

# ELEMENTS

Forschen. Wissen. Zukunft.



## Gestaltungsfreiheit

1/2020

**3D-Druck eröffnet ungeahnte Wege in der Fertigung** → S. 10

Bioprinting: Hoffnung für Transplantationspatienten → S. 24

Wärmespeicher: Wie Pottasche die Energiewende unterstützt → S. 52

# Industrielle Produktion

Von der Dampfmaschine zum 3D-Druck

---

**Industrielle Produktion** Produktionsweise, die sich durch fortgeschrittene Arbeitsteilung, einen hohen Kapitaleinsatz sowie höhere Fertigungsstückzahlen im Vergleich zum Handwerk auszeichnet. Im 18. Jahrhundert in England entstanden, setzt sich die industrielle Produktion im Laufe des 19. Jahrhunderts auf dem europäischen Kontinent und in Nordamerika durch, befördert von Innovationen wie der Dampfmaschine. 1931 folgt der nächste große Durchbruch: Mit der Fließbandfertigung ebnet Henry Ford der standardisierten Massenproduktion den Weg. Die Art und Weise, in der Unternehmen produzieren, wird bis heute stetig weiterentwickelt. Die neueste Evolutionsstufe sind additive Fertigungsverfahren, die die Produktion komplexer und individueller Bauteile ermöglichen.

---

**Henry Ford (1863–1947)** Gründer der Ford Motor Company

**Massenproduktion** Herstellung großer Mengen identischer Produkte unter Verwendung standardisierter Einzelteile

**Additive Fertigung** Computergesteuerter Herstellungsprozess, bei dem durch schichtweises Auftragen von Material ein dreidimensionaler Gegenstand entsteht



## LIEBE LESERINNEN UND LESER,

der furchtlose Reporter Tim gehört zu den großen Comic-Helden meiner Kindheit. Gemeinsam mit seinem Hund Struppi ist Tim weltberühmt geworden. Der eigentliche Held dieser großartigen Comic-Reihe ist allerdings ein anderer: der geniale und leicht schwerhörige Professor Bienlein.

Er hat als erster Mensch der Welt ein U-Boot im Haifisch-Design gebaut und mit seiner Rakete dafür gesorgt, dass Tim und Struppi erfolgreich auf dem Mond gelandet sind. Und er hat bereits vor 50 Jahren eine Technologie erfunden, die heute endlich Realität wird: eine 3D-Fotokopiermaschine. Ein Hoch auf Professor Bienlein!

Die Schwelle, die wir nun überschreiten, ist die zur seriellen Fertigung. Bislang kamen aus den 3D-Druckern vornehmlich Prototypen und Einzelstücke, Kosten und Zeit spielten dabei nur eine untergeordnete Rolle. Ganz anders wird das in der Massenproduktion von Bauteilen. Sie müssen sich künftig messen lassen an den hergebrachten Verfahren: bei den Kosten ebenso wie bei Geschwindigkeit und Qualität.

Wie und wo dieser Durchbruch genau gelingen wird, ist heute noch offen. Sicher aber ist: Die Zeit spielt für den 3D-Druck. Und Evonik ist mit seinen Innovationen ganz vorn dabei.

Ob die erneuerbaren Energien die Welt eines Tages tatsächlich kostengünstig und zuverlässig versorgen können, wird entscheidend davon abhängen, wie wir Strom und Wärme in Zukunft werden speichern können. Vor gut 200 Jahren hat der italienische Physiker Alessandro Volta die erste Batterie erfunden, die dauerhaft elektrische Energie speichern konnte. Die Batterieentwickler unserer Zeit liefern sich heute ein spannendes Rennen: Immer leichter müssen die Akkus werden, immer sicherer und zugleich immer leistungsstärker. Das gilt nicht nur für Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien. Sondern erst recht für die nächste Generation von Festkörperbatterien, die zurzeit in den Laboren entwickelt wird. Wir wagen einen Blick in die Zukunft.

Ich wünsche Ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre.

**Matthias Ruch**  
Chefredakteur

**TITEL: 3D-DRUCK**

- 10 HINTERGRUND  
**Schichtbeginn**  
Gießen, fräsen, schrauben – und künftig immer öfter drucken. Evonik mischt in dem Wachstumsmarkt mit und treibt Zukunftstechnologien voran
- 19 DATA MINING  
**Neue Dimension**  
Der Markt für additive Fertigungsverfahren in Zahlen
- 20 REPORTAGE  
**Maßgeschneidert**  
Gedruckte Maschinenteile eröffnen der Evonik-Anwendungstechnik ungeahnte Möglichkeiten
- 24 INTERVIEW  
**„Wir schaffen mehr Lebensqualität“**  
Wai Yee Yeong über die Chancen von Bioprinting

**EFFIZIENZ**

- 28 REPORT  
**Clever abgekürzt**  
Evonik revolutioniert die Propylenglykol-Herstellung

**ENERGIESPEICHER**

- 42 HINTERGRUND  
**Lademeister**  
Aus den aktuellen Batteriegenerationen lässt sich noch jede Menge herausholen
- 50 SCHAUBILD  
**Voller Energie**  
Die wichtigsten Technologien im Überblick
- 52 REPORTAGE  
**Heiße Sache**  
Die Hightech-Wärmespeicher der TU Eindhoven enthalten Pottasche von Evonik

**ELEMENTAR**

- 6 START-UP
- 8 PERSPEKTIVEN
- 32 MEINUNG  
**Kein Umweltschutz ohne Chemie**  
Evonik-CEO Christian Kullmann fordert mehr Maß in der Klimadebatte
- 34 EVONIK-LAND  
**Slowakei**  
Die junge Nation ist stolz auf ihre Tradition – und ihre wirtschaftlichen Erfolge
- 56 CORPORATE FORESIGHT  
**Quantensprung**  
Der Computer der Zukunft kann das Universum erklären
- 58 IN MEINEM ELEMENT
- 59 IMPRESSUM

Der niederländische Forscher Olaf Adan mit einem Prototyp der Wärmebatterie



# 24

Wai Yee Yeong erforscht in Singapur Möglichkeiten, menschliches Gewebe zu drucken – zunächst Haut, später womöglich komplette Organe.

FOR 3D PRINTING

## TÄUSCHEND ECHT

Das biotechnologische Material von Modern Meadow sieht aus wie Leder, ist aber keins. Für sein veganes Produkt verwendet das US-Start-up aus New Jersey Kollagen, das über einen Fermentationsprozess mit Hefezellen produziert wird. Das fertige Material könnte zukünftig Leder aus Tierhaut ersetzen, etwa in Schuhen und Handtaschen. Im Herbst 2019 hat sich Evonik über seine Venture-Capital-Einheit an Modern Meadow beteiligt – und arbeitet so an einer Zukunft mit, in der auf Leder verzichtet werden kann.



## BLICK IN DIE WELT

Innovationen aus Wissenschaft und Forschung

# Abgasfänger auf vier Rädern

Schweizer Forscher wollen die Klimabilanz von Lkw verbessern – mit einem CO<sub>2</sub>-Speicher auf dem Dach.



Laut der Europäischen Umweltbehörde EEA waren Lkw 2017 für rund ein Viertel des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im Straßenverkehr verantwortlich. Ein erheblicher Faktor für den Klimaschutz. Forscher der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (ETHL) haben nun ein Konzept entwickelt, das die Emissionen von Lastwagen drastisch senken soll: Das CO<sub>2</sub> wird am Auspuffrohr des Lkw gesammelt und anschließend gekühlt und verflüssigt – in einer zwei Meter langen Auffangkapsel auf dem Fahrzeugdach. Eine zentrale

Rolle spielen bei dem Prozess Sauerstoff und Stickstoff, die das Kohlenstoffdioxid von anderen Gasen trennen helfen. Das gesammelte CO<sub>2</sub> kann an speziellen Tankstellen abgepumpt und danach beispielsweise zu synthetischen Kraftstoffen umgewandelt werden. Unterm Strich sollen die Emissionen um bis zu 90 Prozent sinken, so die ETHL-Forscher Shivom Sharma und François Maréchal. Die beiden Wissenschaftler wollen jetzt einen Prototyp entwickeln.

### MENSCH & VISION

»Unsere Erkenntnisse könnten die Beseitigung von Eis künftig zu einem Kinderspiel machen.«



#### DER MENSCH

Joseph S. Francisco (64) wuchs im texanischen Beaumont in der Nachbarschaft großer Fabriken und Ö Raffinerien auf, die die Luft mit Schadstoffen belasteten. Schon früh beschäftigte er sich mit dem Zusammenhang von Luftverschmutzung und Atemwegserkrankungen. Das war der Startpunkt für eine jahrzehntelange Karriere als Atmosphärenchemiker. Francisco forschte und lehrte an zahlreichen Universitäten in den USA, in Europa und Asien. Heute ist er Professor an der renommierten University of Pennsylvania, wo er Licht ins Dunkel des chemischen Innenlebens unserer Erdatmosphäre bringt.

#### DIE VISION

Das Wissenschaftlerteam um Francisco erforscht das Wachstum von Eis. Jüngst ist den Wissenschaftlern dabei ein Durchbruch gelungen: Anhand einer Visualisierung konnten sie zeigen, was auf der Ebene der atomaren Struktur passiert, wenn Eis in der Atmosphäre entsteht. Was abstrakt klingt, könnte schon bald praktische Konsequenzen für die Nutzung von Windenergie im Winter haben. Der Grund: Sind Windräder vereist, fallen sie häufig aus. Die Erkenntnisse der US-Forscher könnten dafür sorgen, dass die Enteisung deutlich schneller und günstiger erfolgt – und damit der Windkraft zusätzlichen Schwung verleihen.



# Auf Biegen statt Brechen

Elastische Tragflächen machen Fliegen umweltfreundlicher.

Die Luftfahrtbranche ist ein Vorreiter beim Thema Leichtbau. Um den Kerosinverbrauch zu senken, verwenden Flugzeugbauer bereits seit Jahren leichte und dennoch stabile Werkstoffe wie glas- oder kohlefaserverstärkte Kunststoffe. Das Institut für Aeroelastik des deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) arbeitet gemeinsam mit der Universität Delft (Nieder-

lande) jetzt daran, das Gewicht von Tragflächen weiter zu verringern. Die Forscher haben einen sogenannten aeroelastischen Flügel gebaut, der länger, leichter und elastischer als konventionelle Tragflächen ist. Dank speziell angeordneter Kohlefasern können sich die Flügel unter hohem Druck verdrehen, sodass bei starken Windböen kein zusätzlicher Auftrieb entsteht.

## SONNENWENDE

Forscher der Nanyang Technological University (NTU) in Singapur haben eine Recyclingmethode entwickelt, bei der Plastikabfälle in wertvolle Chemikalien umgewandelt werden – und zwar mithilfe von Sonnenlicht. Das Schwermetall Vanadium sorgt dabei als chemischer Katalysator dafür, dass sich die Kunststoffmoleküle unter Sonneneinstrahlung auflösen. Als Resultat entsteht Ameisensäure, die unter anderem in Brennstoffzellen zur Erzeugung von Strom eingesetzt werden kann.

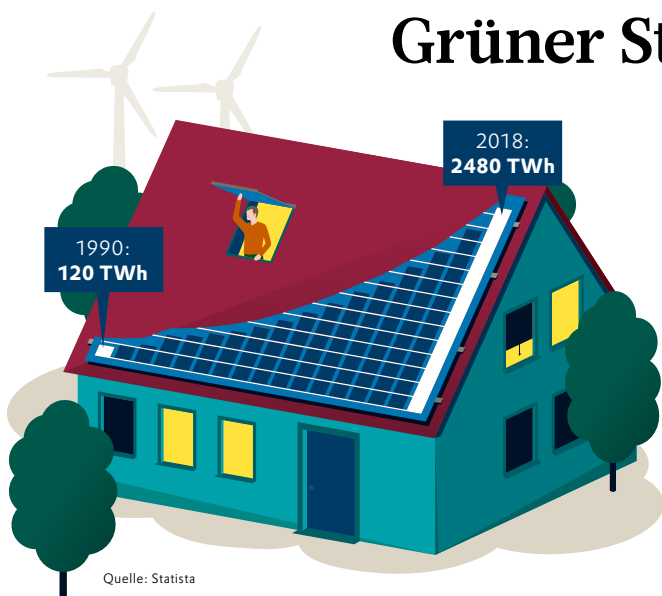
# 25

### PROZENT

der heute jährlich ausgestoßenen Treibhausgase lassen sich laut einer Studie des Weltchemieverbands ICCA bis 2050 durch den Einsatz innovativer Chemietechnologien einsparen. Verbesserungen bei Solarzellen, Aminosäuren für die Tierernährung und Batteriespeicher böten das größte Potenzial.

BESSER IST DAS

## Grüner Strom



Die Energiewende ist eine Erfolgsgeschichte, trotz aller Hindernisse und Schwierigkeiten. Der weltweite Verbrauch von erneuerbaren Energien aus Sonne, Wind und Wasser steigt kontinuierlich mit hohen Raten. In den vergangenen drei Jahrzehnten hat er sich mehr als verzweifacht. Spitzenreiter ist China, mit einigem Abstand vor den Vereinigten Staaten und Deutschland.

Weltweiter Verbrauch erneuerbarer Energien in Terawattstunden (TWh)

### GUTE FRAGE



»**Können wir unsere Häuser bald mit Holz kühlen, Professor Hu?**«

Ja, aber nicht mit normalem Holz. Mein Team und ich haben dem Holz das Lignin entzogen und es gepresst. Dieses gebleichte „weiße Holz“ hat zwei Vorteile. Zum einen heizt es sich durch Sonneneinstrahlung kaum auf. Zum anderen kann es Infrarotenergie an die Umgebung abstrahlen. So wird das Gebäude heruntergekühlt. Die kühlende Wirkung beruht auf Schwingungen und Dehnungen der Zellulosemoleküle. Daher benötigt das Gebäude keine zusätzliche Kühlung, etwa in Form einer Klimaanlage. Wir haben in unseren Experimenten herausgefunden, dass der Energieverbrauch dadurch um 20 bis 60 Prozent reduziert werden könnte. Die Dauerhaltbarkeit – bis zu 20 oder 30 Jahre im Außenbereich – muss noch untersucht werden. Doch wir sind optimistisch, dass das Holz in wenigen Jahren für einige spezielle Kühlanwendungen, wie Dächer in trockenen Gegenden, genutzt werden kann.

*Liangbing Hu ist Professor an der Universität Maryland. Mit seinem Team erforscht er neue, innovative Anwendungen für Holz.*

# DA GEHT NOCH MEHR

TEXT GEORG DAHM



Die Autobranche gilt als Vorreiter beim 3D-Druck: BMW fertigt aus Kunststoff Führungsschienen für Autofenster.



3D-Druck entwickelt sich vom Nischenverfahren zur Fertigungstechnik für Großserien. Evonik liefert für alle wichtigen Technologien passgenaue Materialien und treibt die Entwicklung von Druckern der nächsten Generation voran.

**O**bjekt 3D-0426 war ein Fehlschlag, ganz klar: ein fusseliges, weiß-graues Gebilde mit ausgefranzten Kanten. Was das mal werden sollte, ist schwer zu erraten. Dagegen sein Nachbar 3D-0308: ein Prachtexemplar! Eine Kugel, so glatt und sauber, als wartete sie nur auf ihren Einsatz auf dem Billardtisch. Kryptisch beschriftete Tüten, gefüllt mit filigranen kleinen Skulpturen, Klötzen und Kugeln füllen ein komplettes Regal in dem Laborraum von Evonik im Chemiapark Marl.

Daneben rauschen die schrankgroßen 3D-Drucker, deren Pulverkartuschen all diese Teile hervorgebracht haben. Die Stücke sind das Ergebnis von Testläufen, bei denen Druckparameter ausgelotet, neue Formulierungen erprobt oder Eigenschaften einer Materialcharge geprüft werden. Dafür werden wieder und wieder die gleichen standardisierten Objekte gedruckt und danach standardisierten Belastungstests ausgesetzt. Ohne solche aufwendigen Qualitätsprüfungen

würde sich kein Unternehmen darauf einlassen, seine Produkte mittels additiver Fertigung, wie Fachleute den 3D-Druck nennen, herzustellen.

Die Zukunft der additiven Fertigung wird zu einem erheblichen Teil in diesem unscheinbaren Laborraum mitgestaltet. „Wir fragen Unternehmen: Woran arbeitet ihr? Welche Materialien braucht ihr in fünf Jahren?“, berichtet Sylvia Monsheimer, die bei Evonik das Marktsegment für neue 3D-Technologien verantwortet. „Und mit den passenden Materialien sorgen wir dafür, dass neue Drucktechnologien in den Markt kommen.“

#### EINE TECHNOLOGIE – VIELE MÖGLICHKEITEN

Monsheimer ist viel unterwegs als Botschafterin für den 3D-Druck mit exzellentem Netzwerk – bei Technikern und Ingenieuren ebenso wie in den Vorstandsetagen namhafter Unternehmen. Sie will das Bewusstsein dafür wecken, wie additive Fertigung Geschäftsmodelle umkrempeln könnte. Was, wenn man neue Fertigungs-ideen einfach auf die Schnelle selbst ausprobieren könnte? Wenn man beim Entwurf von Bauteilen nicht mehr auf die Grenzen einer Gussform Rücksicht nehmen müsste? Oder wenn man auf einmal Kleinserien produzieren könnte, für die andere Verfahren zu teuer wären? Monsheimer erzählt von einem Besuch in einer Textilfabrik, die Maschinen schneller für neue Stoffe und Muster umrüsten möchte: „Mit gedruckten Teilen ist das möglich.“

Seit mehr als 20 Jahren beschäftigt sich Monsheimer mit 3D-Druck, aber noch nie, so sagt sie, habe sie so eine Kreativität und Euphorie erlebt wie in den vergangenen drei Jahren: „Lange hat eine Handvoll →

Sylvia Monsheimer prüft im Evonik-Labor in Marl, wie weit der Druck eines Musterteils vorangeschritten ist.



Platzhirsche den Markt dominiert. Nachdem zwischen 2010 und 2017 etliche Basispatente ausgelaufen sind, kommen nun viele Weiterentwicklungen dieser Technologien auf den Markt. Das belebt die Szene.“ Mit mehreren dieser Innovatoren arbeitet Evonik zusammen. Die jüngsten Beteiligungen und Kooperationen in Israel, China, den USA und Österreich dienen einem Ziel: die additive Fertigung reif für die Großserienproduktion zu machen.

Unaufhaltsam macht sich 3D-Druck in der Industrie breit. Zum Beispiel in der Automobilbranche, wo Start-ups wie das US-Unternehmen Local Motors von

sich reden machen. Dessen autonomer elektrischer Shuttlebus „Olli“ besteht zu 80 Prozent aus gedruckten Bauteilen. Sie entstehen in garagengroßen Druckern, die im Prinzip wie das 200-€-Gerät aus dem Elektronikmarkt funktionieren: Ein Kunststoff-Filament von der Spule wird erhitzt und Schicht für Schicht aufgetragen. Diese Technik heißt Fused Deposition Modeling (FDM). Sie ist robust, beim Druckprozess entsteht kein Staub, und das Ergebnis von Profigeräten ist so präzise, dass damit medizinische Implantate oder Abbilder von Organen gedruckt werden können, anhand derer Chirurgen komplizierte Operationen planen.

An einem der Technologieführer auf diesem Feld hat sich die Venture-Capital-Sparte von Evonik kürzlich beteiligt: Das chinesische Start-up Meditool arbeitet mit medizinisch zugelassenem PEEK-Material von Evonik, zu den Erzeugnissen gehören Schädelimplantate und künstliche Bandscheiben (siehe Überblick Seite 14). Den Materialentwicklern von Evonik verschaffen solche Partnerschaften einen Einblick in die Ideenpipeline der Branchenvordenker. Der Austausch über neue Fertigungsverfahren gibt Aufschluss darüber, wie die Druckmaterialien von morgen beschaffen sein müssen.

In die Werkshallen der Autobauer haben 3D-Drucker Einzug gehalten. Darunter sind FDM-Plotter des niederländischen Start-ups Ultimaker, deren erster Selbstbauapparat 2011 für Aufsehen sorgte und den Hype um den 3D-Druck beförderte. Heute richtet sich das Un-



BMW setzt bei der additiven Fertigung unter anderem auf Multi-Jet Fusion.

ternehmen vor allem an professionelle Anwender; VW entwickelt und produziert mit Ultimaker-Druckern Werkzeuge und Montagehilfen in seiner Fabrik in Portugal. Die Entwicklungskosten sind um 91 Prozent gesunken, die Zeitersparnis beträgt sogar 95 Prozent.

### 3D-DRUCK FÜR DIE MASSE

Was die FDM-Maschinen nicht produzieren: Bauteile in Großserie. Zu langsam ist selbst bei Hochleistungsdruckern das Verfahren, bei dem die Bauformen Bahn für Bahn abgefahren werden. „Für große Stückzahlen kommt in absehbarer Zeit nur die additive Fertigung mit Pulver infrage“, sagt Thomas Grosse-Puppenthal, der bei Evonik das globale Geschäft rund um den 3D-Druck verantwortet. Polymerpulver wird dabei Schicht für Schicht aufgetragen, an den entscheidenden Stellen erhitzt und dadurch verschmolzen. Meist geschieht dies mithilfe eines Lasers, doch neue Verfahren versprechen noch mehr Tempo. Meist arbeiten sie mit Polymerpulvern von Evonik.

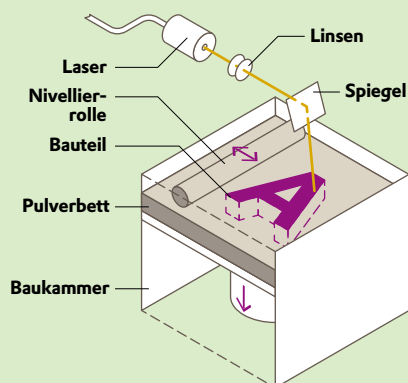
Zum Beispiel die grauen Maschinen von HP, die hier im Marler Technikum neben dem Probenregal ihre Testläufe fahren. Der Druckerhersteller, den man sonst aus dem Büro oder dem Homeoffice kennt, hat sein Know-how aus dem Tintenstrahldrucker-Bereich auf die additive Fertigung übertragen: Die Konturen des Bauteils werden mit schwarzer Tinte auf eine Lage Polymerpulver aufgetragen, dann gehen die Wärmelampen an. Die schwarzen Stellen erhitzen sich schneller, verschmelzen, die nächste Pulverschicht wird aufgetragen, wieder Tintenstrahldruck, wieder Hitze, wieder und wieder, bis am Ende ein schwarzgraues Bauteil aus einem Pulverbett gehoben und unter einer Abzugshaube sauber gepustet wird.

Multi-Jet Fusion (MJF) heißt diese Technologie, die zum Beispiel BMW bereits in der Produktion einsetzt. 2010 begannen die Münchner mit kunststoff- und metallbasierten Verfahren zunächst in kleinen Serien. Mittlerweile hat BMW nach eigenen Angaben mehr als eine Million Bauteile mittels additiver Fertigung produziert, darunter Lichtleiterhalterungen für den Rolls-Royce Dawn oder Fensterführungsschienen für den i8 Roadster. Für den Mini produziert der Konzern mittels 3D-Druck individualisierte Dekoeinlagen im Armaturenbrett und an der Karosserie.

Noch werden vor allem Zierelemente oder für den Autokäufer unsichtbare Kleinteile gedruckt. Doch jede neue Anwendung muss sich erst einmal in weniger kritischen Bereichen beweisen. Vor allem gegenüber dem etablierten Spritzguss, der sich im Laufe vieler Jahre entwickeln konnte. Die Vorteile des 3D-Drucks liegen in der Designfreiheit und

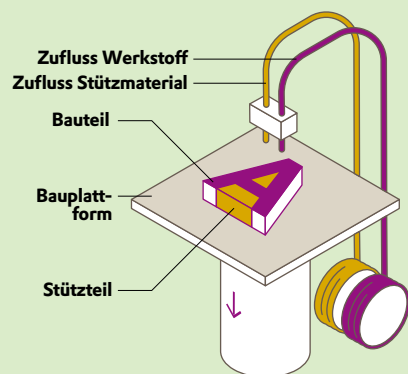
weiter auf Seite 16 →

## Die wichtigsten Verfahren



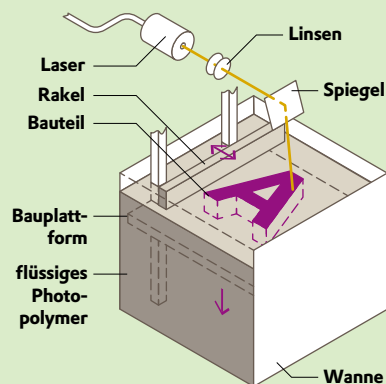
### Powder Bed Fusion (PBF)

Ein Pulver wird Schicht für Schicht aufgetragen und an den Stellen verschmolzen, wo das Bauteil entstehen soll. Je nach Verfahren wird dafür ein Laser benutzt (SLS) oder ein Infrarotstrahler (Multi-Jet Fusion/MJF, High-Speed Sintering/HSS). Bei der zweiten Variante werden Stellen von einem Tintenstrahldrucker schwarz markiert, die sich dadurch schneller aufheizen als die nicht markierten. Das fertige Bauteil wird dann aus dem Pulverbett gehoben.



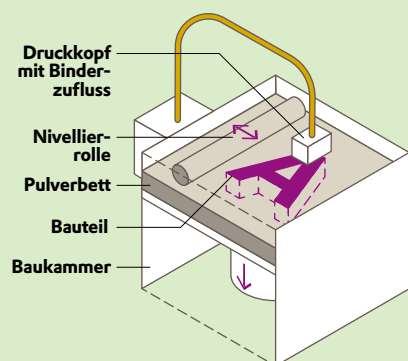
### Fused Deposition Modeling (FDM)

Der Werkstoff wird hier als Kunststoffgarn von einer Spule zugeführt und von einem Druckkopf verflüssigt – wie in einer Heißklebepistole. So wird das Bauteil Schicht für Schicht aus flüssigem Kunststoff aufgebaut. Ein zweiter Druckkopf fügt Stützmaterial ein, zum Beispiel in Hohlräumen und an Überhängen, wo das Bauteil während des Drucks stabilisiert werden muss. Das Stützmaterial wird hinterher entfernt.



### Stereolithografie (SLA)

Die Bauplattform taucht Schritt für Schritt in eine Wanne mit flüssigem, lichtempfindlichem Kunststoff (Photopolymer) hinab. Bei jedem Schritt wird ein Laserstrahl mit Spiegeln an die gewünschten Stellen gelenkt und härtet dort den Kunststoff aus. Das fertige Bauteil wird aus dem Bad gehoben, je nach Druckverfahren muss es dann noch nachgehärtet und von den mitgedruckten Stützstrukturen befreit werden.



### Binder Jetting (BJ)

Ähnlich wie die Powder Bed Fusion arbeiten auch die Binder-Jetting-Verfahren mit einem Pulver, das Schicht für Schicht aufgetragen wird. Allerdings wird das Pulver hier nicht verschmolzen, sondern mit einem Binder verklebt, den ein Druckkopf aufbringt. Binder Jetting eignet sich zum Beispiel dafür, Modelle für den Feinguss herzustellen, weil man sie aus den fertigen Gussformen gut ausbrennen kann.

# Futuristisches Quartett

Neue Technologien erfordern neue Kooperationsmodelle. Beim 3D-Druck tut sich Evonik weltweit mit Firmen zusammen, um zukunftssträngige Einsatzfelder zu erkunden. Vier Beispiele



Reine Kopfsache: Vestakeep-Filamente werden heute bereits in Schädel-, Gesichts- und Kieferimplantaten verwendet.

## CUBICURE

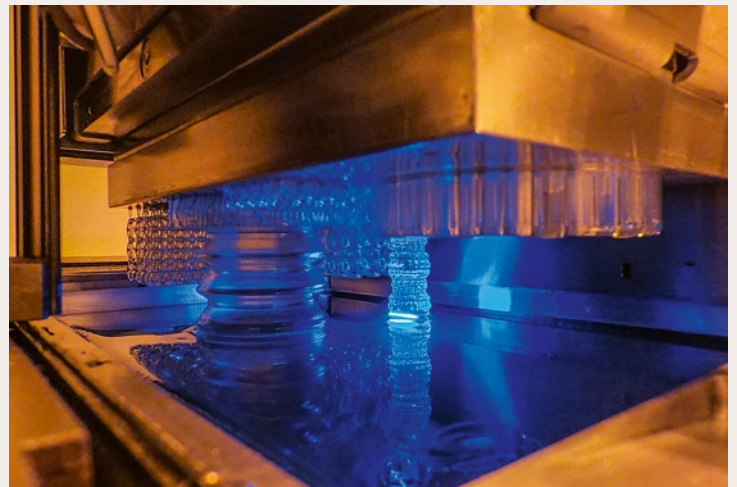
### Zäher Stoff

Bereits ein Jahr nach der Gründung von Cubicure fanden 2016 die ersten Gespräche mit der Creavis, der Innovationseinheit von Evonik, statt. Das junge Unternehmen – ein Spin-off der TU Wien – besitzt viel Erfahrung mit einem aussichtsreichen 3D-Druck-Verfahren, das aber noch zahlreiche Herausforderungen bereithält: Bei der Stereolithografie (SLA) entstehen Bauteile aus flüssigem Harz, das auf Licht reagiert. Das Verfahren ist enorm präzise, „aber die klassischen Harze sind spröde, und die fertigen Teile haben meist einen enormen Verzug“, erklärt CEO Robert Gmeiner. Das Problem: SLA-Verfahren arbeiten mit dünnflüssigem Material. „Besser wären hochviskose Harze und Pasten, die sich aber bislang nur schwer verarbeiten lassen.“ Das von Cubicure entwickelte Hot-Lithography-Verfahren ermöglicht die Verarbeitung solcher zähflüssiger Materialien mithilfe einer speziellen Temperatursteuerung. Um die Technologie weiter zu verbessern, arbeiten die Österreicher mit Unternehmen zusammen, die bislang Spritzgussverfahren einsetzen. Im Computertomografen zeigt sich, wie stark sich die Technik der klassischen Fertigungsweise angenähert hat. Mit Evonik hat Cubicure gemeinsam Rohstoffe getestet und vielversprechende Kandidaten unter den Reaktiv-Polyestern gefunden. „Seitdem arbeiten wir zusammen in Richtung Produktentwicklung.“

## MEDITOOL

### Künstliche Knochen

Künstliche Schädelteile, Gelenke, Knochenpartien: „Nirgendwo kommen die Möglichkeiten des 3D-Drucks so zur Geltung wie in der Medizintechnik“, sagt Marc Knebel, der in der Hochleistungspolymer-Sparte von Evonik das Medizingeschäft leitet. „Hier entsteht für jeden einzelnen Patienten ein individuelles Produkt.“ 2019 ist Evonik als Lead Investor bei einem der aussichtsreichsten Start-ups in diesem Sektor eingestiegen: dem chinesischen 3D-Druck-Spezialisten Meditool. Das Unternehmen aus Schanghai druckt Schädel-, Gesichts- und Kieferimplantate aus Peek, einem Hochleistungskunststoff, den Evonik unter dem Markennamen Vestakeep als erster Hersteller in medizinischer Qualität auf den Markt gebracht hat. Langfristig will Meditool in einem noch anspruchsvolleren Segment wachsen: Implantate für die Wirbelsäulen Chirurgie. Eines der ersten Produkte sind sogenannte Cages, künstliche Bandscheiben, die mit dem Körpergewebe verwachsen. Evonik und Meditool wollen nun gemeinsam ausloten, wie sich Forschung und klinische Praxis entwickeln. „Meditool bietet eine einzigartige Kombination aus technischer Kompetenz und klinischem Fachwissen“, sagt Knebel. „Und wir können das Unternehmen dabei unterstützen, seinen globalen Footprint zu vergrößern.“



Die Spezialität der Österreicher ist die Hot Lithography, bei der spezielle Harze verarbeitet werden.



Gießen oder drucken? Castor hilft Unternehmen bei der Entscheidung für das wirtschaftlichste Produktionsverfahren.

CASTOR

## Mit anderen Mitteln

Castor unterstützt Unternehmen beim Einstieg in den 3D-Druck. Das israelische Start-up hat ein System entwickelt, das Konstruktionen anhand der zugrunde liegenden CAD-Dateien mittels künstlicher Intelligenz analysiert und Tausende Bauteile gleichzeitig bewertet: Welche Geometrieigenschaften muss das Teil haben, mit welchem Verfahren und welchem Material könnte man es drucken? Und rechnet sich das? Castor konzentriert sich zunächst auf komplexe Bauteile, die in geringen Stückzahlen gefertigt werden. Zu den Kunden gehören mehrere Fortune-500-Firmen. „Wir helfen Unternehmen, die weit unten hängenden Früchte zu ernten“, sagt Mitgründer und CEO Omer Blaier. „Und wir helfen ihnen dabei, ihre Konstruktionen für den 3D-Druck weiterzuentwickeln.“ So macht das Castor-System Vorschläge, welche nahe beieinanderliegenden Bauteile im 3D-Druck als zusammenhängendes Werkstück gefertigt werden können. Und es empfiehlt dem Kunden Dienstleister, die ihnen bei der Umstellung ihrer Produktion helfen. Grundlegend neue Designs entwirft Castor nicht: „Das bleibt die Arbeit der Ingenieure, wir helfen ihnen nur auf dem Weg.“ Der Einstieg von Evonik als Investor sei eine Win-win-Situation, so Blaier: „Evonik bekommt bessere Einblicke in die Bedürfnisse und Wünsche seiner Kunden – und uns hilft die Expertise von Evonik bei der Verbesserung unserer Software.“

EVOLVE

## Druckzuck

Alles begann mit einem gebrauchten Digitaldrucker, diskret ersteigert auf Ebay und dann in einer Garage umgebaut: Das US-Start-up Evolve entstand aus einem Entwicklungsprojekt des 3D-Druck-Unternehmens Stratasys, heute zählen Lego und Stanley Black & Decker zu den Investoren. Die Technologie beruht auf dem gleichen Prinzip wie ein Laserdrucker: Ein Bild wird durch elektrische Ladung auf einer Walze aufgebracht. An den geladenen Stellen haftet der Toner, das Bild wird auf ein elektrostatisches Hochgeschwindigkeitsband übertragen und dann auf einen Schichtbindungsmechanismus übertragen. „Wir tragen zunächst Schicht für Schicht auf“, erklärt Rich Allen, Vice President von Evolve, „danach pressen wir die Struktur unter Hitzeeinwirkung zusammen, sodass ein stabiles Teil entsteht.“ Der größte Vorteil des Verfahrens, das bereits vermarktet wird: Es ist schnell, weil eine komplette Schicht in einem Rutsch aufgetragen wird. Und weil die Maschine fünf Druckwerke besitzt, können in einem einzigen Bauteil verschiedene Materialien kombiniert werden. „Wir können zudem eine größere Bandbreite an Materialien einsetzen, und weil die Partikel sehr klein sind, ist die Auflösung höher“, so Allen. Seit 2019 arbeitet Evonik mit Evolve an Materialien für das Verfahren. „Wir haben sehr schnell zusammengefunden“, sagt Allen. „Evonik sieht wie wir das enorme Potenzial für die Massenproduktion.“



Wie im Flug: Die Technik von Evolve ermöglicht es, Kombinationen unterschiedlicher Materialien schnell zu drucken.



VW will 3D-Druck zur Produktion individualisierter Bauteile wie Schaltknäufen nutzen.



Bei Evonik in Marl entstehen jede Woche Hunderte Testobjekte, die dazu dienen, Materialien und Verfahren zu verbessern.

eröffnen Forschern und Ingenieuren völlig neue Möglichkeiten in Richtung Leichtbau oder neue Funktionalitäten. „Für den 3D-Druck konstruieren wir die Teile ganz neu, damit sie am Ende die gewünschten Eigenschaften haben“, erklärt Grosse-Puppendahl.

Diesen Prozess erleichtert einer der neuen Evonik-Partner, das israelische Start-up Castor (siehe Überblick Seite 15): Die Software des Unternehmens führt eine umfassende technische und wirtschaftliche Analyse durch. So lässt sich ermitteln, ab wann Additive Manufacturing gegenüber traditionellen Herstellungsmethoden wirtschaftlich ist.

Wird ein Bauteil für den 3D-Druck neu erfunden, hat es mit dem Original oft nicht mehr viel zu tun. Wo ein Spritzgussteil massiv und schwer sein muss, um großen Belastungen standzuhalten, kann das gleichwertige gedruckte Bauteil eine scheinbar filigrane Konstruktion aus Bogen, Streben und Waben aufweisen. Die Kräfte hält es genauso aus, bei einem Bruchteil des

Gewichts. Und so bietet selbst ein so schlichtes Teil wie die Fensterführungsschiene eines Roadsters einen Ausblick darauf, wie in Zukunft komplette Autos gebaut werden könnten.

Die Gewichtsersparnis macht die additive Fertigung interessant für den Flugzeugbau, wo jedes Gramm zählt und die Nachfrage nach sparsameren, weniger klimaschädlichen Maschinen steigt. Auch hier wirken die Innovationen zunächst unscheinbar: Die US-Luftwaffe etwa nutzt 3D-Druck, um Ersatzteile für ihre Jets nachzuproduzieren – eine Nachricht war es Fachkreisen wert, dass man einen Toilettensitz dank Wabenstruktur sehr viel leichter und doch robust hinkommen habe. Funktionskritischer sind die Bauteile, die die Flugzeugbauer Boeing und Airbus entwickeln: Erste Flügel- und Motorenkomponenten werden schon aus Metallpulvern gefertigt, der Kunststoff-3D-Druck breitet sich in der Kabinenausstattung aus. Auch hier wäre es oft zu teuer, Spritzgussformen anzufertigen, etwa wenn eine Airlineflotte modernisiert wird. Dann kommen Spezialisten wie das belgische Unternehmen Materialise ins Spiel, die beispielsweise Bauteile für Airbus aus Hochleistungskunststoffen drucken.

#### LEISTUNGSSCHAU DES 3D-DRUCKS

Um auf größere Produktionsmengen zu kommen, sagt Grosse-Puppendahl, muss die additive Fertigung vor allem eines werden: schneller. „Für die Automobilindustrie wird es spannend, wenn wir Stückzahlen im fünf- oder sechststelligen Bereich schaffen.“ Die neue Partnerschaft von Evonik mit dem US-Start-up Evolve (siehe Überblick Seite 15) könnte dazu vielleicht der Schlüssel sein. Ihr STEP genanntes Verfahren funktioniert im Prinzip wie ein Laserdrucker und erzielt dadurch ganz andere Geschwindigkeiten.

„Bei den üblichen pulverbasierten Verfahren haben Sie immer einen Laser oder einen Druckkopf, der auf dem Pulverbett die Druckform nachzeichnet“, erklärt Wolfgang Diekmann, der das 3D-Druck-Labor in Marl leitet. „Beim STEP-Verfahren bedient man sich der Digitaldrucktechnologie. Mit sehr hoher Geschwindigkeit wird das Material auf eine Trommel aufgebracht und von dieser abgelegt. Und weil das Pulver sehr fein ist, hat das Bauteil eine höhere Auflösung.“

Evonik bringt seine jahrzehntelange Materialerfahrung in die Partnerschaft ein – eine Win-win-Situation, sagt Monsheimer: „Wir können neues Material entwickeln, wenn wir eine Maschine haben, auf der wir testen können. Die anderen können eine neue Maschine



# »Für den 3D-Druck müssen wir Teile ganz neu konstruieren.«

THOMAS GROSSE-PUPPENDAHL, LEITER  
DES INNOVATIONSWACHSTUMSFELDS  
ADDITIVE MANUFACTURING BEI EVONIK



entwickeln, wenn sie gutes Material haben.“ Und so bietet das Technikum in Marl eine Leistungsschau der internationalen 3D-Drucker-Szene. Neben Maschinen von HP oder 3D Systems stehen hier Geräte der deutschen Marktführer EOS und Voxeljet, des Schweizer Unternehmens Sintratec sowie des chinesischen Herstellers TPM. Die Apparate werden intensiv gefordert, wie ein Drucker mit offen liegendem Innenleben belegt, den Monsheimer inspiziert. „Wir fragen uns eben nicht nur: Welche Materialien können wir für bestehende Technologien entwickeln? Sondern auch: Wie könnte man die bestehenden Technologien noch besser machen?“

Dank dieser Herangehensweise hat Evonik – quasi nebenbei – mehrere eigene 3D-Druck-Technologien entwickelt, für die das Unternehmen Lizenzen vergibt. „Wir haben hier mit Varianten des High-Speed Sintering experimentiert“, sagt Monsheimer. Bei diesem Verfahren wird das Pulver nicht direkt mit einem Laser geschmolzen. Stattdessen trägt man an den gewünschten Stellen einen Absorber auf und fährt dann mit einer Wärmequelle darüber – ähnlich wie bei Multi-Jet Fusion.

## NEUE EIGENSCHAFTEN DURCH ADDITIVE

Das tiefe Verständnis hilft bei der Entwicklung neuer Pulver für die verschiedenen Druckverfahren, sagt Innovationsmanager Diekmann. „Je nach Anforderungen brauchen wir für ein neues Material zwischen sechs Monaten und zwei bis drei Jahren – manchmal auch mehr.“ Dabei ist Polyamid 12 (PA12), das in unzähligen Anwendungen zum Einsatz kommt, oftmals die Basis, der die Materialentwickler von Evonik mithilfe von Additiven neue Eigenschaften verleihen. „Flammschutzmittel machen es beispielsweise tauglich für Anwendungen in der Elektroindustrie oder für Bauteile in der Luft- und Raumfahrt“, sagt Diekmann. „Und wenn das Material besonders stabil sein soll, arbeiten wir zum Beispiel Glaspartikel ein.“ →

Der Shuttlebus „Olli“ des US-Unternehmens Local Motors stammt zu 80 Prozent aus gedruckten Teilen.



# »Bei den Polymeren gibt es noch viel unbekanntes Terrain.«

SYLVIA MONSHEIMER, LEITERIN DES MARKTSEGMENTS  
NEUE 3D-TECHNOLOGIEN BEI EVONIK

Auch ganz neue Materialkombinationen entstehen in Marl, im vorigen Jahr erst hat Evonik das Hochleistungspulver PA613 vorgestellt, das die Vorteile lang- und kurzkettiger Polyamide verbindet: Es ist besonders temperaturstabil, fest und doch flexibel – und nimmt zudem wenig Wasser auf. Das in den 80er-Jahren eingeführte thermoplastische Elastomer PEBA (Polyetherblockamid) diente 2018 als Basis für ein Pulver, mit dem Objekte von fast gummiartiger Konsistenz gedruckt werden können.

## ES MUSS NICHT IMMER PULVER SEIN

„Weltweit kann keine andere Firma auf so viele verschiedene Pulverherstellungsmethoden zurückgreifen wie Evonik“, sagt Grosse-Puppendahl. Und vieles, was noch nicht geht, soll mit einer neuen Produktionstechnologie möglich werden, die das Unternehmen 2019 eingekauft hat: Das US-Start-up Structured Polymers hat ein Verfahren entwickelt, mit dem sich viel mehr Materialien pulverisieren lassen, als es Evonik bis dahin

möglich war. Ein neues Copolyester-Pulver, das erste mit der innovativen Technologie hergestellte Material, ist dafür das beste Beispiel.

Doch auch mit anderen Ausgangsmaterialien setzten sich die Experten auseinander. Start-ups wie das österreichische Unternehmen Cubicure (siehe Überblick Seite 14) und die Creavis, die strategische Innovationseinheit von Evonik, arbeiten nicht nur an pulverbasierten Verfahren, sondern auch an Drucktechniken, bei denen das Werkstück aus einem flüssigen Photopolymer gezogen wird. Lichtquellen, zum Beispiel Laser, härten das lichtempfindliche Material an den gewünschten Stellen aus. Die Präzision, sagt Cubicure-CEO Robert Gmeiner, sei unschlagbar: „Die Auflösung wird nur über die Lichtmaske definiert, die sich sehr fein einstellen lässt.“ Zugleich ist nach der Fertigung nur zehn Prozent des Ausgangsmaterials nicht mehr für weitere Drucke nutzbar. „Da müssen die pulverbasierten Verfahren erst einmal hinkommen.“

Auch andere SLA-Druckhersteller arbeiten bei der Entwicklung neuer Materialien mit den Evonik-Spezialisten zusammen. Erst im vergangenen Jahr hat Evonik einen neuen Forschungshub in Singapur eröffnet, wo sich Formulierungsspezialisten mit der Entwicklung von Photopolymeren der nächsten Generation beschäftigen. „Es gibt noch sehr viel unbekanntes Terrain bei den Polymeren“, sagt Monsheimer. Doch genau das macht für sie und Wolfgang Diekmann den Reiz ihrer Arbeit aus: „Seit ich hier angefangen habe, wollte ich immer weg vom Prinzip ‚eine Firma – ein Verfahren‘. Dass es jetzt genau so kommt, freut mich sehr.“



EOS aus Krailing bei München bietet in Kooperation mit Evonik 3D-Druck-Systeme an.

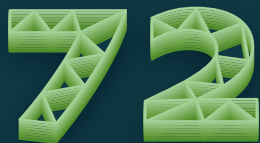
# DER DRUCK WÄCHST

Additive Fertigung ist der Nische entwachsen und erreicht den Massenmarkt. Wo sitzen die wichtigsten Akteure, welche Materialien nutzen sie und welche Techniken?

Quellen: Ernst & Young Global Limited, Statista

## Worauf es bei additiver Fertigung ankommt: optimales Material ...

Meistgenutzte Materialien für 3D-Druck in Unternehmen, Anteil in Prozent 2018 weltweit (Mehrfachnennungen möglich)



**Kunststoff**

**49**

**Metall**

## ... und passende Technik

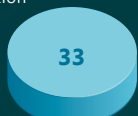
Ausgewählte Verfahren beim 3D-Druck in Unternehmen, Anteil in Prozent 2018 weltweit



Powder Bed Fusion



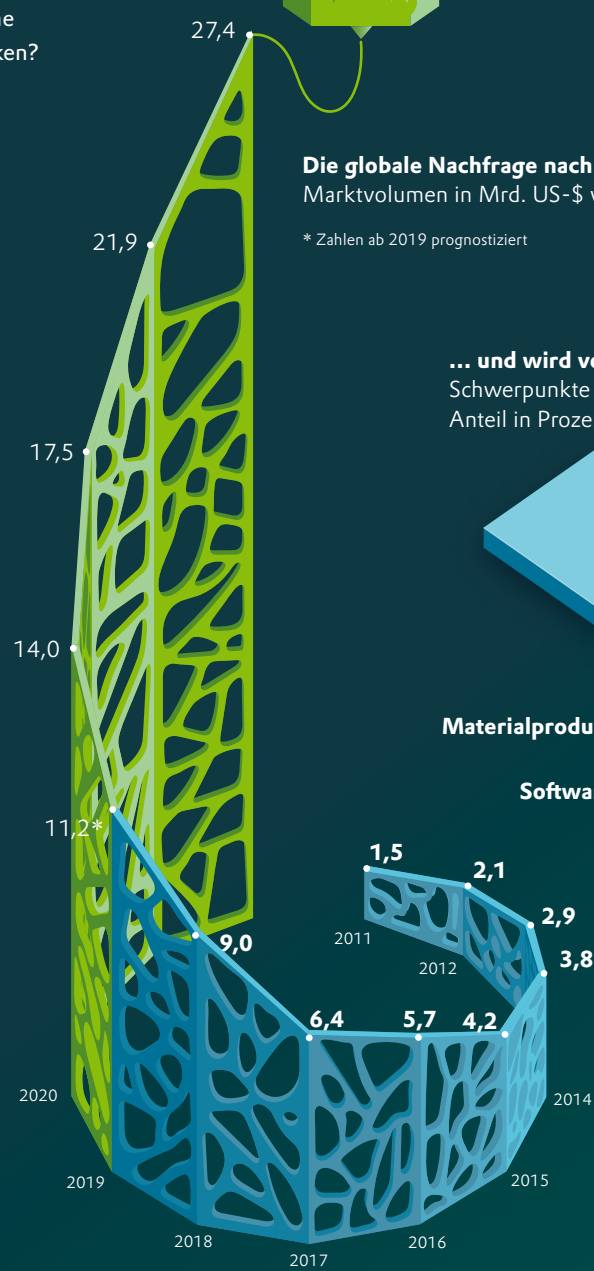
Fused Deposition Modeling



Stereolithographie



Binder Jetting



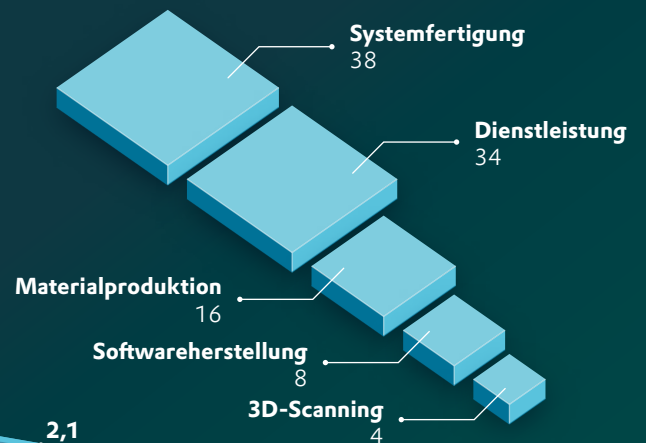
## Die globale Nachfrage nach 3D-Druck steigt ...

Marktvolumen in Mrd. US-\$ von 2011 bis 2023

\* Zahlen ab 2019 prognostiziert

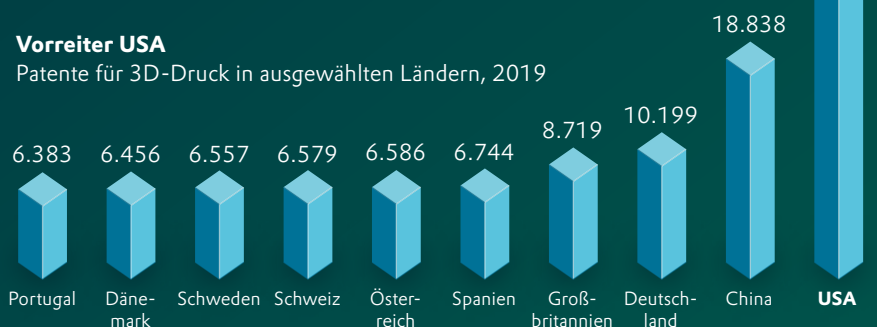
## ... und wird von unterschiedlichen Akteuren bedient

Schwerpunkte von Unternehmen in der 3D-Branche, Anteil in Prozent 2019



## Vorreiter USA

Patente für 3D-Druck in ausgewählten Ländern, 2019



# DER NATUR GANZ NAH

Evonik setzt für den Bau der eigenen Anlagen neuerdings auch auf 3D-Druck. Aus Metallpulver entstehen dabei Reaktoren und Apparate, die ihr Vorbild in der Biologie finden. Das dient der Umwelt – und der Wirtschaftlichkeit.

TEXT **GEORG DAHM** FOTOGRAFIE **RAMON HAINDL**

**W**enn man nicht aufpasst, übersieht man die Revolution nur allzu leicht. Hinter riesigen Fräsmaschinen, vorbei an Werkstattkabinen, aus denen Schweißlicht durch Gummivorhänge flackert, inmitten einer Flut an Sinneseindrücken aus Hammerschlägen und Metallgeruch, steht an einer Wand eine Glaskabine. Der Eintritt ist nur mit Mundschutz und durch eine Schleuse gestattet. Hinter den großen Fenstern fertigt ein Techniker in einem schrankgroßen 3D-Drucker Bauteile aus Metallpulver.

Die Methode, mit der Evonik auf dem Hanauer Werksgelände neue Reaktoren und Bauteile entwickelt und herstellt, eröffnet der chemischen Industrie völlig neue Möglichkeiten für deren Anlagen und Verfahren. Die Chancen liegen in einer verbesserten Leistungsfähigkeit der Anlagen, reduzierten Kosten und weniger Umweltbelastung.

Was Daniel Adam gerade an seinem Computer vor der Glaskabine für den Druck vorbereitet, gleicht eher einem anatomischen Modell als dem einer Maschine: ein Gebilde aus verschiedenen dicken Leitungen, die sich vereinen zu einer größeren Struktur, aus der dann wieder Verzweigungen herausprießen – ähnlich dem menschlichen Venensystem. Schicht für Schicht prüft der Ingenieur das Konstrukt, plant Stützgeflechte ein,

wo die feinen Leitungen im Metallpulverbad abknicken würden. Wer in dem Maschinenbauteil Vorbilder aus der Biologie erkennt, liegt nicht falsch: „Wir schauen uns tatsächlich an, wie die Natur Strukturen optimiert, zum Beispiel bei Kapillaren, Muskeln oder Wurzeln“, sagt Senada Schaack, im Bereich Verfahrenstechnik und Engineering von Evonik verantwortlich für 3D-Druck.

## OPTIMALE FORM

Eigentlich hat sich Schaack nie besonders für Biologie interessiert. Schon in ihrer Heimatstadt Sarajevo hatte sie ein Maschinenbau-Studium aufgenommen. Wegen des Bosnien-Kriegs verschlug es sie nach Hannover, wo sie über die Simulation von Mehrphasenströmungen promovierte. Später fing sie bei Evonik an.

Ihre Begeisterung für die Möglichkeiten von Simulationen brachte sie schließlich dazu, dem Konzern die Gründung eines Kompetenzzentrums für 3D-Druck in der Fertigung von Apparaten für chemische Prozesse vorzuschlagen. „Wenn ich die Möglichkeiten des 3D-Drucks mit denen der Computersimulation verbinde, kann ich für Apparate eine optimale Form finden, die mit klassischen Methoden nicht umzusetzen wäre“, sagt Schaack. Seit 2018 forscht sie nun mit einem Dutzend Mitarbeitern im von ihr ersonnenen Kompe- →





Senada Schaack (r.) mit ihrem Mitarbeiter Maninadh Podapaka

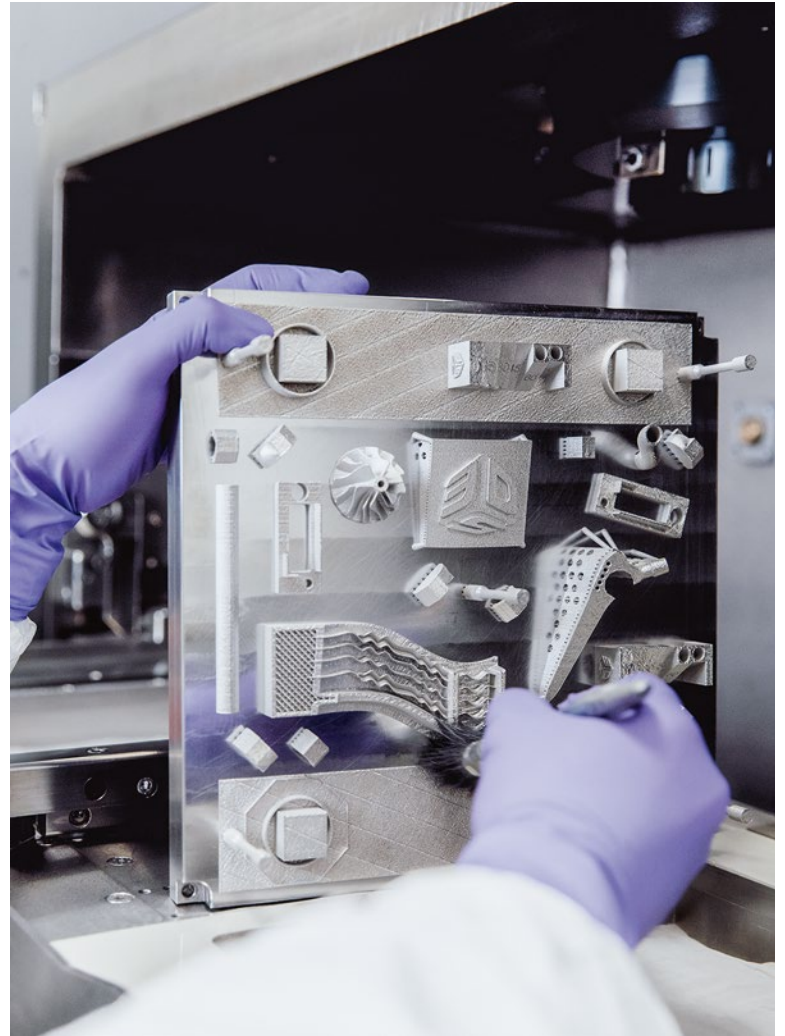
tenzzentrum Simulation und Additive Manufacturing 3D – kurz SAM 3D – daran, wie Reaktoren und Bauteile für die Chemieanlagen des Evonik-Konzerns mithilfe des 3D-Drucks noch effizienter und sicherer werden können.

Drehen, Bohren, Fräsen, Schweißen: Mit solchen Techniken entstehen bisher Reaktoren, in denen die chemische Industrie produziert. Für deren Leistungsfähigkeit und Effizienz lassen sich Chemiker, Verfahrenstechniker und Maschinenbauer eine Menge einfallen. „Wenn ich mit Simulationen in Kombination mit 3D-Druck die Form von vornherein so maßschneidern kann, dass ich an jeder Stelle optimale Bedingungen habe, benötige ich noch viel weniger Energie, weniger oder gar kein Lösungsmittel und erziele noch bessere Ausbeuten“, erklärt die Ingenieurin. „Wir können so einen spürbaren Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit leisten.“

### EIN PROTOTYP IN ZWEI MONATEN

Mehr Nachhaltigkeit – das ist Schaacks Motivation, ihre zentrale Idee hinter dem Projekt. Doch es bietet auch großes wirtschaftliches Potenzial, denn mithilfe von 3D-Druck ist der Entwicklungsaufwand deutlich niedriger, als wenn konventionelle Methoden zum Einsatz kämen. „Eine neue Konstruktion haben wir in zwei Tagen gedruckt und können sie testen, verbessern und wieder testen“, sagt Schaack. Künftig will sie optimierte Prototypen innerhalb von zwei bis drei Monaten vorlegen. So lange braucht man manchmal mit den üblichen Methoden schon für den ersten experimentellen Aufbau.

Die Möglichkeiten, die der 3D-Druck für die Verfahrensentwicklung bietet, haben sich bei Evonik schnell herumgesprochen. Nicht nur in Hanau und Marl, wo das Team angesiedelt ist: Aus dem ganzen



Gedruckte Prüfkörper für die Reaktorentwicklung

Konzern kommen Anfragen und Ideen, das Kompetenzteam konferiert regelmäßig mit anderen Standorten, sei es in Vancouver, Birmingham oder Singapur. Bei Workshops mit den Geschäftseinheiten von Evonik stellen Schaack und ihr Team ihre Arbeitsweise vor und entwickeln mit den Kolleginnen und Kollegen Lösungen für bislang ungelöste Probleme.

Die Gruppe rund um Schaack ist relativ jung, das Potenzial sehen ebenso die Älteren. Deren Reaktion kann man in einem Wort zusammenfassen: endlich! Endlich ist es möglich, Ideen umzusetzen, die teils seit Jahrzehnten im Raum stehen, aber technisch nicht realisierbar waren. „In den Workshops kommen wir auf Themen wie Mikroreaktoren, die um 2000 aufkamen und dann ad acta gelegt wurden“, sagt Johannes Ehrlich, der bei Evonik den Spezialanlagenbau leitet. „Jetzt sind sie wieder interessant.“

Mit den filigranen Strukturen, die Schaacks Team berechnen und drucken kann, entstehen Lösungen für klassische Herausforderungen der Chemie. Zum Beispiel die enorme Abwärme, die bei vielen Reaktionen entsteht. „Bei solchen exothermen Verfahren können sich Hotspots bilden, die schädlich sind für das Produkt und auch für die Anlage“, sagt Andreas Gumprecht, der



EIN BLUTGEFÄSS?  
ODER DOCH EIN  
REAKTOR FÜR EINE  
CHEMIEANLAGE?



Das Innenleben eines aus Stahl gedruckten Demonstrationsobjekts

sich gerade mit seinen Kollegen durch ein Simulationsmodell klickt, das an der SAM 3D errechnet wurde. „Mithilfe dieser Methode können wir für solche anspruchsvollen Reaktionen Apparate mit Geometrien für einen verbesserten Wärmeaustausch entwickeln.“

#### WENIGER AUFWAND, MEHR KONTROLLE

Noch steht die neue Fertigungstechnologie am Anfang. „Sie ist kein Ersatz für den klassischen Anlagenbau, sondern eine Ergänzung“, sagt Johannes Ehrlich. Gedruckte Reaktoren brächten aber schon heute „mehr Laufruhe ins System“ durch weniger Einzelteile, weniger Wartungsaufwand – und mehr Kontrolle. „Üblicherweise hat ein Reaktor eine Temperatur- und eine Druckmessung“, sagt Ehrlich. „Jetzt planen wir 16 Sensoren ein und können viel mehr Daten erfassen.“ Bislang konnte man so viele Sensoren auf engem Raum nicht mittels herkömmlicher Fertigung realisieren. Durch den 3D-Druck ist es nun möglich, die Zugänge für Sensoren im Bauteil direkt mitzudrucken.

3D-Druck-Reaktoren bewähren sich bei Evonik bereits in ersten Produktionsanlagen. Die meisten Projekte seien jedoch noch im Labor- oder Pilotstadium, so Schaack. Der Hauptgrund: Aus Edelstahlpulver gedruckte Reaktoren sind ein Novum in der chemischen



Anlagenführer David Fuchs füllt im Schutzanzug Metallpulver ein



FEINGLIEDRIGE STRUKTUREN ERMÖGLICHEN NEUE VERFAHREN.

Industrie. Je nach Einsatzbereich müssen die Bauteile zertifiziert werden. „Da es hier noch keine Vorgaben gab und wir nicht warten wollten, sind wir mit dem TÜV selbst aktiv geworden und haben gemeinsam den Zertifizierungsprozess entwickelt“, sagt Ehrlich. Nach erfolgreicher TÜV-Zertifizierung darf Evonik nun als eines der ersten Unternehmen Metalldruckreaktoren mittels additiver Fertigungsverfahren herstellen.

Die Qualität der Prozesse und Produkte nutzen Schaack und ihr Team als Werbung in eigener Sache. Sie wollen in den kommenden drei Jahren nicht nur die Zeitspanne verkürzen von der ersten Idee bis zur Umsetzung in der Produktion. „Jetzt, da wir alle Grundlagen und die ganze Prozesskette aufgebaut haben, wollen wir unser Know-how auch dem gesamten Evonik-Konzern sowie dessen Kunden als Entwicklungsplattform anbieten“, sagt Schaack.

Die Revolution soll schließlich nicht nur in Hanau und Marl stattfinden. —





**Professor Wai Yee Yeong** (42) ist Programmleiterin am Singapore Centre for 3D Printing (SC3DP), einem der wichtigsten Forschungsinstitute für additive Fertigung in Südostasien. Sie beschäftigt sich seit 2004 mit 3D-Druck und gehört zu den führenden Forschern in diesem Bereich. 2019 hat sie den internationalen TCT Women in 3D Printing Innovator Award gewonnen. Mit dem Preis werden Frauen ausgezeichnet, die Innovationen in 3D-Druck-Technologien vorantreiben.

# „Wir können die Lebensqualität von Patienten verbessern“

Wai Yee Yeong forscht in Singapur daran, menschliches Gewebe mithilfe von Bioprintern zu produzieren. Das könnte Arzneytests beschleunigen, Tierversuche überflüssig machen – und die Transplantationsmedizin revolutionieren.

INTERVIEW **CHEERIO CHAN**  
FOTOGRAFIE **NORMAN NG**

**Frau Professor Yeong, Sie befassen sich in Ihrer Forschung mit allen möglichen Arten von 3D-Druck. Was fasziniert Sie gerade am Bioprinting?**

Ich möchte Gewebekonstrukte entwickeln, die Organtransplantate von Spendern ersetzen. So können wir die Lebensqualität von Patienten verbessern. Bioprinting macht Tissue Engineering, also die Züchtung von Gewebe, überhaupt erst möglich. Bis es so weit ist, können wir die Technologie für die Herstellung von In-vitro-Modellen nutzen, mit denen die Zahl von Tierversuchen reduziert und die Ergebnisse von Tests zur Erprobung neuer Therapien besser vorhergesagt werden können.

**Wie funktioniert die Technik?**

Bioprinting ist ein 3D-Druck-Vorgang mit Zellen und Biomaterialien als Tinten. Die Biomaterialien dienen dazu, ein Gerüst aufzubauen. Mit dem Bioprinter sind wir in der Lage, die Ablagerung von Zellen und Biomaterialien punktgenau festzulegen. So können wir eine für das Zellwachstum optimale 3D-Umgebung entwerfen, neue Strategien für die Kultivierung von unterschiedlichen Zellen und Materialien entwickeln und die Form von Zellkonstrukten beeinflussen. →

## »Es ist heute schon möglich, zweidimensionales Gewebe wie Haut zu drucken.«

### Welche Organe lassen sich prinzipiell mithilfe von Bioprintern drucken?

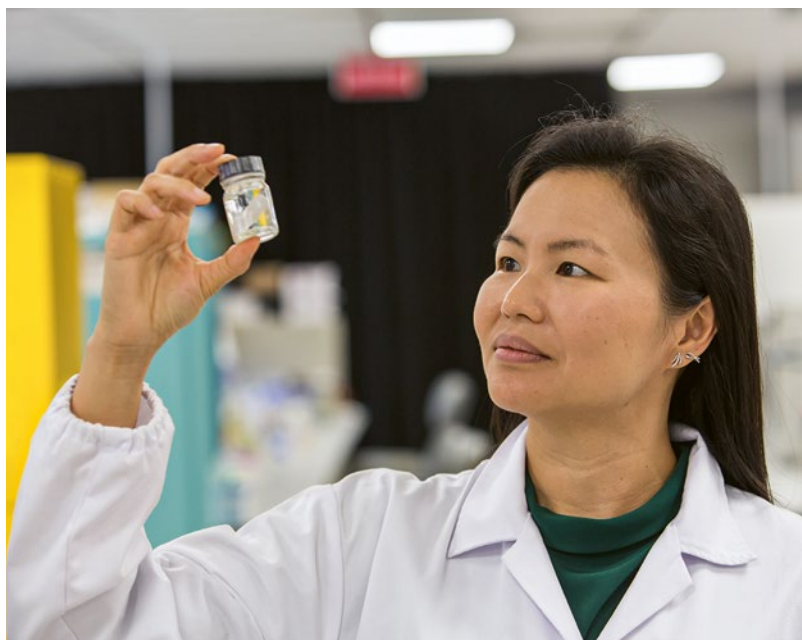
In jüngster Zeit habe ich mich bei meiner Forschung auf Haut, Netzhaut und Lunge konzentriert. Außerdem habe ich mit Krankenhäusern an der Entwicklung neuer Lösungen gearbeitet. Dabei ging es unter anderem um die Frage, wie die Bauchspeicheldrüse zu einem besseren Verständnis von Diabetes beitragen kann. Bei diesen laufenden Projekten arbeite ich nicht nur mit unterschiedlichen Methoden, ich setze auch unterschiedliche Materialzusammensetzungen ein.

### Eine Lunge aus dem Drucker – das klingt wie Zukunftsmusik. Wie weit ist der Stand der Technik heute?

Wir sind gerade in einer sehr spannenden Phase: Es ist heute schon möglich, zweidimensionales Gewebe wie Haut und dünne, röhrenartige Gebilde zu drucken, die für In-vitro-Tests von Arzneimitteln genutzt werden.

### Was sind die größten Hürden bei komplexeren Anwendungen wie Gewebe- oder Organtransplantaten?

Eine der größten Herausforderungen ist die Versorgung mit Nährstoffen. Daher beschäftigen wir uns mit der Züchtung von vaskulärem Gewebe. Angesichts der Auflösung heutiger Bioprinter fangen wir mit kleinen Blutgefäßen an. Außerdem sind bislang nur wenige Materialien verfügbar, die als Tinte genutzt werden können. Beim Bioprinting brauchen wir weiche, gelartige Materialien, die das Wachstum und die Migration von Zellen fördern. Diese Materialien haben jedoch nicht die nötige Festigkeit, um die gewünschte Form zu halten. Daher müssen wir Strategien zur Verbesserung der sogenannten mechanischen Festigkeit entwickeln. Zudem benötigen wir Tinten oder Zusatzstoffe aus Biomaterial, die das Zusammenspiel zwischen Wirt und Transplantat fördern, sodass es nach der Transplantation beim Patienten nicht zur Abstoßung des gedruckten Organs kommt.



Multitalent: Yeong beschäftigt sich in ihrer Arbeit mit den unterschiedlichsten Disziplinen – von der Materialwissenschaft bis hin zur Medizin.

### Wie arbeiten Sie mit Evonik bei diesem Thema zusammen?

Wir haben unter anderem gemeinsam die Betreuung eines Doktoranden übernommen, der sich auf das Thema Biotinte konzentriert. Um größere biologische Konstrukte zu drucken, brauchen wir mehr Auswahl an Tinten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften. Für Bioprinting-Techniken mit extrusionsbasierten Verfahren sind intelligente Materialien von Interesse, die auf spezifische Reize reagieren.

### Wann werden Sie erste Organe produzieren?

Das wird noch einige Zeit dauern. Wir benötigen eine große Anzahl von Zellen. Dieser Bedarf steigt mit der Größe des Gewebekonstrukts und der Anwendung in größerem Maßstab. Hinzu kommen die Herausforderungen und Bedenken bei der Verwendung von Primärzellen, die direkt von Patienten gewonnen werden. Wir prüfen zurzeit die Verwendung sogenannter induzierter pluripotenter (adulte) Stammzellen. Wenn es darum geht, Stammzellen und Bioprinting zusammenzubringen, um gemeinsame Anwendungen beider Bereiche weiterzuentwickeln, befinden wir uns noch in einem frühen Stadium. Eine weitere Herausforderung stellen die Nährstofflösungen dar. Wir benötigen „universelle“ Zellkulturmedien, die gedruckte Konstrukte aus mehreren Zelltypen unterstützen. Momentan sind die meisten Zellkulturmedien nur für ein bis zwei Zelltypen optimiert.



ELEMENTS-Reporterin Cheerio Chan (r.) traf Wai Yee Yeong auf dem Campus der Nanyang Technological University.

**Werden diese Hindernisse in fünf bis zehn Jahren überwunden sein?**

Ich denke, bei der Haut ist das möglich, denn deren Gewebestruktur ist weniger komplex. Das gilt vor allem für Gewebekonstrukte, die nur wenig Unterstützung von den Blutgefäßen brauchen, etwa Hornhaut oder Netzhautschichten. Blutgefäßtransplantate mit großem Durchmesser werden wahrscheinlich ebenfalls verfügbar sein. Bei Organen mit komplexer Struktur und hoher Funktionalität wie etwa der Leber oder Nervengewebe werden wir deutlich mehr biologischen Input brauchen.

**Welche Perspektiven geben Sie dem 3D-Druck generell in der Medizin?**

Die besten Ergebnisse, die wir momentan erzielen, sind medizinische Produkte aus dem 3D-Drucker. Diese Implantate sind jedoch keine originalgetreuen

Nachbildungen des ursprünglichen Gewebes. Ich glaube, dass wir durch Bioprinting die Werkzeuge, Plattformen und finanziellen Möglichkeiten bekommen werden, um ein echtes biologisches Konstrukt zu züchten, das das ursprüngliche Organ ersetzen kann. Wir wollen auch bionische Organe herstellen, die lebendes und nicht lebendes Material miteinander kombinieren und so vielleicht sogar besser funktionieren als ein rein biologisches Konstrukt.

**Warum konzentriert sich in Singapur so viel Know-how im Bioprinting?**

Beim 3D-Druck haben wir in Asien und weltweit eine klare Führungsposition. Die Forschung wird von der Regierung stark gefördert – wir haben zum Beispiel eines der am besten ausgestatteten Uni-Forschungslabore in der Region. Diese starke Basis fügt sich sehr gut in die gesamte Forschungslandschaft in Singapur ein, vor allem im Bereich Biowissenschaften. Wir arbeiten nicht nur mit Hochschulen und Forschungsinstituten zusammen, sondern auch mit Technologieunternehmen wie Evonik oder HP Inc., um Lösungen zu finden, die die Industrie wirklich braucht. —



TEXT HANNS-J. NEUBERT

# AUF DIREKTEM WEG

Evonik hat ein neues Verfahren zur effizienten und umweltschonenden Herstellung von Propylenglykol entwickelt. Gemeinsam mit dem US-Konzern Dow wird die Technologie nun zur Marktreife gebracht.

**M**anchmal braucht es den Blick zurück, damit etwas richtig vorwärtsgeht. Vor acht Jahren stieß Holger Wiederhold, Forscher im Geschäftsgebiet Active Oxygens von Evonik, auf eine jahrealte Notiz in einer Datenbank. Bernd Jaeger, damaliger Forschungsleiter bei Evonik, hatte dort seine Gedanken zu einer sogenannten Direktsynthese von Propylenglykol hinterlassen. Statt das begehrte Produkt in mehreren aufwendigen Schritten über Vorprodukte herzustellen, so Jaeger, verspreche die Synthese in einem Schritt erhebliche Vorteile.

Doch Jaeger fehlte damals ein passender Lösungsansatz. Deshalb schrieb er sein Projekt in die unternehmensinterne Datenbank. In diesem Ideengedächtnis speichern Evonik-Forscher Vorschläge, für die sie noch keine technischen Umsetzungsmöglichkeiten sehen, aber hoffen, dass jemand diese eines Tages findet.

Als Wiederhold Jaegers Notiz las, kam ihm spontan eine Idee, wie die Synthese chemisch funktionieren könnte. „Das war der Startpunkt von HYPROSYN™“, sagt der Chemiker. Seit 2013 wird das Projekt zur günstigen und nachhaltigen Direktsynthese von Propylenglykol durch das Geschäftsgebiet Active Oxygens in den Laboren der Verfahrenstechnik entwickelt.

Die Nachfrage nach Propylenglykol ist groß, und sie wächst jährlich um 2,5 Prozent. Es steckt nicht nur in Frostschutz- und Schmiermitteln, sondern auch in glasfaserverstärkten Kunststoffen, in Reinigungs- und Waschmitteln oder in Latexwandfarben. Auch für die Lebensmittelindustrie ist der Stoff unverzichtbar. Er

verleiht nicht nur Kaugummi die gewünschte Konsistenz, sondern macht auch Gebäck weich und hält verpackte Nahrungsmittel feucht. Bauern behandeln damit sogar Stoffwechselerkrankungen bei ihren Milchkühen. „Propylenglykol hat sich zu einem Allround-Bestseller entwickelt“, sagt Thomas Bode, der bei Evonik für die HYPROSYN™-Technologie verantwortlich ist. Derzeit werden weltweit pro Jahr rund zwei Millionen Tonnen Propylenglykol verarbeitet. Um den steigenden Bedarf zu decken, arbeiten Entwickler seit Jahren an neuen Lösungen.

## EIN VORPRODUKT FÜR VIELE ANWENDUNGEN

Bei Evonik machte sich ein Kernteam von vier Mitarbeitern an die Arbeit, eine neue Form der Propylenglykol-Synthese zu entwickeln. „Um das Verfahren auszufeuern, brauchten wir allerdings die Unterstützung weiterer Kollegen aus unterschiedlichen Bereichen“, erläutert Wiederhold. So trugen zahlreiche Mitarbeiter aus dem ganzen Unternehmen ihr Wissen zu dieser Entwicklung bei.

Bislang wird zur Herstellung von Propylenglykol oft zuerst Propylenoxid produziert. Zur Herstellung dieses Vorprodukts hat Evonik in Kooperation mit Thyssenkrupp nach der Jahrtausendwende das sogenannte HPPO-Verfahren entwickelt. Die Abkürzung steht für Hydrogen Peroxide to Propylene Oxide. 2008 wurde das Verfahren erstmals für eine Anlage in Südkorea lizenziert, die inzwischen über 130.000 Tonnen Propylenoxid produziert. Gegenüber klassischen Synthesen, →



Von der Tiermedizin bis hin zur Luftfahrt – die Einsatzbereiche für Propylenglykol sind vielfältig.

## »Propylenglykol hat sich zu einem Allround-Bestseller entwickelt.«

THOMAS BODE,  
LEITER PERFORMANCE OXIDANTS,  
BEI EVONIK

Der Schlüssel zum Erfolg, der Wiederhold zum Durchbruch verholfen hat, liegt in einem neu entwickelten Katalysatorsystem. Es ist jetzt möglich, das Propylenglykol in nur einer einzigen Reaktion aus Propylen und Wasserstoffperoxid herzustellen – ohne den Umweg über das Propylenoxid. Ein Katalysator sorgt generell dafür, dass eine chemische Reaktion erleichtert und beschleunigt wird. Besonderer Charme dieser Lösung: Einige Komponenten des neuen Katalysators wurden bei Evonik bereits in anderen chemischen Prozessen eingesetzt. „Die Kombination unterschiedlicher Einsatzstoffe sorgt zusammen mit speziellen technischen Verfahren dafür, dass der Katalysator über lange Zeit stabil bleibt“, so Wiederhold. „Außerdem werden die Grundstoffe Propylen und Wasserstoffperoxid durch ihn besonders effizient und energiesparend umgewandelt.“

### ERFAHRUNG MIT H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ZAHLT SICH AUS

Das HYPROSYN™-Verfahren ist somit nicht nur günstiger als die bislang eingesetzte Technologie, es ermöglicht auch eine merklich höhere Ausbeute bei deutlich geringerem Energiebedarf. Wie schon bei der HPPO-Synthese entstehen außer Wasser keine Koppelprodukte, die man abtrennen müsste. Was im Labor schon hervorragend funktionierte, wird jetzt in eine Pilotanlage mit einer 160-mal höheren Kapazität überführt: Statt 50 Gramm werden nun 8 Kilogramm Propylenglykol pro Stunde produziert. 2021 soll die Anlage in Hanau fertig sein. „Sie wird dann ein Jahr lang betrieben, um den Prozess zu verbessern und die Ergebnisse zu verifizieren“, sagt Evonik-Manager Bode. Die Marktreife von HYPROSYN™ wird für 2022 erwartet.

Dass es überhaupt so kommen konnte, liegt nicht zuletzt an der mehr als 100 Jahre langen Erfahrung von Evonik in der Peroxidchemie. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ist für das Unternehmen eines der wichtigsten Verkaufsprodukte. Der Stoff kommt in zahlreichen Anwendungen zum Einsatz. Wurde er anfangs vor allem als Textil- und Papierbleiche sowie als Desinfektionsmittel genutzt, wird er heute unter anderem in der Elektronikindustrie für die Reinigung von Platinen oder Halbleitern zur Herstellung von LCD-Bildschirmen verwendet. In Raketen treibt Wasserstoffperoxid die Turbopumpen an, die den eigentlichen Kraftstoff in die Brennkammern drücken.

bei denen man beispielsweise Chlor oder Benzol benötigt, kommt hier neben Propylen nur Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) zum Einsatz, das Evonik liefert. Als Nebenprodukt entsteht lediglich Wasser.

Das Zwischenprodukt Propylenoxid ist überaus begehrt: Ein Fünftel der Produktion wird zur Synthese von Propylenglykol verwendet. Zwei Drittel werden weiterverarbeitet zu Polyetherpolyolen, die man über Zwischenstufen zu Polyurethan-(PU)-Produkten verarbeitet, beispielsweise Bauschäume oder Farbgrundierungen. Der Rest dient als Ausgangsstoff für andere wertvolle Chemikalien. Die Nachfrage nach Propylenoxid wuchs zuletzt sogar noch schneller als die nach Propylenglykol: um etwa vier Prozent auf rund elf Millionen Tonnen.

Um den Bedarf auch in Zukunft decken zu können, könnte man also weitere Propylenoxid-Anlagen bauen. Jede Anlage kostet jedoch einen dreistelligen Millionen-€-Betrag. Oder aber man erforscht innovative Lösungen, die zugleich neue Möglichkeiten für den Einsatz umweltschonenden Wasserstoffperoxids eröffnen. „Der zweite Weg erschien uns deutlich attraktiver“, sagt Projektleiter Wiederhold.

Mit der HYPROSYN™-Technologie eröffnet sich jetzt ein zusätzlicher Absatzmarkt.

Evonik ist ein weltweit führender Hersteller von  $H_2O_2$  mit 18 Produktionsstandorten und einer Jahreskapazität von über einer Million Tonnen. Das Unternehmen hat sich vor allem als Spezialist für die Produktion hochkonzentrierten Wasserstoffperoxids etabliert. Bei der bekannten HPPO-Synthese wird 70-prozentiges  $H_2O_2$  verwendet. Üblich sind Konzentrationen von 50 und weniger Prozent. Evonik kann  $H_2O_2$  sogar in einer Konzentration von 98 Prozent liefern, ein Spitzenwert in der industriellen Herstellung von Wasserstoffperoxid.

### NEUES LEBEN FÜR ALTE ANLAGEN

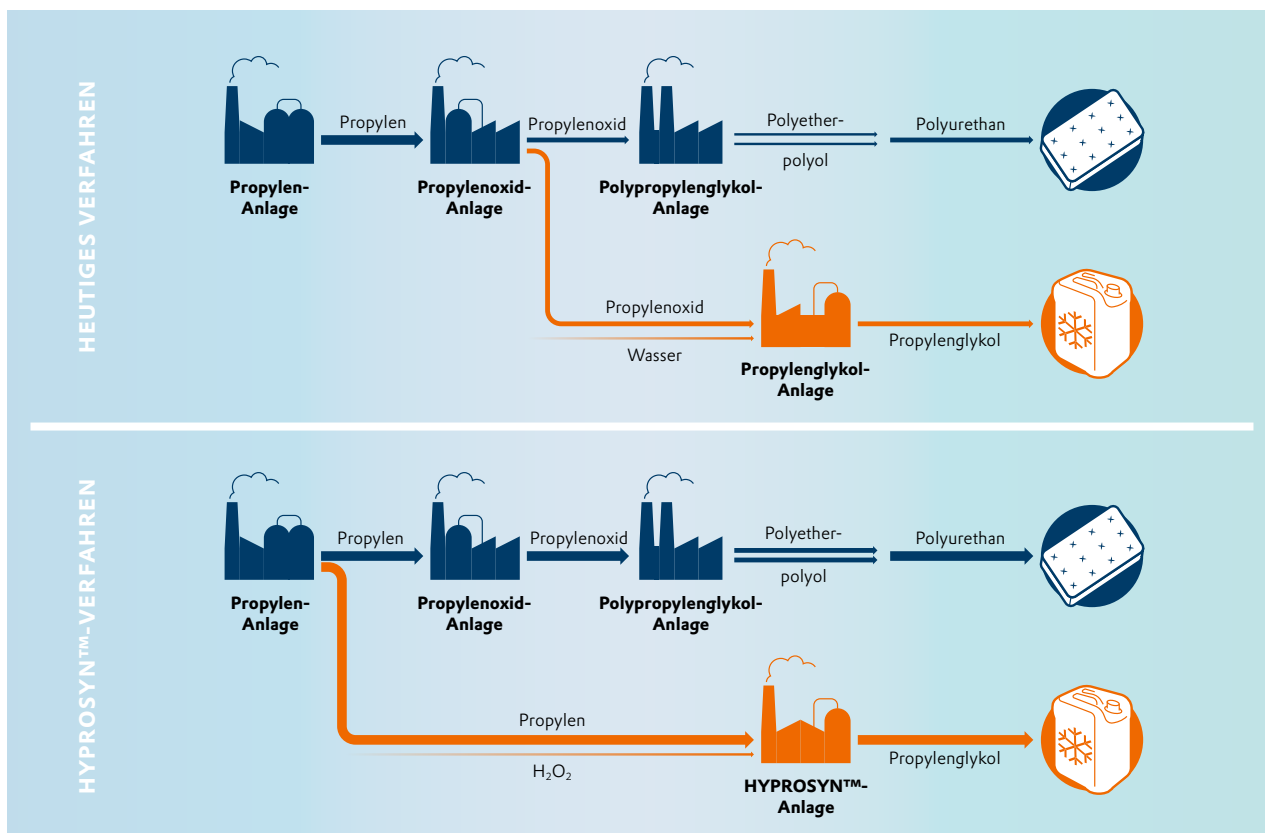
Doch die Vorteile des neuen Verfahrens reichen weiter. Schließlich läuft die Reaktion von Propylen und Wasserstoffperoxid wie beschrieben in nur einem einzigen Reaktor ab. Damit wird das bisherige Vorprodukt Propylenoxid überflüssig. Durch die kostengünstige Umrüstung vorhandener Propylenglykol-Anlagen auf HYPROSYN™ wird das bisher benötigte Propylenoxid freigesetzt und kann somit zusätzlich als Grundstoff für PU-Erzeugnisse verwendet werden. So kann die neue Technologie als intelligente Methode zur indirekten Kapazitätserweiterung von Propylenoxid-Anlagen aufgefasst werden. Weil zudem mit Einführung der HYPROSYN™-Technologie die Herstellung von Propylenglykol und Propylenoxid unabhängig voneinander

gesteuert werden kann, lassen sich die Produktionsmengen der Stoffe leichter an die Nachfrage anpassen.

Evonik entwickelt die neue Technologie nun gemeinsam mit Dow bis zur Marktreife weiter. Der US-Konzern produziert Propylenglykol und Propylenoxid in zahlreichen Werken auf vier Kontinenten und ist Weltmarktführer bei beiden Produkten. Michael Träxler, Leiter des Geschäftsgebiets Active Oxygens, nennt Dow einen „idealen Partner“ – nicht zuletzt wegen dessen Expertise bei Materialwissenschaften.

„Für uns ist wichtig, dass die neue Technologie die anspruchsvollen Qualitätsanforderungen, besonders bei medizinischen Anwendungen, erfüllt und dadurch eine wettbewerbsfähige Alternative zu bestehenden Prozessen darstellt“, sagt Meinolf Weidenbach, Technologischer Leiter bei Dow Deutschland. Vincent Lacoste, Direktor für die weltweiten Geschäfte mit Propylenoxid und Propylenglykol bei Dow, erhofft sich aus der Kooperation einen Wettbewerbsvorteil für die eigenen Produkte: „Durch HYPROSYN™ können wir ein kostengünstiges Produkt auf Grundlage einer nachhaltigen und umweltschonenden Technologie anbieten, das uns hilft, bei der Betreuung unserer Kunden flexibler agieren zu können.“

Sind das HYPROSYN™-Verfahren und die zugehörige Reaktortechnik reif für die Produktion im industriellen Maßstab, wollen Evonik und Dow sie weltweit auch an Dritte lizenzieren. So wird aus einer Idee in einer Datenbank am Ende ein einträgliches Geschäft. —



**Schlanker Prozess** Durch das HYPROSYN™-Verfahren werden Anlagen für die Produktion von Propylenoxid frei.



Christian Kullmann ist Vorsitzender des Vorstands von Evonik.

# Ingenieure der Zukunft

Von Christian Kullmann

Ökonomischer Erfolg und Umweltschutz sind kein Widerspruch. Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Wirtschaft brauchen wir keine neuen Verbote und keinen symbolischen Verzicht. Wir brauchen mehr Innovation. Und die kommt vor allem von uns.

In den sozialen Netzwerken, auf der Straße und natürlich in den Medien: Die gesellschaftliche Debatte um Klimawandel und Klimakrise ist allgegenwärtig – und sie wird mit zunehmend verhärteten Fronten geführt. Der gemeinsame Nenner ist dabei der denkbar kleinste: Natürlich wollen wir alle einen lebenswerten Planeten für unsere Nachkommen erhalten.

Doch statt mit sachlichen Argumenten zu diskutieren, wird ein Kampf zwischen Natur und Industrie heraufbeschworen. Das bringt uns nicht voran, sondern führt allenfalls zu symbolischen Handlungen und Bekenntnis-Weltmeisterschaften. Darunter leidet das Vertrauen in die Politik und in die Industrie gleichermaßen. Das ist kontraproduktiv, denn gerade die Chemieindustrie ist ein Schlüsselfaktor auf dem Weg zu mehr Klimaschutz.



---

»Kein Windrad dreht sich ohne unsere Technologie, kein Elektroauto fährt ohne unsere Produkte. Wir sind die Ingenieure der Zukunft.«

Wir brauchen nicht immer neue Verbote und immer mehr Verzicht. Wir brauchen eine Politik, die Innovationen bestmöglich fördert. Wenn wir in Deutschland nicht zeigen, dass Umwelt- und Klimaschutz mit wirtschaftlichem Wachstum und gesellschaftlichem Wohlstand Hand in Hand gehen, verlieren wir. Ohne die chemische Industrie werden die Ziele des Pariser Klimaabkommens jedenfalls nicht zu erreichen sein. Kein Windrad dreht sich ohne unsere Technologie, kein Elektroauto fährt ohne unsere Produkte. Wir sind die Ingenieure der Zukunft.

#### EVONIK IST TREIBENDE KRAFT

Wer stets Verzicht predigt und Veränderungen mit Verboten erreichen will, wird nie eine globale Vorreiterrolle einnehmen. Während die Staatengemeinschaft noch über Klimaschutzmaßnahmen diskutiert, handeln viele Unternehmen längst. Bei Evonik wollen wir Treiber bei der Lösung drängender Zukunftsfragen sein. Unsere Klima- und Nachhaltigkeitsstrategie setzen wir deshalb konsequent um. Das Ziel, das wir uns gesteckt haben, ist ambitionierter als der Plan der Bundesregierung für ganz Deutschland: Zwischen 2008 und 2025 wird Evonik die absoluten Emissionen halbieren und gleichzeitig den Umsatz mit nachhaltigen Produkten deutlich steigern.

Produkte, die in der Anwendung nachweislich einen Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit und verbesserter Ressourceneffizienz

leisten, tragen bereits heute mehr als die Hälfte zum Umsatz von Evonik bei. Additive von Evonik machen Windkraft- und Solaranlagen leistungsfähig und langlebig. Siliziumdioxid von Evonik verbessert die Dämmung von Häusern. Materialien von Evonik, die in Separatoren und Kathoden stecken, machen Batterien für Elektroautos effizienter und sicherer.

#### CO<sub>2</sub> NUTZBAR MACHEN

Die chemische Industrie braucht viel Energie. Eine vollständige Umstellung der Versorgung auf CO<sub>2</sub>-neutrale elektrische Energie ist allerdings nur theoretisch möglich. In der Realität ist grüner Strom in den Mengen, die die chemische Produktion benötigt, weder verfügbar noch bezahlbar. Deshalb arbeiten wir an alternativen Lösungen: sowohl für unsere eigenen Prozesse und die Produkte unserer Kunden als auch für die Frage, was mit dem emittierten Kohlendioxid passieren soll.

Wir wollen CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht nur reduzieren, sondern sie als Rohstoff nutzbar machen. Gemeinsam mit Siemens forscht Evonik an Elektrolyse- und Fermentationsprozessen, die künstliche Fotosynthese ermöglichen. So produzieren wir Chemikalien mithilfe von CO<sub>2</sub>, Ökostrom und Bakterien – eine Technologie, die in Zukunft überall installiert werden könnte, wo CO<sub>2</sub> anfällt.

Investitionen in Forschung und Entwicklung sind ebenso unverzichtbar wie Kooperationen über Branchengrenzen hinweg. Wer den Verkäufer von E-Autos feiert und zugleich

die Branche verteufelt, die den Bau solcher Autos erst ermöglicht, dem mangelt es am nötigen Verständnis für Wertschöpfungsketten.

Kunden und Investoren fordern Wachstum von uns. Auch im globalen Wettbewerb können wir nur bestehen, wenn wir wachsen und profitabel sind. Daher dürfen sich Umweltschutz und Nachhaltigkeit einerseits und Wachstum und Profitabilität andererseits nicht ausschließen. Die gute Nachricht: Das tun sie nicht. Zukunftsfähigkeit ist schon immer unser Geschäft gewesen.

An morgen zu denken bedeutet, die Umwelt genauso im Blick zu behalten wie den Wohlstand unserer Kinder und Enkel. Dabei gilt es, neben ökologischen Aspekten auch die Sozialverträglichkeit von Veränderungsprozessen zu berücksichtigen. Denn nur wenn am Ende Planet, Menschen und Wirtschaft gleichermaßen profitieren, ist es wirklich nachhaltig.

#### GEMEINSAM ZUM ZIEL

Wir können mit unseren Kompetenzen viel zu einer nachhaltigeren Zukunft beitragen. Solange es jedoch nicht genügend Ökostrom zu wettbewerbsfähigen Preisen gibt und wir weiter an der Nutzung alternativer Rohstoffe forschen, lehnen wir Trennlinien und Bevormundung ab. Wir brauchen das Vertrauen der Bevölkerung ebenso wie die Unterstützung der Politik. Nur gemeinsam wird es uns gelingen, mit Innovationen nachhaltiges Wirtschaften noch attraktiver zu machen – und nachfolgenden Generationen einen lebenswerten Planeten zu hinterlassen. —



# Junge Nation mit langer Tradition

---

Die Slowakei ist ein kleines Land. Die Begeisterung der Bürger für ihre Heimat ist jedoch groß – egal ob es um Eishockey geht, die Naturlandschaften oder die wiedererstarke Automobilindustrie.

TEXT ANNA SCHRIEVER



— Mehr als 200 Burgen und Schlösser gibt es in der Slowakei, einem Land, das kleiner ist als Bayern. Zu den bekanntesten gehört die Burg Bratislava, die hoch über der gleichnamigen Hauptstadt thront und das Stadtbild dominiert.



■ „Slovenskoo, heja, heja, heja, Slovenskoo“ – mit diesem Schlachtruf trieben die slowakischen Fans 2019 ihr Team bei der Weltmeisterschaft im eigenen Land voran. Eishockey ist in der Slowakei Nationalsport. Die Fans begeistern sich für die unglaubliche Dynamik und Schnelligkeit der körperbetonten Sportart. Auf bis zu 170 Stundenkilometer beschleunigen die Spieler den Puck. Dafür, dass der Schläger dabei nicht bricht und der Spieler die volle Kontrolle behält, sorgt Rohacell von Evonik. Doch der Hochleistungsschaumstoff kann noch mehr: Er absorbiert die Aufprallenergie. So kann der Sportler sein Spiel besser kontrollieren und das Tempo noch weiter erhöhen.







Die Autobranche ist das Rückgrat der slowakischen Wirtschaft. Jährlich werden über eine Million Fahrzeuge hergestellt, das sind rund 190 pro 1.000 Einwohner – mehr als in jedem anderen Land der Welt. 44 Prozent der gesamten Industrieproduktion und 40 Prozent der industriellen Exporte entfallen auf die Automobilbranche. Mehr als 145.000 Jobs hängen direkt von ihr ab. Zusätze für Autolacke von Evonik verleihen den Fahrzeugen nicht nur einen schillernden Glanz, sondern bieten auch einen dauerhaften Schutz. Unsanfte Berührungen bleiben ohne Spuren, und Regentropfen perlen einfach ab.

Neun Nationalparks, die majestätischen Bergspitzen der Karpaten, geheimnisvolle Schluchten: Die Slowakei ist ein Paradies für Wanderer. Rund 40 Prozent des Landes sind mit Wald bedeckt. Wer diese Naturlandschaft erkunden möchte, muss sich auf seine Ausrüstung verlassen können. Mit innovativen Kunststofflösungen trägt Evonik zu mehr Nachhaltigkeit in der Sportindustrie bei. Das biobasierte Polyamid Vestamid Terra überzeugt nicht nur durch seinen Umweltvorteil, sondern auch durch seinen Schutz der Ausrüstung gegen Schläge und Risse bei kaltem und nassem Wetter. Somit eignet es sich zum Beispiel ideal für Allwetterschnallen an Wanderrucksäcken.





Jede Region der Slowakei ist stolz auf ihre eigene Folklore. Ob Trachten, Musik, Bräuche, Tänze oder Mundarten – viele Traditionen sind bis heute erhalten geblieben und werden bei Volksfesten präsentiert. Dabei dürfen auch traditionelle Frisuren nicht fehlen. Evonik leistet mit Rheance One einen Beitrag für eine sanfte und effektive Haarreinigung. Der für die Produktion von Rheance One wichtige Fermentationsprozess findet am Standort in Slovenská Ľupča statt.





## NACHHALTIG ERFOLGREICH

Wenn es um industrielle Fermentationsprozesse für neue Produkte geht, führt bei Evonik seit 1993 ein wichtiger Weg in die Slowakei. Der Trend zur Nachhaltigkeit – ob in der Tierernährung oder der Kosmetikindustrie – nützt dem Standort Slovenská Ľupča. In den vergangenen Jahren wurde hier in neue Produkte, verbesserte Technologien und in die Infrastruktur investiert. Seit kurzem gibt es dort zusammen mit dem Start-up Modern Meadow auch Aktivitäten für die Kunstlederproduktion.



### Evonik-Standorte

- 1 Bratislava
- 2 Slovenská Ľupča

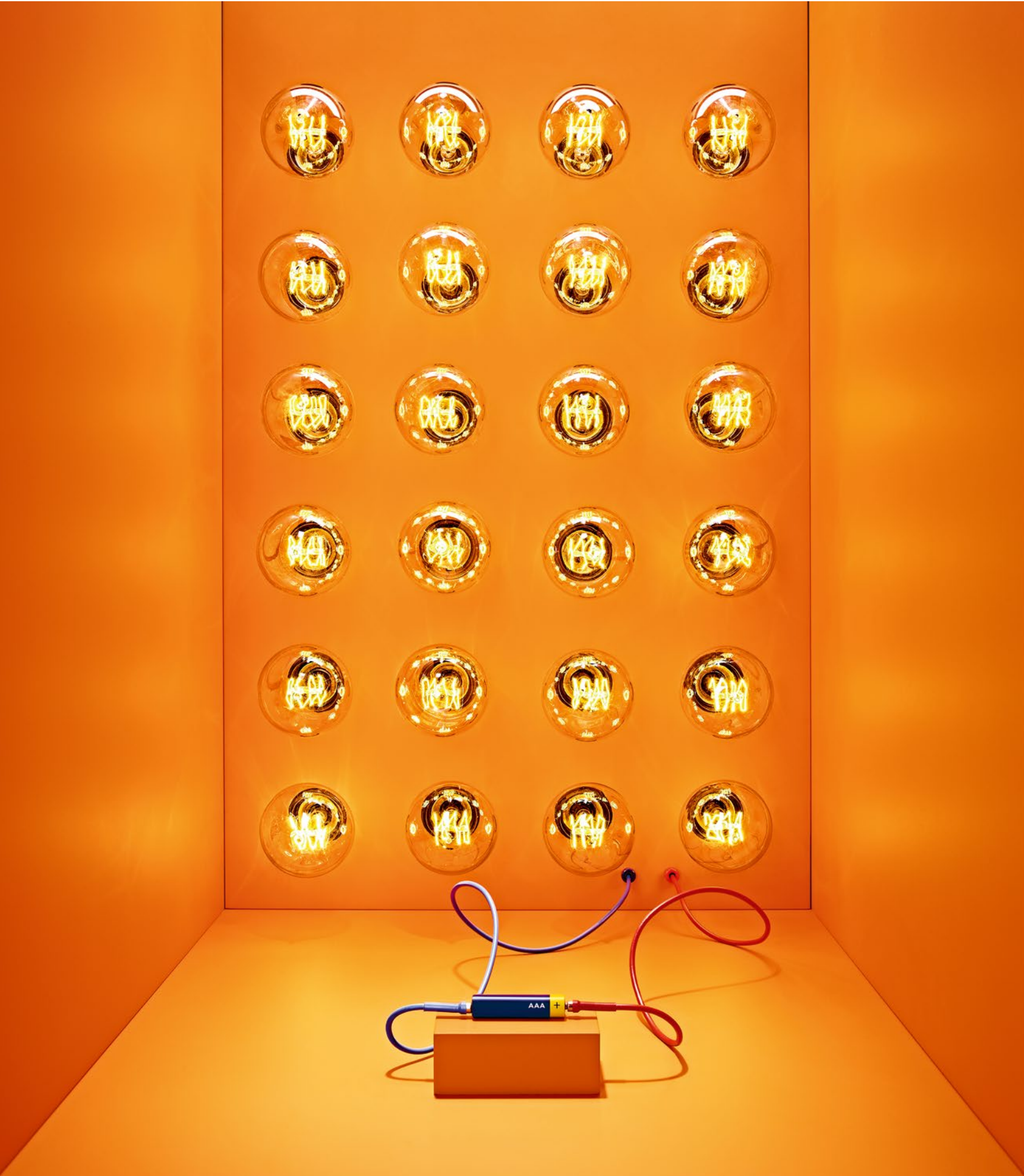
An

# 2

Standorten arbeiten

# 230

Mitarbeiter.



# GELADEN UND GESICHERT

TEXT TOM RADEMACHER

Bessere Batterien sind ein Schlüssel für die Energiewende und nachhaltige Mobilität. Evonik arbeitet daran, die Stromspeicher leistungsfähiger und günstiger zu machen. Selbst aus altbekannter Technik lässt sich noch eine Menge herausholen.

**D**ie „New York Times“ schreibt nicht oft über das Städtchen Arnstadt bei Erfurt. Und wenn, dann eigentlich nur, weil vor drei Jahrhunderten ein junger Herr namens Johann Sebastian Bach dort Orgel spielte. Seit Sommer 2018 weckt ein ganz anderer Star in der Provinzstadt das Interesse der Weltpresse: Die chinesische Contemporary Amperex Technology Limited, kurz CATL, baut dort ihre erste Batteriefabrik außerhalb des Heimatlandes.

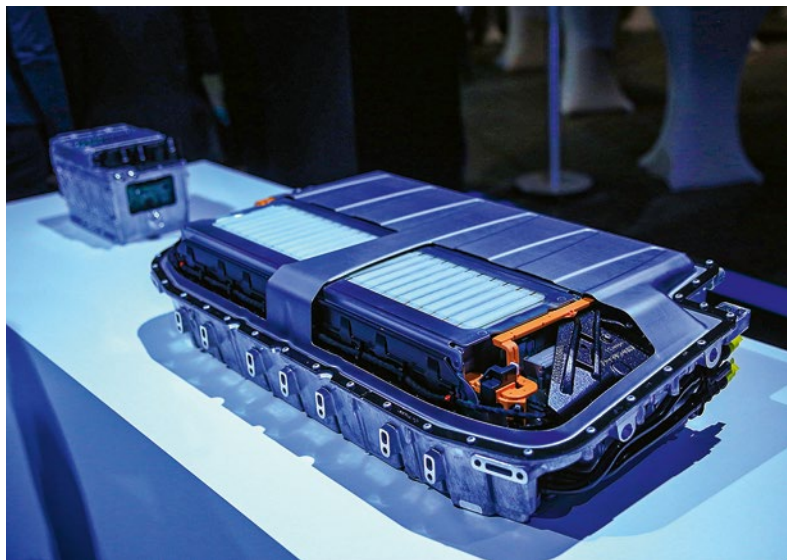
Zwei Milliarden € will der weltgrößte Hersteller von Batterien für Elektroautos in Thüringen investieren. Der Grundstein ist gelegt, schon in diesem Jahr sollen erste Akkus für BMW vom Band laufen. Der Autobauer hat Speicher für 1,5 Milliarden € bestellt. Bis zu 2.000 neue Jobs sollen entstehen, ein stillgelegter Güterbahnhof wird eigens für die Chinesen reaktiviert. „Die Leute

freuen sich, dass sich hier eine Firma ansiedelt, die Jobs für ihre Kinder und Enkelkinder bieten wird“, gab die örtliche Leiterin der Agentur für Arbeit der „Times“ zu Protokoll. Die Arnstädter knüpfen große Hoffnungen an die Batterie.

Damit sind sie nicht allein. Energiespeicher haben das Zeug, Wirtschaft und Gesellschaft grundlegend zu verändern. Elektromobilität, erneuerbare Energien, Informationstechnik, Unterhaltungselektronik – kaum ein Lebensbereich, der nicht von einem leistungsfähigen Strom- oder Wärmespeicher abhängt. Vom Pumpspeicherwerk, das Leistungsspitzen von Sonnen-, Wind- und Wasserkraftwerken ausgleicht, über Doppelschichtkondensatoren in Bremssystemen von Elektroautos bis hin zur Elektrolyse, bei der mit Strom energiereicher Wasserstoff erzeugt werden kann (siehe Schaubild Seite 50/51).

## BAUPRINZIP AUS DEN 90ERN

Die Marktchancen sind gewaltig: Allein die Automobilbranche wird im laufenden Jahrzehnt 300 Milliarden US-\$ in die Entwicklung von Elektrofahrzeugen investieren, hat die Nachrichtenagentur Reuters errechnet. Der Internationalen Energieagentur IEA zufolge könnten im Jahr 2030 weltweit 44 Millionen Elektroautos verkauft werden. Die Prognosen des französischen Beratungsunternehmens Avicenne Energy sind sehr viel konservativer, doch selbst danach würde sich der →



**Kraftpaket** Hybridbatterien für Autos müssen bei geringer Größe in kurzer Zeit sehr viel Energie abgeben.

Markt für Lithium-Ionen-Batterien in Elektroautos in den kommenden zehn Jahren auf gut 120 Milliarden US-\$ nahezu vervierfachen.

Die Schlüsselrolle der modernen Lithium-Ionen-Batterie (kurz: LIB) für die Elektromobilität kommt nicht von ungefähr: Sie ist leistungsfähiger und effizienter als alles vorher Dagewesene. Dass sie für den Alltag taugt, ist drei Erfindern zu verdanken, die dafür 2019 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet wurden (siehe Kasten Seite 48). Sie setzten schon vor Jahrzehnten den technischen Standard.

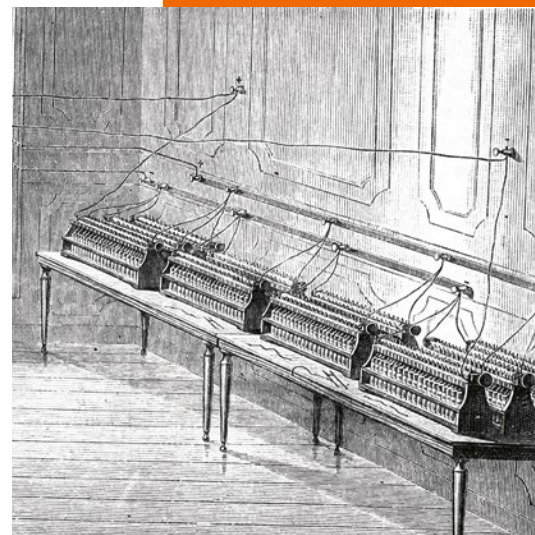
„Das Prinzip der Lithium-Ionen-Batterie hat sich seit den 1990ern nicht verändert“, sagt Prof. Dr. Frank Menzel. Er lehrt an der Technischen Universität Ilmenau und verantwortet bei Evonik die Anwendungstechnik für Spezialoxide. Die Aussage mag ketzerisch klingen. Immerhin haben Entwickler drei Jahrzehnte Arbeit in längere Lebensdauer, höhere Kapazität und geringere Produktionskosten gesteckt. Allein zwischen 2010 und 2019 konnte der Preis pro Wattstunde Speicherleistung von einem US-\$ auf unter 16 Cent gesenkt werden. Doch im Grunde folgen gängige LIBs im Wesentlichen noch immer dem alten Bauplan: Die Kathode besteht aus einem Lithium-Metall(misch)oxid und die Anode aus Kohlenstoff. Beides ist getrennt durch einen dünnen Separator, und alle Zellkomponenten sind getränkt mit einem flüssigen Elektrolyten.

#### IMMER STÄRKER, IMMER BILLIGER

Um mehr aus dieser etablierten Technologie herauszukitzeln, setzt Evonik an praktisch allen Komponenten an. Das Ziel sind höhere Kapazität, längere Lebensdauer und verbesserte Sicherheit. Der Weg dorthin führt über

## »Das Prinzip der Lithium-Ionen-Batterie hat sich seit den 1990ern nicht verändert.«

FRANK MENZEL, DIRECTOR APPLIED TECHNOLOGY SOLUTIONS BEI EVONIK



Um 1850 kamen die ersten Blei-Batterien (System Blei-Schwefelsäure-Bleiodioxid) zum Einsatz – zum Beispiel bei telegrafischen Experimenten.

Rheinfelden. Dort, nahe der deutsch-schweizerischen Grenze, produziert Evonik nanostrukturierte Partikel aus Aluminiumoxid und Titandioxid. Sie könnten eine ganze Reihe von Problemen lösen, wie Dr. Daniel Esken erklärt. Er leitet die Anwendungstechnik Batteries am Standort Hanau und ist verantwortlich für die Batterieprojekte des Geschäftsgebiets Silica bei Evonik. „Eine der Herausforderungen ist die Reaktivität des Kathodenmaterials mit dem flüssigen Elektrolyten. An dieser Grenzfläche kommt es aufgrund der elektrochemischen Prozesse und der hohen Zellspannung zu ungewollten Reaktionen“, erklärt Esken. Das Ergebnis zeigt er auf einer elektronenmikroskopischen Aufnahme: Die einst runden Kathodenpartikel, die an mürbe Kek-



**Feine Sache** In der Anwendungstechnik in Hanau demonstriert Evonik, wie man Separatorfolien mit einer keramischen Beschichtung versieht.

se erinnern, haben sich nach 250 Ladezyklen partiell zersetzt, sind also regelrecht zerbröseln. Dadurch fällt die Gesamtkapazität der Batterie über die Zeit irreversibel ab.

#### WUNDERMITTEL ALUMINIUMOXID

Deutlich einschränken lässt sich dieser Effekt, indem man die Kathodenpartikel mit Aluminiumoxid oder Titandioxid beschichtet. Dazu wird das nanostrukturierte, oxidische Pulver mit dem Kathodenmaterial gemischt. Es legt sich um die Partikel und reagiert in der fertigen Batterie mit dem Elektrolyten zu einer Art Glasur, die zwar Ionen durchlässt, aber die Partikel am Zerfall hindert.

Was Aluminiumoxide für den Separator einer Lithium-Ionen-Batterie leisten, wird in einem brachialen Test deutlich: Hinter Panzerglas werden Nägel durch zwei Batteriezellen getrieben. Die erste explodiert, die zweite nicht – dank Aluminiumoxid im Separator. „Unser Material lässt sich beim Extrudieren in den Kunststoff einarbeiten oder aber als dünne keramische Beschichtung auf die Separatorfolie auftragen“, erklärt Esken. Gerade einmal rund 20 Mikrometer misst der poröse Separator, das ist weniger als der Durchmesser eines menschlichen Haars.

Mit der Hanyang-Universität in Seoul arbeitet Eskens Team außerdem daran, Aluminiumoxid im Elektrolyten einzusetzen – in Kombination mit Methacrylat

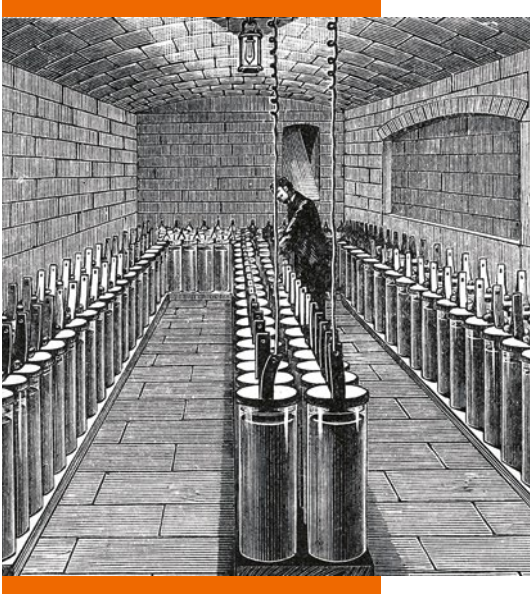
als funktionelle Gruppe auf der Oberfläche der Oxidpartikel. „Unser Material wird als keramische Schicht auf den Separator aufgebracht und polymerisiert nach dem Befüllen der Zelle mit Additiven im Elektrolyten“, sagt der Batterieexperte. Dadurch bildet sich ein Gel. Das macht die LIB-Zelle nicht nur auslaufsicher, sondern es kommt zu einer verbesserten Adhäsion zwischen den Zellkomponenten.

Unweit von Eskens Büro widmet sich Dr. Julia Lyubina vom Bereich Strategy & New Growth Business der Anode. Auch ihr hilft ein Produkt aus Rheinfelden, in diesem Fall ein ganz neues. „Heutige Anoden bestehen aus Graphit“, erklärt die Materialphysikerin. „Aber wir wissen, dass zusätzlich eingebautes Silizium in der Anode die Kapazität deutlich erhöhen kann.“ Das Problem: Siliziumpartikel blähen sich beim Beladen mit Lithium-Ionen um bis zu 300 Prozent auf. Das kann die Anode sprengen, vor allem aber zerbröseln die Partikel wieder. Zur Lösung dieses Problems hat Lyubinas Team ein neuartiges Kompositmaterial samt Produktionsprozess entwickelt. Die etwa 200 Nanometer großen Kugeln, die in der Anode verwendet werden, bestehen aus Silizium und Kohlenstoff, wobei im Kern vor allem Silizium steckt und zum Rand hin die Kohlenstoffkonzentration zunimmt. „Mit zehn Gewichtsprozent Silizium in der Anode können wir ihre Ionen-Kapazität verdoppeln“, erklärt Lyubina. Am Evonik-Standort →

Rheinfelden, wo man bis vor ein paar Jahren noch reines Silizium für die Solarindustrie herstellte, wurde eine bestehende Anlage für das neue Produkt umgerüstet. Sie soll noch in diesem Jahr in Betrieb gehen.

**ALTE TECHNIK MIT POTENZIAL**

Wenn es darum geht, noch mehr aus den aktuell verfügbaren Speichertechnologien zu holen, bleibt auch die Blei-Säure-Batterie nicht außen vor. Die klassische

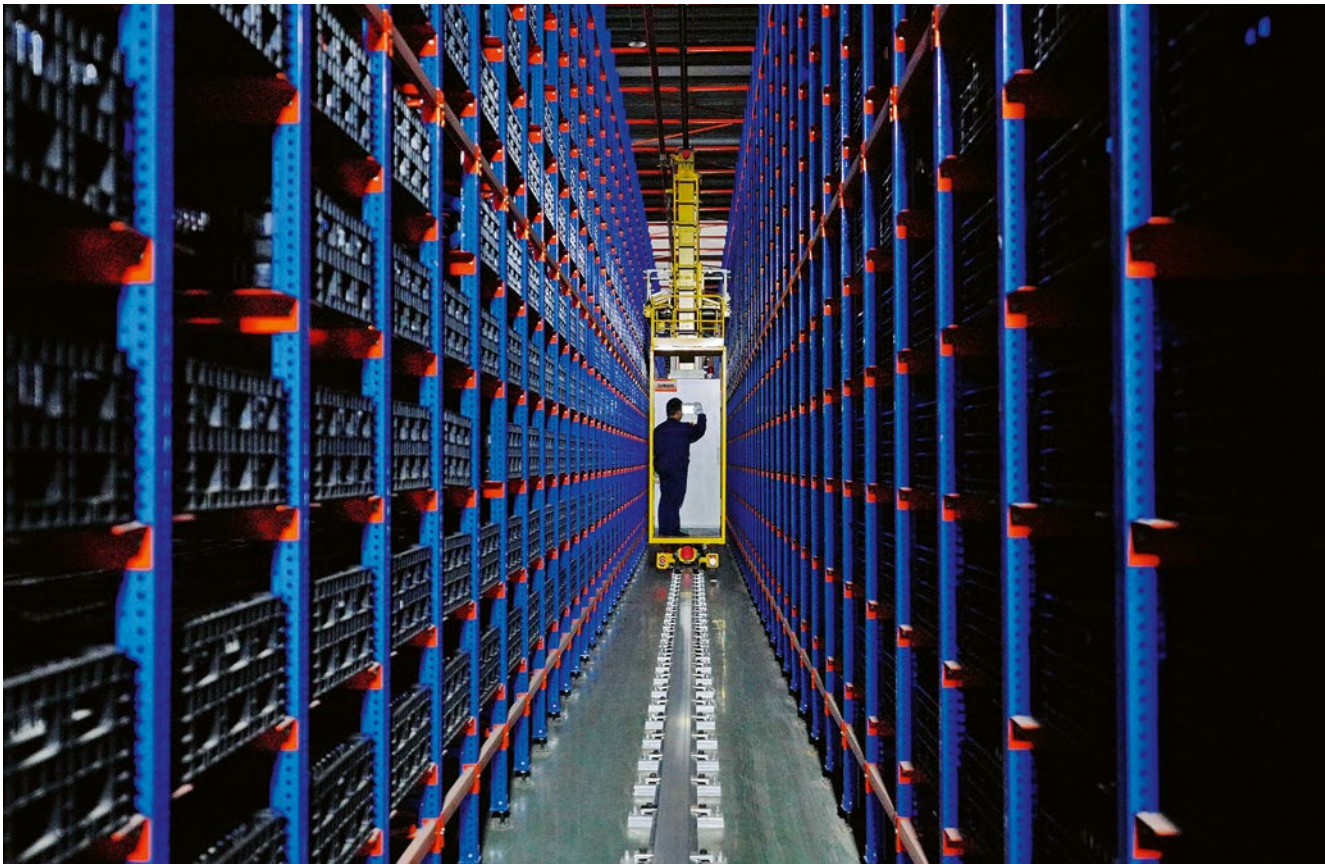


Bevor ein Netz aus Kraftwerken und Leitungen existierte, versorgten im 19. Jahrhundert Batterien Gebäude mit Strom – so auch im Pariser Rathaus.

„Autobatterie“ ist alles andere als tot. Gemessen an der verkauften Speicherleistung macht sie 70 Prozent des Weltmarkts aus. Jedes Jahr werden Blei-Säure-Batterien mit einer Speicherleistung von 400 Gigawattstunden verkauft. Tendenz: steigend. Drei Viertel davon sind in Autos mit Verbrennungsmotoren unterwegs.

Auch da wird ihnen mittlerweile viel mehr abverlangt als früher: Start-Stop-Systeme, die den Motor im Stillstand an der Ampel abschalten, erhöhen die Zahl der Ladezyklen deutlich und fordern die Batterie in sehr unterschiedlichen Ladezuständen. „Das mag die Blei-Säure-Batterie eigentlich gar nicht, aber moderne Weiterentwicklungen kommen damit gut klar“, sagt Dr. Jochen Settelein vom Fraunhofer Forschungs- und Entwicklungszentrum Elektromobilität Bayern (FZEB) in Würzburg. Der Experte für Nanostrukturen leitet dort die Arbeitsgruppe Blei-Säure-Technologie.

Für Hybrid- und Elektroautos ist diese Batterie zu schwer, die Energiedichte zu gering. Anderswo spielt das keine Rolle. Gabelstaplern etwa verleiht die Blei-Säure-Batterie sogar die nötige Hecklastigkeit, damit sie bei der Arbeit nicht nach vorn kippen. Vor allem aber bei stationären Elektrizitätsspeichern hat die vermeintliche Uralt-Technik viel Zukunftspotenzial. Je mehr natürliche Energiequellen wie Sonne oder Wind eingesetzt werden, desto mehr Energie muss in Spei-



Lager für Lithium-Ionen-Batterien: Der Internationalen Energieagentur zufolge könnten im Jahr 2030 bereits 44 Millionen neue Elektrofahrzeuge auf die Straße rollen.



## Akkus aus Plastik

Im Frühjahr 2019 hat Evonik eine Technologie vorgestellt, mit der sich Batterien aus Plastik auf fast jede beliebige Oberfläche aufdrucken lassen – hauchdünn biegsam und obendrein umweltfreundlich. Das Verfahren namens TaettooZ basiert auf sogenannten Redox-Polymeren. Das sind Kunststoffe, die ihre elektrochemischen Eigenschaften verändern können, indem sie über eine Oxidation Elektronen abgeben und umgekehrt auch wieder hinzugewinnen können. Die Polymerbatterien kommen ganz ohne Metall oder flüssige Elektrolyte aus, und der Logistik und Verpackungsindustrie eröffnen sie Möglichkeiten für Sensoren, die Lieferketten überwachen oder die Unversehrtheit von Lebensmitteln und Arzneien. Auch Wearables, also mobile Geräte, mit denen etwa Körperfunktionen gemessen werden können, sind ein interessanter Anwendungsbereich für die flexiblen Stromspeicher.

chern vorgehalten werden, um Schwankungen bei der Versorgung auszugleichen. Allein 2018 hat sich die weltweit installierte Speicherkapazität laut Zahlen der Internationalen Energie Agentur (IEA) nahezu verdoppelt. Der Großteil dieses Zuwachses entfällt auf elektrische Batterien und „behind-the-meter storage“, also individuelle Speicher von Verbrauchern.

Zunehmend setzen auch große Energieerzeuger auf elektrische Batterien als Zwischenspeicher, um Netzschwankungen und Diskrepanzen zwischen Angebot und Nachfrage zu nivellieren. Die IEA geht davon aus, dass sich die installierte Batteriekapazität für Netzwerke bis 2040 nahezu verzehnfachen wird.

Lithium-Ionen-Batterien sind zwar auch in diesem Segment gefragt. Ausgediente Batterien aus Elektroautos etwa können hier weiterverwendet werden. Doch Blei-Säure-Batterien spielen hier ihre Vorteile aus. Denn hohes Gewicht und sperrige Größe sind bei diesem Einsatz kaum relevant, der niedrige Preis dafür umso mehr. Pro Kilowattstunde kosten Blei-Säure-Batterien nur ein Drittel so viel wie Lithium-Ionen-Akkus. Sie kommen zudem ohne aufwendige Ladesteuerung und Kühlung aus und sind umweltfreundlich: Rund 99 Prozent der Materialien werden wiederverwertet. Der Wertstoffkreislauf für Blei ist seit Jahrzehnten etabliert. Beim Lithium ist man noch weit davon entfernt.

### EIN PROJEKT, SECHS PARTNER

Um diese Vorteile der Blei-Säure-Speicher für die Energiewende zu nutzen, fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2017 das Projekt „AddESun“ an Setteleins Fraunhofer-Forschungszentrum. Der Name wird ausgesprochen wie der des Strompioniers Thomas Edison und verweist auf „Sonne“, „Energie“ und „Additive“. Letztere liefert Evonik als einer von sechs Projektpartnern – vor allem nanostrukturierte Oxidpartikel aus Rheinfelden. →

## »Mit dieser Konfiguration sind wir auf dem Weg zu einem Leistungsplateau.«

CHRISTOS SARIGIANNIDIS, CHEMIEINGENIEUR BEI DER CREA VIS, ÜBER DIE GRENZEN DER LITHIUM-IONEN-BATTERIE-TECHNIK



Anwendungstechniker Herbert Habermann kontrolliert einen Separator, der beidseitig mit Aluminiumoxid beschichtet wurde.

## Preisgekrönte Batterieforscher

Dass die Lithium-Ionen-Batterie heute so gut für den Alltag taugt, ist drei Erfindern zu verdanken, die dafür im vergangenen Jahr mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet wurden.

Der britisch-amerikanische Festkörperchemiker **Stanley Whittingham** (Foto u. r.) experimentiert Ende der 1970er-Jahre für den Ölmulti Exxon mit Tantal-sulfid und Kalium. Er stellt fest, dass geschichtetes Sulfid in seinen Zwischenräumen Ionen aus einer Metall-Anode aufnimmt – Experten sprechen vom „Interkalieren“. Dabei entsteht eine elektrische Spannung zwischen Anode und Kathode. Whittingham ersetzt später das Tantal-sulfid in der Kathode durch leichteres Titansulfid und schwenkt beim Ionenspeicher in der Anode von Kalium um auf das weniger volatile Lithium. Whittinghams erste Zelle liefert bereits zwei Volt Spannung, ist aber hochexplosiv. Nach mehrmaligem Laden bildet das Metall Nadeln, sogenannte Dendriten. Stoßen die durch zur Kathode, kommt es zum Kurzschluss. Die örtliche Feuerwehr rückt damals so oft in Whittinghams Labor an, dass sie droht, ihm die Einsätze in Rechnung zu stellen. An der Universität Oxford nimmt kurz darauf der amerikanische Physiker **John Goodenough** (m.) Whittinghams Idee auf. Er vermutet, dass Oxide mehr Ionen aufnehmen können als Sulfide – und behält recht. Seine Kathode aus Lithium-Kobalt-Oxid liefert prompt vier statt zwei Volt. Außerdem erkennt Goodenough als Erster, dass die Batterien nicht im geladenen Zustand gefertigt werden müssen, sondern sich auch nach dem Zusammenbau laden lassen.

Den letzten und für die Sicherheit entscheidenden Baustein steuert der Japaner **Akira Yoshino** (l.) bei. Anders als seine Wegbereiter ist er bei einem Konzern mit eigener Elektroniksparte angestellt, der japanischen Asahi Kasei Corporation. Dort setzt man Anfang der 1980er-Jahre große Hoffnungen in portable Unterhaltungselektronik. Sony hatte kurz zuvor mit dem ersten Walkman einen Welterfolg gelandet. Yoshino entwickelt eine Anode aus Kohlenstoff, die Lithium-Ionen problemlos interkaliert. Ohne metallisches Lithium ist die Gefahr der Dendriten gebannt und der bis heute gültige Bauplan für die Lithium-Ionen-Batterie gefunden. 1991 bringt Sony die erste auf den Markt.

BERND KALTWASSER



„Mit den Additiven von Evonik, wie zum Beispiel Aluminiumoxid, können wir die Porosität der Elektroden erhöhen“, erklärt Settelein. Wie in den Poren eines Schwamms soll demnach der Elektrolyt in die additierten Elektroden effizienter eindringen und ein Maximum an reaktiver Fläche finden. Das ehrgeizige Ziel folgt der Kurzformel „3 mal 30“: 30 Prozent mehr Ladezyklen sollen möglich werden und so die Lebensdauer weiter erhöhen. Die Ladefähigkeit – also die Bereitwilligkeit, Strom aufzunehmen – soll um 30 Prozent steigen. Und weitere 30 Prozent sollen bei der Energiedichte, also der Speicherkapazität pro Kilogramm Material, herausgeholt werden.

Als er vor sieben Jahren beim FZEB anfing, sei er selbst skeptisch gewesen, wie viel Zukunft noch in der Blei-Säure-Batterie stecke, sagt Settelein. Umso faszinierender sei es nun zu sehen, was noch aus ihr herauszukitzeln sei.

### DIE NÄCHSTE AKKU-GENERATION

Dennoch wenden sich die Forscher bei Evonik auch neuen Technologien zu. Schließlich werden die theoretischen Grenzen zum Beispiel der etablierten Lithium-Ionen-Batterietechnik immer klarer sichtbar. „Mit dieser Konfiguration sind wir auf dem Weg zu einem physikalisch bedingten Leistungsplateau“, sagt Dr. Christos Sarigiannidis. Der Chemieingenieur arbeitet bei der Creavis, der zentralen Evonik-Innovationseinheit in Marl, an der nächsten Batteriegeneration. „Eine ganz große Hoffnung sind Feststoffbatterien“, sagt er. Diese Akkus kommen ohne flüssigen Elektrolyten aus, was sie sicherer und leistungsfähiger machen soll und sich zum Beispiel in größeren Reichweiten von Elektroautos widerspiegelt.

Erste Prototypen gab es schon in den späten 1950ern. Doch erst seit etwa fünf Jahren nährt sich die Technologie der Marktreife. Vom Batterie Giganten Panasonic bis hin zu Autobauern wie Toyota, Nissan, BMW und VW arbeiten zahlreiche Unternehmen an einer praxistauglichen Version der Feststoffbatterie.

Sogar einer der Erfinder der Lithium-Ionen-Batterie, der mittlerweile 97-jährige John Goodenough (siehe Kasten links), mischt mit: 2017 stellte sein Team von der Uni Texas eine Feststoffbatterie mit Glaspulver als Elektrolyt vor. Mindestens doppelt so leistungsstark





**Blaues Wunder** Lithium-Abbau, wie hier in der bolivianischen Uyuni-Salzebene, steht in der Kritik von Umweltschützern und Menschenrechtlern. Ein fünfköpfiges Team um Dr. Alessandro Dani arbeitet seit Kurzem bei Evonik an einer Technologie, um Lithium mithilfe einer selektiven Keramikmembran aus Altbatterien zurückzugewinnen. Die Idee mit dem Projektnamen „Blue Lithium“ wurde 2019 mit einem Evonik-internen Innovationspreis ausgezeichnet. Mit einem sechsstelligen Budget kann sich Dani nun ein Jahr lang ausschließlich um die Weiterentwicklung der Idee kümmern.

wie herkömmliche Lithium-Ionen-Batterien soll sie sein. Obendrein könnte das darin enthaltene Lithium womöglich durch Natrium ersetzt werden.

#### ENERGIE AUS DEM MEER

Die Natrium-Batterie ist ein lang gehegter Traum der Batterieindustrie. Lithium gibt es auf unserem Planeten zwar in großen Mengen, aber nicht überall. Australien und Chile sind heute die größten Produzenten. China hat sich gewaltige Vorkommen gesichert. Noch rarer ist Kobalt, von dem weltweit 60 Prozent in der Demokratischen Republik Kongo abgebaut werden – und das oftmals mittels Sklaverei und Kinderarbeit, wie Menschenrechtler beklagen. Natrium hingegen ist rund um den Globus verfügbar, zumindest in Küstenstaaten: Jeder Liter Meerwasser enthält im Schnitt zehn Gramm des Elements.

Für Evonik ist vor allem die Feststoffbatterie interessant. Gut zwei Dutzend feste Elektrolyte kommen in-

frage, die sich grob in anorganische Materialien, organische Polymere und Composite unterteilen lassen. „Die Krux bei jeder Feststoffbatterie ist die Balance zwischen der Ionen-Leitfähigkeit des Elektrolyts und den mechanischen Eigenschaften“, erklärt Creavis-Experte Sarigiannidis. Jedes der zuvor genannten Materialien besitzt Vor- und Nachteile. Zum Beispiel gibt es bisher kein Polymer-Elektrolyt mit guter Leitfähigkeit bei Raumtemperatur. Die Creavis arbeitet zusammen mit diversen Evonik-Geschäftseinheiten daran, unterschiedliche Feststoff-Elektrolyt-Technologien, basierend auf Evonik-Materialien, zu evaluieren.

Bis die nächste Batteriegeneration in Mobiltelefonen oder gar Elektroautos zum Einsatz kommt, wird allerdings noch einige Zeit vergehen. „Feststoffbatterien kommen wohl erst ab etwa 2030 am Markt an“, schätzt Sarigiannidis. Angesichts des bis dahin weiter wachsenden Speicherbedarfs werden aktuell verfügbare Technologien also noch für eine ganze Weile dominieren. —

# Voller Energie

Nur mithilfe leistungsstarker Speicher kann die Energiewende gelingen. Je nach Einsatzbereich stehen verschiedenste Technologien zur Verfügung. Doch wie funktionieren sie, wo kommen sie zum Einsatz, und welche Vor- und Nachteile haben sie? Ein Überblick über die wichtigsten Verfahren.

TEXT **LUCAS RIEMER**

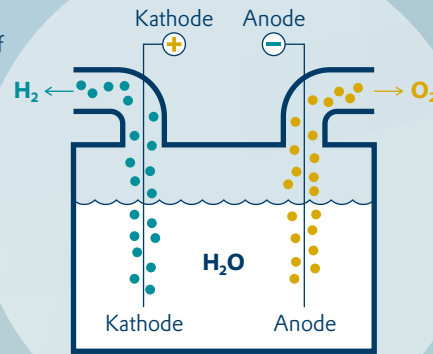
ILLUSTRATION **MAXIMILIAN NERTINGER**

## CHEMISCHE SPEICHER

Chemische Energiespeicherung funktioniert durch die Umwandlung von energiearmen in energiereiche Stoffe. So kann Wasser mittels **Elektrolyse** in Wasserstoff umgewandelt werden. Beim Power-to-Gas-Verfahren macht man sich dieses Prinzip zunutze, um aus überschüssigem Strom Wasserstoff zu produzieren.

**ANWENDUNGSBEREICHE** Speicherung von überschüssigem Strom aus erneuerbaren Quellen  
**VORTEILE** zeitlich unbegrenzte Speicherung, gut transportierbar

**NACHTEILE** Da Wasserstoff nur selten direkt genutzt werden kann, müssen weitere Umwandlungen (zum Beispiel in synthetisches Benzin) erfolgen, die den Wirkungsgrad verschlechtern.



Wirkungsgrad: **25–65%**

WASSERSTOFFELEKTROLYSE

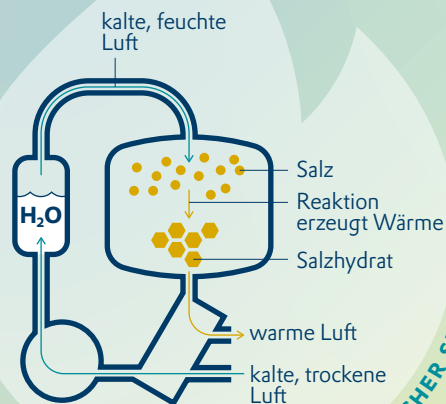
## THERMISCHE SPEICHER

Wärme wird meist in Flüssigkeiten oder Feststoffen gespeichert. Die mögliche Speicherdauer erstreckt sich von wenigen Stunden (Nachtspeicheröfen) bis hin zu Monaten (Wärmebatterien). **Sensible Wärmespeicher** verändern bei Be- und Entladung ihre Temperatur. Bei **Latent-Wärmespeichern** bleibt diese konstant, dafür ändert das Speichermedium den Aggregatzustand. **Thermochemische Speicher** halten Wärme mithilfe endo- und exothermer Reaktionen verfügbar.

**ANWENDUNGSBEREICHE** Brauchwassererwärmung, Gebäudebeheizung, solarthermische Kraftwerke

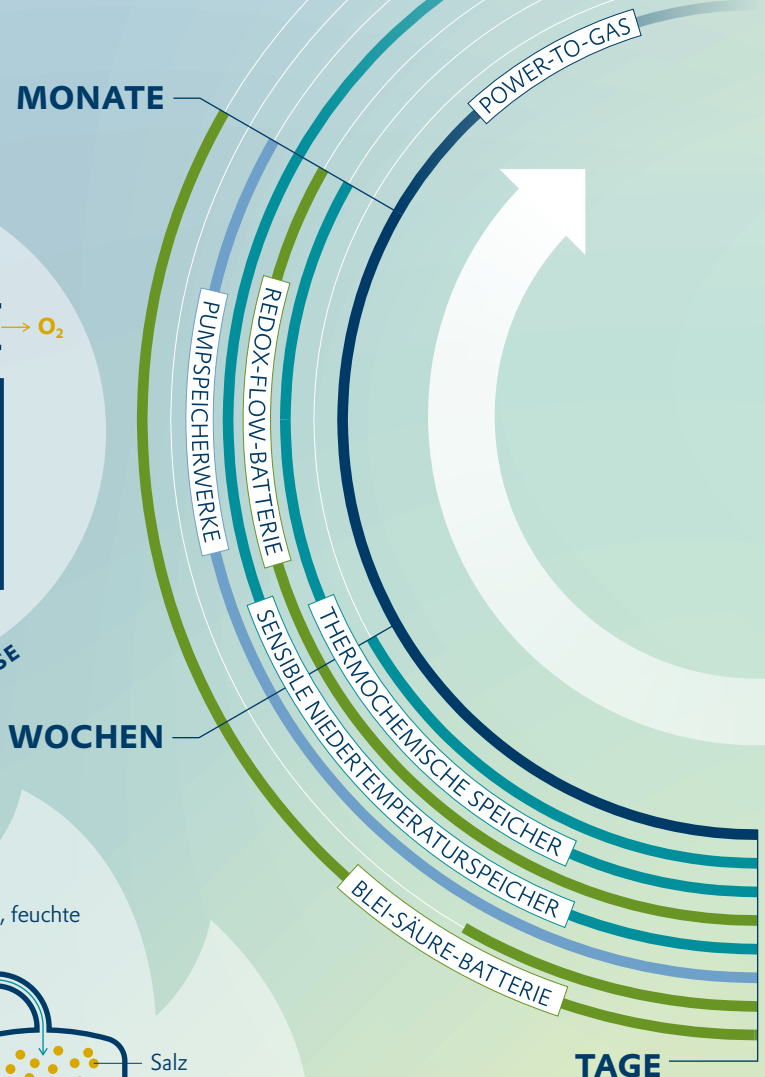
**VORTEILE** robuste Technik, geringe Kosten

**NACHTEILE** teils hohe Energieverluste durch Abwärme

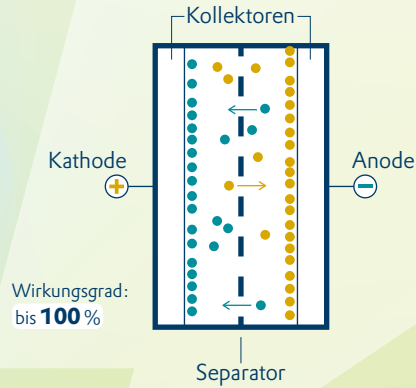
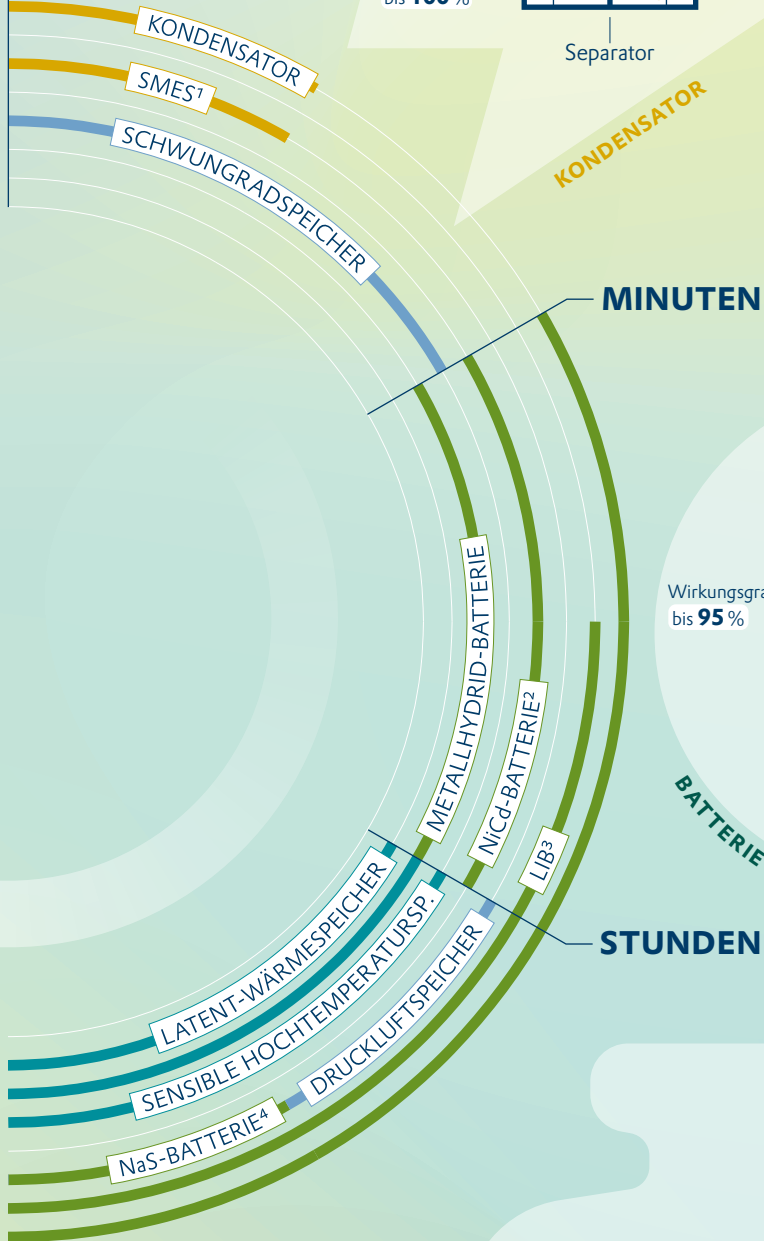


Wirkungsgrad: bis **100%**

THERMOCHEMISCHER SPEICHER



übliche Nutzungsdauer:  
**SEKUNDEN**



## ELEKTRISCHE SPEICHER

Kondensatoren speichern Strom mithilfe eines elektrischen Felds, moderne **Doppelschichtkondensatoren** sind dank ihrer porösen Oberfläche besonders effektiv. Bei Spulen wird die Energie in elektromagnetischen Feldern gespeichert. Nach diesem Prinzip arbeiten auch **supraleitende Magnetspeicher (SMES)**.

**ANWENDUNGSBEREICHE** kurzfristige Stabilisierung des Stromnetzes bei Spitzenlasten, Ergänzung zu Batterien bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen, Fahrradstandlichter (Doppelschichtkondensatoren)

**VORTEILE** sehr hoher Wirkungsgrad, sehr oft aufladbar, Energie schnell verfügbar

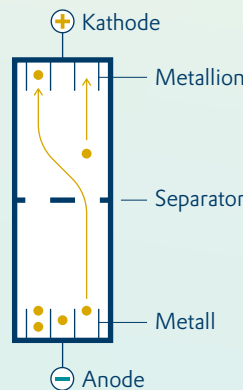
**NACHTEILE** hohe Selbstentladung, Kühlung auf unter  $-200$  Grad Celsius nötig (SMES)

**MINUTEN**

## ELEKTROCHEMISCHE SPEICHER

In Batterien und Akkus sind Elektroden per Elektrolyt verbunden. Beim Entladen wird chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Bei Akkus ist diese Reaktion umkehrbar. Während **Blei-Säure-** und **Lithium-(Li)-Ionen-Akkus** bei moderaten Außentemperaturen funktionieren, werden **Natrium-Schwefel-Akkus** erst bei über  $200$  Grad Celsius aktiviert. **Redox-Flow-Batterien** nutzen Tanks als Speicher.

Wirkungsgrad: bis 95%



**ANWENDUNGSBEREICHE** Elektrofahrzeuge und -kleingeräte (vor allem Li-Ionen-Akkus), Ausgleich von Netzschwankungen

**VORTEILE** hoher Wirkungsgrad, schnelle Reaktionszeit, niedrige Selbstentladung

**NACHTEILE** Brandgefahr (Li-Ionen-Akkus), kosten- und wartungsintensiv (Redox-Flow-Batterien)

**STUNDEN**

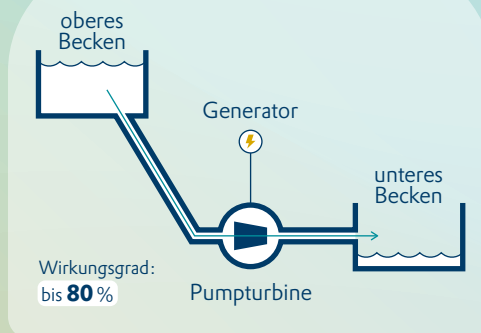
## MECHANISCHE SPEICHER

Durch Umwandlung in andere Energieformen lässt sich Strom langfristig speichern. Beispiele hierfür sind **Druckluftspeicher** oder **Schwungradmassenspeicher**. **Pumpspeicherkraftwerke** machen weltweit den größten Teil aller Speicherkapazitäten aus.

**ANWENDUNGSBEREICHE** Ausgleich von Spitzenlasten im Stromnetz, Sicherung der Stromversorgung zum Beispiel in Krankenhäusern (Schwungradspeicher)

**VORTEILE** relativ günstig, große Energiemengen können lange gespeichert werden (Pumpspeicher), kurze Zugriffszeiten (Schwungradspeicher)

**NACHTEILE** Eingriffe in die Landschaft (außer Schwungradspeicher), hohe Selbstentladung (Schwungradspeicher)



PUMPSPEICHERWERK

1 SMES Supraleitender Magnetischer Energiespeicher

2 NiCd-BATTERIE Nickel-Cadmium-Batterie

3 LiB Lithium-Ionen-Batterie

4 NaS-BATTERIE Natrium-Schwefel-Batterie



# MAN NEHME ETWAS SALZ

Forscher im niederländischen Eindhoven tüfteln an einem genial einfachen Wärmespeicher für die Energiewende. Die wichtigste Zutat steckt auch in Lebkuchen.

TEXT **TOM RADEMACHER** FOTOGRAFIE **ROBERT EIKELPOTH**

# »Wir speichern überschüssige Wärme im Keller.«

OLAF ADAN, LEITER HEAT-INSYDE

**O**laf Adan hat viele Jobs, aber keinen Schreibtisch. „Das wäre Unsinn, ich pendle ja andauernd“, sagt der Physiker. Sein Laptop klappt Adan dort auf, wo er gerade zu tun hat: meist in den Labors der Technischen Universität (TU) Eindhoven oder im TNO-Gebäude am anderen Ende der Stadt. TNO steht für Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, zu Deutsch: Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung. Es ist so etwas wie das niederländische Gegenstück zur deutschen Fraunhofer-Gesellschaft, und Adan leitet dort den Forschungsbereich Materialwissenschaft. An der TU Eindhoven ist er Professor für Angewandte Physik, Fachbereich „Transport in porösen Medien“. Mit Hilfe ausgedienter MRT-Geräte, die er für seine Zwecke frisiert, schaut er dort zum Beispiel in Betonbauteile hinein. „So verstehen wir etwa, warum Tunneldecken bei Bränden regelrecht explodieren.“

Besonders stark beansprucht Olaf Adan jedoch derzeit seine Tätigkeit als Leiter von Heat-Insyde. Das Entwicklungskonsortium wurde im vorigen Herbst von elf internationalen Projektpartnern – darunter Evonik – gegründet und wird von der EU mit knapp sieben Millionen € gefördert.

## SONNENENERGIE FÜR KALTE TAGE

Für Heat-Insyde ist Adan in halb Europa unterwegs, in Polen, Belgien, Frankreich und Deutschland. Kürzlich reiste er auch nach Lülldorf bei Köln, wo Evonik Materialien produziert, die bei Adans Projekt eine wichtige Rolle spielen. Mit seinem Team arbeitet der Wissenschaftler an einer revolutionären Technologie, mit deren Hilfe sich Wärmeenergie für Gebäude verlustfrei speichern lassen soll – und zwar solange man will. Sie könnte den Einsatz von Solarthermie effizienter und verlässlicher machen. „Wenn die Sonne scheint, speichern wir überschüssige Wärme im Keller für kalte, graue Tage“, erklärt Adan. Und zwar nicht nur in einzelnen Wohnhäusern. Ganze Siedlungen und sogar große Fernwärmeproduzenten könnten damit Spitzen in Angebot und Nachfrage abfedern.

Das Heat-Insyde-Projekt ist am Südwestrand von Eindhoven im sogenannten High Tech Campus angesiedelt. Binnen zwei Jahrzehnten haben sich auf dem

ehemaligen Philips-Gelände rund um einen künstlichen See rund 200 Start-ups, Konzerne und Forschungsinstitute angesiedelt. Fast 40 Prozent aller neuen niederländischen Patentanmeldungen haben hier ihren Ursprung. In einem kleinen Konferenzraum im zweiten Stock steht die erste funktionsfähige Wärmebatterie der Forscher. Sie speichert Energie auf thermochemische Weise und fußt auf den Erkenntnissen zweier Vorgängerprojekte, an denen TNO ebenfalls beteiligt war, darunter eines in Polen.

Dort musste vor ein paar Jahren noch ein Schiffscontainer per Kran in den Garten eines Einfamilienhauses gehievt werden, um genügend Speicherkapazität bereitzustellen. Der neue Demonstrator ist deutlich kompakter. Auf Rollen lässt er sich bequem durch eine Zimmertür schieben. Vier Komponenten reichen im Wesentlichen: ein Wärmetauscher, ein Ventilator, ein Verdampfer und ein Reaktorbehälter.

„Die Einfachheit ist der größte Charme der Batterie“, erklärt Adan. Der Clou steckt im Reaktor. Er enthält ein Bett aus Salzkörnern, durch das der Ventilator heiße, trockene Luft bläst. Die nötige Energie liefern zum Beispiel Sonnenkollektoren auf dem Dach eines Hauses. Theoretisch lässt sich auch jede Stromquelle dafür nutzen. Die Luft erhitzt das Salz, es trocknet aus und gibt Wasserdampf an den Luftstrom ab. Der Kondensator holt die Feuchtigkeit aus der Luft, bis das Salz komplett dehydriert ist. Die Batterie ist nun geladen. „Die Energie bleibt im Salz, solange ich es trocken halte“, erklärt Adan. „Um sie wieder abzurufen, muss ich nur befeuchtete Luft hinzufügen.“ →

Womit Olaf Adan sein Salz beschichtet, ist geheim.





Pim Donkers hat zum thermochemischen Prinzip hinter der Wärmebatterie promoviert. Pottasche (u. r.) identifizierte er als perfektes Speichermedium.

In der Wärmebatterie übernimmt diesen Part wieder der Ventilator, indem er die Luft – diesmal kalt und feucht – durch das trockene Salzbett bläst. Das Salz zieht die Feuchtigkeit aus dem Luftstrom und erhitzt ihn dabei auf über 60 Grad Celsius. Die Wärme kann für Heizung und Warmwasserbereitung genutzt werden. Das zugrunde liegende Prinzip ist seit Ewigkeiten bekannt: Wenn bestimmte Salzkristalle Wasser aufnehmen, geben sie dabei Wärme ab. Adans Mitarbeiter Pim Donkers demonstriert das gern, indem er Besuchern ein Glas mit Salzkügelchen in die Hand drückt.

Dann gibt er einen kräftigen Spritzer aus seiner Wasserflasche dazu. Sofort zischt es, das Wasser verschwindet im Salz, und das Glas wird heiß. Über diesen Überraschungseffekt hat Donkers vor fünf Jahren seine Doktorarbeit geschrieben. Dazu hat er fast alle verwendbaren Salze selbst untersucht. „Mein persönlicher Favorit waren die Kupfersalze“, sagt er. „Aber die sind leider viel zu teuer.“ Andere erwiesen sich als instabil, korrosiv oder bildeten gar giftige Gase. Alles nichts für eine Anlage, die später mal jahrzehntelang im Keller eines Einfamilienhauses stehen soll.

#### DIE WICHTIGSTE ZUTAT: POTTASCHE

Letztlich landete Donkers bei einem Salz mit sehr hoher Energiedichte, das sich bei den im Wohnbereich üblichen Temperaturniveaus bestens hydrieren und dehydrieren lässt. Es ist stabil, harmlos im Umgang und obendrein noch vergleichsweise günstig. Die Rede ist von Kaliumcarbonat, auch bekannt als Pottasche. Pottasche kommt in unzähligen Anwendungen zum Einsatz – von der Kakaoverarbeitung bis zur Herstellung von Kristallglas. Zu den bekanntesten Einsatzgebieten zählt wohl die Lebkuchenproduktion, wo Pottasche als

Backtriebmittel dient. „Das zeigt schon, wie harmlos das Material ist“, sagt Georg Dürr. Er arbeitet in der Anwendungstechnik bei Evonik in Lülsdorf. Dort stellt man seit 70 Jahren Pottasche her. Mit einer Jahreskapazität von rund 60.000 Tonnen ist Evonik einer der größten Produzenten weltweit. Gewonnen wird Pottasche aus Kalilauge, die Evonik selbst in einem besonders ressourcenschonenden Elektrolyseverfahren herstellt. Als Grundstoff dient Kaliumchlorid, das wie gewöhnliches Kochsalz auch in Europa abgebaut wird.

#### BAUSTEIN FÜR DIE ENERGIEWENDE

Während Hobbybäcker Pottasche im 15-Gramm-Beutel im Supermarkt bekommen, verkauft Evonik sie selbst erst ab einer Lkw-Ladung. Aufmerksam wurde Dürr auf Heat-Insyde dann auch nur, weil ihn die ungewöhnliche Anfrage eines Zwischenhändlers erreichte. „Die wollten kleine Produktproben und stellten ganz ungewöhnliche Fragen“, erinnert sich der Evonik-Manager. Ein paar E-Mails und Telefonate später hatte er Olaf Adan selbst am Hörer. Kurz darauf war Dürr im Auto unterwegs ins zwei Stunden entfernte Eindhoven. Eine kurze Überschlagsrechnung hatte ihn und seine Chefs aufhorchen lassen: Allein in Deutschland sind laut Bundesverband Solarwirtschaft knapp 2,4 Millionen Solarthermieanlagen im Einsatz, zuletzt kamen 71.000 in einem Jahr dazu. „Nur ein Prozent davon wäre schon ein ordentlicher Markt“, sagt Dürr. „Da hat man dieses Produkt, das zwar unheimlich vielseitig ist, aber halt auch bestens bekannt und vermeintlich zu Ende entwickelt. Und plötzlich tut sich nicht nur ein





Der High Tech Campus am Stadtrand von Eindhoven ist Heimat zahlreicher Technologiefirmen, darunter auch Heat-Insyde.

solches Marktpotenzial auf, sondern man liefert möglicherweise auch einen entscheidenden Baustein fürs Gelingen der Energiewende.“

#### PROTOTYPEN IN SIEBEN HÄUSERN

Bis es so weit ist, bleibt einiges zu tun. Zwar hat sich die Pottasche von Evonik dank ihres hohen Reinheitsgrads inzwischen als besonders geeignet erwiesen. Doch aus dem Demonstrator muss noch ein marktfähiges Produkt werden. Das soll nicht größer sein als eine Waschmaschine und noch einfacher zu bedienen. „Mehr als einen Knopf zum An- und Ausschalten braucht es eigentlich nicht“, sagt Olaf Adan. Die hohe Energiedichte der Pottasche, gepaart mit dem simplen Aufbau, macht die Technologie besonders attraktiv: „Wir rechnen damit, dass unsere Wärmebatterie bei gleicher Leistung nur etwa halb so groß wird wie heutige Speicher auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien und weniger als ein Zehntel kostet“, sagt Adan. Andere gängige Speicher, die Wärme etwa in isolierten Wassertanks vorhalten, sind zwar ähnlich günstig, aber etwa zehnmal so groß und weniger effektiv. Mit nur einem einzigen beweglichen Teil, dem kleinen Ventilator, wäre der Heat-Insyde-Speicher zudem geräuscharm und wenig wartungsanfällig. Und das Salz selbst ist zu 100 Prozent recycelbar.

Wie so oft steckt hinter der genial simplen Technologie eine Menge wissenschaftlicher Arbeit. Um das Salz über Jahrzehnte und Hunderte Ladezyklen stabil zu halten, wird es zu einem Komposit verarbeitet. Deswegen Zusammensetzung ist ein strengstens gehütetes Betriebsgeheimnis. Außerdem tüfelt man noch am optimalen Aufbau des Betts und der Partikelgröße, um den Luftstrom möglichst effektiv durch den Reaktor zu leiten. Eine weitere Doktorarbeit an Adans Fakultät be-



Olaf Adan (l.) und sein Team kooperieren mit Evonik. Der Konzern stellt in seinem Werk in Lülldorf Pottasche her, für die Georg Dürre neue Anwendungsbereiche sucht.

schäftigt sich mit Dotierungen, also dem gezielten Einbau von Fremdstoffen in die Salzkristallstruktur, mit denen die Aufnahmegeschwindigkeit und die Speicherleistung noch gesteigert werden könnten.

Die Parameter des Systems folgen einem typischen Anforderungsprofil: „Länger als 12 bis 14 Tage muss man in unseren Gefilden die Solarthermie praktisch nie überbrücken“, sagt Donkers. Um zu beweisen, dass ein Vierpersonenhaushalt im Zeitraum von zwei Winterwochen mit dem Heat-Insyde-Speicher gut über die Runden kommt, sollen spätestens im Sommer 2022 sieben Häuser mit seriennahen Prototypen ausgestattet werden – in Frankreich, Polen und in den Niederlanden. „Wir können uns schon jetzt vor Bewerbern kaum retten“, sagt Adan, eher er sich verabschiedet und mit dem Laptop unterm Arm zum nächsten Termin an der Uni aufbricht. —

**Zauberwürfel** IBMs Q System One ist der erste schaltkreisbasierte, kommerzielle Quantencomputer der Welt. Das System ist in einem luftdichten Glaswürfel untergebracht.



# DIE SIMULATION DER WELT



# Quantencomputer eröffnen Forschern ungeahnte Möglichkeiten. Erstmals könnte es gelingen, selbst komplexe Moleküle exakt nachzubilden – und völlig neue Materialien zu schaffen.

TEXT **BJÖRN THEIS**

**D**ass wir heute selbst komplexe Rechnungen im Bruchteil einer Sekunde lösen können, verdanken wir zwei britischen Mathematikern – einem Mann und einer Frau. Mitte des 19. Jahrhunderts legten Charles Babbage und Ada Lovelace mit ihrem Konzept der Analytica Engine die theoretische Grundlage für den modernen Computer. Zu ihren Lebzeiten wurde diese Maschine nicht gebaut. Realisiert wurden vergleichbare Rechner rund 100 Jahre später: 1937 präsentierte Konrad Zuse den Computer Z1 – den ersten frei programmierbaren Binärcomputer der Welt. Seither wächst die Leistung unserer Rechner exponentiell. Davon profitiert nicht zuletzt die Wissenschaft. Ohne Computerunterstützung wäre die moderne Forschung heutzutage größtenteils unmöglich.

Doch selbst Supercomputer stoßen an ihre Grenzen, was ihrem binären Arbeitsprinzip geschuldet ist. Unsere Welt besteht eben nicht nur aus Nullen und Einsen. Max Planck verdanken wir die Erkenntnis, dass wir in einer Quantenwelt leben, in der Energie nicht in jeder beliebigen Größe existieren kann, sondern nur in bestimmten Einheiten. Ein Molekül lässt sich quantenphysikalisch mit einem binär arbeitenden Computer nicht exakt simulieren.

## MOLEKÜLEN AUF DER SPUR

Richard Feynman war sich dieses Problems bewusst und wies daher 1981 am Massachusetts Institute of Technology darauf hin, dass nur ein Quantencomputer zu solch einer Simulation in der Lage wäre. Anstelle von Bits, der klassischen Informationseinheit binärer Rechner, verwendet der Quantencomputer Qubits. Während ein Bit da-



**Björn Theis** ist Head of Corporate Foresight der Evonik Innovationseinheit Creavis. Seine ELEMENTS-Kolumne erscheint regelmäßig auf [elements.evonik.de](http://elements.evonik.de).

rauf beschränkt ist, den Wert 0 oder 1 anzunehmen, kann ein Qubit beide Werte annehmen – und weitere dazwischen. Dieses Prinzip ist als Superposition bekannt. Befinden sich Qubits in einem solchen Zustand, können sie miteinander verschränkt werden, sie beginnen zu kommunizieren. Quantenalgorithmen, die Software der Quantencomputer, machen sich dies zunutze, sodass komplexe Aufgaben parallel bearbeitet werden können.

Zum Beispiel bei der Simulation eines Moleküls: Ein Quantencomputer kann die miteinander verflochtenen Zustände der Elektronen des Moleküls analysieren, indem er seine eigenen Quantenbits in superponierte und verschränkte Zustände bringt. Das ermöglicht es, ungewöhnlich große Informationsmengen simultan zu verarbeiten. Ein klassischer Computer muss dagegen die

nötigen Rechenschritte nacheinander abarbeiten. Und das kann dauern: Für die exakte Simulation des Hormons Insulin bräuchte ein moderner, binär arbeitender Supercomputer länger als zehn Milliarden Jahre.

**DREI MINUTEN STATT 10.000 JAHRE**  
Feynmans Gedankenexperiment beginnt nun Wirklichkeit zu werden: 2016 gab der US-Datenkonzern Google bekannt, dass er das Wasserstoffmolekül mithilfe eines Quantencomputers exakt simuliert hat, 2017 simulierte der Computerriese IBM Lithiumhydrid und Berylliumhydrid. Im Oktober 2019 verkündete Google nun, man habe „Quantum Supremacy“ erreicht: Googles Rechner, ausgestattet mit einem Chip, auf dem 53 Qubits arbeiten, führte in gut drei Minuten eine Berechnung durch, für die ein klassischer Computer 10.000 Jahre benötigt hätte.

Internetkonzerne wie Alibaba, Google, IBM, Intel, Microsoft oder Rigetti investieren ebenso wie staatliche Forschungseinrichtungen Milliarden in die Entwicklung von Quantencomputern, versprechen die Wunderrechner doch Durchbrüche bei der Entwicklung neuer Katalysatoren, Medikamente und Materialien. Bis Quantencomputer solch praktische Aufgaben lösen können, bedarf es Forschern zufolge jedoch noch fünf bis zehn Jahre zusätzlicher Entwicklung. Das Corporate-Foresight-Team der Creavis beobachtet diese Fortschritte kontinuierlich im Rahmen des Fokusthemas Digital Futures. So lässt sich abschätzen, wie und wann Evonik die Technologie zum eigenen Vorteil nutzen kann. —

IN MEINEM ELEMENT



# »Arsen löst das Rätsel um verstecktes Gold«



**Dr. Christof Kusebauch** (36) ist Wissenschaftler am Deutschen Geoforschungszentrum in Potsdam. Als Geochemiker untersucht er den Aufbau der Erdkruste. Ein Schwerpunkt ist die Erforschung von Goldvorkommen, etwa im Pyrit.

PROTOKOLL ANNA SCHRIEVER  
FOTOGRAFIE JONAS HOLTHAUS

**O**b im US-Filmklassiker „Arsen und Spitzenhäubchen“ oder in Friedrich Schillers Drama „Kabale und Liebe“ – Arsen ist vor allem als tödliches Gift bekannt. Dabei hat es wie viele Wirkstoffe in geringen Konzentrationen heilende Wirkung; bis heute wird es daher in Arzneimitteln verwendet. Bekannt ist das Element schon seit dem Altertum, in der Natur kommt es in unterschiedlicher Konzentration praktisch überall im Boden vor. Meine Kollegen und ich haben es nun als das entscheidende Element bei der Entstehung großer Goldvorkommen ausgemacht.

In der Lagerstätte Carlin im US-Bundesstaat Nevada zum Beispiel liegt das Edelmetall nicht als Nuggets oder Golderz vor,

sondern verbirgt sich fein verteilt in Pyritkristallen. Pyrit ist ein Eisensulfid, das auch als Katzensgold bekannt ist. Das Problem: Das im Katzensgold verborgene Gold lässt sich erst durch chemische Analysen nachweisen, sodass neue Goldlagerstätten dieses Typs nur schwer zu finden sind. Lange blieb unklar, wie die goldhaltigen Pyrite entstanden sind und vor allem, wie sie sich erkennen lassen.

Genau dieses Rätsel haben wir nun gelöst. Für unsere Studie bildeten wir die Bedingungen bei der Entstehung des Pyrits

im Labor nach. Wir ließen heiße, schwefelsäurehaltige Lösungen durch eisenreiche Karbonate strömen und erzeugten dadurch Pyritkristalle. Den heißen Lösungen setzten wir unterschiedlich hohe Konzentrationen an Gold und Arsen zu. Wir stellten fest: Je höher die Arsenkonzentration im Pyrit, desto mehr Gold kann sich einlagern. Das Arsen dient dem Gold gewissermaßen als Wegbereiter: Durch das Arsen wird der Pyrit so verändert, dass sich Gold leichter anreichern kann.

Drei Jahre Forschungsarbeit stecken in dieser Studie. Die besondere Herausforderung bestand darin, die Natur im Labor künstlich nachzubauen. Die Ergebnisse sind hoch relevant, denn für Gold steigt die Nachfrage weiter an, etwa in der Elektroindustrie. Verstehen wir, wie die Lagerstätten entstanden sind, können wir sie auch besser aufspüren. Da wir nun gezeigt haben, dass Arsen wichtig für die Ansammlung von Gold ist, kann es uns als Hinweis auf weitere Goldvorkommen dienen.

## Impressum

---

**HERAUSGEBER** Evonik Industries AG | Christian Schmid | Rellinghauser Straße 1–11 | 45128 Essen | **BERATUNG UND KONZEPT** Manfred Bissinger | **CHEFREDAKTION** Matthias Ruch (V.i.S.d.P.) | **CHEFIN VOM DIENST** Inga Borg, Deborah Lippmann | **TEXTCHEF** Christian Baulig, Jörg Wagner | **ONLINE-REDAKTION** Nicolas Garz, Nadine Nösler | **BILD-REDAKTION** Nadine Berger | **LAYOUT** Wiebke Schwarz (Art Direction), Magnus Wiedenmann (Grafik) **ANSCHRIFT DER REDAKTION** KNSKB+ | An der Alster 1 | 20099 Hamburg | **DRUCK** Neef+Stumme premium printing, Wittingen | **COPYRIGHT** © 2020 by Evonik Industries AG, Essen. Nachdruck nur mit Genehmigung der Agentur. Der Inhalt gibt nicht in jedem Fall die Meinung des Herausgebers wieder. Fragen zum Magazin ELEMENTS: Telefon +49 201 177-3315 | E-Mail [elements@evonik.com](mailto:elements@evonik.com) | **BILDNACHWEISE** Titelfoto: Christian Lohfink/Upfront | S. 3 Kirsten Neumann | S. 4–5 Robert Eikelpoth, Norman Ng | S. 6–7 Ty Cole | S. 8–9 Deepol by plainpicture/Cameron Davidson, Mark Simons/Purdue Media, privat; Illustration: KNSKB+ | S. 10–13 Christian Lohfink/Upfront, BMW Group (2), Bastian Werner/Upfront; Illustrationen: KNSKB+ | S. 14–15 Meditool, Cubicure, Castor technologies LTD, Words at Work, Minneapolis | S. 16–18 Volkswagen AG, Bastian Werner/Upfront, Harald Reusmann, Local Motors by LMI, EOS | S. 19 Illustration: Maximilian Nertinger | S. 20–23 Ramon Haindl | S. 24–27 Norman Ng | S. 28–31 Christian Lohfink/Upfront; Illustrationen: Anton Hallmann/Sepia, Maximilian Nertinger | S. 32 Bernd Brundert/Evonik | S. 34–41 Mauritius images/Michael Abid, Getty Images, Chris Steele-Perkins/Magnum Photos/Agentur Focus, ddp/insight media, mauritius images/Urs Flüeler | S. 42–49 Christian Lohfink/Upfront, Getty Images (2), Universal Images Group via Getty Images (2), Xinhua News Agency/eyevine/laif, Stefan Wildhirt, picture alliance/MAXPPP, The New York Times/ Redux/laif | S. 50–51 Illustration: Maximilian Nertinger | S. 52–54 Robert Eikelpoth, picture alliance/Pro Shots | S. 56 IBM | S. 58 Jonas Holthaus

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

# Wer immer tut, was er schon kann,

... bleibt immer das, was er schon ist, sagte einst Henry Ford. Der US-Amerikaner wagte sich folgerichtig zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf unbekanntes Terrain – mit einer innovativen Produktionsmethode, mit der die industrielle Herstellung von Autos revolutioniert wurde: dem Fließband.

Auch heute gibt es Menschen wie Henry Ford, die nicht bleiben wollen, was sie schon sind. Diese Forscher und Entwickler treiben die nächste Stufe der industriellen Produktion voran: den 3D-Druck, Schwerpunkt der neuen ELEMENTS-Ausgabe. Eine Technologie, die die Art und Weise, wie wir Dinge herstellen, grundlegend verändert – und ungeahnte Chancen eröffnet.

1/2020 **3D-Druck**