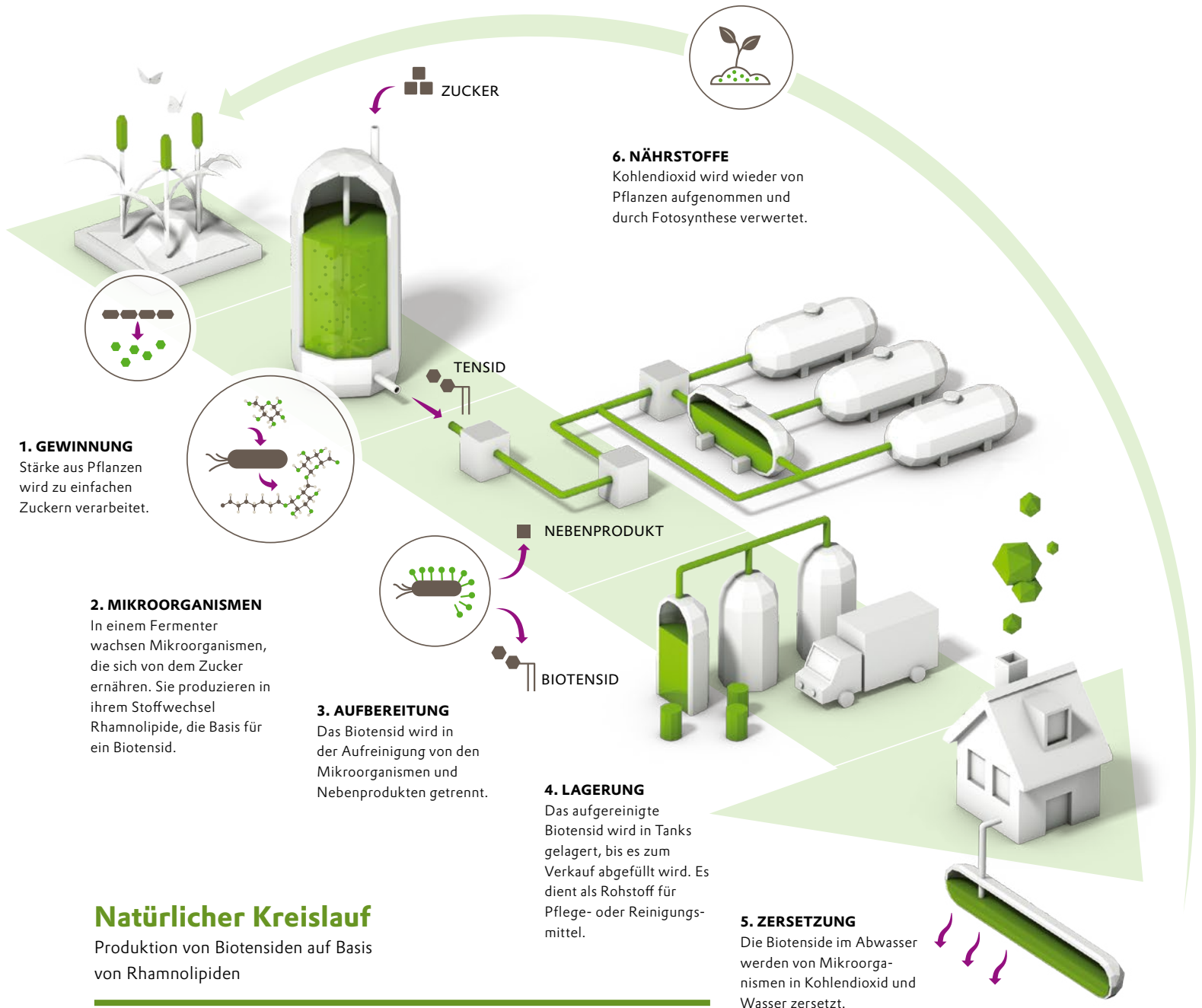
HANS HENNING WENK,
LEITER DER FORSCHUNGSABTEILUNG
BEI CARE SOLUTIONS

ein bedeutender Spieler. Gemeinsam mit dem Konsumgüterkonzern Unilever haben Spezialisten von Evonik ein neuartiges Tensid entwickelt, das nicht nur sehr gut spült und die Haut pflegt, sondern auch vollständig biologisch abbaubar ist. „Biotenside sind Gamechanger in der Haushaltsreinigung und darüber hinaus“, sagt Wenk, „und wir haben mit unserer Technologie das Potenzial, die Herstellung von Reinigungsmitteln grundlegend zu verändern.“

Tenside arbeiten nach einem simplen Prinzip: Sie haben ein Ende, das Wasser „liebt“, und eines, das sich mit Fett verbindet (siehe Grafik Seite 39). So sorgen sie dafür, dass der gelöste Schmutz nicht wieder am Geschirr landet. Das neue Biotensid basiert auf sogenannten Rhamnolipiden, die deutlich besser verträglich für Wasserorganismen sind als bislang eingesetzte Tenside.

BAKTERIUM ALS WEGBEREITER

Ausgangspunkt für den Saubermacher ist ein Bakterium, das gern im Dreck ist: *Pseudomonas aeruginosa*. Es lebt im Boden und ernährt sich von Fetten. 1900 wurde es entdeckt, blieb jedoch zunächst weitgehend unbeachtet. Das mag auch daran liegen, dass es als pathogen eingestuft wird: In großen Mengen aufgenommen, ist es für den Menschen gesundheitsschädlich. →

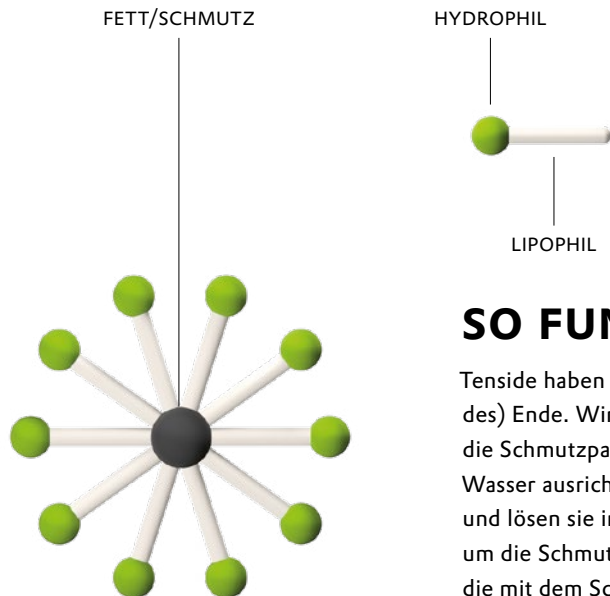


Erst in den 1960er-Jahren fand man heraus, dass das Bakterium nützliche Rhamnolipide produziert, wenn auch nur in winzigen Mengen. Die Idee, die säubernden Eigenschaften dieser Lipide zu nutzen, blieb zunächst eine Vision. Aber als es im Jahr 2000 gelang, das Genom des Bakteriums zu entschlüsseln, griffen Forscher diese Idee wieder auf.

Ein Tensid verwenden die Menschen bereits seit Jahrtausenden: Seife. An dessen Stelle traten später Tenside auf Basis petrochemischer Rohstoffe. Die erste Generation dieser Produkte sorgte allerdings dafür, dass sich auf Abwässern und in Flüssen riesige Schaumberge bildeten. Die Tenside wurden in der Wasseraufbereitung nicht abgebaut, gelangten in die Umwelt und schädigten dort Organismen. Heute ist vorgeschrieben, dass sich Tenside in Kläranlagen innerhalb von vier Wochen zum größten Teil abbauen lassen müssen.

Den Wunsch der Verbraucher, nachhaltige Produkte zu nutzen, die genauso leistungsfähig sind wie herkömmliche, wurde immer größer. 2008 startete Hans Henning Wenk deshalb mit einem Forscherteam in Essen ein Projekt zur Entwicklung einer neuen Generation von Tensiden für Reinigungs- und Pflegeprodukte. „Anfangs haben Verbraucher akzeptiert, dass umweltfreundliche Produkte weniger gut waren als der Standard“, erinnert er sich. „Aber diese Zeiten sind vorbei.“

Die Forscher entschieden sich für den Einsatz von Rhamnolipiden, denn die bauen sich vollständig biologisch ab, und zwar mit und ohne Sauerstoff. Zudem entfernen sie Schmutz genauso zuverlässig wie sehr



SO FUNKTIONIEREN TENSIDE

Tenside haben ein hydrophiles (Wasser liebendes) und ein lipophiles (Fett liebendes) Ende. Wird eine verschmutzte Oberfläche mit Wasser gewaschen, ziehen die Schmutzpartikel das lipophile Ende an, während sich das hydrophile Ende zum Wasser ausrichtet. Diese entgegengesetzten Kräfte lockern die Schmutzpartikel und lösen sie im Wasser. Dort ordnen sich die Tenside mit ihren lipophilen Enden um die Schmutzpartikel herum an und schließen sie in sogenannte Mizellen ein, die mit dem Schmutzwasser entfernt werden.

gute synthetische Tenside. Hinzu kommt die Hautfreundlichkeit, im Fachjargon „Mildheit“ genannt: Nach dem Spülen, Duschen oder Baden fühlt sich Haut angenehm gepflegt an.

Wenk und seine Kollegen machten sich auf die Suche nach einem alternativen Bakterium, das Rhamnolipide ohne Gesundheitsrisiko herstellen kann und eine möglichst hohe Ausbeute ermöglicht. Zugleich legten sie fest, dass Zucker als Basis dienen sollte, denn der ist überall aus regionalen Quellen erhältlich, die nicht mit sensiblen Ökosystemen konkurrieren. „Das war eine Wette auf die Zukunft“, sagt Wenk im Hinblick auf den finanziellen und zeitlichen Aufwand. „Wir haben ordentlich was in die Hand genommen.“

INTERNATIONALE PARTNERSCHAFT

Für die Produktion wählte das Team einen Bakterienstamm aus der Familie *Pseudomonas putida*, der bereits für andere industrielle Anwendungen genutzt wird. Dabei handelt es sich um einen gut erforschten Sicherheitsstamm, der für Menschen, Tiere und Pflanzen ungefährlich ist und sich nur unter künstlich hergestellten Bedingungen stark vermehrt. Diesem Stamm wurden dann Eigenschaften des Ausgangsbakteriums einprogrammiert. Schritt für Schritt gelang es den Forschern, die Leistungsfähigkeit der Bakterien so zu erhöhen, dass eine kommerzielle Nutzung der produzierten Rhamnolipide möglich erschien.

Unter dem Mikroskop sieht das Bakterium unspektakulär aus: ein längliches Gebilde mit ein paar Fäden an einem Ende. Für die Forschung aber stellten sich Rhamnolipide als hoch attraktiv heraus. Dies blieb auch Unilever nicht verborgen. 2015 stellte sich heraus, dass der niederländisch-britische Konsumgüterhersteller ebenfalls an der Entwicklung von Tensiden auf deren Basis arbeitete. Aus der Geschäftsbeziehung zu Evonik

ergab sich ein gemeinsames Entwicklungsprojekt. „Unser Forschungs- und Entwicklungsteam ist mit Rhamnolipiden seit Jahren vertraut, allerdings waren Technologie und Wissenschaft noch nicht an dem Punkt angekommen, an dem eine industrielle Produktion möglich gewesen wäre“, sagt Peter Ter Kulve, President des in London beheimateten Home-Care-Geschäfts von Unilever. Für dieses Scale-up brachte Evonik ihre Kompetenz ein. Das Marktpotenzial ist enorm: →

Die Fermenterhalle des Evonik-Werks in Slovenská Ľupča. Der Standort hat große Erfahrung in der Produktion von Biotensiden.





Umweltfreundlich und wirkungsvoll: Mit diesem Produktversprechen brachte Unilever in Chile Quix heraus, das erste Spülmittel auf Basis von Rhamnolipiden.

2,5 Milliarden Menschen verwenden täglich Unilever-Produkte. Allein die Sparte Home Care setzt jährlich mehr als elf Milliarden € um.

Der Durchbruch in der Produktion im großen Maßstab gelang 2016 im slowakischen Evonik-Werk in Slovenská Ľupča. Dort beschäftigt der Konzern seit vielen Jahren Spezialisten für Fermentation, unter anderem zur Herstellung von Tensiden auf Basis biologischer Rohstoffe.

HERAUSFORDERUNG SCHAUM

„Wenn Sie 5.000 statt zehn Liter einer Substanz produzieren, reicht es nicht, die Werte einfach zu multiplizieren“, sagt Wenk. Auch Drücke, Prozesse und Temperaturen müssten angepasst werden. Als größtes Problem erwies sich ausgerechnet das, was die Rhamnolipide für



Der Markteinführung ging eine jahrelange Forschungs- und Entwicklungsarbeit voraus. In der Slowakei konzentrierte man sich darauf, die Schaumbildung in der Produktion zu reduzieren.

den Endverbraucher so attraktiv macht: der Schaum. Bei der Anwendung soll das Produkt zwar schäumen, nicht jedoch bei der Produktion. Stimmen die Parameter, läuft die Produktion reibungslos (siehe Grafik Seite 38). Als Rohstoff wird in den Fermentern in Slovenská Ľupča simpler Traubenzucker genutzt. Die Umsetzung von Zucker zu Rhamnolipiden erledigt der Bakterienstamm im Fermenter bei Zimmertemperatur.

Seit 2018 sind die Rhamnolipide auf dem Markt. Unter dem Namen Rheance One wurde zunächst eine Lösung für Pflegeprodukte entwickelt. Das Produkt kam sehr gut an, und das Forscherteam erhielt interne und externe Preise dafür. Unilever zielt jedoch auf einen anderen Markt: den für Spülmittel. Ein besonderes Augenmerk legt der Konzern auf die Nachhaltigkeit seiner Produkte und die Situation in Schwellenländern. Dort steigt das Bedürfnis nach Hygiene und Sauberkeit, zugleich haben nur wenige Haushalte eine Spülmaschine. Handspülmittel sind daher stark gefragt. Hinzu kommt: Abwasser wird oft weniger intensiv aufbereitet als in Industrieländern. Ein vollständig abbaubarer Inhaltsstoff ist da von besonderem Vorteil.

Für die Markteinführung entschieden sich die Experten von Unilever für Chile und die dort sehr populäre Marke Quix (siehe Interview Seite 42). Wichtigstes Verkaufsargument war die Umweltverträglichkeit, auf die Chilenen bei Kaufentscheidungen großen Wert legen. Unilever wertet die Markteinführung als Erfolg, weitere Länder sollen nun folgen.

Zugleich prüft Evonik den Bau einer neuen Großanlage. Dass der Bedarf an Rhamnolipiden in Zukunft kräftig steigen wird, gilt unter Experten als sicher. —

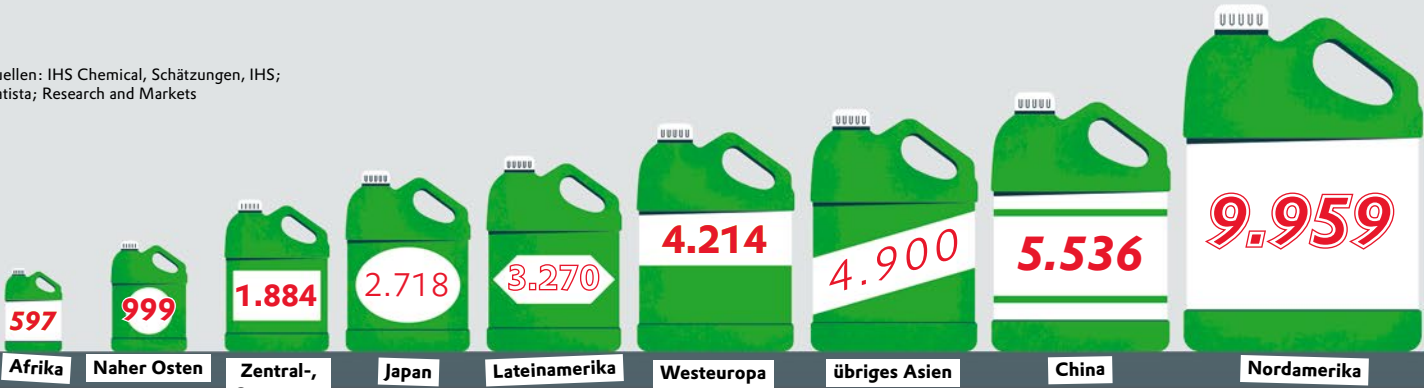
GROSSREINEMACHEN

Tenside stecken in zahlreichen Alltagsprodukten und kommen weltweit zum Einsatz. Doch die Absatzmärkte verändern sich – ebenso wie die Anforderungen der Kundschaft. Ein Überblick der Daten und Fakten

Quellen: IHS Chemical, Schätzungen, IHS; Statista; Research and Markets

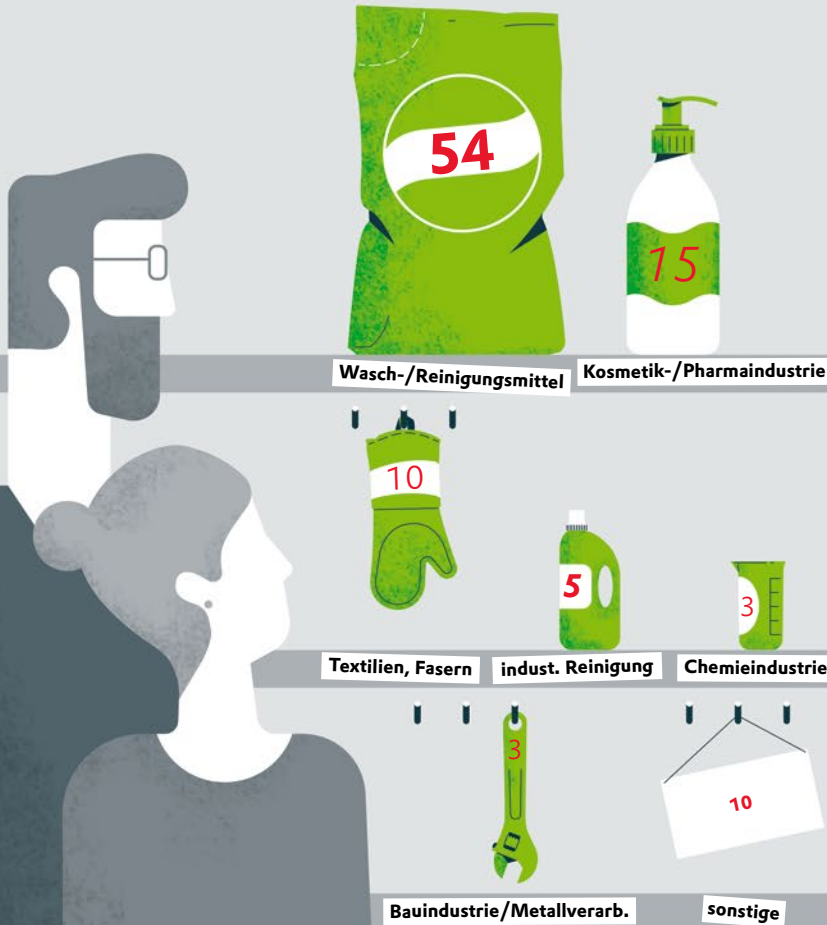
Asien und Nordamerika dominieren den Markt

Absatz von Tensiden in ausgewählten Märkten in Mio. US-\$, 2015



Größter Abnehmer sind Hersteller von Wasch- und Reinigungsmitteln

Verwendung von Tensiden nach Branchen in Prozent, 2015



Nachholbedarf in Schwellenländern

Prognostizierter jährlicher Pro-Kopf-Umsatz mit Spülmitteln in ausgewählten Ländern, 2020



Biobasierte Tenside auf dem Vormarsch

Jährlicher Umsatz (2022: prognostiziert) mit biobasierten Tensiden



Dr. Bert Nijhuis (48) leitet beim Konsumgüterkonzern Unilever von Rotterdam aus die Forschung und Entwicklung für die Hand- und Maschinengeschirrspülmittel. Der Niederländer hat in Analytischer Chemie promoviert und arbeitet seit 16 Jahren für Unilever auf dem Gebiet der Reinigungsmittel. Während seiner Karriere leitete Nijhuis Forschungs- und Entwicklungsteams in zahlreichen Ländern.



»Dies ist erst der Anfang unserer Reise mit Biotensiden«

Unilever-Experte Bert Nijhuis erklärt, worauf Konsumenten beim Spülmittelkauf achten – und warum Chile der perfekte Testmarkt für die gemeinsam mit Evonik entwickelten Biotenside ist.

INTERVIEW **CHRISTOPH BAUER**
ILLUSTRATION **ORIANA FENWICK**

Herr Nijhuis, wenn sich Unilever entscheidet, ein Produkt wie das Handgeschirrspülmittel Quix mit einer neuen Zusammensetzung auf den Markt zu bringen, welche Kriterien legen Sie dann an?

Egal welches Produkt wir irgendwo auf der Welt auf den Markt bringen, es muss Leistung bringen – und Leistung bedeutet bei einem Geschirrspülmittel vor allem, dass es sauber machen muss. Fett entfernen, Flecken entfernen und Teller und Gläser glänzen lassen. Aber das ist nicht alles. Die Menschen machen sich zunehmend Gedanken darüber, dass ihre Reinigungsprodukte möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Umwelt haben. Deshalb machen wir unsere leistungsfähigen Produkte umweltfreundlich und bieten darüber hinaus zusätzliche Vorteile, etwa eine spürbare Milde für die Haut. So schaffen wir die perfekten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Neueinführung.

»Umweltfreundliche Produkte müssen die gleiche Leistung bringen wie konventionelle – oder sogar eine bessere.«

Warum haben Sie sich gerade für Chile als ersten Testmarkt entschieden?

Unsere Daten zeigen, dass unter der dortigen Bevölkerung das Umweltbewusstsein wächst und damit die Nachfrage nach nachhaltigeren Produkten zunimmt.

Und vermutlich wird dort Geschirr auch noch zum großen Teil per Hand gespült.

Genau. Geschirrspülmaschinen sind vor allem in den USA und Europa verbreitet. Im Rest der Welt wird weiterhin Tag für Tag hauptsächlich mit der Hand gespült. Und das bedeutet, dass die Menschen viel Zeit mit ihren Händen in Seifenwasser verbringen. In Chile hatten wir bereits ein Produkt mit einer sehr handfreundlichen Zusammensetzung. Das erschien uns als großartige Möglichkeit für eine Markteinführung mit Rhamnolipiden als Tensid, da diese aus erneuerbaren Rohstoffen gewonnen werden, bioabbaubar sind und zudem sehr mild zu den Händen.

Was macht Rhamnolipide für Unilever so attraktiv?

Wir haben beobachtet, dass es ein Spannungsverhältnis gab zwischen „clean“ und „green“, also sauber und umweltfreundlich. Von „grünen“ Produkten wurde oft angenommen, dass sie weniger gut reinigen, und das stimmt bei den herkömmlichen Technologien manchmal tatsächlich. Mit Rhamnolipiden haben wir eine „grüne“ Lösung, die reinigt und sanft zur Haut ist – und darüber hinaus auch noch gut für unseren Planeten.

Ist Nachhaltigkeit für Ihr Unternehmen auf allen Märkten gleichermaßen ein wichtiger Treiber?

Es gibt sicher von Land zu Land Unterschiede. Der Grad der Luft- oder Wasserverschmutzung beeinflusst das Bewusstsein der Verbraucher ebenso wie die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Bei Meinungsumfragen landet die Sorge um die Umwelt aber in den meisten Ländern weit vorn. Und unsere Marktforschung zeigt, dass ein nachhaltiges Produkt einem konventionellen Mittel vorgezogen wird – sofern es gut funktioniert. Aber für uns als Unilever ist Nachhaltigkeit nicht allein ein Wachstumstreiber. Wir wollen auch als Unternehmen unseren Anteil dazu beitragen, die großen Probleme unserer Welt wie den Klimawandel oder die Umweltverschmutzung anzugehen.

Unilever ist in Schwellenländern stark vertreten. Was sind die besonderen Anforderungen dieser Märkte?

Viele Haushalte dort haben ein knappes Budget. Es ist daher wichtig, dass wir den Verbrauchern einen sehr guten Gegenwert bieten. Das heißt, ein hervorragendes Produkt zu einem Preis, den die Leute sich leisten können.

Akzeptieren die Verbraucher eine schwächere Leistung, wenn ein Produkt dafür umweltfreundlicher ist?

Dazu sind nur wenige Verbraucher bereit. Wenn wir Nachhaltigkeit alltäglich machen wollen, müssen umweltverträgliche Produkte die gleiche Leistung liefern wie konventionelle – oder sogar eine bessere. Das ist, so glauben wir, das Erfolgsrezept für den Verkauf.

Wie genau beobachtet Unilever die unterschiedlichen Märkte? Was wissen Sie über die Verbraucher, bevor Sie ein Produkt in den Handel bringen?

Wir investieren eine beachtliche Zeit darauf, uns mit den Verbrauchern auszutauschen, um ihre Bedürfnisse und ihre Wünsche kennenzulernen. Ein großer Teil des Erfolgs von Unilever basiert auf unserer Fähigkeit, schnell auf diese Bedürfnisse zu reagieren.

Biotenside spielen bislang noch eine relativ kleine Rolle. Werden diese Inhaltsstoffe jemals mehr sein als nur eine Marktnische?

Wir glauben, dass wir gerade erst das Potenzial der Biotenside für den Haushalt entdecken. Da immer mehr Verbraucher nach gut funktionierenden Produkten suchen, die besser für die Umwelt sind, ist dies erst der Anfang unserer Reise mit Biotensiden.

Welche Rolle spielen für Sie Zulieferer wie Evonik bei der Aufgabe, ökologische Produktversprechen einzulösen?

Unsere Zulieferer sind oft mehr als nur Zulieferer. Sie sind zugleich unsere Technologiepartner – wie auch Evonik. Jede Verbesserung der Leistung und Nachhaltigkeit unserer Produkte erfordert ein gewisses Maß an Technologie. Deshalb sind unsere Lieferanten für die Umsetzung unserer Nachhaltigkeitsagenda unerlässlich.

Bis hin zur gemeinsamen Vermarktung von Produkten?

Ja, sicher. Unilever und Evonik forschen und entwickeln auf dem Gebiet der Biotenside gemeinsam. Da ist eine gemeinsame Kommerzialisierung aus geschäftlicher Sicht absolut sinnvoll. —



Kraftakt in Krisenzeiten

Fortschrittsgeist und Innovationskraft haben China zu einem Wachstumsmotor der Weltwirtschaft gemacht. Heute, da das Land wie fast alle Staaten mit den Folgen der Coronapandemie zu kämpfen hat, sind diese Werte umso wichtiger.

TEXT **NICOLAS GARZ**





Im Herbst 2019 wurde der neue Pekinger Flughafen Daxing eröffnet, wegen seiner Seitenarme „Seestern“ genannt. Aktuell ist der Flugverkehr durch die Coronapandemie eingeschränkt. Künftig soll Daxing aber als Drehkreuz für Flugzeuge aus aller Welt dienen – und symbolisiert neben dem neuen Selbstbewusstsein Chinas Ambitionen in der Luftfahrt. Beim Flugzeugbau kommt es neben Leistung und Komfort auf Nachhaltigkeit an und damit auf das Gewicht: je leichter der Jet, desto geringer der Kerosinverbrauch. Rohacell von Evonik sorgt für leichte und stabile Flugzeuge – und ressourcenschonendes Reisen.

Der Einkauf in einer Shoppingmall, wie hier im Schanghaier Finanzdistrikt Lujiazui, ist für viele Chinesen Ausdruck wirtschaftlichen Aufstiegs und gesteigerter Lebensqualität. Wegen der Covid-19-Pandemie wurden Einkaufszentren jedoch monatelang eher spärlich besucht. Heute betreten wieder mehr Kunden die Läden, unter Einhaltung strenger hygienischer Standards. Desinfektionsmittel spielen dabei eine tragende Rolle. Ursächlich für ihre Wirkung sind auch Evonik-Produkte wie Wasserstoffperoxid, Peressigsäure und biozide Wirkstoffe wie Rewocid WK 30. Sie ermöglichen so ein Stück Normalität im Ausnahmezustand.





In der 8,3-Millionen-Einwohner-Stadt Dongguan testet der chinesische Hersteller Huawei eine 5G-Antenne. Mit einer im Vergleich zum LTE-Netz bis zu 100-mal so schnellen Übertragungsgeschwindigkeit schafft die neue Technologie beste Voraussetzungen für das Internet der Dinge, in dem Maschinen miteinander kommunizieren. China ist einer der wichtigsten Vorreiter beim Ausbau des Netzes. Und Evonik ein wichtiger Treiber der 5G-Revolution: Mit Produkten wie Siridion für Glasfaserkabel und Dynasytan für gedruckte Leiterplatten liefert das Unternehmen verlässliche Bausteine für den nächsten Schritt ins digitale Zeitalter.





■ Gutes Essen nimmt im Reich der Mitte einen besonderen Stellenwert ein. Traditionelle Genüsse wie die hier gezeigten Shumai-Teigtaschen sind ebenso beliebt wie die moderne Fusion-Küche. Der Wohlstand der vergangenen Jahrzehnte sorgt zudem dafür, dass sich immer mehr Menschen hochwertige Lebensmittel leisten können. Darauf reagiert auch die heimische Viehzucht. Damit die Tiere gesünder aufwachsen und besseres Fleisch liefern, setzt sie zunehmend auf nachhaltige Futterergänzungsmittel. Evonik fördert diesen Trend durch DL-Methionin-Aminosäuren für Hühner, Schweine, Milchkühe, Shrimps sowie durch Probiotika, die die Darmgesundheit von Geflügel und Schweinen verbessern.

— Gesundheit ist die Grundlage für ein langes Leben – in der aktuellen Notlage wird das überdeutlich. In einer alternden Gesellschaft wie der chinesischen ist die medizinische Versorgung besonders wichtig: um Leben zu retten, aber auch um ein gutes Leben im Alter zu ermöglichen, so wie hier im Pflegeheim in Sanya. Dafür ist oft fortschrittliche Medizintechnik notwendig. In China wächst beispielsweise die Nachfrage nach Prothesen und Zahnersatz. Für hochwertige medizinische Implantate liefert Evonik Produkte wie Vestakeep und Resomer – und leistet so einen Beitrag für einen würdevollen Lebensabend.



**WEITSICHTIGES
ENGAGEMENT**

Bereits in den 1930er-Jahren eröffneten die Evonik-Vorgängergesellschaften ihre erste Vertretung in China. Seitdem hat Evonik ihre Investitionen schrittweise ausgeweitet. Eine Schlüsselrolle spielt die Finanzmetropole Schanghai, wo das Unternehmen neben einem F&E-Zentrum einen Multi-User-Standort (MUSC) betreibt, an dem zurzeit mehr als 200 verschiedene Produkte hergestellt werden.

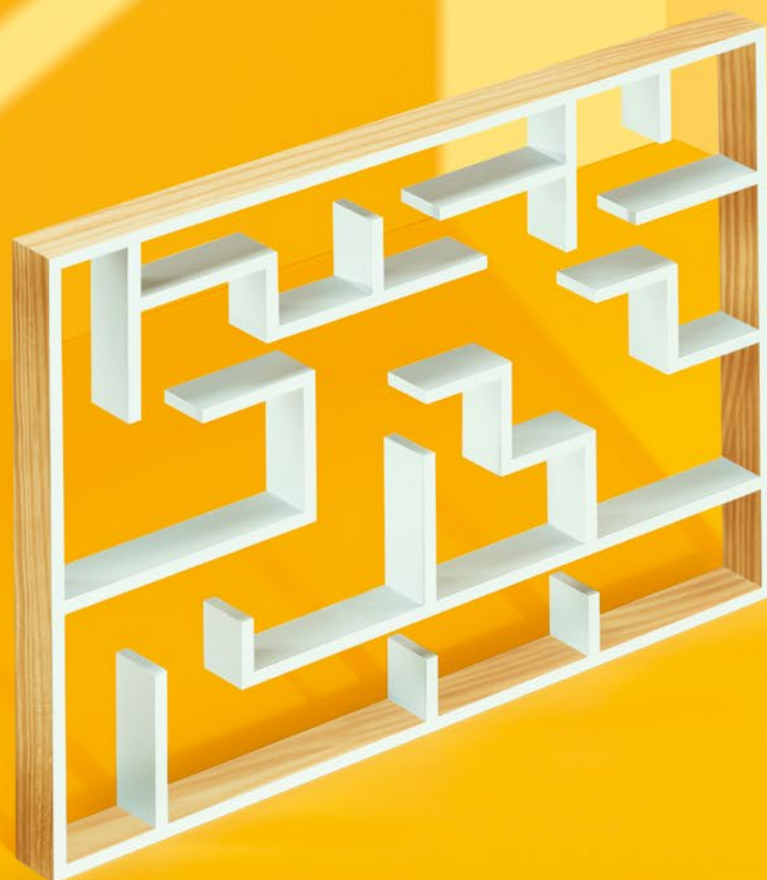
An

14

Standorten arbeiten circa

2.500

Mitarbeiter.



TRAUMHAFT ABKÜRZUNG

»Es ist manchmal gar nicht schlecht, sehr herausfordernde Ziele nicht direkt anzugehen.«

ROBERT FRANKE, LEITER DER
HYDROFORMYLIERUNGSFORSCHUNG BEI EVONIK



Chemie ist umso nachhaltiger, je effizienter Reaktionen ablaufen. Jetzt ist Evonik-Forschern, gemeinsam mit Partnern vom Leibniz-Institut für Katalyse, ein Coup gelungen: Die wichtige Industriechemikalie Adipinsäure lässt sich auf direktem Weg herstellen. Dieser Durchbruch war sogar dem Fachmagazin Science einen Beitrag wert.

TEXT **KARL HÜBNER** ILLUSTRATION **SAMY LOEWE**

Es ist mehr als 60 Jahre her, dass Schalke 04 deutscher Fußballmeister wurde. 1958 war das. Da war Professor Dr. Robert Franke noch gar nicht geboren. Umso mehr träumt der Schalke-Fan in Diensten von Evonik davon, endlich eine deutsche Meisterschaft von Königsblau zu erleben. Aber auch als Forscher hat Franke Träume. Da sind zum Beispiel ein paar chemische Reaktionen, die bisher keinem Labor der Welt je gelungen sind. Einige davon sind so unrealistisch wie die baldige Meisterschaft des Zweitligisten und Schalke-Nachbarn VfL Bochum, andere immerhin denkbar – so wie ein Titelträger aus Gelsenkirchen.

Chemiker sprechen tatsächlich von „Traumreaktionen“. Bei einer davon gelang Franke gemeinsam mit Partnern vom Rostocker Leibniz-Institut für Katalyse (LIKAT) vor Kurzem ein Durchbruch. Und wenn man so will, ist der Traum von dieser Reaktion ähnlich alt wie der der Schalke-Fans von der Meisterschale: Die Literatur über entsprechende Arbeiten reicht zurück bis in die 1950er-Jahre.

Es geht um die direkte Umsetzung von Butadien zu Adipinsäure. Diese Dicarbonsäure ist ein wichtiger Ausgangsstoff für viele andere Produkte (siehe Kasten Seite 56), zum Beispiel Nylon. Weltweit werden pro Jahr einige Millionen Tonnen Adipinsäure produziert. Bislang erreichen die Hersteller ihr Ziel nur über chemische Umwege und aggressive Chemikalien wie Salpetersäure. Außerdem müssen sie sich mit dem Nebenprodukt Lachgas herumschlagen, das für das Klima pro Molekül rund 300-mal so schädlich ist wie Kohlendioxid. →



»Es ist schön, wenn wir unsere akademische Forschung auf konkrete Industriebeispiele anwenden können.«

MATTHIAS BELLER, DIREKTOR DES LEIBNIZ-INSTITUTS FÜR KATALYSE (LIKAT)

Adipinsäure in einem Schritt aus Butadien zu gewinnen wäre also deutlich nachhaltiger. Kein Wunder, dass der nun erzielte Erfolg sogar der renommierten Fachzeitschrift *Science* einen Beitrag wert war.

Wenn Chemiker die Gleichung zu dieser Reaktion aufschreiben, sieht das ziemlich simpel aus: An beide Enden des Butadienmoleküls wird jeweils eine sogenannte Carbonsäuregruppe (COOH) angehängt – fertig ist die Adipinsäure. Doch so einfach ist das in der Praxis nicht. Das beweisen die vielen Versuche, die in den zurückliegenden Jahrzehnten allenfalls zu Teilerfolgen führten. „Ein Problem sind die vielen möglichen Nebenreaktionen zu unerwünschten anderen Substanzen“, erklärt Franke. Ein weiteres Hindernis besteht darin, dass das Anhängen jeder COOH-Gruppe in zwei separaten Stufen verläuft, die bisher nur unabhängig voneinander gelangen. „Das erfordert umständliche Trenn- und Reinigungsschritte, die das Ganze vergleichsweise unwirtschaftlich machen“, so der Forscher.

Der nun erzielte Durchbruch gelang, wie so oft in der Chemie, dank eines geeigneten Katalysators. „Ohne die Kollegen vom LIKAT hätten wir das nicht geschafft“, sagt Franke ganz unumwunden. Der gemeinsame Erfolg ist nicht der erste in der 23 Jahre währenden Kooperation zwischen LIKAT und Evonik: Die Partner haben bereits acht gemeinsam entwickelte Verfahren in den Technikumsmaßstab übertragen und mehr als 140 Patente angemeldet. Seit vielen Jahren schicken sie zudem Personal für begrenzte Zeit ins jeweils andere „Lager“, um von der Kompetenz des Partners zu profitieren. „Eine sehr fruchtbare Kooperation“, findet Franke.

ZUFÄLLIGES NEBENPRODUKT

Dass der Industrieforscher sich für Adipinsäure interessiert, ist dabei ungewöhnlich. Schließlich spielt diese Chemikalie bei Evonik bislang keine Rolle. Franke bemüht für solche Exkurse gern das Wort „Serendipität“, will heißen: Die Entdeckung ist zwar bedeutsam, war aber gar nicht angestrebt. Ein zufälliges Nebenprodukt.

„Es ist manchmal gar nicht schlecht, sehr herausfordernde Ziele nicht direkt anzugehen, sie aber trotzdem immer im Hinterkopf zu behalten“, sagt Franke. Eine Traumreaktion wie die von Butadien zur Adipinsäure, die habe man als Industriechemiker eben immer im Kopf. Und irgendwann vor wenigen Jahren war dann die Stunde gekommen, sich daran zu erinnern und einen eigenen Versuch zu starten.

Grundlage dafür war ein Durchbruch rund um die Hydroformylierungsforschung, die Franke bei Evonik leitet. Hydroformylierung ist ein bewährtes Verfahren, bei dem man ungesättigte Kohlenwasserstoffe, sogenannte Olefine, mit Synthesegas, einer Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, reagieren lässt, um Carbonylgruppen (CO) in die Moleküle einzubauen. Im

Adipinsäure ist Ausgangsstoff für viele Produkte, zum Beispiel Polyamid 6.6 – besser bekannt als Nylon. Die Kunstfaser findet unter anderem Verwendung in reißfesten Geweben, Seilen und Saiten für Musikinstrumente.



Chemiepark Marl, wo auch Robert Franke sein Büro hat, überführt Evonik auf diese Weise alljährlich mehrere Hunderttausend Tonnen petrochemische Rohstoffe in Zwischenprodukte.

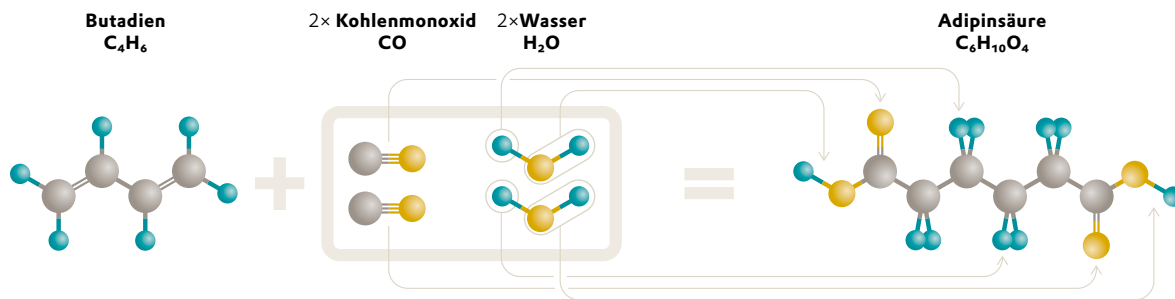
Auch bei etablierten Prozessen lohnt es sich immer, Möglichkeiten zur Optimierung zu suchen. Geht es noch wirtschaftlicher, noch nachhaltiger? „Das sind Fragen, die mich antreiben“, sagt Franke. Unter anderem tüftelt er seit zehn Jahren an der Alkoxy-carbonylierung, die die Hydroformylierung womöglich ersetzen könnte. Dabei bearbeitet man die Doppelbindungen der Olefine mit einer Mischung aus Kohlenmonoxid und einem Alkohol. Das Ergebnis sind Ester. Da viele Produkte aus Hydroformylierungen für die spätere Verwendung ohnehin in Ester überführt werden, wäre eine direkte Synthese elegant und nachhaltig zugleich.

„HEIRATSVERMITTLER“ GESUCHT

Vor allem die Suche nach dem passenden Katalysator stellte die Forscher vor Herausforderungen. Katalysatoren werden gern als „chemische Heiratsvermittler“ bezeichnet, da sie Moleküle zusammenbringen und dabei bestehende Energiebarrieren überwinden helfen. Häufig handelt es sich um komplexe Moleküle, die vielfältige Aufgaben erfüllen. So durchläuft etwa die geplante Alkoxy-carbonylierung eines Olefins vier bis fünf Über-

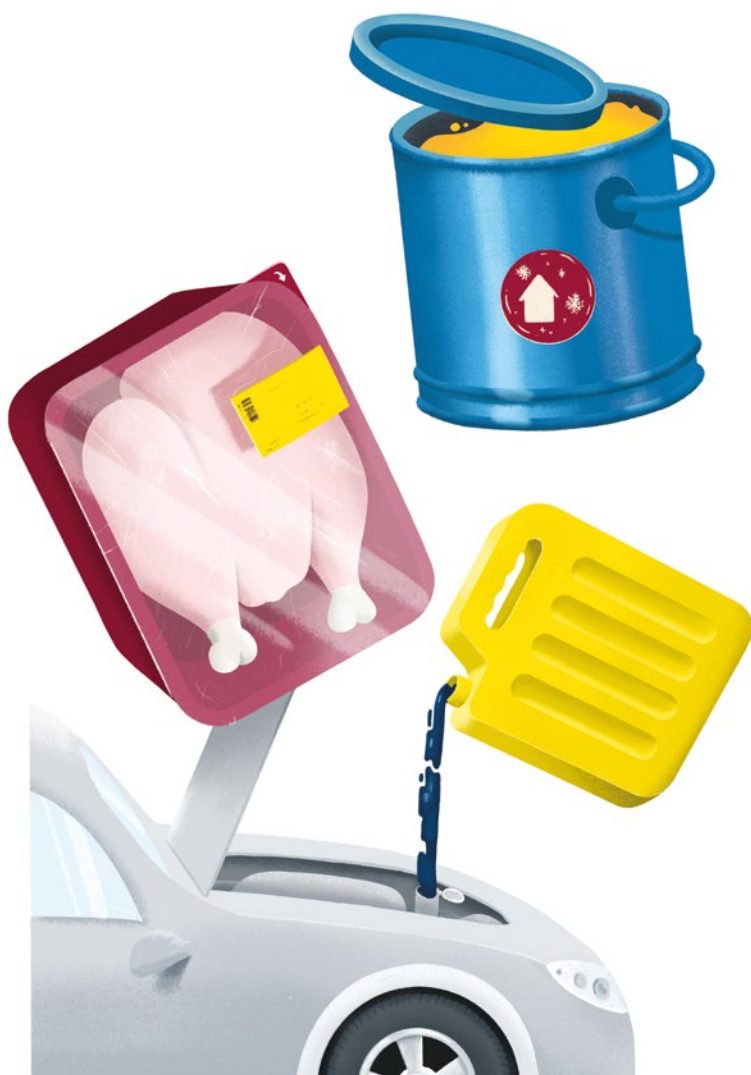
gangszustände, wobei jeder Übergang vom Katalysator unterstützt werden muss. 2015 startete man daher eine weitere Kooperation mit den Spezialisten am LIKAT. Dessen Leiter, Professor Dr. Matthias Beller, sagte sofort zu: „Für uns ist es immer schön, wenn wir unsere akademische Forschung auf konkrete Beispiele aus der Industriepraxis anwenden können.“

Als Ausgangspunkt wählte sein Team einen industriell bereits etablierten, für die Evonik-Zwecke aber untauglichen Katalysator. Die LIKAT-Spezialisten veränderten Molekülgruppen so, dass vor allem die →



Eine Säure für viele Fälle

Für die chemische Industrie ist Adipinsäure ein wichtiges Zwischenprodukt. Jährlich werden einige Millionen Tonnen davon produziert. Der mit Abstand größte Teil geht in die Herstellung von Polyamid 6.6 (Nylon), aus dem man Fasern für leichte, reiß- und abriebfeste Textilgewebe, aber auch Saiten für Zupfinstrumente oder Tennisschlägerbespannungen sowie verschleißfeste Bauteile wie Zahnräder fertigt. Darüber hinaus ist Adipinsäure ein Rohstoff für bestimmte Polyurethane, die sich etwa in Skischuhen, Sportschuhsohlen, Golfbällen, Schaumstoffen, Lacken und Klebstoffen finden. Aus Adipinsäure gewinnt man außerdem Weichmacher für Kabel, Schläuche, Folien und Lebensmittelverpackungen aus PVC, Zusätze, um Farben und Lacke kältestabil zu machen, sowie Komponenten für Schmierstoffe. Adipinsäure selbst ist auch als Säuerungsmittel für Lebensmittel zugelassen (E355). Der Name geht zurück auf das lateinische Wort *adipes* (tierische Fette). Früher gewann man Adipinsäure durch Oxidation von Fett, später ersetzten erdölbasierte Rohstoffe das natürliche Ausgangsmaterial. Die entsprechende Synthese erfolgt bislang in mehreren Stufen. Mit der jetzt realisierten Reaktion gelang es mittels eines eigens entwickelten Katalysators erstmals, die Adipinsäure direkt aus Butadien zu gewinnen. Dabei werden in einem Prozessschritt mittels Kohlenmonoxid und Wasser zwei Carbonsäuregruppen an das Butadienmolekül gehängt.



Ester der Adipinsäure kommen beispielsweise als Weichmacher in PVC-Lebensmittelverpackungen sowie als Zusatz in Lacken und Schmierstoffen zum Einsatz.

zweite Stufe der Reaktion, das Anlagern des Alkohols, schneller ablaufen kann. 2017 publizierte das Team um Franke und Beller den Durchbruch. Mit dem neuen Katalysator gelingt es nun, einfach ungesättigte Olefine in guter Ausbeute in Ester zu überführen. Evonik bereitet derzeit bereits erste Umstellungen auf das neue Verfahren in kommerziellem Maßstab vor.

Nach diesem Erfolg musste Robert Franke unwillkürlich wieder an seine Traumreaktion denken – Stichwort Serendipität. Würde der Katalysator vielleicht auch bei Butadien funktionieren? Dort geht es ja ebenfalls um eine Carbonylierung, wobei allerdings gleich zwei CO-Gruppen eingeführt werden müssen.

Und siehe da: Es funktionierte schon ganz gut. Allerdings entstanden zu viele störende Nebenprodukte. Diese unbefriedigende Selektivität wollten die Forscher verbessern und kombinierten daraufhin Molekülgruppen aus dem industriell etablierten System und ihrem bisherigen Kandidaten. Das brachte den Durchbruch. Science druckte das Ergebnis kurz vor Weihnachten 2019 – und fügte noch einen ganzseitigen Expertenkommentar hinzu, der die erzielte Selektivität und Produktausbeute als „herausragend“ hervorhob.

Einen kleinen Schönheitsfehler hat diese Reaktion allerdings noch. Sie führt zunächst „nur“ zu einem Adipinsäureester. Um zur Säure selbst zu gelangen, ist noch die Zugabe von Wasser nötig. Direkt in einem Rutsch gewönne man die Adipinsäure nur dann, wenn man die Reaktion statt mit einem Alkohol mit Wasser durchführen könnte. Das war zunächst schwierig. Inzwischen ist das Team dort aber ebenfalls weitergekommen. „Mit einem anderen Lösungsmittel geht auch das“, so Matthias Beller zu dem – bisher noch nicht publizierten – Anschluss Erfolg.

Für die industrielle Praxis reicht dieses Ergebnis allerdings noch nicht aus. „Die Synthese des Katalysators ist sehr kompliziert und überdies unwirtschaftlich“, so Franke. Außerdem zersetzen sich Teile des komplexen Moleküls während des Prozesses. Derzeit ist Matthias Bellers Team in Rostock dabei, einen ähnlich guten, aber leichter herstellbaren und stabileren Katalysator zu entwerfen.

AUS DEM LABOR IN DIE GROSSTECHNIK

Parallel zur Weiterentwicklung des Katalysators arbeitet Frankes Evonik-Team bereits an der Überführung der Reaktion in den technischen Maßstab. Bisher fanden die Tests im Labormaßstab statt, mit Substanzmengen von wenigen Hundert Gramm. Die nächste Stufe in einer sogenannten Miniplant solle zeigen, ob der Prozess in einem solchen Reaktor dauerhaft stabil funktioniert, so Franke.

Irgendwann wird sich Evonik dann auch entscheiden, ob man selbst Adipinsäure produziert oder das Verfahren anderweitig vermarktet. Den wichtigsten Rohstoff, Butadien, hätte man aus dem unternehmens-eigenen C4-Chemie-Produktionsverbund direkt am Standort Marl. Der Verbund basiert auf dem sogenannten C4-Schnitt aus Erdölcrackern, womit Kohlenwasserstoffe mit vier Kohlenstoffatomen gemeint sind. Butadien ist einer davon.

Egal wer das Verfahren eines Tages nutzt, es würde die Adipinsäureproduktion einfacher und vor allem auch nachhaltiger machen. „Unschöne Chemie“ (Franke) wird vermieden, und sämtliche Ausgangssubstan-

zen finden sich vollständig im Produkt wieder. Es entsteht keinerlei Abfall. Künftig könnte man auch einige der Ausgangsstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugen, zum Beispiel das Synthesegas, aus dem Kohlenmonoxid für die Adipinsäureherstellung abgetrennt wird. Immerhin zwei der insgesamt sechs Kohlenstoffatome im Endprodukt ließen sich laut Franke somit „grün“ erzeugen.

Die Traumreaktion ist also schon fast wahr geworden. Und sollte aus dem Laborerfolg ein großtechnischer Prozess werden, der das herkömmliche Verfahren zur Herstellung von Adipinsäure ablöst, wäre das eine große Sache. Auch für Robert Franke. Da würde er es sogar verschmerzen, wenn die nächste Meisterfeier auf Schalke doch noch etwas auf sich warten ließe. —



Bei der Herstellung bestimmter thermoplastischer Polyurethane wird ebenfalls Adipinsäure verwendet. Aus ihnen entstehen etwa Skistiefel, Skateboardrollen oder Ohrmarken für Tiere.

A hand wearing a blue nitrile glove is shown against a solid pink background. The hand is making a 'rock on' or 'devil horns' gesture, with the index and ring fingers extended upwards and the thumb and pinky fingers curled down. A dark shadow of the hand is cast onto the pink background to the left. The text 'SAUBER BLEIBEN' is overlaid in large white letters across the middle of the image.

SAUBER BLEIBEN

Wir leben im Zeitalter der Hochleistungsmedizin. Doch ein langes und gesundes Leben ist ohne Fortschritte in der Hygiene auch heute undenkbar.

TEXT **BJÖRN THEIS**

Seit Beginn der Menschheitsgeschichte ist unsere Lebensdauer kontinuierlich gestiegen. Vor allem im 20. Jahrhundert beschleunigte sich dieser Effekt: Um 1900 wurden Männer in Deutschland durchschnittlich 45 und Frauen 48 Jahre alt – heutzutage dürfen sie beinahe das Doppelte an Lebenszeit erwarten.

Diese Entwicklung verdanken wir zu großen Teilen der Hygiene, die den Ausbruch von Krankheiten verhindert. Erst der neuzeitliche Ausbau der öffentlichen Hygiene – von einer funktionierenden Kanalisation bis hin zu Impfpflichten – und eine effiziente private Hygiene durch wirksame Putzmittel, Toilettenpapier oder Zahnpasta machten eine so lange Lebensspanne möglich.

Dabei reicht die Historie der Hygiene zurück bis in die griechische Mythologie. Namensgeberin ist Hygieia, die Göttin der Gesundheit und Tochter von Asklepios, dem Gott der Medizin. Einer ihrer bekanntesten Verehrer: Hippokrates, der eine gewissenhafte Körperpflege zur Vermeidung von Krankheiten empfiehlt. Auch im Römischen Reich herrscht großes Hygienebewusstsein, öffentliche Badeanstalten und Toiletten gehören zum Stadtbild. Gelehrte vermuten bereits damals, dass „kleine Tiere“, die mit dem Auge nicht zu erkennen sind, Krankheiten verursachen. Sichtbar werden diese Mikroorganismen jedoch erst

fast 2.000 Jahre später: 1675 beobachtet der niederländische Kaufmann Antoni van Leeuwenhoek erstmals Bakterien unter einem Mikroskop.

KAMPF GEGEN BAKTERIEN

Im 19. Jahrhundert beschleunigt sich die Entwicklung der Hygiene rasant: Ignaz Philip Semmelweis entdeckt den immensen Nutzen der Handdesinfektion und reduziert damit die Müttersterblichkeit dramatisch. Zur selben Zeit führt Joseph Lister die antiseptische Wundbehandlung mit desinfizierender Carbolsäure (Phenol) ein, die das Sterben durch Wundfieber beendet. Louis Pasteur entdeckt die Wirksamkeit des Erhitzens von Lebensmitteln, um sie keimfrei zu machen, und wenig später isoliert Robert Koch den Tuberkulose-Erreger und begründet damit neben Pasteur die moderne Bakteriologie. Wirksam heilen kann man bakterielle Infektionskrankheiten allerdings auch da noch nicht. Erst 1929 entdeckt Alexander Fleming das erste Antibiotikum, das Penicillin.

Heute ist die Geschichte der Hygiene nicht zu Ende. Zwar können wir Krankheiten wie Pest oder Tuberkulose behandeln, gegen viele andere Infektionserkrankungen gibt es jedoch gegenwärtig noch keine Medikamente – auch nicht gegen Covid-19. So bleiben strenge Hygieneregeln die beste Waffe im Kampf für die Gesundheit.

Während in der westlichen Welt meist das Notwendige zur Verfügung steht, um die wichtigsten Hygieneregeln einzuhalten, sieht es in den Entwicklungsländern anders aus: Mehr als 50 Prozent der indischen Haushalte verfügen über keine eigene Toilette, die Hälfte der Weltbevölkerung wäscht ihre Wäsche per Hand, und noch immer haben sehr viele Frauen keinen Zugang zu Menstruationshygieneprodukten.



Björn Theis ist Head of Corporate Foresight der Evonik-Innovationseinheit Creavis. Seine ELEMENTS-Kolumne erscheint regelmäßig auf elements.evonik.de.

EINE GLOBALE HERAUSFORDERUNG

Doch Krankheiten kennen keine Ländergrenzen, und in der heutigen globalisierten Welt verbreiten sie sich schneller als je zuvor. Aufgrund des Klimawandels müssen wir uns auf mehr Infektionen vorbereiten: Durch steigende Temperaturen erweitern sich Reichweite und Saisonalität von Stechmückenarten und den von ihnen eingeschleppten Viren. In entwickelten Ländern hat die breite Verwendung von Antibiotika zudem dazu geführt, dass immer mehr Bakterienstämme resistent gegen aktuelle Medikamente sind. So ist eine strikte Hygiene auch heute oft das beste Mittel, um Krankheiten Einhalt zu gebieten.

Die hygienischen Herausforderungen werden in Zukunft nicht kleiner. Daher analysieren das Corporate-Foresight-Team und die Wissenschaftler der Creavis neue Ansätze und Konzepte in der Hygiene wie antimikrobielle Oberflächen und Beschichtungen oder den Einsatz von Phagen – Viren, die spezifische Bakterien angreifen und zerstören. Das Ziel: eine saubere und gesunde Zukunft. —



»Die solide Basis meiner Sammlung ist Eisen«

PROTOKOLL ANNA SCHRIEVER
ILLUSTRATION ORIANA FENWICK

Chemie war nicht immer meine Leidenschaft. In der Schule habe ich zunächst nicht viel verstanden. Die chemischen Formeln waren für mich ein Buch mit sieben Siegeln. Nach und nach habe ich dann begriffen, dass alles um uns herum aus chemischen Elementen besteht. Unsere Umgebung ist Chemie zum Anfassen! Als ich 14 Jahre alt war, habe ich damit begonnen, chemische Elemente zu sammeln. Mein erstes war Eisen und stammte aus meinem Chemiebaukasten. Es ist die solide Basis meiner Elementesammlung.

Mittlerweile besitze ich 56 von insgesamt 118 Elementen des Periodensystems. Dabei ist wichtig zu wissen, dass lediglich 81 Elemente zugänglich sind und nur 70 für eine Sammlung infrage kommen. Einige Elemente sind sehr instabil und zerfallen wegen ihrer Radioaktivität innerhalb sehr kurzer Zeit. Andere sind giftig und können daher nicht gesammelt werden.

Aus heutiger Sicht ist meine Sammlung einzigartig. Viele Elemente sind so selten und wertvoll geworden, dass Privatleute sie nicht mehr einfach kaufen können. Das mit Abstand teuerste Element meiner Sammlung ist Europium. 1982 zahlte ich

für ein halbes Gramm mehr als 50 D-Mark. Heute wäre es um ein Vielfaches teurer. Klar, dass es die meisten chemischen Elemente nicht an jeder Straßenecke zu kaufen gibt. Meist habe ich sie über das frühere Unternehmen Degussa oder den Chemikalienfachhandel bezogen.

Ich finde besonders die Entdeckung der einzelnen Elemente spannend und wie sie ihre Namen erhielten. So wurde zum Beispiel das silberweiß glänzende Übergangsmetall Rhenium im Jahre 1925 nach dem Rheinland benannt. Manchmal sind auch berühmte Forscher Namensgeber, zum Beispiel die österreichisch-schwedische Physikerin Lise Meitner, nach der das Meitnerium benannt ist.

Neben den chemischen Elementen „sammele“ ich auch Fremdsprachen. Ich spreche zehn davon, wobei ich mir die meisten selbst beigebracht habe. Mein Spektrum reicht von Englisch und Französisch über Spanisch, Portugiesisch, Italienisch, Dänisch, Niederländisch, Serbisch und Rumänisch (die beiden letztgenannten müsste ich auffrischen) bis hin zu Lesekenntnissen des Norwegischen, Schwedischen und Afrikaans. Die Leidenschaft zur Chemie und die zur Sprache verbinde ich aktuell in einem Buchprojekt: Ich schreibe ein Handbuch für Industriechemiker über alle Elemente. Das Buch wird mehr als 1.000 Seiten umfassen und voraussichtlich im kommenden Jahr erscheinen. —

Hermann Sicius (61) ist Diplom-Chemiker und arbeitet beim Chemieunternehmen Lanxess in der Business Unit Liquid Purification Technologies. Er ist am Standort Leverkusen in der Forschung tätig und kümmert sich um die Patentrecherche.

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.) | **CHEFIN VOM DIENST** Inga Borg, Deborah Lippmann | **TEXTCHEF** Christian Baulig, Jörg Wagner | **ONLINE-REDAKTION** Nicolas Garz, Nadine Nösler | **BILD-REDAKTION** Nadine Berger | **LAYOUT** Wiebke Schwarz (Art Direction), Magnus Wiedenmann (Grafik) **ANSCHRIFT DER REDAKTION** KNSKB+ | An der Alster 1 | 20099 Hamburg | **DRUCK** Neef+Stumme premium printing, Wittingen | **COPYRIGHT** © 2020 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 | **BILDNACHWEISE** Cover: Getty Images | S. 2 Kirsten Neumann | S. 4–5 Getty Images, Bloomberg via Getty Images | S. 6–7 Getty Images | S. 8–9 Getty Images, Glenn J. Asakawa, Peter Leßmann, Illustration KNSKB+ | S. 10 Christian Lohfink/Upfront | S. 11–19 thyssenkrupp Steel Europe (2), Dieter Debo, Heiner Müller-Elsner/Agentur Focus, picture-alliance/dpa (2), AFP via Getty Images, Getty Images (2), Paris Match via Getty Images, Alstom/René Frampe, Jean Marie Urlacher, Daimler; Illustrationen GET H2, Henrik Abrahams mit Fotovorlagen: Evonik (3), BMBF/Laurence Chaperon | S. 20–21 Infografik Maximilian Nertinger | S. 22–27 Illustrationen Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlagen: picture-alliance/ZB (2), picture-alliance/dpa, Bela Biank; Foto privat | S. 28–32 mauritius images/Science Source/GIPhotoStock, Enapter (3), Dieter Debo (3); Illustrationen Henrik Abrahams mit Fotovorlagen: Evonik, Enapter | S. 33 Infografik Maximilian Nertinger | S. 34–35 Bernd Brundert | S. 36–40 Christian Lohfink/Upfront, Evonik (3); Illustration: Henrik Abrahams mit Fotovorlage: Evonik; Infografiken: C3 Visual Lab, Maximilian Nertinger | S. 42 Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlage: privat | S. 44–51 ddp/BJNews-Imaginechina, Zhou Junxiang-Imaginechina/laif, Todd Darling/Polaris/laif, ddp/Xinhua/Sipa USA, Bryan Denton/NYT/Redux/laif | S. 52 Christian Lohfink/Upfront | S. 51–57 Illustrationen: Henrik Abrahams mit Fotovorlagen: Evonik, Pablo Castagnola, Samy Löwe/Die Illustratoren (3); Infografik: Max Nertinger | S. 58–59 Cactus Creative Studio/stocksy.com, Evonik | S. 60 Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit Fotovorlage: Matthias Koch/Lanxess

elements.evonik.de

»»Das Wasser ist die Kohle der Zukunft.

Ich bin davon überzeugt, dass das Wasser dereinst als Brennstoff Verwendung findet, dass Wasserstoff und Sauerstoff, die Bestandteile desselben, zur unerschöpflichen und bezüglich ihrer Intensität ganz ungeahnten Quelle der Wärme und des Lichtes werden.«

AUS DEM ROMAN »DIE GEHEIMNISVOLLE INSEL« (1875) VON JULES VERNE

2/2020 **Wasserstoff**