

ELEMENTS

Forschen. Wissen. Zukunft.



Ende gut, alles gut

**Probiotische Futtermittelzusätze halten den Geflügeldarm
gesund und senken den Einsatz von Antibiotika → S.10**

Grüner Wasserstoff: Günstiger durch Hightech-Membranen → S.22

Chemisches Recycling: Innovative Filter für die Pyrolyse → S.36

Probiotikum

Präparat mit lebenden Mikroorganismen zur Stabilisierung des Mikrobioms

Der Name Probiotikum leitet sich vom lateinischen pro („für“) und dem altgriechischen bios („Leben“) ab. Ein Probiotikum ist eine Zubereitung aus lebenden Mikroorganismen, meist Milchsäurebakterien oder Hefen, die Lebensmitteln, Nahrungsergänzungspräparaten oder Medikamenten hinzugefügt wird. Anders als Antibiotika sollen Probiotika das Gleichgewicht des Mikrobioms stabilisieren. Sie können krank machende Keime verdrängen, antimikrobielle Substanzen bilden, den pH-Wert beeinflussen und das Immunsystem aktivieren. Probiotika werden zur Prävention und unterstützenden Behandlung verschiedener Erkrankungen eingesetzt.

Mikroorganismus Mikroskopisch kleines Lebewesen, das als Einzelwesen mit bloßem Auge nicht erkennbar ist; oft auch Mikrobe oder Kleinstlebewesen genannt

Antibiotika Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen, die Infektionen bekämpfen, indem sie Bakterien abtöten oder deren Wachstum hemmen

Mikrobiom Als komplexe Lebensgemeinschaft verstandene Gesamtheit aller Mikroorganismen, die ein Lebewesen besiedeln



LIEBE LESERIN, LIEBER LESER,

Resilienz war bis vor wenigen Jahren eine Vokabel, mit der nur Physiknerds oder Werkstoffwissenschaftler etwas anfangen konnten. Heute taucht sie überall auf, in vielen Kreisen wird sie so inflationär verwendet wie Nachhaltigkeit. Ursprünglich stand Resilienz für die Fähigkeit eines Körpers, nach einer Verformung wieder seine eigentliche Gestalt zurückzugewinnen. Wenn es besonders viele krisenhafte Entwicklungen gibt, gewinnt solch ein Konzept naturgemäß an Bedeutung.

Inzwischen überwiegt der übertragene Sinn: Resilienz als Fähigkeit, aus eigener Kraft Probleme zu bewältigen und somit widerstandsfähig zu sein. Drei Beispiele stellen wir in diesem Heft vor. Da geht es zum einen um körperliche Widerstandskraft von Zuchtgeflügel. Viel zu oft erhalten die Tiere Antibiotika, was sich mittelbar auch für Menschen zum Problem auswächst. Eine Innovation made by Evonik hält dagegen und ermöglicht resiliente Ernährungssysteme.

Ein zweiter Fall führt in die Energiewelt: Grüner Wasserstoff aus Sonnen- oder Windkraft gilt als Schlüssel für die Defossilierung der Industrie. Doch noch ist der nachhaltige Rohstoff zu teuer. Eine neue Membran, die von unseren Expertinnen und Experten in Marl entwickelt wurde, macht die Produktion günstiger und erleichtert die Abkehr von fossilen Rohstoffen. Ebenfalls ein wertvoller Beitrag, der die Resilienz erhöht.

Das Gleiche trifft zu auf eine Evonik-Entwicklung für die Petrochemie, die zunehmend auf Pyrolyseöl aus Kunststoffabfällen setzt. Das Problem dabei sind die im Recyclingprodukt enthaltenen Verschmutzungen. Evonik hat etwas erfunden, das viele unerwünschte Inhaltsstoffe entfernt. In diesem Fall liegt der Weg zu mehr Resilienz in der Reinheit.

Für Evonik ist klar: Ganz gleich, welche Systeme wir resilienter machen wollen – Nachhaltigkeit wird dabei nicht an Bedeutung verlieren. Resilienz und Nachhaltigkeit sind für uns zwei Seiten derselben Medaille, wie die Beispiele in unserer aktuellen Ausgabe zeigen.

Ich wünsche Ihnen spannende Einblicke. Wenn Sie Fragen, Anregungen oder Kritik zu diesem Heft haben, schreiben Sie mir gern: elements@evonik.com

Jörg Wagner

Chefredakteur

Sämtliche Artikel aus dem gedruckten Magazin sowie weitere aktuelle Inhalte finden Sie im Internet unter elements.evonik.de



Gesunder Schluck: Die Putenküken in diesem Stall werden über das Trinkwasser mit Ecobiol Fizz versorgt. Das Probiotikum von Evonik verbessert die Balance im Darmmikrobiom der Tiere und macht sie weniger anfällig für bakterielle Infektionen. So kann der Einsatz von Antibiotika deutlich reduziert werden.

PROBIOTIKA

10 Stall-Meister

Antibiotika sind ein Segen für die Menschheit. Immer öfter schlagen Therapien damit jedoch nicht mehr an. Grund hierfür sind zunehmende Resistenzen von Bakterien – ausgelöst durch den übermäßigen Einsatz unter anderem in der Tierhaltung. Mit dem Probiotikum Ecobiol bietet Evonik Züchtern und Landwirten eine wirksame Alternative, die unerwünschte Nebenwirkungen vermeidet.

DATA MINING

21 Ursache und Wirkung

Antibiotika-Resistenzen nehmen weltweit zu. Ein Überblick in Zahlen

GRÜNER WASSERSTOFF

22 Polymehrwert

Die Wasserelektrolyse ist die Schlüsseltechnologie zur Herstellung grünen Wasserstoffs. Als besonders aussichtsreich gilt die AEM-Technologie, die Vorteile mehrerer Verfahren vereint. Evonik hat hierfür Polymermembranen entwickelt, die nun auch in großen Mengen produziert werden können.

INTERVIEW

32 »Grüner Wasserstoff ist noch zu teuer«

Der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft erfordert technische Innovationen und staatliche Regulierung. Die Expertin für Energiesystemtechnik Ann-Kathrin Klaas erklärt, worauf es ankommt.

Fortschritt von der Rolle: In einer Pilotanlage in Marl produziert Evonik eine neu entwickelte Hochleistungsmembran. Sie ist der Schlüssel zu günstigerem grünen Wasserstoff.

PYROLYSE

36 Reine Formsache

Lassen sich Kunststoffabfälle nicht sortenrein trennen, kommt oft die Pyrolyse zum Einsatz. Damit das dabei gewonnene Öl wieder in möglichst hochwertigen Kunststoffen verarbeitet werden kann, muss es von Verunreinigungen befreit werden – mit innovativen Adsorbentien.

SCHAUBILD

46 Einmal Kunststoff und zurück

Deponie oder Verbrennung sind keine Option. So wird aus geschreddertem Plastikmüll wieder ein wertvoller Rohstoff für neue Produkte.



Auf ein Neues: Die Firma Arcus Greencycling stellt aus zerkleinertem Plastikabfall Pyrolyseöl her, das bei der Produktion von neuem Kunststoff genutzt wird.

6 PERSPEKTIVEN
Neues aus Wissenschaft und Forschung

48 FORESIGHT
Auf in den Jungbrunnen!
Wie Mediziner den Traum von der ewigen Jugend Wirklichkeit werden lassen wollen

50 IN MEINEM ELEMENT
Zinn
Martin Hiltmann verleiht Orgelpfeifen mit fein abgestimmten Legierungen den richtigen Ton.

51 IMPRESSUM





Die Welt steckt voller Herausforderungen. Evonik arbeitet an innovativen Lösungen, die ebenso ökonomisch wie nachhaltig sind. Hier stellen wir sie vor.

Das Problem: Farben und Lacke schützen Oberflächen und machen das Leben bunter. Häufig enthalten sie Siloxane, die dafür sorgen, dass sich die Produkte gleichmäßig auf dem Untergrund verteilen und nach dem Aushärten Wasser und Schmutz abweisen. Außerdem erhöhen sie die Witterungs- und UV-Beständigkeit. In siloxanhaltigen Farben und Lacken können jedoch Nebenbestandteile vorkommen, die von der Europäischen Union als Substances of Very High Concern (SVHC) eingestuft werden, also als Stoffe mit besonders besorgniserregenden Eigenschaften.

Die Lösung: Evonik stellt zahlreiche siloxanbasierte Additive her. Bei 95 Prozent dieser Produkte liegt der SVHC-Gehalt unter 0,1 Prozent, sodass sie für den Einsatz in Farben und Lacken mit Ecolabel-Zertifizierung geeignet sind. Eine gezielte Auswahl der Rohstoffe und optimierte Herstellungsprozesse haben dazu geführt, dass Verunreinigungen durch problematische Siloxane deutlich reduziert werden konnten.

Das frühere Fischerdorf Punta Brava auf Teneriffa ist bekannt für seine leuchtend bunten Häuschen. Das relativ feuchte Klima und die salzhaltige Luft an der Nordküste der spanischen Atlantikinsel machen einen schützenden und robusten Anstrich der Fassaden und Dachterrassen besonders wichtig.

Da dreht sich was

Ein Windpark in den Niederlanden wird abgebaut. Die Rotorblätter der Anlagen sind bislang schwer zu recyceln.

Reparaturfähige Rotorblätter machen Windkraftanlagen noch nachhaltiger.

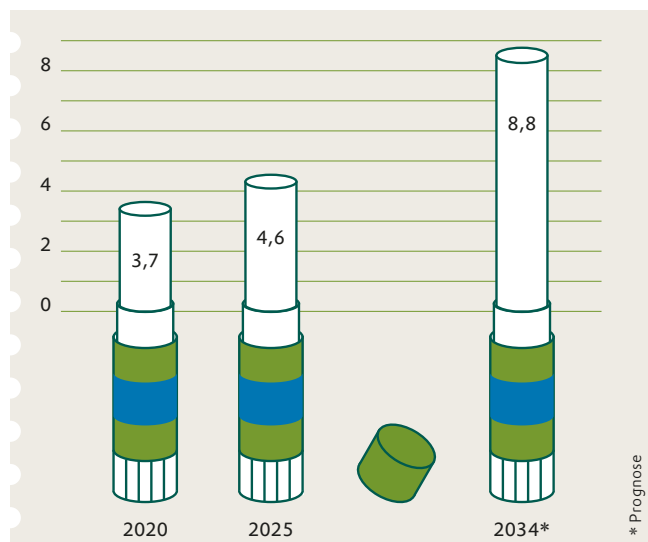
Windkraftanlagen sind ein wichtiger Treiber der Energiewende. Doch die Rotorblätter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen belasten nach Ende der Lebensdauer die Umwelt erheblich. Sie thermisch zu verwerten oder zu schreddern, um die Bestandteile beispielsweise Zement beizumischen, sind keine nachhaltigen Optionen; die Deponierung in der EU ist untersagt. Ein weiteres Manko: Die mehrere Dutzend Meter langen Flügel müssen oft komplett ersetzt werden, obwohl nur einzelne Komponenten beschädigt sind. Grund dafür sind die dauerhaft miteinander verbundenen Konstruktionsschichten, die sich schwer oder gar nicht trennen lassen. Im EU-Projekt „Recreate“ entwickeln Forschende des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Rotorblätter, die modular auf-



gebaut sind. An einem durchgehenden tragenden Holm sind weitere Bauteile über lösbare Klebeverbindungen befestigt. So lassen sich zum Beispiel die besonders beanspruchten Vorderkanten austauschen. Besser recycelbare Naturfaser-Thermoplaste ersetzen zudem die glasfaserverstärkten Kunststoffe. So kann Windenergie nicht nur klimafreundlich Strom erzeugen, sondern auch nachhaltiger produziert und genutzt werden.

BESSER IST DAS Grüne Haftkraft

Weltweiter Absatz nachhaltiger Klebstoffe,
in Milliarden US-Dollar



Nachhaltige Klebstoffe gewinnen in der Verpackungs-, Bau-, Automobil-, Elektronik- und Konsumgüterindustrie weltweit an Bedeutung. Der Markt für biobasierte, recyclingfreundliche und emissionsarme Produkte wächst kontinuierlich und soll bis 2034 jährlich um 7,6 Prozent zulegen. Fortschritte in der Polymer- und Materialchemie treiben diese Entwicklung voran: Biobasierte Rohstoffe, optimierte Polymerarchitekturen und neue Vernetzungskonzepte ermöglichen leistungsfähige Alternativen zu fossilbasierten Klebstoffen.

Quelle: fortunebusinessinsights.com

6.000

LADEZYKLEN

ohne Kapazitätsverlust erreicht eine von Forschenden der Chinese Academy of Sciences entwickelte Eisen-Redox-Flow-Batterie. Das entspricht rund 16 Jahren täglichem Einsatz. Bisher verkürzten instabile Eisen-Ionen und Materialverluste die Lebensdauer solcher Akkus. Eine Kombination von Schutzmechanismen im Elektrolyten löst nun dieses Problem: Große organische Moleküle schirmen die Eisen-Ionen gegen zersetzende Hydroxid-Ionen ab. Zugleich stößt ihre hohe negative Ladung die ebenfalls negativ geladenen Hydroxid-Ionen elektrostatisch ab. Die Technologie ermöglicht langlebige und kostengünstige Großspeicher für Strom aus erneuerbaren Quellen.

DIFORMYLXYLOSE ...

... ist ein aus pflanzlichen Zellwandzuckern gewonnener Reaktionshelfer, den Forschende der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne mit dem Holzbestandteil Lignin kombinieren, um die schädlichen Bisphenole A (BPA) und S (BPS) in Thermopapierbeschichtungen zu ersetzen. Die Beschichtung aus pflanzlicher Biomasse erzeugt beim Erhitzen klare, stabile Druckbilder und zeigt anders als BPA oder BPS keine nachweisbaren toxischen Wirkungen oder Beeinträchtigung von Hormonen. Sie ermöglicht die Herstellung umweltfreundlicherer Kassenbons, Fahrkarten oder Versandetiketten.

MENSCH & VISION

»Wir wollen die chemische Industrie elektrifizieren«

DIE MENSCHEN

Martin Baumgärtl und Gianluca Pauletto verbindet die Leidenschaft für Chemie und nachhaltige Energietechnologien. Baumgärtl, geboren in Altötting, studierte Chemie an der Technischen Universität München (TUM) und promovierte über heterogene Katalyse. Pauletto stammt aus dem italienischen Castelfranco Veneto, studierte Chemie- und Verfahrenstechnik an der Universität Padua und promovierte in Kanada. Aus seiner Forschung zur effizienteren Nutzung von Erdgas entstand die Idee, chemische Prozesse elektrisch zu beheizen. Gemeinsam mit Baumgärtl entwickelte er den Ansatz weiter und gründete das TUM-Spin-off Sybox.

DIE VISION

„Wir wollen die Elektrifizierung energieintensiver chemischer Prozesse vorantreiben“, so beschreibt Baumgärtl das Ziel von Sybox. Die Technologie des Unternehmens ersetzt fossile Brennstoffe in industriellen Hochtemperaturprozessen durch Elektrizität zur Beheizung der Reaktoren. Dadurch können synthetische Kraftstoffe (E-Fuels) sowie Wasserstoff, Methanol und weitere Grundchemikalien künftig deutlich emissionsärmer hergestellt werden. Aktuell arbeiten die Gründer an ihrem ersten kommerziellen elektrisch beheizten Zehn-Megawatt-Reformer, der in Dänemark Synthesegas für die Methanolproduktion erzeugen soll.



Die Gründer Gianluca Pauletto (l.) und Martin Baumgärtl vor einer Demoanlage ihres Start-ups Sybox

Hier geht's lang

Innovative „Wegweiser“ steuern chemische Reaktionen an schwer zugänglichen Positionen eines Moleküls.

Ein Forschungsteam der Universität Wien unter Leitung von Professor Dr. Nuno Maulide hat eine Methode zur präzisen Veränderung von Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen entwickelt, das Cation Sampling. Die gezielte Funktionalisierung von C-H-Bindungen in komplexen Molekülen ist eine Kernaufgabe der modernen Synthesechemie. Viele Reaktionsstellen sind jedoch schwer zugänglich und erfordern aufwendige Mehrschrittverfahren oder den Einsatz teurer Katalysato-

ren. Beim Cation Sampling wandern positive Ladungen entlang der Kohlenstoffkette eines Moleküls und werden von speziellen Ketongruppen – molekularen „Wegweisern“ – gesteuert. Das ermöglicht eine besonders präzise Reaktionsführung. Die Methode eröffnet neue Ansätze für eine effizientere und nachhaltigere Synthese komplexer Moleküle und vereinfacht unter anderem die Entwicklung pharmazeutischer Wirkstoffe und Hightech-Materialien.

GUTE FRAGE



Herr Schreiner, löst Hexastickstoff unsere Energieprobleme?

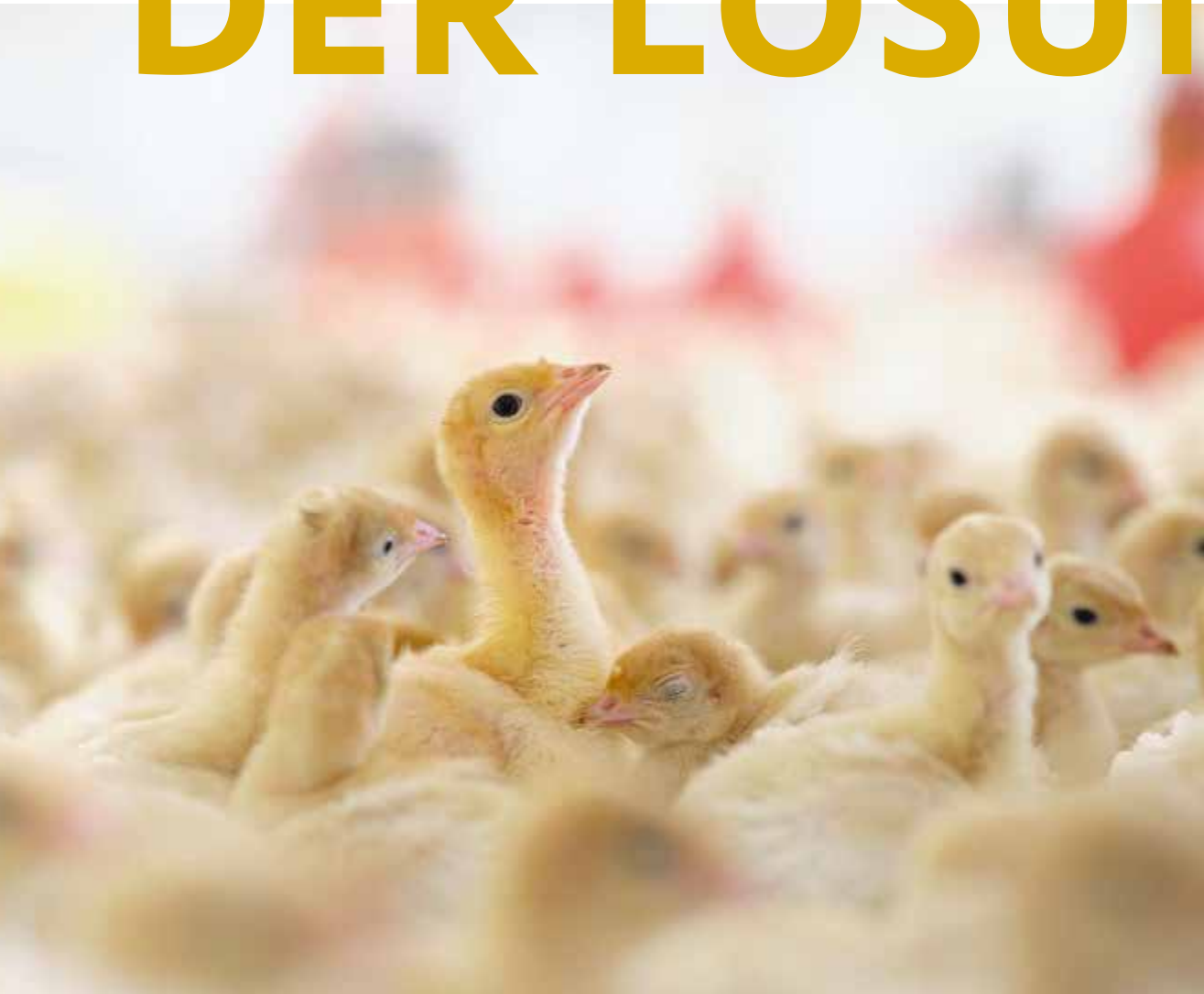
Das ist eine ambitionierte und weitreichende Frage. Hexastickstoff (N_6) ist kein fertiges Produkt, sondern ein wissenschaftlicher Hoffnungsträger mit revolutionärem Potenzial: Wenn er sich zu Luftstickstoff zersetzt, entsteht keinerlei CO_2 . Als Energieträger wäre N_6 sauber, ungiftig und außergewöhnlich energiereich. Allerdings stehen wir erst am Anfang der Forschung. Die größte Herausforderung ist die Stabilität von N_6 . Wir müssen lernen, dieses extrem energiereiche Molekül sicher zu handhaben, und zwar in der Erzeugung, Lagerung und kontrollierten Zersetzung. N_6 wird unsere Energieprobleme nicht über Nacht lösen, könnte aber der Schlüssel zu neuen Konzepten für saubere, hocheffiziente Energiespeicherungen sein. Es handelt sich um ein wissenschaftliches Hochrisikoprojekt mit der Aussicht auf eine enorme ökologische und ökonomische Rendite.

Dr. Peter Richard Schreiner ist Professor für Organische Chemie an der Justus-Liebig-Universität Gießen und Direktor des Instituts für Organische Chemie.



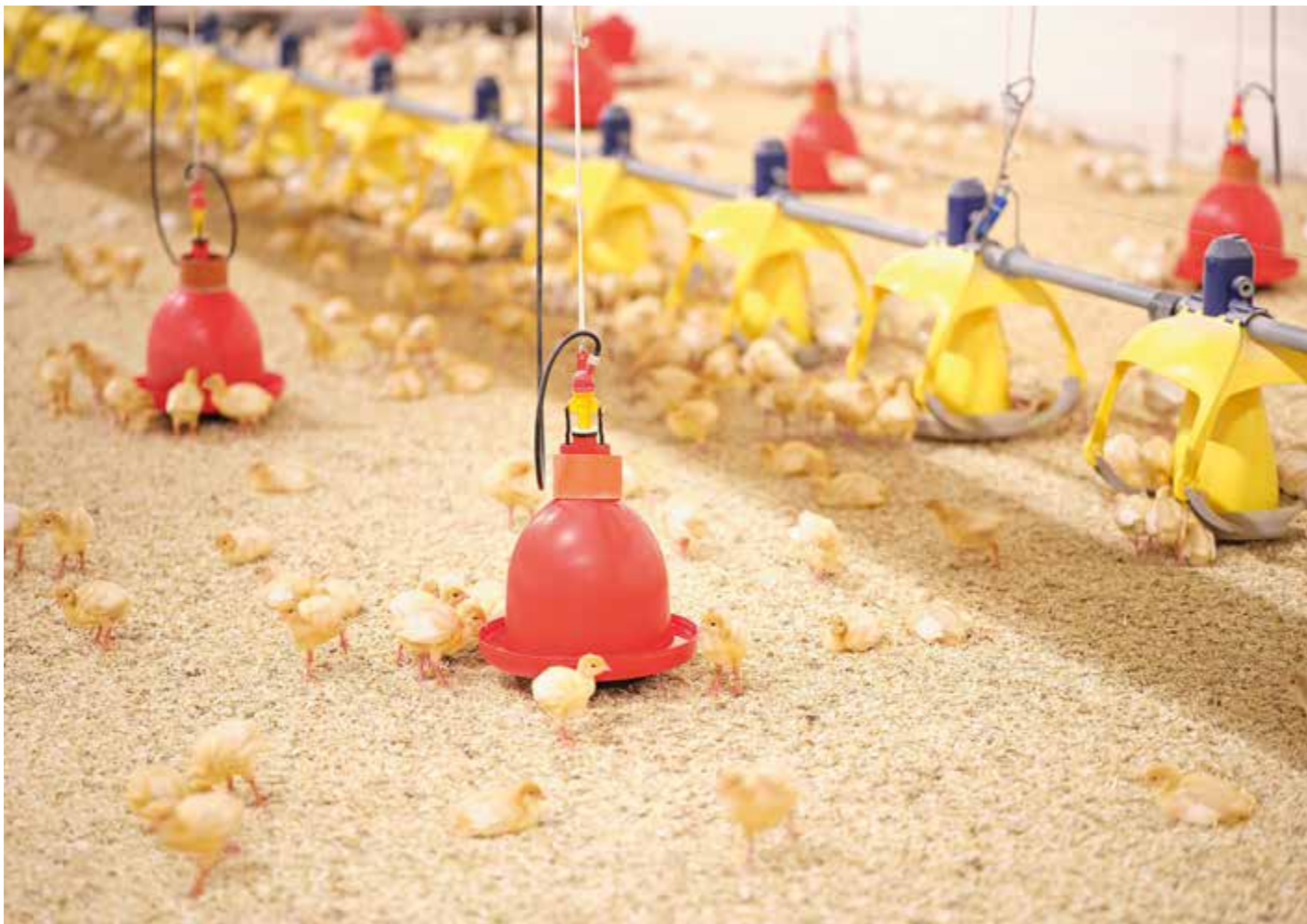
In einer Petrischale mit agarbasiertem Nährmedium werden am Evonik-Standort Halle-Künsebeck Bacillus-Bakterien kultiviert. Rechte Seite: acht Tage alte Putenküken auf dem Geflügelhof von Corinna Wilke im Landkreis Oldenburg

KEIM DER LÖSUNG



Der jüngste probiotische Futtermittelzusatz von Evonik hält nicht nur Küken gesund. Sein Einsatz in der Geflügelmast leistet einen wichtigen Beitrag im Kampf gegen Antibiotikaresistenzen. Wie Ecobiol Pro entsteht und warum es Menschen weltweit nützt.

TEXT **SINA HORSTHEMKE**



Im Stall von Corinna Wilke haben die Küken ihr neues Zuhause bezogen. Über das Wasser in den roten Tränken erhalten die Tiere Ecobiol Fizz.

Treten Menschen durch die Stalltür, verbreitet sich Aufregung in der gut beleuchteten Halle. Das zuvor zarte Piepsen einzelner Küken schwillt an zu einem Zwitscher-Orchester, flauschig gelbe Babyputen mit schwarzen Knopfaugen recken neugierig den Hals Richtung Tür. Von allen Seiten rennen sie den Besuchern entgegen, untersuchen mit ihren Schnäbeln furchtlos deren Gummischuhe. Die Luft ist feuchtwarm wie vor einem Sommergewitter, es riecht nach Holzspänen und Futter.

Es ist unmöglich, im Gewusel der Tiere, von denen die einen die roten Tränken ansteuern und die anderen sich um die gelbe Futterbahn scharen, ihre Anzahl zu schätzen. Doch Corinna Wilke weiß genau, wie viele Tiere sie vor acht Tagen eingestallt hat: 4.800 Hennen und 8.800 Hähne, allesamt frisch geschlüpft, lieferte man ihr auf den Hof. Der Betrieb, den die Tierärztin mit ihrem Mann führt, liegt im Landkreis Oldenburg, wo Fachwerkhäuser mit Reet gedeckt sind, Windräder am Horizont stehen und man sich mit „Moin“ begrüßt. Die Wilkes haben sich auf Putenaufzucht spezialisiert: Sechs Wochen lang ziehen sie die anfangs rund 60 Gramm leichten Küken groß. Mit mehr als zwei Kilo Gewicht geben sie die Jungtiere dann an den Mastbetrieb weiter, wo sie bis zur Schlachtung vier Monate bleiben.

Vögel durch Krankheit zu verlieren bedeutet nicht nur Tierleid, sondern ist auch schlecht fürs Geschäft. Deshalb sind die Hygienevorschriften strikt: Wer Wilkes Stall betritt, muss Plastiküberzieher über Füße und Unterschenkel streifen, in Gummischuhe und einen blauen Einweg-Overall schlüpfen, sich die Hände desinfizieren und vor dem ersten Schritt in die Sägespäne abermals die Schuhe wechseln. „Alle Tiere ständig gesund zu halten ist gar nicht so einfach“, erklärt die Tierärztin. „Bemerkt man eine Infektion zu spät, ist im schlimmsten Fall der ganze Bestand in Gefahr.“ Vier- bis sechsmal am Tag schaut sie deshalb nach ihrem „Putenkindergarten“, reinigt die Tränken, nimmt Wasserproben, achtet auf das Verhalten der Vögel und untersucht deren Kot im Labor der Praxis, in der sie angestellt ist. „Durchfall ist ein häufiges Problem“, sagt Wilke. „Gerade junge Puten sind anfällig, denn ihre Darmflora gerät schnell durcheinander.“

STRENGE STAATLICHE VORGABEN

Gegen Infektionen im Stall setzen Nutztierhalter seit Jahrzehnten Antibiotika ein – therapeutisch und metaphylaktisch: Werden bei der Therapie nur erkrankte Tiere behandelt, erlaubt die Metaphylaxe, in einem Stall mit Krankheitsfällen auch solchen Tieren Medikamente zu verabreichen, die gesund sind. Mittlerweile ist jedoch

»Bemerkt man eine Infektion zu spät, ist im schlimmsten Fall der gesamte Bestand in Gefahr.«

CORINNA WILKE, GEFLÜGELHALTERIN UND TIERÄRZTIN

klar, dass der Gebrauch von Antibiotika dringend reduziert werden muss: Zu groß sind weltweit die Probleme, die resistente Keime verursachen (siehe Seite 16). Die Vorgaben des Veterinäramts für Antibiotikagaben im Stall sind deshalb im Lauf der vergangenen 20 Jahre strenger geworden. Corinna Wilke ist heute etwa verpflichtet, vorher Proben zu nehmen, um zu klären, mit welchem Erreger sie es zu tun hat. Auf gut Glück ein Breitbandantibiotikum verteilen? Ist in der Tierhaltung seit 2022 stark eingeschränkt. Die Mittel gar einzusetzen, um schlechte Haltungsbedingungen zu kompensieren: verboten. „Ich muss auch genau dokumentieren, wie viele Puten an welchen Tagen welche Mengen eines Medikaments bekommen haben.“ Bricht zweimal hintereinander bei den Tieren im selben Stall die gleiche Krankheit aus, ist ein Resistenztest mit Keimnachweis fällig. Und wer überdurchschnittlich viel Antibiotika verbraucht, ist schon seit 2014 verpflichtet, mit seinem Tierarzt Gegenmaßnahmen zu erarbeiten. Die Mittel als Wachstumsförderer zu verwenden, was früher üblich war und in manchen Ländern noch praktiziert wird, weil die Tiere dann mehr Fleisch ansetzen, ist seit 2006 in der gesamten EU verboten.

Ihre Aufzeichnungen zeigen, dass die Wilkes seit etwa einem Jahr weniger Antibiotika benötigen als früher. Ihre Puten sind nicht mehr so oft krank, seitdem sie regelmäßig Ecobiol Fizz bekommen. Die Brausetablette, die in Wasser aufgelöst wird, enthält ein Probiotikum von Evonik, das auch als Futtermittelzusatz erhältlich ist. Nun ist das Produkt optimiert worden, und Ecobiol Pro kommt auf den Markt. Ob Tierhalter und Futtermühlen es als Tablette ins Trinkwasser oder als Pulver in die Futterpellets geben, das Prinzip ist das gleiche: Das Produkt stabilisiert unter anderem das Darmmikrobiom von Geflü-

gel und hemmt die Ausbreitung gefährlicher Darmkeime wie *Clostridium perfringens*. Dieses Bakterium führt bei Hühnern häufig zu Infektionen. Sie verursachen nicht nur Durchfall, sondern Schäden in der Darmschleimhaut, die für das Tier tödlich enden können, in jedem Fall aber sein Wohl und Wachstum beeinträchtigen. Über infizierten Kot können sich zudem andere Vögel schnell anstecken. Den Landwirten entsteht durch Darmerkrankungen ihrer Tiere beträchtlicher wirtschaftlicher Schaden: Fachleute schätzen ihn weltweit auf bis zu sechs Milliarden US-Dollar jährlich.

Dank eines veränderten Produktionsverfahrens ist die Wirksamkeit von Ecobiol jetzt gestiegen. Einer Fütterungsstudie der Oklahoma State University zufolge verbessert es die Überlebensrate von Masthähnchen um 50 Prozent, verglichen mit einem marktüblichen Produkt. Corinna Wilke hat den Effekt in ihrem Stall vom ersten Einsatz an bemerkt: „Puten sind sehr sensibel und reagieren empfindlich auf Wetter- oder Futterveränderungen. Seit wir ihnen Ecobiol geben, ist alles entspannter geworden. Unsere Tiere sind gesünder und erreichen sogar ein höheres Gewicht.“ →



»Die Welt hat ein großes Problem mit Antibiotika-resistenzen.«

STEFAN PELZER,
LEITER DER MIKROBIOMFORSCHUNG
BEI EVONIK



Stefan Pelzer leitet bei Evonik die Mikrobiomforschung. Mithilfe des Hühnerdarmmodells DAISy entwickelt sein Team in Halle-Künsebeck neue Probiotika.

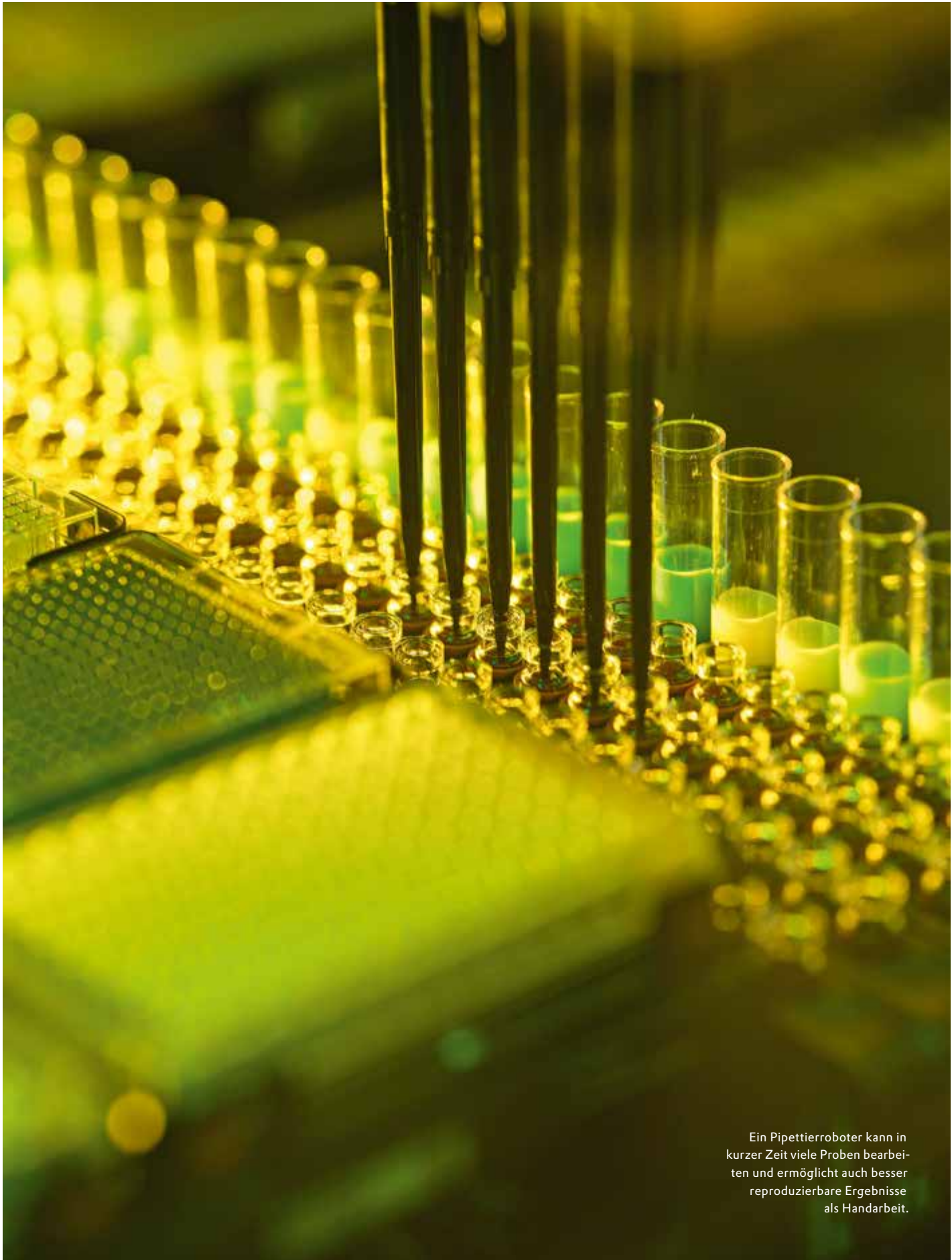
Die Besonderheit bei Ecobiol-Produkten: In dem Probiotikum mit „guten“ Bakterien für eine gesunde Darmflora sind keine aktiven Zellen enthalten, sondern deren Sporen. Bakterien der Gattung *Bacillus* bilden diese sogenannten Dauerformen, wenn Nährstoffe knapp werden. Sporen sind hitze- und kälteresistent, trotzen Säure, Strahlung und hohem Druck, kurz: Sie können bei widrigsten Bedingungen Millionen Jahre überdauern und auf bessere Zeiten warten. Erst wenn sie wieder geeignete Lebensbedingungen vorfinden, keimen die Sporen aus, entwickeln sich zu aktiven Bakterien und können sich vermehren.

Die Überlebensstrategie der Mikroorganismen machte sich Evonik bei der Entwicklung von Ecobiol Pro zunutze. Die Sporen der „guten“ Darmbakterien des Stammes *Bacillus velezensis* CECT 5940 sollen schließlich nicht

schon beim Pressen der Pellets, im Futterlager, Trog oder Kropf eines Huhns aktiv werden, sondern erst in seinem Dünndarm. Dort muss es aber schnell gehen: Je nach Alter des Tieres durchläuft die Nahrung die Darmassage in drei bis fünf Stunden, im Zwölffingerdarm wachsen die Sporen innerhalb von einer Stunde aus. Damit das Probiotikum dort wirken kann, ist das Timing entscheidend.

TESTS IM GEFLÜGELDARMMODELL

Wie sich Ecobiol im Hühnerdarm verhält, ermittelte Stefan Pelzer, Leiter der Mikrobiomforschung von Evonik, mit seinem Team. Im Biotech Hub des Chemieunternehmens im westfälischen Halle-Künsebeck arbeiten die Wissenschaftler seit einigen Jahren mit dem Geflügeldarm-Simulationsmodell „Dynamic Avian Intestine in-vitro System“ (DAISy), das sich schon bei der Entwicklung anderer Produkte bewährt hat. In jedem der Glasgefäße herrschen dieselben Bedingungen wie in jeweils einem der verschiedenen Abschnitte des Verdauungstrakts eines Huhns: pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Enzymaktivität und die mikrobielle Zusammensetzung entsprechen den Bedingungen im Tier. „Wir können unterschiedliche Futtermischungen hineingeben und von DAISy verdauen lassen“, erklärt Pelzer. „Das Modell ermöglicht uns zudem, aus jedem Darmabschnitt Proben zu nehmen, für die wir sonst ein Huhn töten müssten.“ Ein Pipettierroboter nimmt den Menschen im Labor →



Ein Pipettierroboter kann in kurzer Zeit viele Proben bearbeiten und ermöglicht auch besser reproduzierbare Ergebnisse als Handarbeit.

GEFÄHRLICHE RESISTENZEN

Die Entdeckung der Antibiotika hat die Medizin revolutioniert – und zugleich den Keim für eine globale Krise gelegt. Denn immer häufiger lassen sich Bakterien mit den verfügbaren Mitteln nicht mehr bekämpfen.

Hätte Alexander Fleming 1928 vor seinem Urlaub das Labor aufgeräumt, wären Antibiotika nicht so bald entdeckt worden. Doch so fand der Londoner Mediziner und Bakteriologe nach seiner Rückkehr eine verschimmelte Petrischale vor. Erstaunt stellte er fest, dass in der Nähe des Schimmelpilzes *Penicillium notatum* keine Bakterien wuchsen. Schied die blaugrüne Mikrobe etwas aus, das die Einzeller hemmte, eine antibakterielle Substanz? Fleming ging der Sache nach – und gilt seit der Veröffentlichung seiner Forschungsergebnisse 1929 als Entdecker des ersten Antibiotikums der Welt. Es dauerte noch mehr als zehn Jahre, bis es Howard Florey und Ernst Boris Chain gelang, sein „Penicillin“ so aufzubereiten, dass man es Kranken spritzen konnte. Doch schon 1943 produzierten Pharmafirmen den Wirkstoff tonnenweise. Das rettete Tausende Leben, denn mit Penicillin ließen sich erstmals Infektionen heilen, die zuvor oft tödlich endeten.

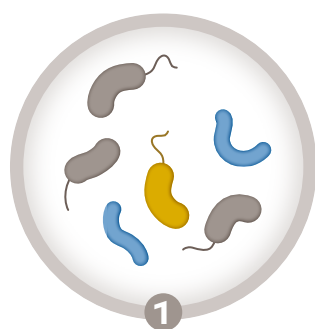
Für ihre Arbeit verlieh man Fleming, Florey und Chain 1945 den Nobelpreis für Medizin. In seinem Festvortrag warnte Fleming: „Eine Gefahr könnte in einer Unterdosierung liegen. Es ist nicht schwierig, Mikroben gegen Penicillin resistent zu machen, indem man sie Konzentrationen aussetzt, die nicht reichen, um sie zu töten.“ Jedes Antibioti-

kum hemmt zwar die meisten Bakterien, gegen die es gerichtet ist. Doch manchmal überleben welche – wenn sie aufgrund einer zufälligen Mutation resistent sind – und vermehren sich. Zudem sind Bakterien in der Lage, Gene untereinander auszutauschen. Das führt dazu, dass sich Resistenzen schnell verbreiten können. Mitunter entwickeln Keime eigene Resistenzmechanismen. Sie schaffen es etwa nach einiger Zeit, das Antibiotikum abzubauen oder aus ihrer Zelle zu transportieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass resistente Keime entstehen und sich ausbreiten, wächst, je mehr und je häufiger Antibiotika zum Einsatz kommen.

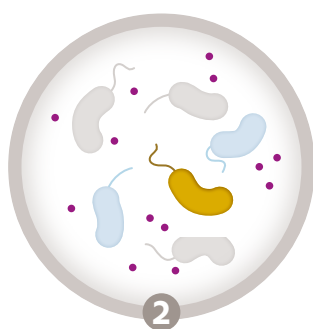
Nach Flemings Penicillin wurden zwischen 1940 und 1970 noch zahlreiche weitere Antibiotika entwickelt; inzwischen gibt es mehr als 80 Wirkstoffe. Doch die einst scharfe Waffe gegen krank machende Bakterien ist abgestumpft, weil sich die Mittel immer häufiger als wirkungslos erweisen: Aufgrund des inflationären oder oft falschen Antibiotika-Einsatzes in der Humanmedizin und Nutztierhaltung haben sich viele Keime mit der Zeit verändert und sind gegen die einst wirksamen Substanzen resistent geworden. Bereits jetzt gibt es gegen jede sechste bakterielle Infektion kein Antibiotikum mehr, jährlich sterben deshalb rund 1,3 Millionen Menschen (siehe auch Data Mining auf Seite 21). Seit 2022 wertet die Weltgesundheitsorganisation (WHO) Antibiotikaresistenzen als „globale Bedrohung“ – auch weil die Entwicklung neuer Substanzen hinterherhinkt. Resistenzen seien „schneller als die Fortschritte der modernen Medizin und bedrohen die Gesundheit weltweit“, warnt WHO-Generaldirektor Tedros Adhanom Ghebreyesus.

Es beginnt beim Bakterium

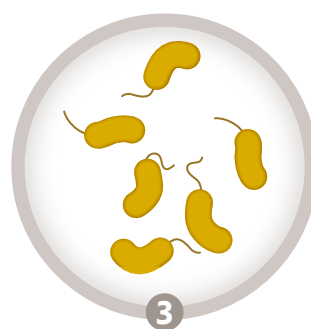
Wie sich Resistenzen gegen Antibiotika entwickeln



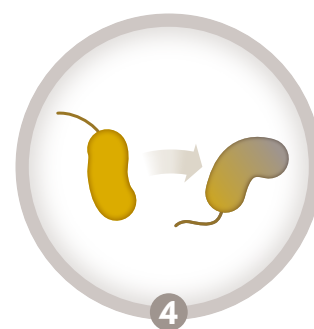
Im Körper (und anderswo) leben **„gute“ Bakterien**, die vor Krankheiten schützen, schädliche Bakterien, die krank machen, und wenige **zufällig resistente Bakterien**.



Ein **Antibiotikum** tötet fast alle Bakterien ab, die „guten“ und die krank machenden. Die zufällig resistenten Bakterien jedoch überleben.



Die resistenten Bakterien können sich ungehindert vermehren, das Antibiotikum macht ihnen nichts aus.



Sie sind sogar in der Lage, ihr Resistenzgen an andere Bakterien zu übertragen. So breitet sich die Resistenz aus.



Mikrobiologin Stella Molck zählt auf einer Agarplatte im Labor in Halle-Künsebeck die Bakterienkolonien. Bei guten Bedingungen und Wärme wächst aus jeder Spore in der Probe eine sichtbare Kolonie, die mehrere Millionen Bakterien enthält.



einen Teil der Arbeit ab und verdünnt die halb verdauten Futterreste aus DAISy bis zur gewünschten Konzentration. „Die Sporen überstehen den Kropf, dann durchwandern sie den Drüsen- und Muskelmagen“, erklärt Pelzer. „Im Dünndarm verdauen Enzyme die Nahrung weiter, wodurch Aminosäuren und Zucker entstehen.“ Beides dient den Sporen als Startsignal, um auszukeimen. Hat der Nahrungsbrei schließlich den hinteren Teil des Dünndarms erreicht, haben sich nahezu alle Sporen in aktive Zellen verwandelt.

FERMENTATION ALS SCHLÜSSEL ZUM ERFOLG
Ecobiol Pro ist nicht der einzige probiotische Futtermittelzusatz für Nutztiere auf dem Markt. Doch die Experimente im DAISy-Modell zeigten, dass viele andere Produkte im Hühnerdarm gar nicht zu aktiven Bakterien werden: Die Vögel scheiden die Sporen ungenutzt wieder aus, weil sie nicht rechtzeitig auswachsen. So kann die Wirkung nicht eintreten. „Es reicht also nicht, die Sporen im Futter zu zählen, um die Wirksamkeit eines Produkts zu bestimmen“, schlussfolgert Pelzer, der seit

14 Jahren für Evonik forscht und an der Universität Tübingen lehrt. „Entscheidend für die probiotische Wirkung ist, dass die Sporen zur richtigen Zeit an der richtigen Stelle im Darm auswachsen.“

Die Sporen für Ecobiol Pro entstehen, wie viele erfolgreiche Evonik-Produkte, durch Fermentation, ein Spezialgebiet des Unternehmens. Bei dem biotechnologischen Prozess mit ausgewählten Bakterien im industriellen Maßstab herrschen anfangs für die Mikroorganismen perfekte Lebensbedingungen: Temperatur, pH-Wert, Druck, Sauerstoffgehalt und die Nährstoffzufuhr sind so optimiert, dass die Bakterien sich binnen kurzer Zeit vermehren. Erst wenn große Mengen Biomasse entstanden und die Nährstoffe aufgebraucht sind, setzt die sogenannte Sporulation ein: Die Bakterien bilden ihre widerstandsfähige Dauerform, die Spore. „Wir haben herausgefunden, dass wir das Gedächtnis der Sporen und damit die Auswachsgeschwindigkeit im Darm durch die Produktionsbedingungen im Fermenter beeinflussen können“, sagt Experte Pelzer. „Mit diesem Wissen haben wir den Herstellungsprozess →



8.000 Liter fasst der größte Tank in der Fermentationshalle der Produktion im spanischen Onzonilla.

und die Wirkung unseres Probiotikums optimiert, ohne den Bakterienstamm zu verändern.“ Verglichen mit dem Durchschnitt der untersuchten Wettbewerbsprodukte keimt das neue Ecobiol Pro signifikant schneller aus. „Ecobiol spielt damit in der Topliga probiotischer Produkte“, sagt Stella Molck, Mikrobiologin aus Stefan Pelzers Team.

Da Ecobiol Pro unterschiedlichen Futtersorten auf der ganzen Welt zugemischt wird, hat das Team in Halle-Künsebeck im DAISy-Modell auch geprüft, wie sich die Sporen in verschiedenen Mischungen verhalten, beispielsweise mit Mais, Sojaschrot oder Weizen. „Futter ist nicht gleich Futter“, betont Pelzer. „Die Qualität der Rohstoffe schwankt ständig, und die Formulierungen unterscheiden sich je nach Region.“ Die Auswachs-geschwindigkeit von Ecobiol Pro jedoch, das bewiesen die Tests im Labor, ist erstaunlich stabil. „Es funktioniert bei allen Futtermischungen ähnlich gut, während die Wettbewerbsprodukte größere Schwankungen zeigen“, berichtet der Leiter der Mikrobiomforschung.

Probiotische Futtermittelzusätze kommen nicht nur Masthähnchen und Puten zugute: „Die Menschheit hat ein großes Problem mit Antibiotikaresistenzen, und wenn wir das nicht angehen, wird die Zahl der darauf zurückzuführenden Toten weiter massiv steigen.“ 73 Prozent der weltweit verwendeten Antibiotika fließen in die Nutztierhaltung – viel zu viel, findet Pelzer: „Auch im Sinne des von der Weltgesundheitsorganisation propagierten

One-Health-Ansatzes, laut dem Gesundheitsrisiken für Mensch, Tier und Umwelt zusammenhängen, sollte uns der massive Antibiotikaeinsatz bei Tieren nicht egal sein. Denn er beeinträchtigt auch unser Leben.“

Die hohe Aussagekraft der Tests im Hühnerdarmmodell macht es möglich, die Wirksamkeit von Probiotika gezielt unter kundenspezifischen Futterbedingungen zu bewerten. Auf dieser Basis bieten Stefan Pelzer und Stella Molck Kunden eine enge Zusammenarbeit an: Futtermittel können eingesendet werden, um die Auswachs-geschwindigkeit verschiedener Probiotika individuell prüfen zu lassen. „Zunächst vergleichen wir das Auswachsverhalten von Ecobiol Pro mit anderen Produkten in kundenspezifischen Futtermitteln und geben den Kunden Tipps, wie sie die Wirksamkeit des Probiotikums verbessern können“, erklärt Molck. Ziel sei es, das eigene Produkt weiter einzuordnen und besser zu verstehen, welche Faktoren das Auswachsen der Sporen beeinflussen. Perspektivisch will das Unternehmen aus diesen Erkenntnissen ableiten, wie sich das Auswachs-verhalten und damit die Wirksamkeit von Ecobiol Pro weiter verbessern lassen.

LAGERUNG BEI MINUS 80 GRAD

Wie Ecobiol Pro im industriellen Maßstab entsteht, lässt sich im Nordwesten Spaniens bestaunen. Die Molekularbiologin Pilar Honrubia leitet in Onzonilla südlich von León die kleine Produktionsanlage. 29 Menschen sind

hier beschäftigt, eine lange Fensterreihe im Labor gibt den Blick in die Fermentationshalle frei. Seit vier Jahren stehen dort zwei neue Fermenter, 8.000 Liter fasst der größte Tank. Die Fermentation für Ecobiol Pro dauert fünf Tage und beginnt jeden Montag, sobald eine Mitarbeiterin vorsichtig eine frische Starterkultur aus dem Labor in die Halle getragen und in den ersten Tank gefüllt hat.

Angesetzt wird jede Starterkultur in einem Glaskolben im Produktionslabor des Standorts auf Basis von bakteriellen Stammzellbanken, die in Halle-Künsebeck angelegt wurden. Nach ihrer Anlieferung in Onzonilla werden diese Bakterienkulturen bei minus 80 Grad Celsius im Tiefkühlschrank gelagert. Bevor die großen Fermenter beimpft werden können, sind mehrere Kultivierungsschritte erforderlich. „Der größte Feind einer gelungenen Fermentation ist die Kontamination mit anderen Mikroorganismen“, sagt Betriebsleiterin Honrubia. „Wir achten daher während des ganzen Prozesses streng darauf, dass es nicht zu Verunreinigungen

kommt. Im schlimmsten Fall müssten wir sonst die ganze Charge verwerfen.“ Geplant ist, die Produktion in Onzonilla weiter hochzufahren und bald rund um die Uhr in zwei Fermentern gleichzeitig laufen zu lassen, auch am Wochenende.

In der Halle dröhnen Pumpen und Motoren, es riecht malzig. Ein Gabelstapler fährt vorbei, zwei Männer mit Schutzbrille wuchten einen dicken blauen Schlauch nach oben zu einer Öffnung im Fermenter. Das andere Ende steckt in einem Tank mit flüssiger Glukose, die sie nun in den rund vier Meter hohen Kessel pumpen. Zucker ist beim Fermentieren die wichtigste Zutat, er dient den Bakterien als Nahrung, während sie sich hinter der Edelstahlwand des Behälters vermehren. Ist die Glukose aufgebraucht, leitet der Nahrungsmangel die Sporenbildung ein; ist diese abgeschlossen, lässt sich die Biomasse aus Nährlösung, Wasser und Sporen ernten.

Nach dem Zentrifugieren bleibt ein zäher brauner Brei übrig. Er wird auf Tablettis gegossen, bei minus →

»Wir achten streng darauf, dass es nicht zu Verunreinigungen kommt.«

PILAR HONRUBIA, LEITERIN DER ECOBIOL-PRODUKTION BEI EVONIK



Pilar Honrubia leitet den Evonik-Betrieb nahe León. Regelmäßig werden neue Bakterienkulturen der Masterzellbank aus Halle-Künsebeck geliefert, aus der eine Arbeitszellbank entsteht, die bei minus 80 Grad Celsius gelagert wird.



Nach der Fermentation wird die Biomasse zentrifugiert, zu Platten schockgefrostet und gefriergetrocknet.

35 Grad Celsius schockgefrostet und im Tiefkühlcontainer der Halle gelagert. Der nächste Schritt, das Trocknen, erfolgt nur wenige Meter weiter: In zwei großen Gefrier-trocknern geht das gefrorene Wasser direkt in Dampf über, und zurück bleiben trockene Tafeln, die hauptsächlich aus Sporen bestehen. In einer Art Häcksler werden die Platten zerkleinert und gesiebt, anschließend wird das Pulver maschinell mit unterschiedlichen Hilfsstoffen vermischt, in Säcke abgefüllt – und fertig ist Ecobiol Pro.

Um sicherzugehen, dass in jedem Sack die angegebene Menge an Sporen steckt, untersuchen die Mitarbeiterinnen im Labor täglich bis zu 40 Proben aus der laufenden Produktion. Während der gesamten Inkubationszeit werden mehrmals Proben aus der Nährlösung entnommen; nach deren Trocknung wird die Konzentration der Ecobiol-Biomasse bestimmt. Denn das Endprodukt muss eine definierte, dem Kunden garantierte Konzentration enthalten. Um die Sporen zählen zu können, verdünnen die Biologinnen die Proben im Labor im ersten Stock und streichen sie auf sogenannten Agarplatten aus, auf denen die Sporen wieder auswachsen: Jede einzelne wächst auf dem Nährmedium im Brutschrank zu einer Bakterienkolonie heran, die dann mit bloßem Auge sichtbar ist oder maschinell gescannt und ausgezählt wird.



Die Platten mit den Sporen werden maschinell zerbröselt, mit Hilfsstoffen vermengt und für den Transport zu den Kunden in Säcke abgefüllt.

Die Mitarbeiterinnen im spanischen Labor untersuchen auch fertige Pellets, denen Ecobiol Pro in Futtermühlen beigemischt wurde, gerade erst kam eine neue Lieferung. Der Standort hat aber nicht nur menschliche Mitarbeiter: In einem separaten Gebäude auf dem Gelände ist Platz für 475 Hühner, an denen Futtermischungen getestet werden – streng überwacht von zwei Tierärzten.

Wenngleich das neue Ecobiol Pro gerade erst auf den Markt gekommen ist, steht schon jetzt fest: Es wird dazu beitragen, den Einsatz von Antibiotika in der Nutztierhaltung zu verringern. Davon profitieren zuerst die Tiere – zum Beispiel die Putenküken von Corinna Wilke, denen es mit Probiotika besser geht. Ihre Besitzerin freut das nicht nur als Betriebsleiterin: „Als Tierärztin ist es mir wichtig, dass wir dank solcher Produkte verantwortungsbewusster mit Antibiotika umgehen können.“ Denn das dient auch den Menschen auf der ganzen Welt. —



Sina Horsthemke ist Wissenschaftsjournalistin in München. Die Diplombiologin schreibt vor allem über Gesundheitsthemen und Biotechnologie.

LEBEN UND TOD

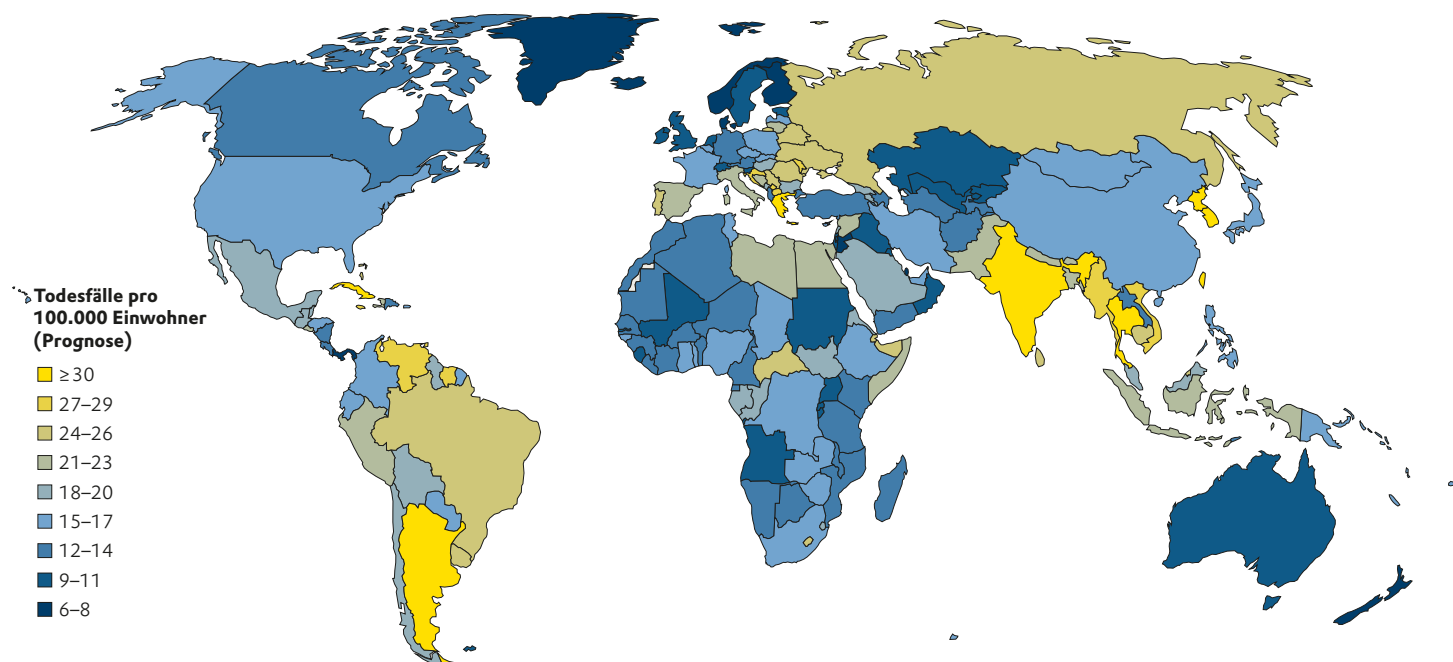
Antibiotika helfen, Millionen Menschenleben zu retten. Insbesondere in der Tierernährung stellen sie jedoch ein Problem dar, weil ihr massenhafter Einsatz Resistenzen fördert. Ein Überblick der Lage in Zahlen

Quellen: FMI, Statista

INFOGRAFIK MAXIMILIAN NERTINGER

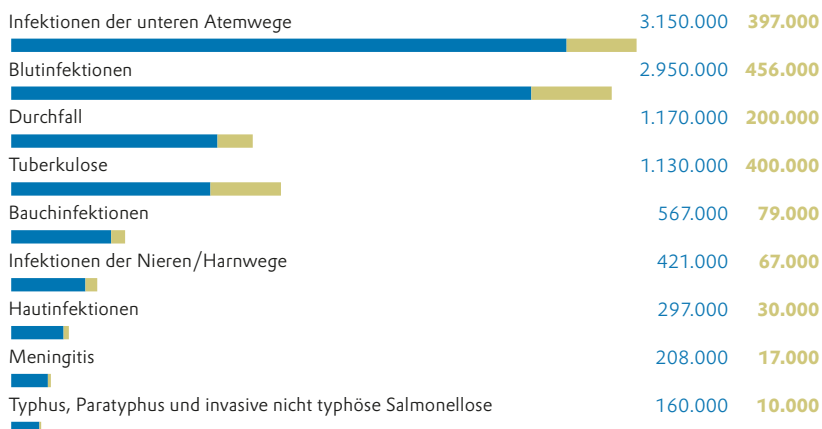
Wo es für Menschen gefährlich wird

Antimikrobielle Resistenzen (AMR) entstehen, wenn Mikroorganismen nicht mehr auf Medikamente ansprechen. In manchen Weltregionen wird die dadurch bedingte Sterblichkeit erheblich zunehmen, für 2050 geschätzte Zahl der durch AMR bedingten Todesfälle pro 100.000 Einwohner



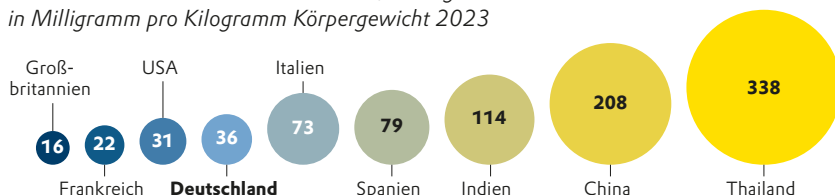
Heilbar und dennoch tödlich

Todesfälle ohne AMR-Bezug und **AMR-bedingte Todesfälle**, nach ausgewählten Krankheitsarten 2021



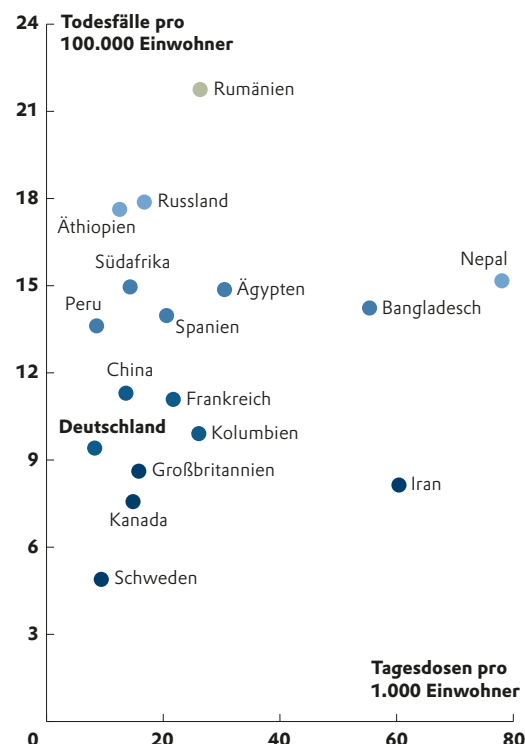
Verhängnisvolle Zugabe

Einsatz von Antibiotika bei Nutztieren, in ausgewählten Ländern in Milligramm pro Kilogramm Körpergewicht 2023



Risiken und Nebenwirkungen

Verhältnis AMR-bedingter Todesfälle zu Tagesdosen an Antibiotika, in ausgewählten Ländern 2021



HAUCH- DÜNNER VORSPRUNG



Grüner Wasserstoff gilt als Hoffnungsträger der Industrie auf dem Weg zur Dekarbonisierung. Doch bis heute ist die Produktion per Wasserelektrolyse oft teuer oder nur begrenzt effizient. Spezielle Hochleistungsmembranen könnten das ändern. Ein Team von Evonik hat jetzt eine Pilotanlage in Betrieb genommen, die solche Membranen in großen Mengen herstellt. Dem Ausbau der Wasserstoffwirtschaft kann das helfen.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Leuchtende Aussichten: Die Duraion-Membran ist der Schlüssel zu günstigerem grünen Wasserstoff. Evonik produziert sie auf der neuen Pilotanlage in Marl jetzt in kommerziellem Maßstab.





»Will man auf fossile Rohstoffe verzichten, kommt man an Wasserstoff nicht vorbei.«

CHRISTIAN DÄSCHLEIN, LEITER NEW GROWTH AREA AEM IN DER EVONIK INNOVATION FACTORY

Bevor die beschichtete Folie aufgerollt wird, scannen Kameras die Oberfläche. Kein Kratzer, kein Luftbläschen, nicht einmal Löcher von Stecknadelspitzengröße dürfen in der Polymerschicht zu sehen sein. Perfektion ist gefragt, denn im späteren Einsatz muss sie Höchstleistung vollbringen – als Herzstück einer innovativen Elektrolysetechnologie, mit der grüner Wasserstoff effizient und preisgünstig hergestellt werden kann.

ETABLIERTE TECHNOLOGIEN MIT SCHWÄCHEN

Wasserstoff, das farb- und geruchlose Gas, gilt als umweltfreundlicher Energieträger der Zukunft, wenn er aus grünem Strom hergestellt wird. Schon heute liegt der weltweite Bedarf bei rund 100 Millionen Tonnen pro Jahr. Wasserstoff wird üblicherweise aus Erdgas erzeugt. Nachhaltiger geht es mittels Elektrolyse: Mit elektrischem Strom aus erneuerbaren Energien wird Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Das Einsparpotenzial liegt bei der Umstellung auf grünen Wasserstoff bei rund einer Milliarde Tonnen CO₂. Das entspricht rund einem Drittel der energiebezogenen Emissionen der EU.

Doch die gängigen Elektrolyseverfahren weisen Nachteile auf: Je nach Technologie müssen die Anlagen sehr groß ausgelegt oder mit Bauteilen aus teuren Rohstoffen bestückt werden. Die neue Polymermembran aus Marl mit dem Namen Duraion soll jetzt einer Elektrolysetechnologie den Weg ebnen, die die Vorteile der etablierten Verfahren vereint und deren Schwächen vermeidet: der AEM-Elektrolyse. AEM steht für Anion Exchange Membrane – eine Schicht, die zwei Halbzellen der Elektrolyse voneinander trennt, in denen jeweils Wasserstoff oder Sauerstoff entsteht. Die Membran wird dabei von den gebildeten Hydroxidionen (OH⁻) durchwandert (siehe Grafik auf Seite 26). →

Die Anlage in der Werkshalle auf dem Evonik-Gelände in Marl ist so groß wie ein Lastwagengespann. Wenn Produktionsleiter Florian Roghmans erklärt, was hier passiert, muss er gegen das Rauschen der Lüftung ansprechen: „Hier wird die Trägerfolie in die Maschine gezogen“, erklärt der Chemieingenieur und zeigt auf eine durchsichtige Rolle an der linken Seite der Anlage. Die einen Meter breite und nur wenige Mikrometer dünne Bahn wandert unter einem Behälter durch, der mit einer honiggelben Flüssigkeit – der Polymerlösung – gefüllt ist. Sachte wird diese mit einer Rakel auf die Folie übertragen, sodass ein dünner Film zu sehen ist. Mit dem Polymer benetzt und straff gespannt, gleitet die Bahn in den Mittelteil der großen Anlage, zu den Trocknern. Drinnen pusten Düsen warme Luft gegen die Folie, bis sie nach wenigen Minuten am anderen Ende getrocknet wieder herauskommt. „Das sieht alles ganz simpel aus, ist aber ziemlich ausgebufft“, sagt Roghmans. „Das Polymer muss auf der Trägerfolie langsam und gleichmäßig trocknen, sonst gibt es Risse oder Defekte – und das bedeutet Ausschuss.“

Zu Beginn der Membranherstellung
messen Kameras die Nassschichtdicke
der Polymerlösung.



Dass Wasserstoff für die Transformation der Industrie hin zu mehr Nachhaltigkeit und größerer Resilienz eine wichtige Rolle spielt, steht für Christian Däschlein fest. „Will man künftig auf fossile Rohstoffe verzichten, um den CO₂-Ausstoß zu senken, kommt man an diesem Energieträger nicht vorbei. Er ist auch unerlässlich, um unser Energiesystem resilienter und somit Europa unabhängiger zu machen“, sagt der Chemiker der Evonik Innovation Factory. Däschlein hat die Membran mit einem mehr als 30-köpfigen Team zur Marktreife entwickelt. Die Chemie- und die Stahlindustrie benötigen Wasserstoff, und auch Gaskraftwerke sollen zunehmend mit ihm betrieben werden. „Entscheidend ist, dass man die Elektrolyseure mit Strom aus erneuerbaren Energien versorgt“, sagt der Evonik-Experte. „Denn nur grüner Wasserstoff ergibt in diesen Industrien langfristig Sinn, um Prozesse und Produkte zu dekarbonisieren.“ Derzeit werden jährlich weltweit rund 100 Millionen Tonnen Wasserstoff benötigt. Schätzungen zufolge soll der Bedarf bis 2050 je nach Szenario auf 300 bis 700 Millionen Tonnen steigen. 60 bis 70 Prozent davon, so sagen es Beratungsfirmen voraus, werden grüner Wasserstoff sein.

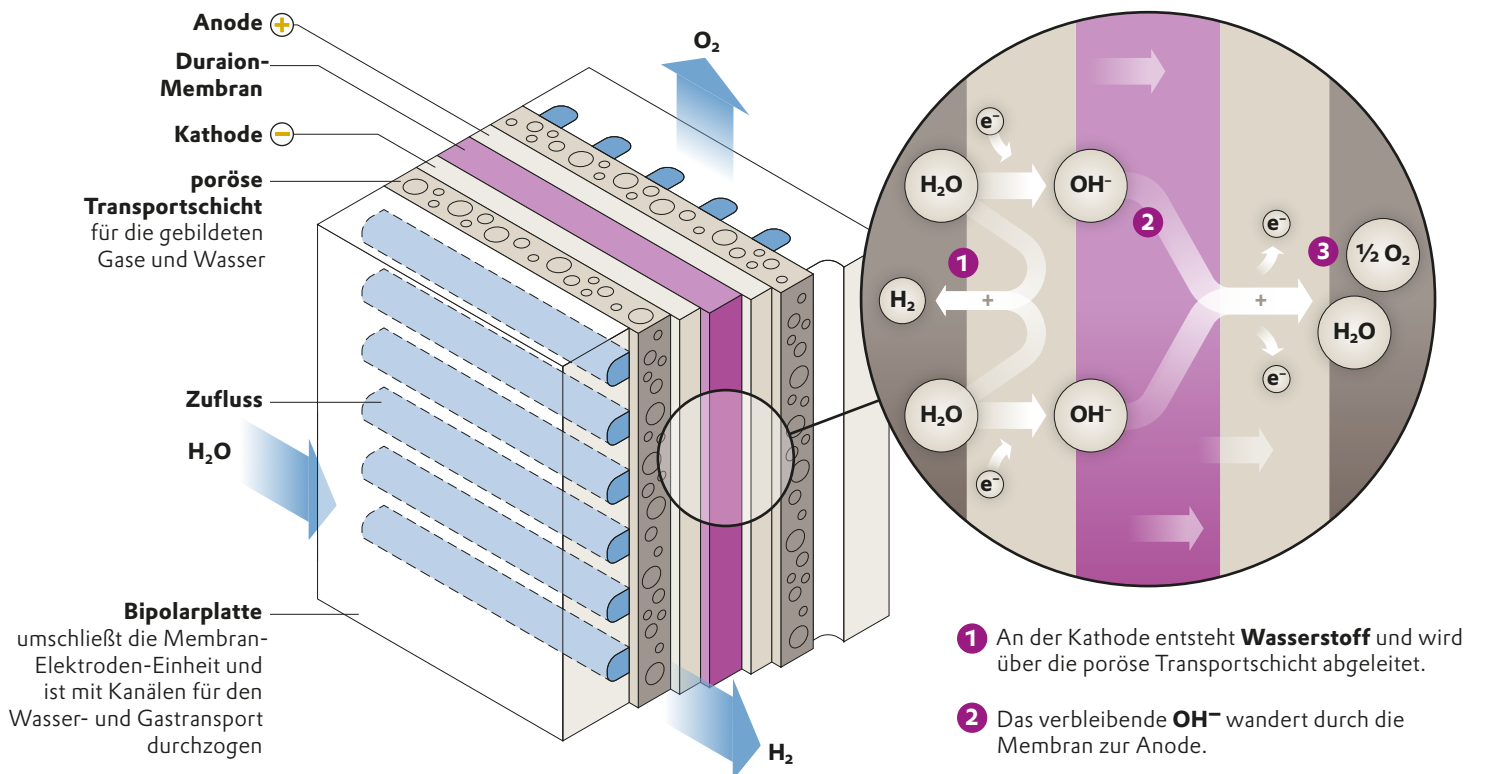
Die neue Duraion-Membran könnte der Wasserstoffwirtschaft zusätzlichen Schub verleihen. Und mit der neuen Pilotanlage in Marl steht jetzt eine Anlage zur Verfügung, die den steigenden weltweiten Bedarf an Membranen für die AEM-Elektrolyse decken kann.

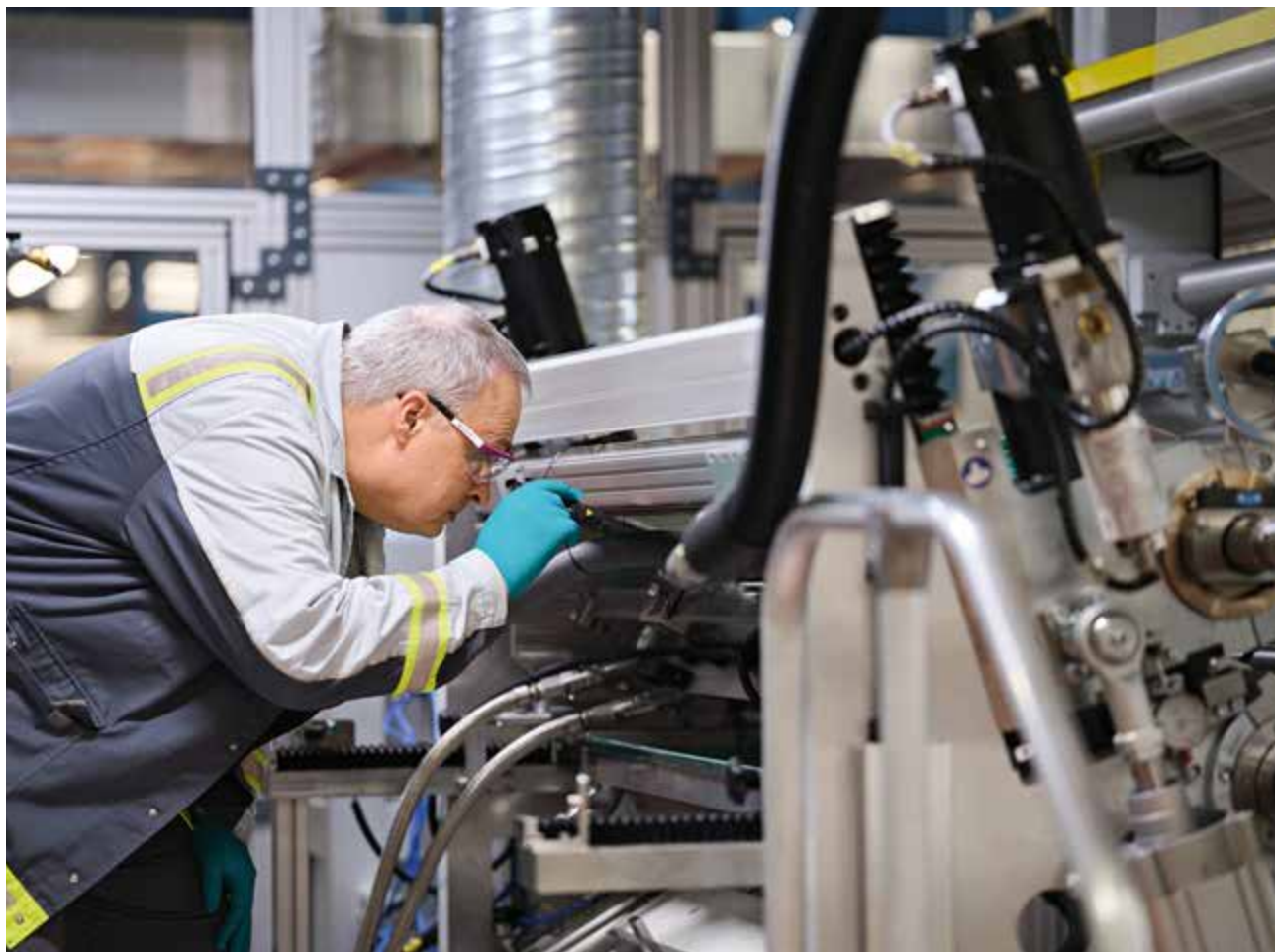
Deren Stärke zeigt sich im Vergleich mit den herkömmlichen Verfahren – der alkalischen Elektrolyse (AEL) und der PEM-Elektrolyse (Proton Exchange Membrane). Allen Elektrolyseuren ist gemein, dass Wasserstoff und Sauerstoff sauber voneinander getrennt sind, damit es nicht zu der aus dem Chemieunterricht bekannten Knallgasreaktion kommt. Zwischen den Halbzellen braucht man eine Trennschicht wie die Duraion-Membran.

Die AEL ist der Klassiker, mit dem schon seit Jahrzehnten Wasserstoff erzeugt wird. Die Anlagen arbeiten aus technischen Gründen allerdings nur mit moderaten Stromdichten und nicht unter Druck, weil sonst zu viel Wasserstoff auf der Sauerstoffseite anreichert. Um wirtschaftlich relevante Mengen an Wasserstoff zu erzeugen, müssen sie daher sehr groß ausgelegt werden. Außerdem muss das Gas anschließend mit hohem Energieaufwand

DIE MEMBRAN MACHT DEN UNTERSCHIED

Wie die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mithilfe einer Anion Exchange Membrane abläuft





Techniker Thomas Schrief prüft, ob die Polymerlösung gleichmäßig auf die Trägerfolie aufgetragen wird.

komprimiert werden, damit es gespeichert und transportiert werden kann.

Die PEM-Elektrolyse arbeitet mit höheren Stromdichten und unter Druck und liefert deutlich mehr Wasserstoff als eine AEL gleicher Größe. Wasser wird bei der PEM-Elektrolyse unter stark sauren Bedingungen gespalten. Deshalb müssen korrosionsbeständige Materialien verwendet werden, zum Beispiel Edelmetalle wie Iridium. Das macht die Elektrolyseur teuer. Auch die Membran muss der Säure widerstehen. Sie wird in der Regel aus widerstandsfähigen PFAS gefertigt. Diese Fluorverbindungen stehen allerdings seit Jahren in der Kritik, weil sie sich in der Umwelt anreichern und in Verdacht stehen, gesundheitsschädlich zu sein. Genau hier liegt die Marktchance von Duraion: Bei ihrer Herstellung werden keine PFAS zugesetzt. Die Membran ist also eine leistungsfähige Alternative, die Elektrolyseur-Produzenten bereits heute Planungssicherheit für kommende Umweltauflagen bietet.

DIE BESTE AUS ZWEI WELTEN

Die AEM-Technologie umgeht die Nachteile von AEL und PEM. Sie arbeitet mit höheren Stromdichten sowie unter Druck und liefert so eine hohe Wasserstoffausbeute. Zudem arbeitet die Membran nicht in einem sauren, sondern einem alkalischen Milieu. Edelmetalle für das Zelldesign und als Katalysatoren müssen daher nicht

zwingend eingesetzt werden. Stattdessen können vergleichsweise günstige Metalle wie Nickel zum Einsatz kommen. So sind die Investitionskosten bei der AEM-Technologie niedriger – ein wichtiger Faktor für großskalige Anwendungen, wie sie beispielsweise in China geplant sind.

Zudem lassen sich AEM-Elektrolyseure schneller hochfahren als etwa AEL-Anlagen. Die Technik eignet sich also sehr gut, um das schwankende Angebot von Sonnen- und Windenergie abzufedern. Steht an einem sonnigen und windigen Tag viel Strom zur Verfügung, könnten AEM-Elektrolyseure kurzfristig ihre Leistung hochfahren und Wasserstoff produzieren. Bislang wird der Überschuss durch das europäische Stromnetz in Nachbarstaaten abgeführt, oder es müssen sogar Anlagen abgeschaltet werden. Die dadurch entstehenden Entschädigungs- und Netzengpasskosten tragen die Netzbetreiber und letztlich die Stromkunden. „Stattdessen könnten wir mit dem Stromüberschuss quasi zum Nulltarif Wasserstoff produzieren“, sagt Christian Schnitzer, der im Geschäftsgebiet High Performance Polymers für Duraion zuständig ist.

Trotz dieser Vorteile ist die AEM eine Nischentechnologie. Für einen Durchbruch der Technologie fehlte es bislang an leistungsfähigen und zuverlässigen Membranen, die sich in großer Menge herstellen lassen. Zwar haben verschiedene Start-ups in den vergangenen →



Goldene Zeiten:
Die Membran kann in
Marl in großen Mengen
und in gleichbleibend
hoher Qualität produ-
ziert werden.



»Evonik verfügt über viel Expertise bei Membranen.«

CHRISTIAN SCHNITZER,
GESCHÄFTSVERANTWORTLICHER FÜR DURAION
BEI HIGH PERFORMANCE POLYMERS

Jahren einige anionenleitende Membranen auf den Markt gebracht. Aber niemand konnte Membranen in ausreichender Menge und gleichbleibender Qualität liefern, die für einen Durchbruch der AEM-Technologie nötig wären. Durch die vollständige Rückwärtsintegration – von den Startmolekülen bis hin zur fertigen Membranrolle – kann Evonik mit Duraion beide Anforderungen erfüllen. Mit der jetzt in Betrieb genommenen Anlage steht die Membran in großem Maßstab zur Verfügung. Schnitzer: „Mit unserer Beschichtungsbreite von 100 Zentimetern werden wir auch die größten AEM-Elektrolyseure mit Membranen versorgen können.“

Nach ersten Tests haben Kunden das Gesamtpaket aus Verfügbarkeit, Qualität und Eigenschaften der Membranen gelobt: Sie sind sowohl chemisch und mechanisch stabil als auch sehr gut anionenleitend. Außerdem sind sie gasdicht, sodass sie hohen Drücken standhalten.

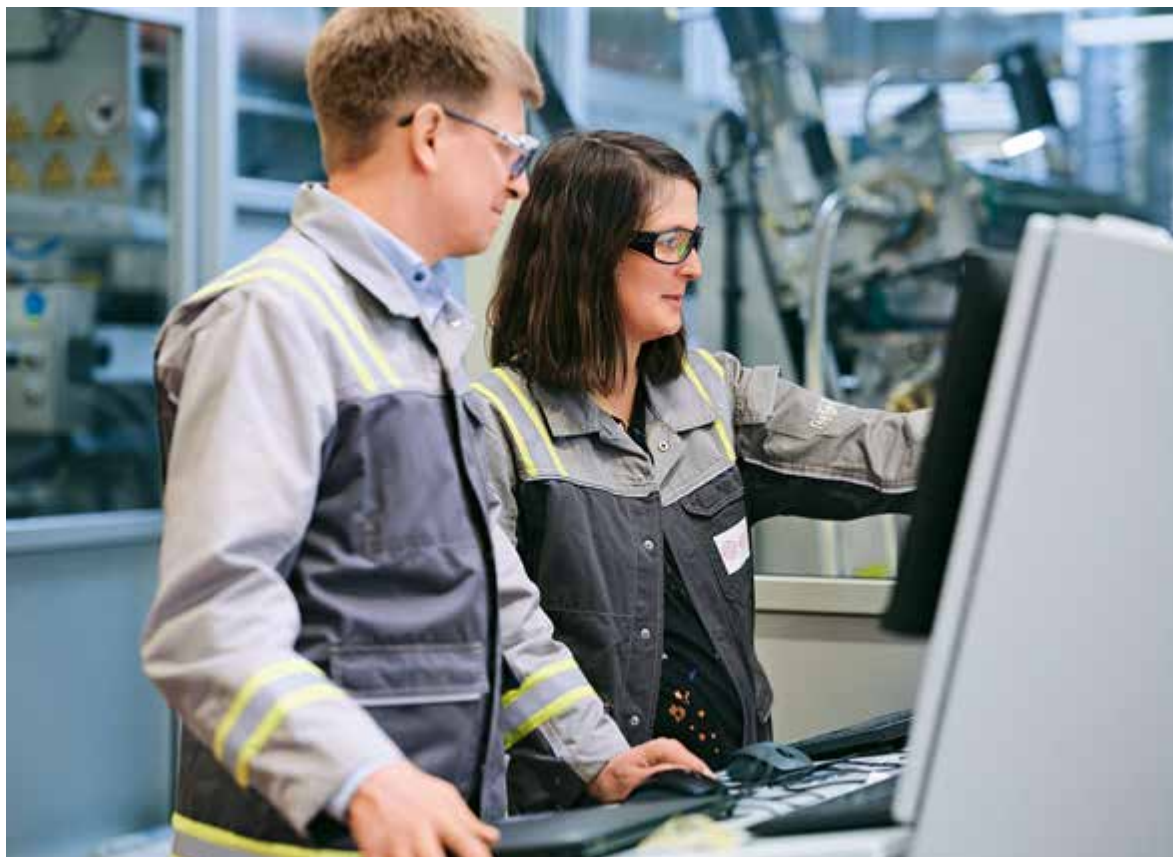
Der Weg bis zur Serienreife der Hochleistungsmembran war lang. „Die Idee entstand vor mehr als zehn Jahren, als wir die Entscheidung trafen, auf Wasserstoff zu setzen“, erzählt Schnitzer. „Evonik verfügt über viel Expertise bei Membranen, zum Beispiel bei Produkten zur Aufbereitung von Gasen. Da lag es nahe, auch die Elektrolyse zu adressieren.“ Das Team begann

mit der Entwicklung des Polymers. Es war klar, dass das Material viele Ansprüche erfüllen muss, und es galt, die richtigen Bausteine – Monomere – zu finden. Vor etwa fünf Jahren stand die chemische Struktur von Duraion fest. „Damals haben wir die Eigenschaften des entwickelten Polymers bereits in Membranform getestet“, erzählt Christian Däschlein. Zwei Jahre später entwickelte das Team zudem eine Version mit Gewebeverstärkung, um alle Kundenanforderungen erfüllen zu können. „Beide Produkte haben wir anfangs von Hand als Folien ungefähr im DIN-A4-Format hergestellt.“

Als nächstes ging es ans Scale-up, den Schritt von den Laborbedingungen zur Produktion im großen Maßstab – in diesem Fall sowohl der Polymerlösung als auch der Membranherstellung. Es ist ein Riesenunterschied, ob man 100 Gramm eines Polymers in einem kleinen Glaskolben herstellt oder Hunderte Kilo in einem großen Kessel. Im Laborkolben hat man die Komponenten schnell verrührt, und die Wärme ist überall einheitlich. In einem großen Kessel wird die gleichmäßige Durchmischung und Erwärmung zur Herausforderung. „Doch glücklicherweise haben wir das nötige Know-how im eigenen Haus – von der Grundlagenchemie bis zum Anlagenbau“, sagt Däschlein. „Für das Scale-up haben wir Spezialisten von verschiedenen Standorten zusammengeholt.“

SCHRITT FÜR SCHRITT WACHSEN

Bis zur Rolle-zu-Rolle-Fertigung in der 20-Meter-Anlage dauerte es allerdings. Das Team tastete sich langsam an die Industriedimension heran. Zunächst produzierten die Experten Membranen von 13 Zentimeter Breite auf einer Anlage von der Größe eines Wohnzimmerschranks. Damit konnten sie testen, wie gut sich das Polymer in einem kontinuierlichen Prozess verarbeiten lässt, um Maschine und Material perfekt aufeinander abzustimmen. Vor →



Produktionsleiter Florian Roghmans und Marketing-Verantwortliche Franziska van Krüchten überwachen die Membranproduktion in der Beschichtungsanlage.

etwa drei Jahren machte sich dann Florian Roghmans mit seinem Team an die Planung der nächsten Ausbaustufe: „Wir hatten jetzt zwar eine Ahnung davon, wie sich die Membran Rolle- zu- Rolle fertigen lässt. Aber eine große Anlage ist noch mal etwas anderes“, sagt er. „Zum Beispiel verteilen sich die Luftströmung und die Wärme darin nicht so wie in der kleinen Anlage.“

MARL TRIFFT SCHANGHAI

Neues Anwendungstechnikzentrum von Evonik nimmt in China den Betrieb auf.

In China wächst der Bedarf an Wasserstoff – und mit ihm das Interesse an der AEM-Technologie. Evonik positioniert sich hier strategisch: Parallel zum Start der Membranproduktion in Deutschland nimmt das neue AEM Center in Schanghai seine Arbeit auf. Es ist das erste technologieorientierte Anwendungstechnikzentrum des Konzerns in Asien mit Fokus auf die AEM-Elektrolyse und ihre Integration in die Wasserstoffinfrastruktur. Dort testen Experten die in Marl produzierten Membranen gemeinsam mit lokalen Partnern und Kunden unter industriellen Bedingungen. Das Center richtet sich an globale Abnehmer und ist zugleich eng an den chinesischen Markt angebunden – mit dem Ziel, die AEM-Technologie schnell in industrielle Anwendungen zu überführen und ihre Verbreitung voranzutreiben.

Zudem musste es gelingen, die flüssige Polymerschicht mit einem dünnen Verstärkungsgewebe zu vereinen. Dieses Gewebe ermöglicht es, dass die Membranen während des Betriebs im Elektrolyseur weniger quellen, um nicht Falten zu werfen wie die Haut des Menschen nach einem langen Wannenbad. Ionenleitende Polymere sind wasseraffin, sodass sie sich in einer feuchten Umgebung um 10 bis 20 Prozent ausdehnen. Wird ein wasserabweisendes Gewebe in das Polymer eingebettet, verringert das die Wasseraufnahme und verhindert, dass die Membran im Elektrolyseur Wellen wirft. „Das ist vor allem bei großen Elektrolyseuren ein Thema, in denen man die Membranen großflächig verbaut“, erklärt Roghmans. Die Anlage in Marl musste also in der Lage sein, das Verstärkungsgewebe so präzise im Polymer zu positionieren, dass es in der Mitte der hauchdünnen Honigschicht eingebettet ist und weder oben noch unten herauschaut. Dafür wickelt die Anlage die Trägerfolie und das Gewebe zeitgleich von zwei Rollen ab. Dort, wo das Gewebe und die beschichtete Bahn aufeinandertreffen – am Kaschierpunkt –, wird es in die Polymerlösung eingedrückt.

PRODUKTION IN GROSSEM STIL

Seit Kurzem ist die Pilotanlage in Betrieb. „Das ist hier keine Forschungseinheit mehr, sondern tatsächlich der Startpunkt, um unser Produkt in den Markt zu bringen“, sagt Christian Däschlein. „In der aktuellen Ausbaustufe sind wir in der Lage, Membranen für eine Elektrolyseleistung von bis zu 2,5 Gigawatt herzustellen. Das entspricht einem Viertel der geplanten Elektrolyseleistung in Deutschland für das Jahr 2030.“ Erste Hersteller von



Bei der Herstellung von Duraion ist das Zusammenspiel von Materialwissenschaft und Polymerchemie entscheidend – etwa bei der präzisen Einbettung der Gewebeverstärkung in die Polymerlösung.

AEM-Elektrolyseuren setzen die Duraion-Membranen bereits in der Pilotfertigung und Demonstrationsanlagen ein. „Wir können jetzt nicht nur große Mengen liefern, sondern auch eine gleichbleibend hohe Qualität.“ Das sei das A und O für die Hersteller von Elektrolyseuren.

Die Duraion-Membran und mit ihr die AEM-Technologie könnten neuen Schwung in die Wasserstoffproduktion bringen. Die Membran ist zuverlässig und robust, senkt die Investitionskosten von Elektrolyseuren und kann dank der großskaligen Rolle-zu-Rolle-Fertigung jetzt im großen Stil an den Markt gebracht werden. Die Ausbauziele in Deutschland und Europa wurden in den vergangenen Jahren hochgesteckt: Die Bundesregierung hat in der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie als Ziel eine Elektrolyseleistung von zehn Gigawatt für 2030 ausgegeben – was immerhin rund zwölf Prozent der in Deutschland installierten Windradleistung entspricht.

Doch der Ausbau ist ins Stocken geraten. Konkret seien jetzt nur noch 7,2 Gigawatt geplant, heißt es beim Verband Gas- und Wasserstoffwirtschaft. „Besonders

auf der Produktionsseite wurden zahlreiche Elektrolyseprojekte aufgeschoben oder abgesagt, da die Förderbedingungen unzureichend sind“, beklagt Verbandsführer Timm Kehler. Zudem sei nicht sicher, dass produzierter Wasserstoff auch abgenommen wird (siehe auch das Interview mit Ann-Kathrin Klaas, Seite 32).

Man stehe in Deutschland und Europa vor einem Henne-Ei-Problem, meint Kehler: Muss erst der Wasserstoff da sein oder erst die Nachfrage? „Wir benötigen praxistaugliche und verlässliche Rahmenbedingungen für die Produktion von Wasserstoff – insbesondere von grünem Wasserstoff. Dazu braucht es von der Politik ein verbindliches Elektrolyseausbauziel, langfristige Abnahmemeinstrumente und wettbewerbsfähige Strompreise.“ Nur dann hätten die Unternehmen Investitionssicherheit, und nur dann ließe sich der Hochlauf beschleunigen. Die Duraion-Membran könnte wesentlich dazu beitragen. Immerhin hat sie das Potenzial, die Elektrolyse preiswerter zu machen. Zudem steht mit Evonik ein zuverlässiger Lieferant für die AEM-Technologie zur Verfügung.

Deutlich mehr Schwung hat der Wasserstoffmarkt in China. Während in Europa noch über regulatorische Hürden debattiert wird, ist Wasserstoff in der nationalen Strategie der Volksrepublik bereits verankert. Die dortige Dynamik ist für Evonik kein fernes Szenario, sondern unmittelbare Geschäftsentwicklung: AEM-Elektrolyseure sind in Asien weitverbreitet, und der Hunger nach leistungsfähigen Membranen ist enorm. „Dort wird die Technologie bereits im industriellen Maßstab skaliert“, berichtet Christian Schnitzer. Ein interessanter Markt für die Membranen aus Marl.

Der Geschäftsverantwortliche für Duraion gibt sich optimistisch: Wasserstoff werde sich durchsetzen, früher oder später, zunächst in Asien und Europa – und entsprechend wachsen. „Für diesen Fall sind wir in der Lage, große Mengen an Membranen herzustellen – zu attraktiven Kosten.“



Tim Schröder arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Oldenburg.



»Es braucht mehr Planungssicherheit«

Der Markt für grünen Wasserstoff entwickelt sich in Deutschland und Europa langsamer als erwartet. Ann-Kathrin Klaas vom Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität zu Köln erklärt, wie staatliche Regulierung und innovative Technik dazu beitragen können, dass der Aufbau wieder Fahrt aufnimmt.

INTERVIEW TIM SCHRÖDER

Frau Klaas, die vorige Bundesregierung hatte sich in ihrer Wasserstoffstrategie das Ziel gesetzt, bis 2030 eine heimische Elektrolyseleistung von zehn Gigawatt aufzubauen. In einer aktuellen Studie kommen Sie zu dem Schluss, dass sich dieses Ziel aller Voraussicht nach nicht mehr erreichen lässt – warum?

Weil viele angekündigte Projekte bis dahin wahrscheinlich nicht mehr realisiert werden. Ende 2025 waren in Deutschland Elektrolyseure mit einer Kapazität von insgesamt knapp 200 Megawatt in Betrieb. Das entspricht einer installierten Leistung von etwa 80 Windrädern. Derzeit gibt es zudem 22 Projekte mit insgesamt 1,3 Gigawatt, für die Unternehmen bereits finale Finanzierungsentscheidungen getroffen haben. Diese Projekte sollen binnen zwei Jahren realisiert werden, sodass wir 2027 bundesweit bei etwa 1,5 Gigawatt landen. Andere größere Projekte stehen kurz vor der Finanzierungsentscheidung. Aber jetzt zögert man, weil Unsicherheit besteht, ob der produzierte Wasserstoff auch Abnehmer finden wird. Es geht dabei um mehrere Projekte von je 100 Megawatt, viele davon in Norddeutschland. Sollten die nicht realisiert werden, dürfte der Wasserstoffhochlauf in Deutschland deutlich länger dauern.

Ist die Sorge vor einer zögerlichen Nachfrage nach grünem Wasserstoff berechtigt?

Grüner Wasserstoff ist derzeit noch deutlich teurer als erwartet. Prognosen und Studien gingen früher davon aus, dass sich seine Produktionskosten langfristig auf zwei bis drei Euro pro Kilogramm reduzieren würden.

Unsere aktuellen Analysen ergeben, dass wir 2030 ungefähr bei fünf bis sechs Euro pro Kilogramm liegen könnten. Hinzu kommen Kosten für die Speicherung oder den Transport. Langfristig könnten die Produktionskosten von grünem Wasserstoff auf drei bis vier Euro sinken. Das ist aber immer noch viel. Die Betreiber der Elektrolyseure können keine Abnahmeverträge abschließen – und ohne Abnahmevertrag startet kaum ein Elektrolyseurprojekt.

Wie kommt es zu dieser Diskrepanz?

Vor einigen Jahren gab es einen regelrechten Wasserstoffhype. Doch der Markt hat sich viel langsamer entwickelt als erwartet. Am Anfang wurden die Kosten für den Aufbau großer Elektrolyseure schlicht unterschätzt, vor allen Dingen was die Nebenkosten angeht, den Anschluss ans Strom- und Wasserstoffnetz und das ganze Engineering. Wenn man das alles zusammenzählt, liegen wir aktuell bei Investitionskosten für einen Elektrolyseur von etwa 2.000 Euro pro Kilowatt.

Könnten neue, effiziente Elektrolysetechnologien helfen, den Wasserstoffpreis zu senken?

Hier muss man zwischen den Investitionskosten für den Elektrolyseur und den gesamten Produktionskosten von Wasserstoff unterscheiden. Die Investition macht etwa die Hälfte des Wasserstoffpreises aus. Hier lassen sich mit neuen, effizienten Technologien und Innovationen sicher Einsparungen erzielen. Die andere Hälfte sind die Kosten für den grünen Strom, den man für die Elektrolyse benötigt.

Kann die Politik Einfluss nehmen, um den Hochlauf der Elektrolyse zu beschleunigen?

Ja, vor allem indem sie mehr Planungssicherheit schafft. Einen wahren Hemmschuh sehen viele Projektierer in der aktuellen Debatte über die Stromnetzentgelte. Momentan sind Elektrolyseure, die vor Mitte 2029 in Betrieb gehen werden, von den Netzentgelten befreit. Für Anlagen, →



»Klimaneutralität werden wir in Europa nicht ohne grünen Wasserstoff erreichen.«



Teures Projekt: Für die Errichtung eines Elektrolyseurs kalkulieren Fachleute mit rund 2.000 Euro pro Kilowatt Leistung (o.). Auch der Aufbau einer Transportinfrastruktur mit Pipelines und Tankschiffen ist kostspielig (M.). Diese Kosten müssen sinken, damit grüner Wasserstoff attraktiv wird für Verbraucher – auch beim Thema Mobilität.

die danach in Betrieb gehen, sollen dann – Stand heute – klassische Netzentgelte gezahlt werden. Das könnte bis zu 20 Prozent Mehrkosten bedeuten. Aktuell wird über die Reform der Stromnetzentgelte beraten. Dabei diskutiert man auch darüber, die Entgeltbefreiung für Elektrolyseure über 2029 hinaus weiterzuführen. Noch ist alles offen. Daher besteht viel Unsicherheit im Markt. Auch hier zeigt sich, dass die Politik mit einem deutlich schnelleren Hochlauf des Wasserstoffmarkts gerechnet hatte und regulativ eingegriffen hat. Aus Sicht der Projektierer wäre eine Befreiung über 2029 hinaus sinnvoll.

Sind diese Schwierigkeiten ein rein deutsches Phänomen?

In der EU haben wir insgesamt etwa 600 Megawatt Elektrolyse in Betrieb. Deutschland hat mit seinen knapp 200 Megawatt den größten Anteil. Darüber hinaus sind Elektrolyseure aktuell vor allem in Dänemark, Spanien und Norwegen in Betrieb. Es gibt verschiedene Initiativen, eine europaweite, grenzüberschreitende Infrastruktur aufzubauen, wie das European Hydrogen Backbone. Die deutschen Fernleitungsbetreiber sind da viele Kooperationen mit allen umliegenden Ländern eingegangen. Grundsätzlich steht der Wasserstoffhochlauf in den anderen europäischen Ländern aber am gleichen Punkt und vor ähnlichen Problemen wie Deutschland.

Und die wären?

Hinderlich sind derzeit vor allem die europäischen RFNBO-Kriterien. Die Abkürzung steht für Renewable Fuels of Non-Biological Origin, also für erneuerbare Energien, die nicht aus Pflanzen oder anderen biologischen Produkten stammen. Hier gibt es strenge Vorgaben für den Strombezug von Elektrolyseuren. Die Betreiber dürfen nur dann produzieren, wenn sie einen Direktvertrag mit einer erneuerbaren Energieanlage wie einem Windpark eingehen, ein sogenanntes Power Purchase Agreement, kurz PPA. Weiter gilt, dass der Elektroly-

seur pro Monat nur so viel Strom verbrauchen darf, wie die Energieanlage erzeugt. Diese monatliche Gleichzeitigkeit soll ab 2030 verschärft werden auf stündliche Gleichzeitigkeit. Das macht den Betrieb eines Elektrolyseurs unflexibel, weil er sehr stark an die zeitliche Verfügbarkeit des Stroms gebunden ist. Ein Elektrolyseur kann heute nicht direkt am Strommarkt teilnehmen, sondern ist über Direktverträge gebunden. Auch hier gilt: Man hatte mit einem schnellen Wasserstoffhochlauf gerechnet und wollte den Markt regulieren. Jetzt erweist sich das als Hemmschuh.

Was kann man sonst tun, um den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft und der Elektrolysekapazität zu beschleunigen?

Ich sehe grundsätzlich drei Ansatzpunkte: Erstens kann man auf der Produktionsseite versuchen, Kosten zu senken, etwa durch Innovationen. Zweitens kann man versuchen, auf der Nachfrageseite die Zahlungsbereitschaft zu erhöhen. Das ließe sich erreichen, indem man fossile Energien verteuert – zum Beispiel über CO₂-Bepreisung. Allerdings würde das bei dem derzeit angespannten Energiemarkt den Druck auf die Industrie weiter erhöhen und könnte dazu führen, dass energieintensive Produktion ins Ausland verlagert wird.

Und der dritte Ansatz?

Eine Kopplung der Wasserstoffherzeuger und der Abnehmer über Vermittler, sogenannte Midstreamer. Diese Händler bündeln Angebot und Nachfrage und aggregieren damit größere Mengen. Das ist heute schon im Strom- und Gasmarkt der Fall. Diese Bündelung kann künftig zu Einsparungen durch Skaleneffekte führen, weil große Wasserstoffmengen gehandelt, gespeichert und transportiert werden. Aktuell wird darüber gesprochen, dass über die Midstreamer regulatorisch finanzielle Unterstützung gegeben wird. Ein konkretes Beispiel für solch einen Stakeholder im Wasserstoffmarkt ist H2Global. Diese Stiftung koordiniert im Auftrag der Bundesregierung Auktionen zum Import von grünem Wasserstoff. In einer Auktionsrunde hat ein Projekt in Ägypten gewonnen, wo grünes Ammoniak hergestellt wird. In Ammoniak lässt sich Wasserstoff auf chemischem Weg speichern und transportieren. Von 2027 an soll das grüne Ammoniak dann nach Deutschland geliefert werden. Subventioniert wird das Projekt über Bundesmittel. Diese werden über den Midstreamer verwaltet, der die Auktion organisiert.



Dr.-Ing. Ann-Kathrin Klaas ist Expertin für Energiesystemtechnik am Energiewirtschaftlichen Institut an der Universität zu Köln (EWI) und leitet dort den Forschungsbereich Energy Commodities. Sie verantwortet die Themen Wasserstoff- und Erdgaswirtschaft und Wärmewende. Ihr Fokus liegt auf techno-ökonomischen Analysen, dem Erdgas- und Wärmesektor sowie dem Wasserstoffmarkt. Klaas hat am Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme an der Technischen Universität Clausthal zum Thema Wasserstoffspeicherung promoviert.

Wie wird sich der Wasserstoffmarkt und mit ihm die Elektrolyse in den kommenden Jahren entwickeln?

Alle aktuellen Klimaneutralitätsstudien zeigen, dass wir Klimaneutralität in Deutschland und Europa nicht ohne grünen Wasserstoff erreichen werden. Es gibt Industrien und Produktionsprozesse, die auf Wasserstoff als grünem Energieträger angewiesen sind, zum Beispiel die Stahlindustrie. Metallerze werden dort bislang in Hochöfen durch Koks-kohle aufgeschmolzen. Als klimaneutrale Alternative sollen künftig Direktreduktionsöfen zum Einsatz kommen, in denen Wasserstoff genutzt wird. Aktuell ist das wegen der hohen Wasserstoffproduktionskosten aber oft keine wirtschaftliche Option. Es braucht ein Bündel an Maßnahmen, um das zu ändern. Auch eine gezielte staatliche Förderung könnte den Hochlauf beschleunigen. Die Stahlhersteller in Deutschland erhalten beispielsweise eine Förderung, die die Investition in neue Anlagen wie Direktreduktionsöfen unterstützt. Klar ist aber auch, dass jede Förderung befristet sein muss, denn Subventionen ohne zeitliches Ende kann sich der Staat nicht leisten. —



EDLER TROPFEN



Weltweit soll mehr Kunststoff recycelt werden. Die Pyrolyse, also das Verflüssigen von Plastikabfällen, schafft hier neue Möglichkeiten. Evonik bietet Hilfsstoffe und Technologien, um die Qualität von Pyrolyseöl so zu verbessern, dass es sich für die Produktion von Polymeren eignet.

TEXT **KARL HÜBNER**



Chemisches Recycling
in Betrieb: die
Pyrolyseanlage von
Arcus Greencycling in
Frankfurt-Höchst

Kunststoffe spielen im Frankfurter Industriepark Höchst seit fast 100 Jahren eine Rolle. 1928 begann die Firma Hoechst hier mit der Produktion von Polyvinylacetat. Später kam unter anderem Polyethylen (PE) hinzu, ein Polymer, das sich bis heute in vielfältiger Form in jedem Haushalt findet.

Kreislaufwirtschaft – oder Circular Economy – stand in der Vergangenheit nicht im Fokus der Kunststoffwelt. Dass sich das gerade ändert, kann man auch im Industriepark Höchst beobachten. Bei der seit 2021 hier ansässigen Firma Arcus Greencycling Technologies fahren regelmäßig Lkw vor und laden Big Bags mit zusammengepressten Kunststoffabfällen ab. „Das ist unser Rohstoff“, erklärt Geschäftsführer Daniel Odenthal. Die Schnipsel in den Abfällen enthalten zum Beispiel das, was Haushalte über die in Deutschland übliche gelbe Tonne entsorgt haben und für das mechanische Recycling ungeeignet ist. Aber auch Industrieabfälle wie ausgediente Folien aus der Landwirtschaft oder Produktionsausschüsse nimmt Arcus gern.

In Deutschland landen derlei Abfälle bisher allerdings größtenteils in Verbrennungsöfen, anderswo auch auf Deponien. Arcus will sie so recyceln, dass andere Unternehmen daraus wieder neue Kunststoffe herstellen können – ein wichtiger Beitrag zur Circular Economy. Damit diese Verarbeitung gelingt, muss die Qualität der Zwischenprodukte gesichert sein. Und hier spielt Evonik eine wichtige Rolle.

Noch sind die Recyclingquoten bei Plastik sehr gering. Von den 2024 weltweit produzierten 431 Millionen Tonnen Kunststoff stammte nicht einmal jede zehnte aus wiederverwertetem Material. Dabei sind die Mengen an Kunststoffabfall gewaltig: 2022 etwa fielen weltweit fast 270 Millionen Tonnen an, davon gut ein Zehntel in der Europäischen Union. Nur knapp 38 Millionen Tonnen wurden davon global recycelt. Dagegen wurden 90 Millionen Tonnen thermisch verwertet – also zur Energiegewinnung verbrannt. Gut 103 Millionen Tonnen fanden ihr Ende auf einer Deponie.



Die Kunststoffpellets für die Pyrolyse werden in großen Plastiksäcken, sogenannten Big Bags, angeliefert. Um eine gleichbleibend hohe Qualität sicherzustellen, passen die Mitarbeiter stetig Prozesse und Anlagen individuell an.



Nur wenige Kunststofftypen werden sortenrein gesammelt und zurückgegeben. Getränkeflaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) sind eine der seltenen Ausnahmen. Bei ihnen gelingt es recht gut, das Material im Kreislauf zu halten, indem alte Exemplare gereinigt, geschreddert, geschmolzen und so zur Herstellung neuer Flaschen genutzt werden. Fachleute sprechen von mechanischem Recycling, wenn das Material im Zuge der Wiederverwendung chemisch unverändert bleibt.

CHEMISCHES ALLERLEI

Der große Rest gemischter Kunststoffabfälle, die nicht für das mechanische Recycling geeignet sind, ist ein Fall fürs chemische Recycling. Dabei werden die Polymere in Bestandteile zerlegt, aus denen man wieder neue Kunststoffe gewinnen kann.

Bisher spielt diese Technik mengenmäßig kaum eine Rolle, aber Firmen wie Arcus wollen das ändern. Dafür schlagen sie sich mit bunten Kunststoffgemischen herum, die nicht nur diverse Polymerklassen enthalten, sondern auch Zusätze wie Farbstoffe, Stabilisatoren, Weichmacher oder Flammschutzmittel. Hinzu kommen Verunreinigungen sowie Metalle oder Papier aus Verschlüssen und Etiketten. Ein chemisches Allerlei, das für mechanisches Recycling völlig ungeeignet ist.

Bei Arcus behandelt man solche Gemische mit Stickstoff und befördert sie dann per Saugschlauch in den

Pyrolyseofen, das Herzstück der Anlage. Hier wird das ausgediente Polymer-Schnipsel-Gemisch unter Luftabschluss auf mehrere Hundert Grad Celsius erhitzt. Weil Sauerstoff fehlt, werden die langen Molekülketten in kleinere Bausteine zerlegt, ohne zu verbrennen. So erhält man am Ende einer Pyrolyse ein Gemisch aus Kohlenwasserstoffen, die, je nach Kettenlänge, als Gas, Flüssigkeit oder Feststoff anfallen.

Die Flüssigkeit, das Pyrolyseöl, macht dabei den Großteil aus und ist ein wichtiges Zwischenprodukt des chemischen Recyclings. „Aus einer Tonne Abfall erhalten wir abhängig vom Feedstock etwa 600 bis 650 Kilogramm Öl“, erklärt Dr. Marco Tomasi Morgano, der Technische Direktor (CTO) von Arcus. Mit dieser schwarzen Flüssigkeit verdient Arcus sein Geld. Abnehmer sind Betreiber von Steamcrackern, die damit einen Teil ihres erdölbasierten Rohstoffs ersetzen können.

In Steamcrackern entsteht das, was man für die Synthese neuer Kunststoffe benötigt, zum Beispiel Ethylen und Propylen. Diese Stoffe bilden nicht nur →

PYROLYSE UND DIE POLITIK

Welche Rolle Pyrolyseöle aus Plastikabfällen künftig bei der Herstellung neuer Kunststoffe spielen können, ist nicht nur eine Frage der Reinheit und der technischen Machbarkeit. Auch politische Rahmenbedingungen entscheiden darüber mit und setzen Anreize für ein chemisches Recycling – oder nicht. Ein Blick auf die EU, die USA und China, wo zusammen rund drei Viertel der weltweiten Steamcracker-Kapazitäten angesiedelt sind.



In den **USA** haben die einzelnen Bundesstaaten unterschiedliche Vorgaben für die Wiederverwendung von Kunststoffen. Kalifornien oder New York haben beispielsweise den Einsatz von Einmalbesteck oder -essensbehältern stark eingeschränkt, was Anreize für abbaubare oder recycelbare Alternativen schafft. Derzeit wird in den USA diskutiert, ob Pyrolyse als Recyclingtechnologie einzuordnen ist. Bislang wird Pyrolyseöl aus Kunststoffabfällen fast ausschließlich als Brenn- oder Treibstoff eingesetzt. Unabhängig von der Gesetzgebung verpflichten sich Unternehmen allerdings zunehmend zu mehr Nachhaltigkeit. Das wiederum befördert Ansätze zur Kreislaufwirtschaft.



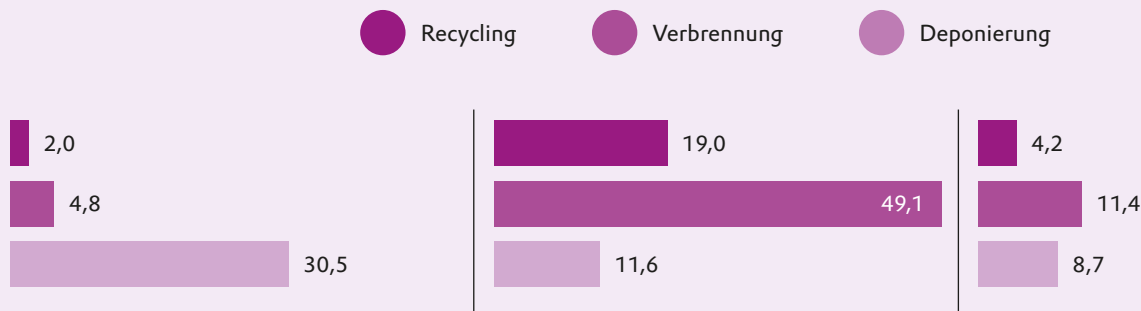
In **China** treibt der aktuelle Fünfjahresplan (2026–2030) auch den Umstieg auf umweltfreundlichere Produktions- und Lebensweisen voran. Spätestens ab 2030 sollen die CO₂-Emissionen sinken, und bis 2060 möchte Peking treibhausgasneutral sein. Konkrete Vorgaben für Recyclinganteile in der Produktion gibt es bisher nur vereinzelt. Folien in der Landwirtschaft etwa müssen inzwischen zu 85 Prozent recycelt werden. Sortier- und Sammelsysteme sind erst im Aufbau. Darüber hinaus verankern einzelne Konzerne zunehmend Nachhaltigkeitsziele in ihrer Strategie. PetroChina etwa, der größte Ölkonzern des Landes, will fossile Rohstoffe bei der Polymerproduktion zumindest teilweise durch Recyclingmaterial ersetzen. Europa ist für China eine wichtige Exportregion. Experten erwarten daher, dass die verschärfte EU-Regulierung von Rezyklatanteilen in neuen Produkten auch das Recycling in China stimulieren könnte.



In der **EU** gibt es in einigen Branchen erste konkrete Ziele für Kunststoffrecycling-Quoten. So müssen von 2030 an 25 Prozent der in neuen Autos verbauten Plastikbestandteile aus Rezyklat bestehen. Dieses Rezyklat wiederum muss zu wenigstens einem Viertel aus alten Autoteilen stammen. Verpackungen sollen von 2030 an zwischen 10 und 35 Prozent Rezyklat enthalten, von 2040 an 25 bis 65 Prozent. Bei Kunstfasern für Textilien sind ähnliche Vorgaben geplant. Solche Quoten sind über mechanisches Recycling allein nicht zu erzielen. Chemisches Recycling wird daher an Bedeutung gewinnen, darunter auch die Pyrolyse von Kunststoffabfällen.

Wohin mit dem Kunststoffmüll?

Abfallverwertungsströme 2022, in Mio. Tonnen



Quelle: Communications Earth & Environment 6/2025



Das Ausgangsmaterial für die Pyrolyse besteht aus schwer zu recycelnden Materialien wie Verpackungsfolien, die geschreddert angeliefert und mit einer Saugvorrichtung in die Anlage geleitet werden.

»Aus einer Tonne Abfall erhalten wir 600 bis 650 Kilogramm Öl.«

MARCO TOMASI MORGANO, CTO BEI ARCUS



die Bausteine von Polyethylen und Polypropylen (PP), sondern sind auch an der Herstellung vieler weiterer Polymere beteiligt, etwa Polyvinylchlorid (PVC) oder Polystyrol (PS). Das Öl aus den Schnipseln alter Joghurtbecher oder Seifenspender liefert so das Ausgangsmaterial für neue Joghurtbecher und Seifenspender.

Steamcracker werden normalerweise mit Naphtha betrieben, einer bestimmten Fraktion aus der Erdölraffination. Prinzipiell können Steamcracker auch Pyrolyseöl verarbeiten. Allerdings bedarf dies einer Vorbehandlung. Das liegt daran, dass gemischte Plastikabfälle

keine reinen Kohlenwasserstoffe sind. Ist etwa PVC enthalten, findet sich auch Chlor im Öl. Stickstoff wiederum kann über Polyamide, Polyurethane oder ABS-Copolymere eingetragen werden. Polycarbonate und Polyester bringen Sauerstoff mit, Silicone Silicium. Außerdem enthalten die Kunststoffabfälle Verunreinigungen wie zum Beispiel Lebensmittelreste.

KLEINE MENGEN, GROSSE PROBLEME

„Die drei Hauptprobleme im Pyrolyseöl sind Chlor, Stickstoff und Sauerstoff“, sagt Arcus-CTO Tomasi Morgano. Weil sie Korrosion verursachen oder den Katalysator im Steamcracker beschädigen können, machen die Betreiber strenge Vorgaben zur Qualität des eingespeisten Pyrolyseöls. „Bei Chlor sind in der Regel maximal zweistellige ppm-Werte zulässig“, so der Verfahrenstechnik-Ingenieur – ppm steht für „parts per million“, fünf ppm sind gerade einmal 0,0005 Prozent. Die Abfälle, die bei Arcus angeliefert werden, enthalten zum Teil mehr als ein Massenprozent Chlor. Da sich ein Teil der Verunreinigungen während der Pyrolyse in der Feststoff-Fraktion abscheidet, hat Öl aus der Arcus-Anlage noch Chloranteile im →





Das Ergebnis der Pyrolyse ist ein Öl, das bei der Synthese von Kunststoffpolymeren eingesetzt werden kann.

zweistelligen ppm-Bereich. Damit kommen die Betreiber von Steamcrackern derzeit zurecht. Denn bisher mischen sie Pyrolyseöl ihrem regulären Rohstoff Naphtha nur in kleinen Anteilen zu, sodass sich das Chlor – und auch andere Begleitstoffe – ausreichend verdünnen.

Doch dabei wird es kaum bleiben. Das chemische Recycling von Plastik dürfte weiter an Bedeutung gewinnen, weil die politischen Rahmenbedingungen die Abkehr von fossilen Rohstoffen verlangen (siehe Kasten auf Seite 40). Zudem ist es für viele Unternehmen attraktiv, mit einer hohen Recyclingquote ihres Produkts zu werben. Wer etwa sein Shampoo in eine Flasche abfüllt, deren Polypropylen zu 20 Prozent auf pyrolysierten Kunststoffabfällen basiert, darf diese Quote auch für sein Produkt reklamieren.

Hendrik Rasch, der sich bei Evonik als VP Circular Packaging & Plastic Recycling des Globalen Next Markets Programs mit Kreislaufkonzepten für die Kunststoffbranche beschäftigt, rechnet daher auch mit einer zunehmenden Verfügbarkeit von Pyrolyseöl. „Derzeit entstehen weltweit viele neue Pyrolyseanlagen“, so Rasch. Damit steige auch der Anreiz für die Betreiber von Steamcrackern, Pyrolyseöl aus Plastikabfällen in größeren Beimengungen einzusetzen.



»Wenn ein Steamcracker stillsteht, kostet das Millionen Euro pro Tag.«

HENDRIK RASCH, VP CIRCULAR PACKAGING & PLASTIC RECYCLING BEI EVONIK

Doch es bedarf neuer technischer Lösungen, denn die Verunreinigungen sind für die Betreiber ein Risiko. „Wenn ein Cracker stillsteht, kostet das Millionen Euro pro Tag“, stellt Rasch klar. Es gilt also, störende Verunreinigungen aus Pyrolyseölen herauszuholen. „Genau dafür haben wir Produkte entwickelt“, sagt Rasch.

Mit „wir“ meint er vor allem ein Evonik-Team im fast 8.000 Kilometer entfernten Little Rock. Die Kollegen in der Hauptstadt des US-Bundesstaats Arkansas befassen sich seit vielen Jahren mit Katalysatoren und Adsorptionsmaterialien. „Pyrolyseprozesse sind im Trend, und daher haben wir uns vor einigen Jahren gefragt, ob wir mit unserer Expertise nicht auch etwas zur Behandlung von Pyrolyseölen bereitstellen können“, erinnert sich Dan Miskin, Evonik-Chemieingenieur in Little Rock. „Eine Umfrage unter Pyrolysebetreibern zeigte dann, dass die Verunreinigung mit Chlor deren größtes Problem ist.“



Der Evonik-Standort in Little Rock (Arkansas) ist darauf spezialisiert, gebrauchte Katalysatoren so aufzubereiten, dass sie wieder eingesetzt werden können.



In Trommelbehältern werden katalytisch aktive Metalle auf einem Adsorbensmaterial verteilt, das unerwünschte Inhaltsstoffe des Ausgangsmaterials abtrennen und dann binden kann.

Zwar gibt es schon lange Produkte, die Chlorverbindungen aus Flüssigkeiten oder auch aus Gasströmen abtrennen. Auch Evonik hat mit Chlorocel eine eigene Produktlinie dazu. Doch in Pyrolyseölen liegt das Chlor organisch gebunden vor, und da kommen herkömmliche Chlorfänger an ihre Grenzen.

ZWEI PROZESSSCHRITTE IN EINEM

Um dieses Marktbedürfnis zu adressieren, stieg das Evonik-Team zunächst tief in die Geschichte der Chlor-Adsorbentien ein. „Wir wollten verstehen, wie die einst entworfen wurden, um sie dann geeignet weiterentwickeln zu können“, erklärt Miskin. Einige Jahre und viele Testreihen später ist genau das gelungen. Anfang 2025 brachte Evonik in seiner Produktlinie Purocel drei Chlor-Adsorbens-Typen speziell für die Aufreinigung von Pyrolyseölen auf den Markt. Purocel 505 sticht dabei heraus. Die Evonik-Entwickler haben es so konzipiert, dass es zwei getrennte Prozessschritte vereint. „Erst katalysiert das Material die Abspaltung von Chlorwasserstoff aus den organischen Molekülen“, so Miskin, „und danach wird dieses HCl direkt festgehalten.“ Den zweiten Schritt sofort an Ort und Stelle zu ermöglichen, sei wichtig, so

der Chemieingenieur, da das reaktive HCl ansonsten erneut organische Chloride bilden könne. Dann wäre nichts gewonnen.

„Testreihen haben gezeigt, dass Purocel 505 dreimal so viel Chlor aus Pyrolyseölen herausholt wie herkömmliche Produkte“, sagt Hendrik Rasch. Ergänzt wird es im Evonik-Portfolio von Purocel 510 und 515. Für welchen Typ sich ein Anwender entscheidet, hängt von den jeweiligen Anforderungen ab. Purocel 510 ist in Sachen Chlor nicht so leistungsstark wie 505, holt dafür aber auch weitere Verunreinigungen wie etwa Silicium, Stickstoff, Phosphor oder etwaige Säuren aus dem Öl. Außerdem kann man das Produkt bei Raumtemperatur einsetzen und durch starkes Erhitzen wieder regenerieren – und damit erneut einsetzen.

Auf mehreren Kontinenten testen Betreiber von Steamcrackern die neuen Produkte bereits an Pyrolyseölen. Für Purocel 510 gebe es dabei auch ein Komplett- →



Der Fertigungsprozess in Little Rock wird kontinuierlich überwacht, die Produktqualität durch die Entnahme von Proben sichergestellt.

paket, so Rasch. „Da bieten wir unsere Rocket-Technologie an. Das sind maßgeschneiderte und vorkonfigurierte Kolonnenmodule mit dem Adsorbens, die wir mitsamt Pumpen und vollständiger Prozesssteuerung liefern.“ Ähnliche Lösungen von Evonik werden bereits in der Öltraffination eingesetzt, etwa um Geruchs- und Farbprobleme zu beheben.

Anwender schalten so eine Rocket-Einheit zum Beispiel an den Ausgang eines Pyrolysereaktors oder vor den Eingang eines Steamcrackers. Dank der Vorkonfiguration müssen Kunden nicht viel tun. „Bequeme Plug-and-Play-Technik“ nennt Rasch das. Die Rocket-Kolonnen heizen Purocel 510 sogar turnusmäßig auf, um es zu regenerieren.

EIN ZWEITES LEBEN FÜR KATALYSATOREN

Auch bei Arcus in Frankfurt finden die neuen Purocel-Typen und die Rocket-Einheit viel Gefallen. Allerdings will man die Pyrolyseöle derzeit nicht selbst reinigen. Das sei dort sinnvoller und wirtschaftlicher, wo größere Mengen im Spiel sind, also bei den Steamcracker-Betreibern. Geschäftsführer Odenthal sieht in den Evonik-Produkten nicht weniger als „einen Erfolgsfaktor dafür, nicht fossile Rohstoffe gängig für die bestehende Infrastruktur der Petrochemie zu machen“ – und so die dortigen Einsatzmengen von Pyrolyseöl zu steigern. „Heutige Steamcracker wurden über Jahrzehnte optimiert“, so Odenthal, „aber eben für die herkömmlichen fossilen Naphtha-



Frisch hergestellte Adsorbentien sind weiß. Während der Reinigung von Pyrolyseöl verfärben sie sich grau.

Qualitäten. Nur wenn es uns gelingt, Pyrolyseöle diesen standardisierten Qualitäten bestmöglich anzugleichen, werden sie noch besser akzeptiert werden.“

In der klassischen Petrochemie kennt man noch ein weiteres Verfahren, das das Adsorptionsverfahren bei der Aufreinigung von Pyrolyseölen ergänzen könnte: Hydrotreating. Dabei setzt man Wasserstoff zu, der dann mit chlor-, stickstoff- oder sauerstoffhaltigen Verunreinigungen zu flüchtigen Verbindungen reagiert. Für diese Technologie haben die Evonik-Experten in Little Rock Metallkatalysatoren entwickelt, die inzwischen in der Reihe Purocel H vermarktet werden.

Im Unterschied zu anderen auf dem Markt befindlichen Katalysatoren handelt es sich dabei um recycelte Produkte. Evonik setzt eine eigens entwickelte Technologie ein, die altersschwach gewordene Katalysatoren einer Verjüngungskur unterzieht. Danach stehen die Katalysatoren neuen Exemplaren in ihrer Leistung in nichts nach. Anwender, die auf diese Purocel-H-Typen setzen, sparen gegenüber neu hergestellten Katalysatoren

Proben aus Rohöl-Produkten: Der Standort Little Rock profitiert von der jahrelangen Zusammenarbeit mit der Petro-Industrie.



»Die Verunreinigung mit Chlor ist das größte Problem von Pyrolysebetreibern.«

DAN MISKIN, CHEMIEINGENIEUR BEI EVONIK
IN LITTLE ROCK

nicht nur Geld, sondern verbessern durch die Wiederverwendung auch ihren CO₂-Fußabdruck.

Mit den neuen Purocel- und Purocel-H-Produkten hat Evonik sein Additivspektrum für die Petrochemie weiter ausgebaut. Schon lange kennt und nutzt die Branche andere Additive von Evonik wie etwa die Pour Point Depressants der Marke Viscoplex. Das sind Produkte, mit denen Anlagenbetreiber Öle flüssig halten, indem eine Kristallisation verhindert wird, um die Öle auch bei niedrigen Temperaturen pumpfähig zu halten. Auch Arcus in Frankfurt setzt in seiner Anlage Viscoplex ein, um die bei der Pyrolyse ebenfalls anfallenden Wachse fließfähig zu halten. Weitere Additive, insbesondere für Crackerbetreiber, hat Evonik in der sogenannten SiYPro-Produktreihe zusammengefasst. Das Kürzel steht für „Simplify Your Process“ – und ist damit Programm. Denn die jeweiligen Produkte haben den Zweck, störenden Effekten im Crackingprozess entgegenzuwirken.

Es ist also alles vorbereitet, um mit Pyrolyseölen aus Plastikabfällen dafür zu sorgen, dass mehr Kunststoff im

Kreislauf bleibt. Das Potenzial wäre riesig: Aus den weltweit gut 200 Millionen Tonnen Kunststoffmüll, die 2022 verbrannt oder deponiert wurden, ließen sich theoretisch etwa 120 Millionen Tonnen Pyrolyseöl gewinnen. Noch fehlen freilich die Kapazitäten für solche Mengen. Arcus etwa verarbeitet derzeit gerade einmal 4.000 Tonnen im Jahr, plant allerdings den Bau einer Anlage mit sechsfacher Kapazität.

Bis auf Weiteres werden die meisten Steamcracker-Betreiber Pyrolyseöl ihrem Naphtha nur beimischen. Hendrik Rasch sieht aber gute Chancen, dass der Anteil weiter steigt: „Ich denke, dass hier mittelfristig zehn Prozent Öl denkbar sind.“ Dass dann Spuren von Chlor, Stickstoff, Sauerstoff oder Silicium keine Spielverderber sind – dafür sorgen Evonik-Produkte. —



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

Noch eine Runde

Beim chemischen Recycling von Kunststoffen kommt es auf die Qualität des dabei entstehenden Pyrolyseöls an. Je reiner das Produkt, desto mehr Möglichkeiten bieten sich zur Weiterverarbeitung. So funktioniert der Kreislauf.

INFOGRAFIK MAXIMILIAN NERTINGER

PYROLYSE

Die Kunststoffpolymere im **Abfallmix** ① werden in einem **Pyrolysereaktor** bei 400 bis 550 Grad in kleinere Moleküle gespalten. Die meisten Spaltprodukte sind zunächst gasförmig. Teils kondensieren sie anschließend zum **Pyrolyseöl** ②, teils werden sie als Gase zum Heizen des Pyrolyseofens genutzt. Anfallende **Feststoffe** ③ werden abgeführt.

AUFBEREITUNG

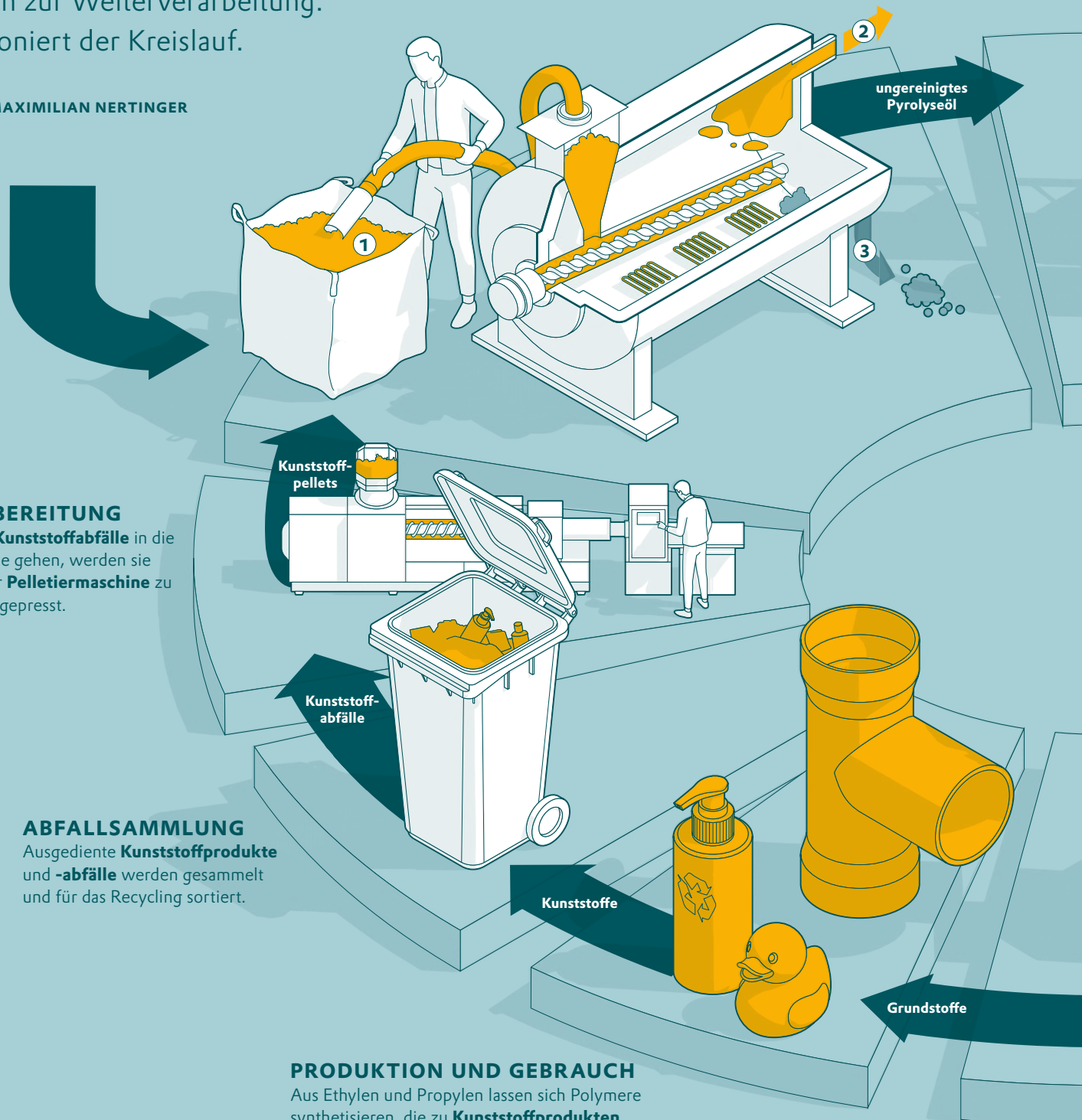
Bevor **Kunststoffabfälle** in die Pyrolyse gehen, werden sie in einer **Pelletiermaschine** zu Pellets gepresst.

ABFALLSAMMLUNG

Ausgediente **Kunststoffprodukte** und **-abfälle** werden gesammelt und für das Recycling sortiert.

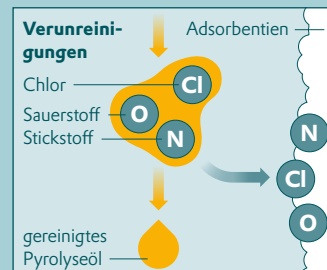
PRODUKTION UND GEBRAUCH

Aus Ethylen und Propylen lassen sich Polymere synthetisieren, die zu **Kunststoffprodukten** weiterverarbeitet werden.



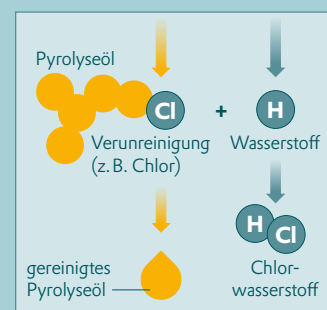
AUFREINIGUNG

Je nach Ausgangsmix kann das **Pyrolyseöl 1** Verbindungen enthalten, die die weitere Verarbeitung erschweren. In Aufreinigungsanlagen – sogenannten **Rocket-Modulen** –, die mit Adsorbentien befüllt sind, wird das Öl von Verunreinigungen befreit. Anschließend kann es weiterverarbeitet werden, oder es durchläuft im Hydrotreater einen weiteren Reinigungsschritt.



HYDROTREATING

Im **Hydrotreater** wird das **Pyrolyseöl 1** unter Zugabe von **Wasserstoff 2** auf 300 bis 400 Grad erhitzt. Dabei wandeln die eingebauten Katalysatoren verbleibende Verunreinigungen (z. B. Sauerstoff, Stickstoff oder Chlor) zu flüchtigen **Verbindungen 3** um, die sich leicht abtrennen lassen. Außerdem werden Doppelbindungen im Pyrolyseöl beseitigt, was dessen chemische Stabilität verbessert.



STEAMCRACKING

Der **Steamcracker** spaltet die Kohlenwasserstoffe im **gereinigten Pyrolyseöl 1** bei über 900 Grad Celsius unter Luftabschluss in sehr kleine Moleküle mit Doppelbindungen. Zu den Hauptprodukten gehören Ethylen und Propylen. Die **Zugabe von Dampf 2** erschwert die Repolymerisation und erhöht so die Ausbeute an kurzkettigen Kohlenwasserstoffen.



WIE NEUGEBOREN

Die Medizin steht womöglich vor einem Epochenwechsel. Statt Krankheiten auf klassische Weise zu behandeln, könnten Ärzte in Zukunft ihre Patienten verjüngen: zunächst Zellen und Organe – später womöglich den ganzen Menschen. Wird der Jungbrunnen Wirklichkeit?

TEXT BJÖRN THEIS

Die klinische Studie, die die US-Aufsichts- und Zulassungsbehörde FDA Anfang dieses Jahres genehmigt hat, könnte nicht weniger als eine medizinische Revolution auslösen. Das Unternehmen Life Biosciences darf an menschlichen Probanden eine Gentherapie erproben, die für bestimmte Zellen ein Ende des Alterns bedeuten könnte. Das Medikament ER-100 zielt darauf ab, überalterte Zellen im Sehnerv zu verjüngen. So soll das bislang irreversible Erblinden durch den grünen Star oder den sogenannten Augeninfarkt (nicht arteriitische anteriore ischämische Optikusneuropathie) rückgängig gemacht und damit heilbar werden. Gemeinsam ist beiden Erkrankungen, dass sie auf altersbedingte Zellschädigungen zurückzuführen sind.

Einer der Gründer von Life Biosciences ist der Harvard-Professor David Sinclair. Der Biochemiker und Molekulargenetiker gilt als einer der bekanntesten Forscher auf dem Gebiet der Alterungsprozesse. Seit Jahren sorgt er mit kühnen Aussagen über die Zukunft der Altersforschung für Aufmerksamkeit – zuletzt auf dem World Governments Summit in Dubai. Dort kündigte Sinclair nicht nur die klinische Studie zu ER-100 an, sondern prognostizierte auch, dass heutige Therapien in zehn bis 20 Jah-

ren veraltet wirken werden: Statt Krankheiten auf klassische Weise zu heilen, werde sich die Medizin darauf konzentrieren, das Altern zu verhindern oder sogar rückgängig zu machen.

BLINDE AFFEN SEHEN WIEDER

Sinclair und sein Team bezeichnen ihre Gentherapie-Technologie als „partielle epigenetische Reprogrammierung“. Sie basiert auf den „Yamanaka-Faktoren“: 2006 zeigte der japanische Stammzellenbiologe Shinya Yamanaka, dass vier bestimmte Proteine adulte Zellen in einen stammzellähnlichen Zustand zurückversetzen können. Diese Entdeckung, 2012 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet, ebnet den Weg für zahlreiche stammzellbasierte Therapieansätze. Forscher wie David Sinclair gehen einen Schritt weiter und verfolgen diese Idee: Werden die Faktoren nur kurzzeitig aktiviert und dann wieder abgeschaltet, könnten Zellen womöglich verjüngt werden, ohne vollständig in einen Stammzellzustand zurückzufallen. In Tierversuchen erwies sich dieser Ansatz als äußerst erfolgreich – bei blinden Primaten konnte die Sehkraft wiederhergestellt werden.

Die ersten Ergebnisse der klinischen Studie am Menschen liegen voraussichtlich bereits in wenigen Monaten vor. Sollten sie

positiv ausfallen, könnte dies den Beginn einer neuen Ära markieren: eines Zeitalters der präventiven Medizin, in dem Krankheiten gar nicht erst entstehen. Nach der Behandlung des Sehnervens ist der nächste Schritt bei Life Biosciences bereits geplant: Als Nächstes möchte man die Leber angehen, danach sollen weitere Organe folgen – bis man irgendwann vielleicht den ganzen Menschen verjüngen kann.

Ein guter Grund für Foresight, dieses Thema im Rahmen des Projekts „Game-Changer 2035“ näher zu analysieren. Evonik ist bereits heute gut für die Medizin der Zukunft aufgestellt. Der Konzern verfügt über umfassende Erfahrung bei Lipidnanopartikeln und der Nanopartikel-Prozessierung – Schlüsseltechnologien, mit denen die Wirkstoffe moderner Gentherapien gezielt, sicher und in der richtigen Dosierung an ihren Wirkort transportiert werden. Darüber hinaus ist Evonik bereits im Forschungsfeld der Epigenetik aktiv. Diesen Vorsprung gilt es weiter auszubauen. —

Björn Theis leitet die Abteilung Foresight der Evonik Innovation Factory.



Die Hoffnung auf Unsterblichkeit ist ein zentrales Motiv des Jugendstils – auch bei diesem Bleiglasfenster, das um 1900 in Mainz entstand.



»Zinn verleiht Orgelpfeifen ihren Ton«

PROTOKOLL ENRICO GERHARTH
FOTOGRAFIE ROBERT EIKELPOTH

Orgelbauer, so sagt man scherzhaft, können alles, aber nichts davon richtig gut. Das rührt daher, dass unser Handwerk so umfangreich ist. Jede Orgel ist ein Kunstwerk für sich: Architektur und Mechanik, Statik und Akustik – damit eine Orgel am Ende gut klingt, muss alles zusammenpassen. Diese Vielfalt macht für mich die Faszination an meinem Handwerk aus. Und doch gibt es einen Werkstoff, auf den es letzten Endes ankommt: Zinn. Ohne dieses Element wäre eine Orgel nur eine schöne Maschine, aus der Wind kommt.

Eine Legierung aus Zinn und Blei gibt der Orgelpfeife ihre Schwingung und verleiht ihr einen weichen, voluminösen Ton. Wir mischen die Legierung im Schmelztiegel und gießen sie zunächst in Platten. Dabei entsteht eine kristalline Struktur. Für sichtbare Pfeifen gebe ich mehr Zinn in die Mischung,

damit sie schön glänzen. Schönheit ist aber nicht alles: Zu viel Blei lässt Pfeifen nach Jahren ihre Form verlieren, zu viel Zinn verfälscht den Klang. Die richtige Mischung ist entscheidend, und aus rund 100 Legierungen wähle ich für jede Pfeife genau diejenige, die ihre Klangfarbe prägt. Es kommt auf feine Unterschiede an, weshalb Erfahrung ebenso wichtig ist wie konstante Qualität und Präzision von Anfang an.

Das Erfolgsgeheimnis bei der Arbeit mit Zinn liegt jedoch nicht nur in der handwerklichen Sorgfalt: Es liegt in häufigen Wieder-

holungen und in der Geduld. In einer durchschnittlichen Kirchenorgel stecken rund 2.500 Pfeifen, jede davon ist individuell gefertigt. Ich löte sie und rundiere sie mit einem Klopffholz. Mit der Hand schneide ich an der richtigen Stelle den Stimmschlitz hinein und bringe sie so „zum Sprechen“. Für jede Pfeife sind 151 Arbeitsschritte nötig. Das kann sich repetitiv und monoton anfühlen. Manch einer bleibt deshalb lieber beim Holz oder bei der Planung am Computer.

Ein ganz besonderer Moment ist es für mich, eine Orgel, an der ich mitgearbeitet habe, zum ersten Mal zu hören. Ihr Klang zeugt von all der Erfahrung und der Hingabe, die in ihren Bau geflossen sind. Darin stecken die Eigenschaften des Metalls, das ich gegossen habe, die Gewissenhaftigkeit jedes Handgriffs. Die Pfeifen sind das Herz jeder Orgel – und Zinn ist deshalb mein Element.

Martin Hiltmann ist Geschäftsführer von Orgelbau Merten in Remagen. Mit sieben Mitarbeitern entwirft, baut und wartet er Kirchenorgeln. Die Pfeifen als Herzstück des Instruments werden seit der Gründung im Jahr 2003 in einer hauseigenen Manufaktur hergestellt.

Impressum

HERAUSGEBER Evonik Industries AG | Matthias Ruch | Opernplatz 1 | 45128 Essen | **BERATUNG UND KONZEPT** Manfred Bissinger | **CHEF-REDAKTION** Jörg Wagner (V.i.S.d.P.) | **CHEF VOM DIENST** Inga Borg, Bernd Kaltwaßer | **TEXTCHEF** Christian Baulig | **REDAKTION** Anne Bauer | **BILDREDAKTION** Nadine Berger | **LAYOUT** Wiebke Schwarz (Art Direction) | **ANSCHRIFT DER REDAKTION** KNSK Group | Holstenwall 6 | 20355 Hamburg | **DRUCK** Linsen Druckcenter GmbH, Kleve | **COPYRIGHT** © 2026 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 +49 201 177-3276 | E-Mail elements@evonik.com | **BILDNACHWEISE** Cover: Shutterstock, Illustration: Tobias Wüstefeld/Die Illustratoren | S. 3: Kirsten Neumann | S. 4–5: Robert Eikelpoth | S. 6–7: Getty Images | S. 8–9: Getty Images, TUM, David Aussenhofer; Infografik: KNSK Group | S. 10–21: Robert Eikelpoth, Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit einer Fotovorlage von Luise Aedtner, Infografik: Maximilian Nertinger | S. 22–31: Robert Eikelpoth, Infografik: Maximilian Nertinger, Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit einer Fotovorlage von Foto und Bilderwerk | S. 32–35: Robert Eikelpoth (2), IMAGO/Rupert Oberhäuser, Getty Images (2) | S. 36–45: Robert Eikelpoth (9), Evonik Industries, Katharina Poblitzki (5), privat, Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss | S. 46–47: Infografik: Maximilian Nertinger | S. 48–49: Bernhard Kraus: Glasfenster „Jungbrunnen“, vor 1913, GDKE, Landesmuseum Mainz, Inv. Nr. KH 1983/19, Illustration: Oriana Fenwick/Kombinatrotweiss mit einer Fotovorlage von Karsten Bootmann | S. 50: Robert Eikelpoth

elements.evonik.de

»Eine Unze Prävention wiegt ein Pfund Behandlung auf.«

Mit diesen Worten appellierte Benjamin Franklin, einer der Gründerväter der USA, 1736 an die Einwohner Philadelphias, sich um den Brandschutz zu kümmern.

Prävention ist auch der Schlüssel für eines der großen Probleme der Menschheit: Antibiotikaresistenzen, die Jahr für Jahr Hunderttausende Leben kosten. Evonik trägt dazu bei, den Antibiotikaeinsatz in der Tierzucht zu reduzieren. Probiotische Futtermittelzusatzstoffe unterstützen die mikrobielle Balance im Geflügeldarm – und dienen so auch der menschlichen Gesundheit.