

Sommer 2022

D € 8,20 | A € 8,20 | CH CHF 14,50  
übrige Euroländer € 8,90 | E 2164 E

# bild der Wissenschaft

Spezial

## HELGOLAND

Das Windgas-Megaprojekt  
inmitten der Nordsee

## WÜSTENSTROM

Kommt Energie für Europa  
per Tankschiff aus Afrika?

## KERNFUSION

Mit künstlichem Sonnenfeuer  
gegen die Energieprobleme

## MOBILITÄT

Wo das Fahren oder Fliegen  
mit Wasserstoff Zukunft hat

# Wasserstoff

Der Schlüssel zur Energiezukunft





bild der wissenschaft

# drei Monate testen!



## Mini-Abo

Drei Ausgaben mit 35% Rabatt  
... und **GRATIS** Geschenk.

### **bild der wissenschaft Spezial** **Rätselhafte Krankheiten, neue Therapien**

Kaum ein Arzt weiß, woran die Betroffenen leiden, kommen sie mit rätselhaften oder seltenen Krankheiten in die Praxis. Nur wenige Mediziner können die Symptome richtig deuten, oft gibt es überhaupt kein passendes Medikament.

Wer wissen will, welche rätselhaften Syndrome lebende Leichen, Menschen mit gebrochenen Herzen oder Mondscheinkinder haben, wird nach diesem Spezial vieles ganz anders sehen.

In diesem Sonderheft erfahren Sie alles über bahnbrechende Therapien bei Volksleiden wie der Makuladegeneration, chronischem Juckreiz oder Lernstörungen bei Kindern.

Ihr  
Geschenk!



Jetzt die nächsten drei Ausgaben hier bestellen!

Im Mini-Abo zum Vorzugspreis von 15,90 €

**bild der wissenschaft**  
Leserservice  
Postfach 810580  
70522 Stuttgart

Phone +49 711 7252-201  
bdw@zenit-presse.de  
oder unter  
[www.direktabo.de](http://www.direktabo.de)

*Wissenschaft in Bestform*



### Liebe Leserinnen und Leser,

früher, im Chemieunterricht, flößte mir die rote Stahlflasche mit dem Wasserstoff immer großen Respekt ein. Denn ich wusste, welchen Rums es machen kann, wenn Wasserstoff mit Sauerstoff zusammenkommt und ein Funken eine sogenannte Knallgasreaktion zündet.

Heute steht der Wasserstoff für Hoffnung – nicht nur bei mir, sondern bei vielen Menschen. Denn das Gas aus dem leichtesten aller chemischen Elemente hat das Zeug, unser Energiesystem auf ein neues – klimaschonendes – Fundament zu stellen. Das ist inzwischen weithin bekannt, und die Erwartungen an den vielseitig einsetzbaren Energieträger sind gewaltig.

Doch das Energiesystem, in Deutschland und anderswo, lässt sich nicht von heute auf morgen einfach so auf Wasserstoff umstellen. Dem stehen noch hohe Hürden im Weg – sowohl technischer Art als auch bei der Frage der Wirtschaftlichkeit und Bezahlbarkeit. Das gilt heute noch genauso wie vor einigen Jahrzehnten, als es auch schon Ansätze gab, eine „grüne“ Wasserstoff-Wirtschaft zu entwickeln und zu etablieren. Daraus ist bekanntermaßen bislang nichts geworden. Wie stehen die Chancen, dass der Kraftakt diesmal gelingt?

Was Wissenschaftler und Ingenieure an etlichen Universitäten und Forschungsinstituten sowie bei einer ganzen Reihe von Unternehmen in Fragen der Herstellung, Verteilung und Nut-

zung von Wasserstoff leisten, stimmt mich zuversichtlich.

Mit diesem bild der wissenschaft Spezial geben wir Ihnen einen Überblick über die wichtigsten Fragen und Aspekte rund um den Hoffnungsträger Wasserstoff. Da wir die Entwicklungen in den letzten Jahren kontinuierlich verfolgen, wird Ihnen manches aus früheren bdw-Ausgaben bereits bekannt sein. Wir haben es für diese Zusammenschau aktualisiert und neu aufbereitet. Dazu kommen die gegenwärtigen Ansätze, technischen Innovationen und vielversprechenden Projekte.

Manche der Entwicklungen verlaufen eher behäbig, andere ausgesprochen schnell – nicht zuletzt angestoßen durch die weltpolitischen Kapriolen. So galt klimaneutral mit Wind- oder Sonnenstrom erzeugte Wasserstoff bis vor Kurzem als ökonomisch nicht konkurrenzfähig mit „grauem“ Wasserstoff, der aus Erdgas produziert wird. Nun belegt eine aktuelle Studie: Durch die stark gestiegenen Gaspreise liegen beide Varianten preislich inzwischen gleichauf.

Damals im Chemieunterricht ist alles gutgegangen. es gab nie eine Explosion. Ich bin gespannt, ob auch der Sprung in eine Wasserstoff-Wirtschaft gelingen wird – und wie schnell. Machen Sie sich selbst ein Bild. Ich wünsche Ihnen dabei eine anregende Lektüre.



**Ralf Butscher**  
Redakteur für Technik und Kommunikation



### Wissen

fachjobs24.de – hier finden Arbeitgeber

## Köner mit Berufserfahrung

und engagierten Nachwuchs



- ✓ Sprechen Sie Nutzer von Branchen-Fachmedien an: die Interessierten und Engagierten ihres Fachs
- ✓ Erreichen Sie die Wechselwilligen, schon bevor sie zu aktiven Suchern werden
- ✓ Für optimales Personalmarketing: Präsentieren Sie sich als attraktiver Arbeitgeber der Branche

Einzigartiges Netzwerk zielgruppenspezifischer Branchen-Channels



28  
Print-Partner

34  
Online-Partner



## KAPITEL 1

### Der Wert des Wasserstoffs

#### 8 Das große Ding

Wasserstoff soll als Energieträger der Zukunft die Energiewende beflügeln und dabei helfen, den Klimaschutz nach vorne zu bringen.

#### 12 Die Vision von der Wasserstoff-Wirtschaft

So könnte das neue Energiesystem aussehen.

#### 14 „Wir werden mit Wasserstoff handeln wie mit Bananen“

Energieforscher André Thess künftig mit einem Bündel unterschiedlicher Technologien – mit Wasserstoff als einem wichtigen Baustein.

## KAPITEL 2

### Die Wege zum Wasserstoff

#### 26 Heiß begehrt

Wie lässt sich das Gas sauber herstellen? Die Forscher feilen an neuen Technologien.

#### 30 Wasserstoff aus dem Biomüll

Speisereste werden zu einem Rohstoff.

#### 31 Aus Altholz wird Wasserstoff

Forscher nutzen Holzreste für die Herstellung des Energieträgers.

#### 32 Die Wasserstoff-Farbenlehre

Von grau bis grün: Was bedeuten die Farben?

#### 36 Mission Meer-Wasserstoff

Wasserstoff in Offshore-Windparks zu produzieren, ist äußerst ambitioniert. Das zeigt ein Megaprojekt auf der Nordseeinsel Helgoland.

#### 44 Wasserstoff aus Wüstenstrom

Wird Afrika zu einem Lieferanten für das grüne Gas? In Namibia gibt es bereits konkrete Pläne.

#### 50 „Wie forschen mitten in der Wüste“

Ingenieur Andreas Brinner erinnert sich an das Pionierprojekt HYSOLAR.

#### 52 Im Sand zerronnen

Warum das Desertec-Konzept des sauberen Stroms aus der Sahara gescheitert ist.

## 36

Inmitten der Nordsee planen mehrere Unternehmen ein zukunftsweisendes Projekt. Auf und um Helgoland wollen sie die Grundlage schaffen, um Wasserstoff vor Ort aus Windstrom zu erzeugen.



## 44

In sonnigen Regionen lässt sich Solarstrom sehr günstig gewinnen. Wird das zur Quelle für grünen Wasserstoff?



## 84

Seit Langem ringen Forscher darum, die Kernfusion als eine saubere und unerschöpfliche Energiequelle zu erschließen. Die Hürden dafür sind hoch, doch es gibt Fortschritte – auch beim Ansatz, Wasserstoff-Kerne mithilfe von Laserlicht zu fusionieren.





## KAPITEL 3

# Das Wirken von Wasserstoff

- 56 Zellen auf Rädern**  
Was kommt nach den heutigen Automotoren? Wasserstoff bietet viele Vorteile.
- 61 Die Zapfsäule für die Garage**  
So lässt sich Wasserstoff zu Hause tanken.
- 62 Der neue Dampfzug**  
Wo heute noch Dieselloks fahren, könnten bald Brennstoffzellen-Züge unterwegs sein
- 64 Sauberer fliegen**  
Wie sich der rapide wachsende Ausstoß von Klimagasen im Luftverkehr stoppen lässt.
- 68 Wasserstoff aus der Pfandflasche**  
Eine pfiffige Technik aus Deutschland macht den des Gases besonders einfach.
- 76 Energie aus dem Sternenfeuer**  
Mehrere spektakuläre Ergebnisse geben der Forschung zur Kernfusion neuen Aufwind.
- 84 Explosion in der Erbse**  
Wie sich Wasserstoff-Atomkerne per Laserlicht und Trägheitskraft verschmelzen lassen.

## KAPITEL 4

# Die Wiege des Wasserstoffs

- 92 Am Anfang war der Wasserstoff**  
Wie kam der Wasserstoff in die Welt? Warum ist davon so viel vorhanden? Und wie beeinflusste das Gas die Entwicklung des Lebens?

## Standards

---

3 Editorial

98 Impressum, Autoren, Bildnachweise



/bildderwissenschaft



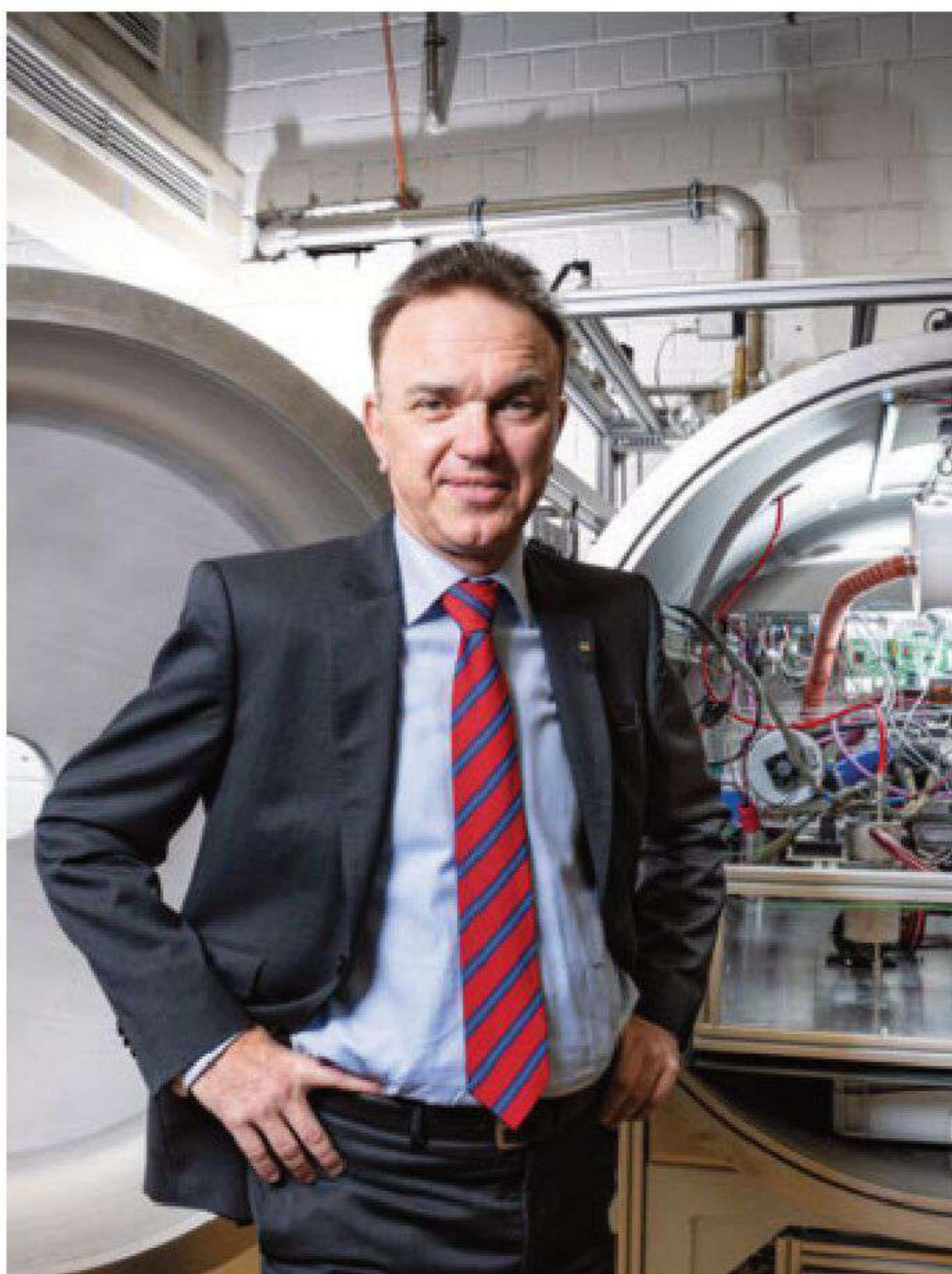
@bdwredaktion



/wissenschaftdetv

Unser Portal: [wissenschaft.de](http://wissenschaft.de)

Newsletter abonnieren: [wissenschaft.de/newsletter](http://wissenschaft.de/newsletter)



# 14

Im exklusiven bdw-Interview erklärt der Stuttgarter Wissenschaftler André Thess, was Wasserstoff in einem künftigen Energiesystem leisten kann – und wo noch Hürden zu überwinden sind.



**64** Erste Flugzeuge mit Wasserstoff und Brennstoffzellen an Bord haben bescheidene Dimensionen. Das soll sich ändern.





---

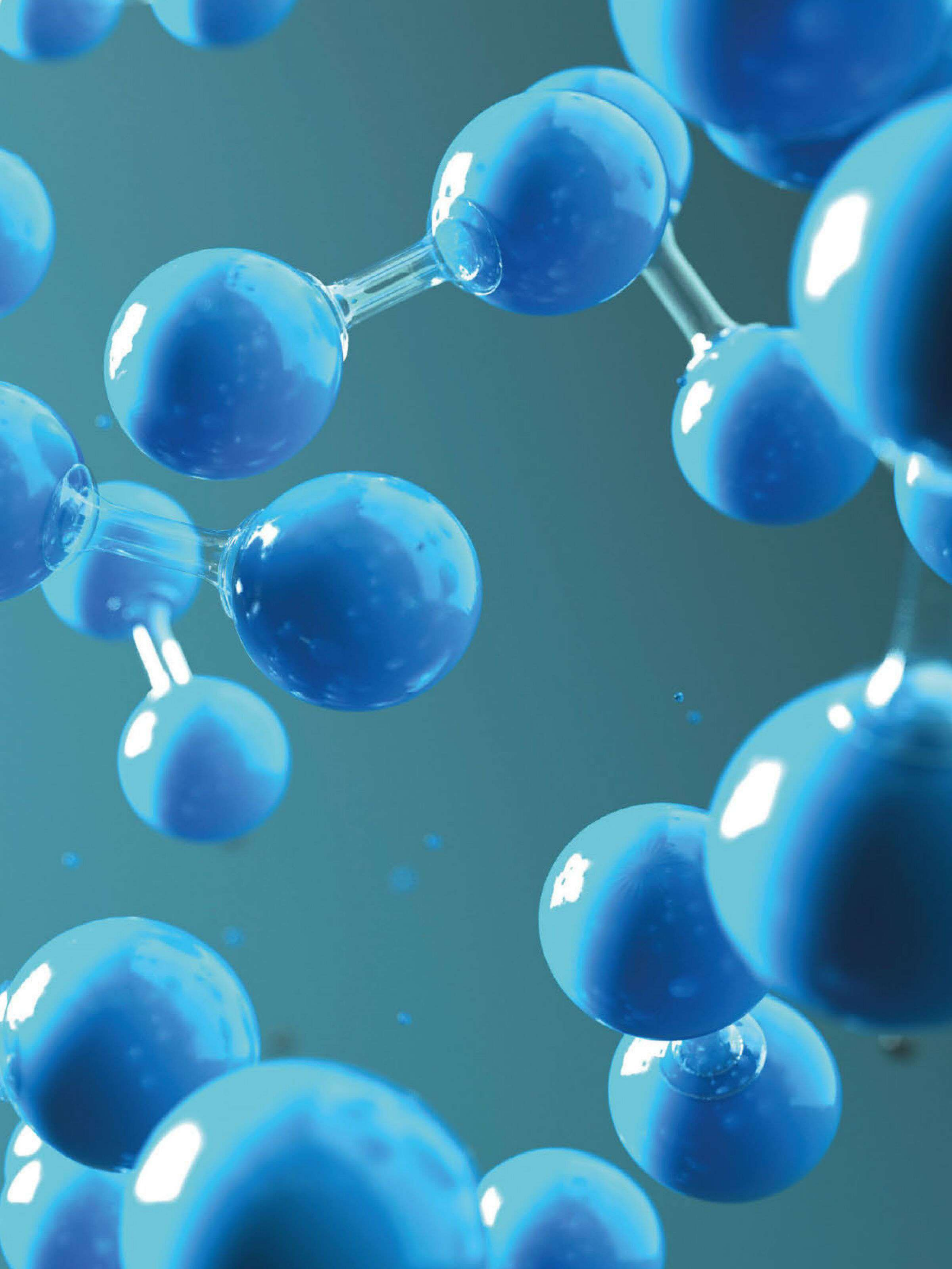
# Der Wert des Wasserstoffs

---

KAPITEL 01









---

# Das große Ding

---

Alle reden vom Wasserstoff. Das leichtgewichtige Gas soll als Energieträger der Zukunft die Energiewende beflügeln und dabei helfen, den Klimaschutz nach vorne zu bringen. Welche Voraussetzungen braucht es dafür?

von RALF BUTSCHER



**Z**usammen mit vier weiteren Menschen flieht der Ingenieur Cyrus Smith eines Nachts mit einem Heißluftballon vor den Wirren des Amerikanischen Bürgerkriegs. Doch ein schwerer Sturm treibt die Flüchtlinge mit ihrem Fluggerät ab, und schließlich landen die Fünf auf einer unbewohnten Insel weit draußen im Pazifik. Smith, der über eine Menge an technischen und naturwissenschaftlichen Kenntnissen verfügt, trägt danach maßgeblich zum Überleben der Gruppe auf dem einsamen Eiland bei. Und er verblüfft seine Gefährten immer wieder mit seinen Ideen und Visionen – unter anderem mit einer gewagten These zur Energie der Zukunft: Das Wasser, ist der gewiefte Ingenieur überzeugt, werde dereinst als Brennstoff dienen. Seine beiden Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, würden zu einer ergiebigen und unerschöpflichen Quelle für Wärme und Licht.

Mit dieser vorausschauenden Prognose seiner Romanfigur wies der französische Autor Jules Verne in „Die geheimnisvolle Insel“ bereits 1874 den Weg in eine Zukunft, die auf Wasserstoff fußt – dem leichtesten und häufigsten chemischen Element.

Noch ist die Menschheit nicht in der Zukunft angekommen, von der in dem Roman geschwärmt wird. Doch die Prophezeiung von Cyrus Smith passt heute, fast 150 Jahre danach, bestens in die Zeit. Denn viele

Experten wähen die Gesellschaft, wie in Vernes Roman angedeutet, auf dem Weg in eine Wasserstoff-Wirtschaft. Ein Beleg dafür ist die im Sommer 2020 durch die damalige deutsche Regierung von Angela Merkel beschlossene Nationale Wasserstoff-Strategie. Sie gibt die Ziele vor, die es am Ende dieses Weges zu erreichen gilt. Und sie benennt die wichtigsten technologischen und ökonomischen Herausforderungen, die dazu noch zu meistern sind.

## Ein Rahmen für Innovationen

Nach Überzeugung des Bundeswirtschaftsministeriums in Berlin schafft die Strategie „den Rahmen für die zukünftige Erzeugung und Verwendung von Wasserstoff und damit für entsprechende Innovationen und Investitionen“. Im Blick haben die politischen Akteure dabei nicht weniger als die „Vorreiterrolle deutscher Unternehmen im Bereich der Wasserstoff-Technologien auszubauen“.

Die Palette dieser Technologien ist breit. Und ein Teil davon ist längst etabliert und hat sich in der Praxis bewährt – zum Beispiel Techniken, um Wasserstoff auf saubere Weise herzustellen, sowie Brennstoffzellen, in denen sich aus Wasserstoff und Luftsauerstoff elektrischer Strom und Wärme gewinnen lassen (siehe Grafik, S. 10: „Die Brennstoffzelle: das Prinzip der kalten Verbrennung“). Doch





Wo heute noch Öltanker verkehren, könnten künftig neuartige Tankschiffe Wasserstoff transportieren.

nun gilt es, Techniken weiterzuentwickeln, an neue Anwendungen und Randbedingungen anzupassen und die einzelnen Puzzleteile zu einem funktionierenden Ganzen zusammenzufügen. Und nicht zuletzt geht es darum, die Elemente einer möglichen künftigen Wasserstoff-Wirtschaft möglichst preiswert und ökonomisch wettbewerbsfähig zu machen.

#### **Eine Zukunft ohne Klimagas-Emissionen?**

Aus der vagen Vision in Jules Vernes Abenteuererzählung ist inzwischen ein recht klares Bild geworden, das Wissenschaftler und Ingenieure von einer auf Wasserstoff als Energieträger basierenden Welt zeichnen. Es ist außerdem das Bild einer Zukunft, die weitgehend ohne klimaschädliche Emissionen auskommt. Denn Wasserstoff ist, wenn man ihn aus Wasser gewinnt – zum Beispiel per Elektrolyse mit elektrischem Strom –, tatsächlich in praktisch unbegrenzter Menge verfügbar. Und – ein in Zeiten des Ringens um eine Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen besonders schlagkräftiges Argument: Wasserstoff lässt sich klimaneutral produzieren.

Wenn man künftig Wasserstoff statt der bislang dominierenden fossilen Rohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle den Wasserstoff als Energieträger nutzt, entströmt dem Auspuff des Autos kein klimaschädliches Kohlendioxid mehr. Und Flugpassagiere

brauchen sich keine Gedanken mehr um den Schaden machen, den ihre Reise am Weltklima anrichtet. Denn auch Flugzeuge sind dann emissionsfrei unterwegs. Ebenso lassen sich im Bild einer künftigen Wasserstoff-Wirtschaft Schiffe, Eisenbahnen und andere Verkehrsmittel klimaschonend bewegen. Gaskraftwerke und Öfen in der industriellen Fertigung können ohne den Ausstoß von Treibhausgasen betrieben werden. Allerdings: So simpel die Vision auch klingen mag, so hoch sind die Hürden, die sich auf dem Weg zu ihrer Realisierung noch vor den Forschern auftürmen.

Zum einen ist die Herstellung von Wasserstoff deutlich teurer als die von rohöl-basierten Kraftstoffen wie Benzin oder Kerosin – trotz der jüngsten Preissprünge bei fossilen Energieträgern. Und die Differenz in den Kosten ist keine Kleinigkeit, wie André Thess betont, Direktor des Instituts für Technische Thermodynamik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): „Sowohl pro Kilogramm als auch pro Kilowattstunde ist Wasserstoff wesentlich teurer als fossile Energieträger“, stellt der Stuttgarter Energieforscher im Interview mit bild der wissenschaft fest (siehe Beitrag, S. 14: „Wir werden mit Wasserstoff handeln wie mit Bananen“).

Um „grünen“ – also klimagas-emissionsfreien – Wasserstoff aus Wasser herzustellen, braucht es bei





der heute etablierten Technik elektrischen Strom, der zum Beispiel aus erneuerbaren Quellen wie Windkraft oder Sonnenlicht stammt. Der Preis dafür sinkt zwar seit Jahren, ist aber trotzdem noch ein bedeutender Kostenfaktor. Hinzu kommen die

technischen Besonderheiten der für die Wasserstoff-Herstellung mit Strom gebräuchlichen Technologie der Wasser-Elektrolyse.

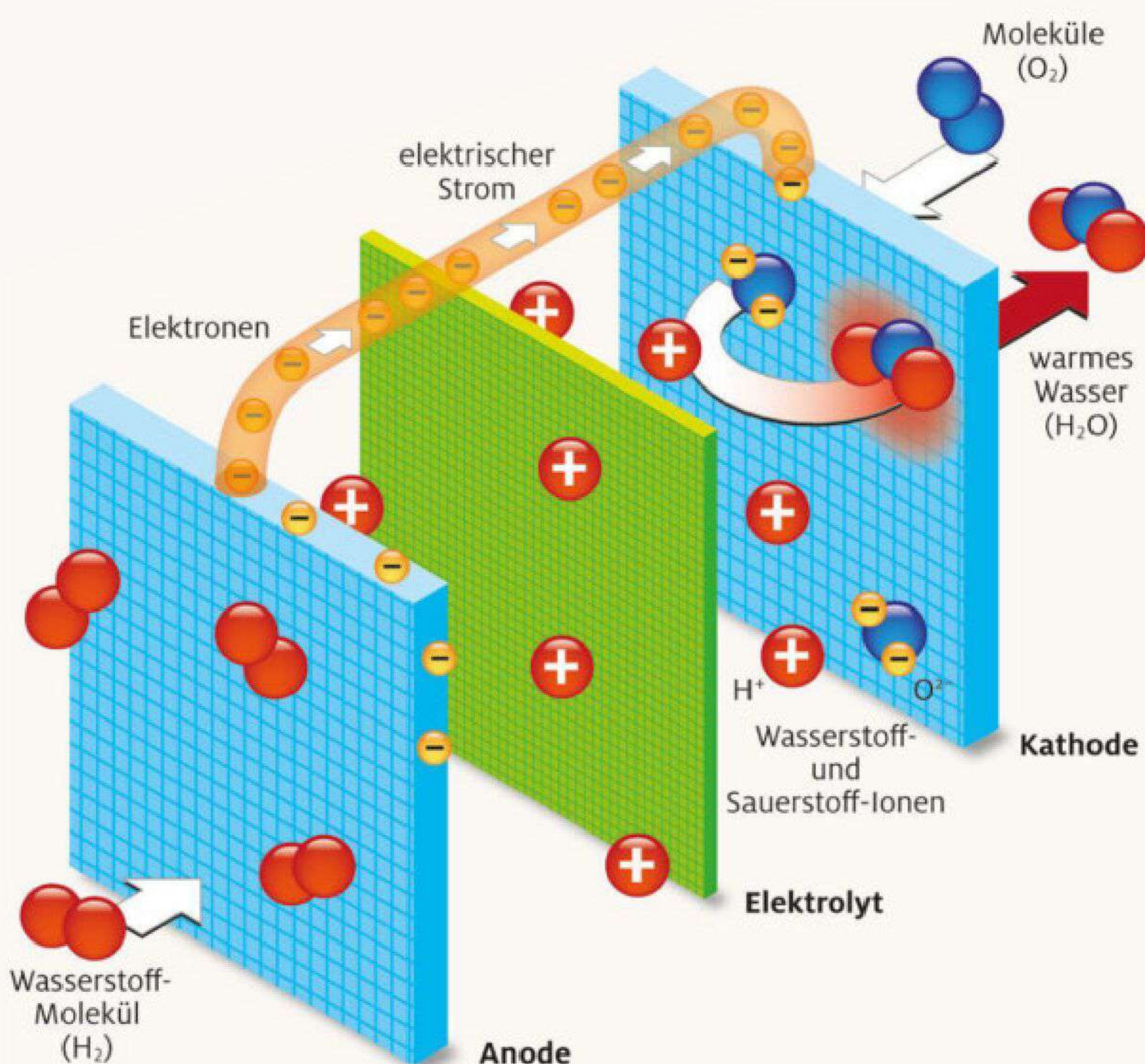
Dabei werden Wasser-Moleküle durch die elektrische Energie chemisch in ihre beiden chemischen Komponenten Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Das geschieht an Elektroden, die mit bestimmten Katalysator-Materialien beschichtet sind und zwischen denen sich eine elektrisch leitfähige Flüssigkeit befindet, der Elektrolyt. Allerdings: Die heute meist verwendeten Alkali-Elektrolyseuren kommen mit den Schwankungen bei Wind- oder Solarstrom nur schwer zurecht. Das limitiert die Effizienz der Elektrolyse und verteuert so die Herstellung des grünen Wasserstoffs zusätzlich.

### Die Brennstoffzelle: das Prinzip der „kalten Verbrennung“

Die Brennstoffzelle ist eine wichtige Technologie, um Wasserstoff nutzbar zu machen. Sie kehrt den Prozess der Elektrolyse um, mit dem sich Wasserstoff aus Wasser herstellen lässt: Sauerstoff und Wasserstoff verbinden sich in der Brennstoffzelle wieder zu Wasser, wobei ein elektrischer Strom fließt und zudem Wärme erzeugt wird. Normalerweise knallt es, wenn man gasförmigen Wasserstoff und Sauerstoff zusammenbringt und entzündet. Doch diese, aus dem Chemieunterricht bekannte „Knallgasreaktion“ wird durch eine Trennung der Zelle in zwei Halbzellen vermieden. Zwischen den Gasen befindet sich ein Elektrolyt, der für bestimmte Ionen durchlässig ist. Experten sprechen bei den Reaktionen in einer Brennstoffzelle von einer „kalten Verbrennung“.

Der an der Anodenseite zugeführte Wasserstoff wird mithilfe eines Katalysators in positiv geladene Ionen gespalten und gibt dabei Elektronen ab. Diese wandern über einen äußeren Kreislauf, wo sie elektrische Arbeit verrichten, zur Kathode. Dort bewirken sie, dass der Sauerstoff ionisiert wird. Freie Sauerstoff- und Wasserstoff-Radikale verbinden sich unter Abgabe von Wärme zu elektrisch neutralem Wasser. Das ganze System ist ein Stapel (Stack) aus mehreren in Serie geschaltete Zellen. Die kalte Verbrennung erfolgt darin, je nach Typ von Brennstoffzelle, bei einer Temperatur zwischen 60 und 1000 Grad Celsius.

Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle kann theoretisch über 80 Prozent erreichen. Doch in der Praxis liegt er meist bei etwa 70 Prozent. Das bedeutet, dass sich von der ursprünglich für die Wasser-Elektrolyse zur Herstellung des Wasserstoffs aufgewandten Energie rund 40 Prozent zurückgewinnen lassen.



### Mit Speichern gegen die Dunkelflaute

Abhilfe schaffen könnten Speicher, in denen sich die aus Wind oder Sonnenlicht gewonnene Energie vorübergehend bunkern und später bei Bedarf wieder entnehmen lässt – um das witterungsbedingte Auf und Ab im Stromangebot auszugleichen. Damit ließe sich eine stabile und gleichmäßige Stromversorgung auch über „Dunkelflauten“ hinwegretten. Darunter verstehen Experten Phasen, in denen weder die Sonne scheint noch ein nennenswerter Wind weht – und daher kaum elektrischer Strom aus diesen Quellen zu gewinnen ist.

Hier schließt sich der Kreis zum Wasserstoff: Denn das Gas könnte in einem auf regenerativen Energiequellen wie Sonne und Wind basierenden System – wie es in Deutschland für die Zukunft angestrebt wird – selbst als Energiespeicher dienen. Um es als Speichermedium zu nutzen, ließe sich das Wasserstoff-Gas unter Druck in Kavernen pressen – große unterirdische Hohlräume im Gestein. Die werden in Deutschland heute teilweise bereits als Lagerstätten für Erdgasreserven verwendet.

### Aus Starkwind wird Wasserstoff

Doch Wasserstoff bietet noch mehr Vorteile. Er könnte auch für die Verteilung von Energie aus Wind und Sonnenlicht sorgen – und so für eine zuverlässige Versorgung der Verbraucher. Das käme etwa zum Tragen, wenn das Gegenteil einer Dunkelflaute eintritt – und an einem sonnigen Tag zugleich ein kräftiger Wind weht. Bei einer solchen Wetterlage werden bislang regelmäßig etliche Windkraftanlagen abgeschaltet, weil die Stromnetze sonst durch die schiere Menge an elektrischem Strom überfordert wären – und weil es bislang kaum Möglichkeiten gibt, die Energie zu speichern. Mit Wasserstoff als Speicher würde sich das ändern.

Künftig könnten dann bei einem Überangebot an Strom Elektrolyseure anspringen und mit einem Teil des Windstroms Wasserstoff produzieren, der





Dem Einsatz von Wasserstoff sind kaum Grenzen gesetzt: zum Beispiel in einem Lastenrad mit Brennstoffzellen-Antrieb.

dann vorübergehend gebunkert wird. Im Fachjargon wird das auch Power-to-Gas-Verfahren genannt. Damit müsste auf keine elektrische Energie mehr verzichtet werden, die sich zwar erzeugen ließe – für die aber kein Platz im Stromnetz ist.

Der aus Windstrom erzeugte Wasserstoff ließe sich dann dazu nutzen, Übertragungsleitungen zwischen verschiedenen Regionen zu ersetzen. Denn, auch um elektrischen Strom großräumig zum Beispiel aus den windreichen Küstengebieten im Norden Deutschlands zu den industriellen Ballungszentren im Westen und Süden zu leiten, fehlt ein Teil der nötigen Netzkapazität. Stattdessen könnte die Energie in Form von Wasserstoff beispielsweise als gekühlte Flüssigkeit mit Tankwagen von den Erzeugern zu den Verbrauchern gebracht werden.

### Eine Klammer für Industrie, Verkehr und Co.

Alles zusammen betrachtet, sei eine Energiewende weg von fossilen und hin zu erneuerbaren Quellen ohne Wasserstoff nicht vorstellbar, meint etwa Tom Smolinka, Forscher am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg. Klimaneutral erzeugter, grüner Wasserstoff als gemeinsamer Energieträger könne eine Klammer bilden zwischen den einzelnen „Sektoren“. Darunter verstehen Fachleute die verschiedenen Bereiche der Bereitstellung oder Nutzung von Energie: die Stromerzeugung in Kraftwerken, Windkraft- oder Solaranlagen zum Beispiel sowie der Energieverbrauch in Industrie, privaten Haushalten, Landwirtschaft oder Verkehr.

Gerade der Verkehrsbereich ist auf dem eingeschlagenen Weg in eine klimaneutrale Zukunft ein Sorgenkind. Denn bislang ist der Ausstoß an Klima-

gasen dort kaum zurückgegangen. Auf Wasserstoff basierende Antriebe für Autos, Züge und Flugzeuge können das ändern (siehe dazu die Beiträge in dem Kapitel „Der Wert des Wasserstoffs“ ab S. 54).

Das Herzstück solcher Antriebe bilden Brennstoffzellen. Sie sind technologisch in gewisser Weise eine Umkehrung der Wasser-Elektrolyse. Denn in einer Brennstoffzelle werden Wasserstoff- und Sauerstoff-Atome (wieder) zu Wasser-Molekülen zusammengefügt. Neben reinem Wasser entstehen dabei Wärme und elektrischer Strom, der als Energielieferant für einen Elektromotor dienen kann. Im Tank eines so angetriebenen Fahrzeugs oder Flugzeugs befindet sich Wasserstoff.

Doch es gibt auch eine vielversprechende Alternative zu diesem technischen Konzept, wie Energieforscher André Thess betont: synthetische Kohlenwasserstoffe. Diese auch als E-Fuels bezeichneten chemischen Verbindungen lassen sich ebenso wie Wasserstoff klimaneutral herstellen – als „grüner“ Ersatz etwa für Benzin, Diesel oder den Flugzeugtreibstoff Kerosin.

### Treibstoffe aus der Retorte

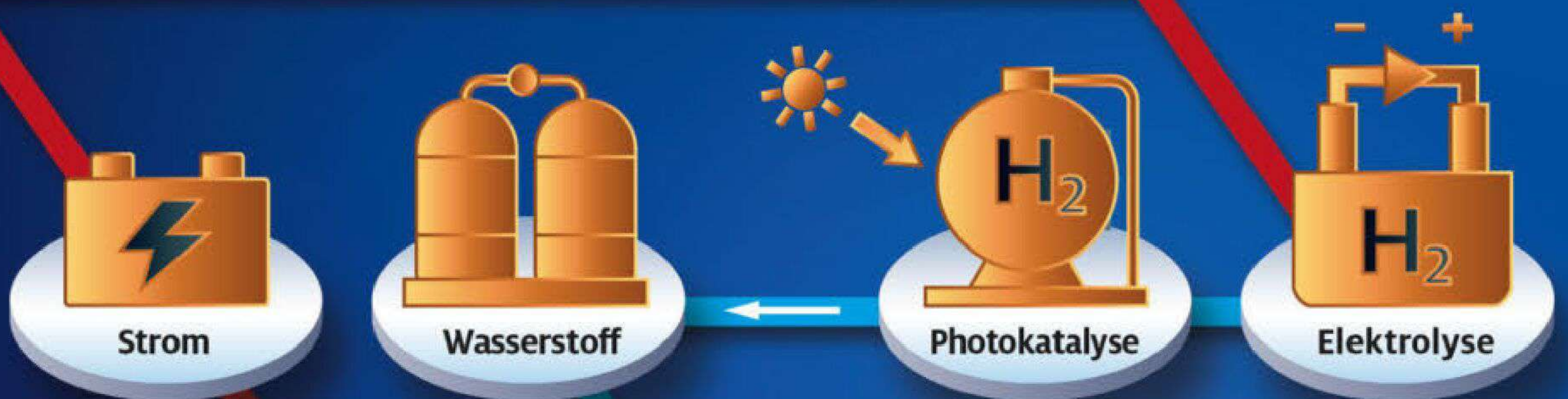
E-Fuels böten eine elegante Möglichkeit, um vor allem den schnell wachsenden Ausstoß an Klimagasen im Luftverkehr einzuhegen. Denn mit synthetischen Treibstoffen betriebene Jets brauchen keine neue Antriebstechnik. E-Fuels lassen sich genauso verbrennen wie etwa Kerosin. Der Haken daran sind auch hier bislang die relativ hohen Kosten. Die Forscher arbeiten daran, sie zu senken. Doch bis dahin muss die Zukunft, wie sie Jules Verne vor 150 Jahren beschrieben hat, noch ein wenig warten. ■



# ENERGIEGEWINNUNG



Weitere



# SPEICHERUNG

# Wasserstoffherstellung



# VERTEILUNG



# VERBRAUCH

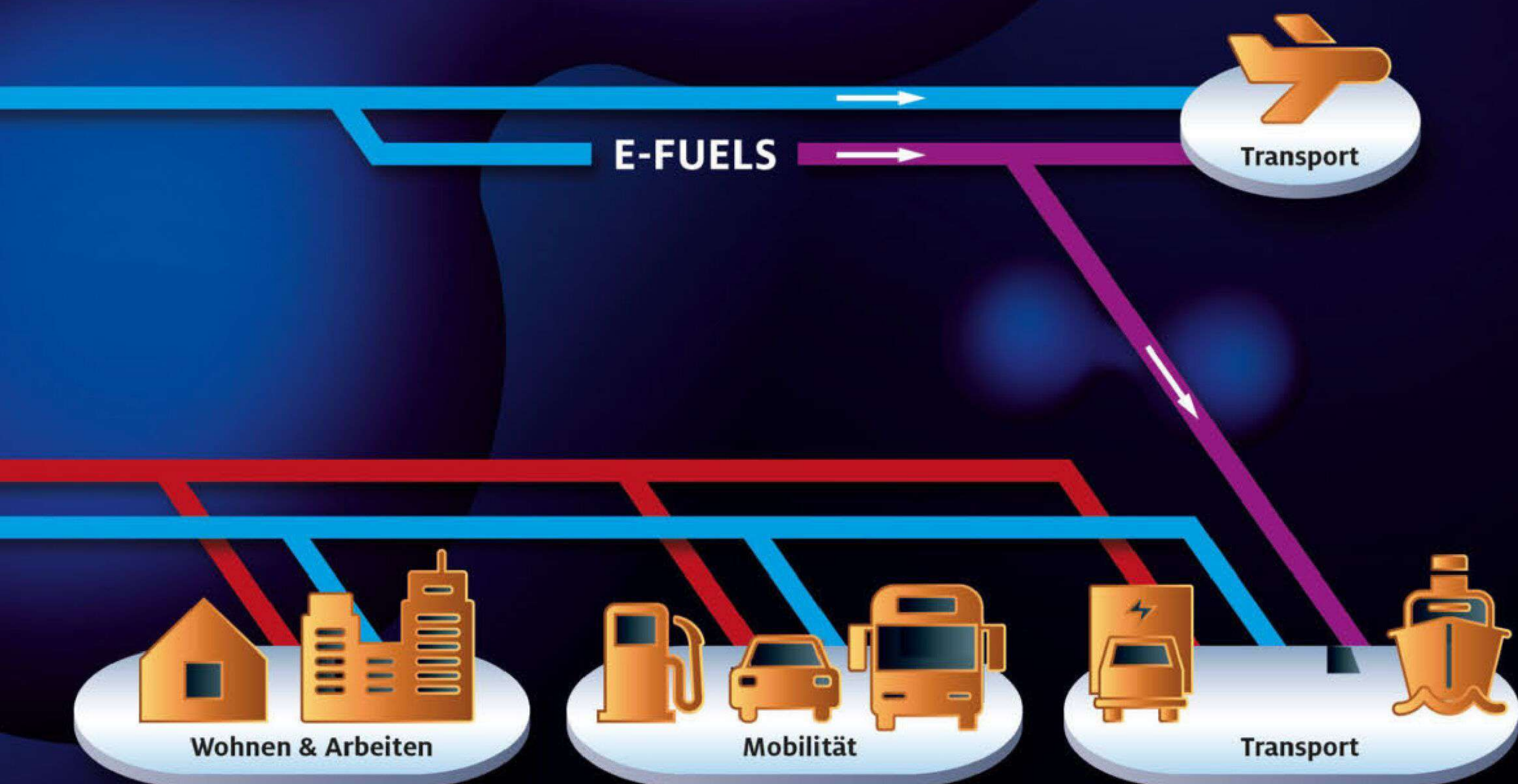


## Die Vision von der Wasserstoff-Wirtschaft

Ein Bild einer klimaneutralen, auf erneuerbaren Quellen beruhenden Energie-zukunft mit Wasserstoff als einem zentralen Energieträger lässt sich recht präzise zeichnen. In diesem Bild ist die Ausgangsbasis die Erzeugung von elektrischem Strom aus Sonnenlicht, Wind- oder Wasserkraft oder aus Biomasse. Der Strom lässt sich entweder direkt nutzen – in der Industrie, in Privathaushalten oder in Elektrofahrzeugen. Alternativ dazu kann die elektrische Energie dazu dienen, per Wasser-Elektrolyse Wasserstoff herzustellen, der dann zu einem chemischen Speicher und Träger von Energie wird. Statt elektrischen Strom ließe sich künftig vielleicht auch das Sonnenlicht unmittelbar – ohne den Umweg über die Stromerzeugung – als Energielieferant für die Wasserstoff-Produktion einsetzen. Die Experten sprechen dabei von Photolyse oder Photokatalyse.

Als Anwendungen für den Wasserstoff bietet sich zum einen der Ersatz von Erdgas an. Dazu wird ein Teil des Wasserstoffs ins Gasnetz eingespeist. Daneben kann das leichtgewichtige Gas ebenso wie Strom Energie für den Antrieb von Fahrzeugen und Flugzeugen bereitstellen. Eine zentrale Technologie dafür sind Brennstoffzellen, in denen aus Wasserstoff und Luftsauerstoff elektrischer Strom (zurück)gewonnen wird.

Einen völlig anderen Anwendungsstrang erschließt die Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen, sogenannten E-Fuels. Die chemischen Verbindungen lassen sich aus Wasserstoff und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) gewinnen und können jede Art von fossilen Treibstoffen ersetzen: zum Beispiel Benzin, Diesel und den Flugzeugtreibstoff Kerosin, aber auch Heizöl.







# „Wir werden mit Wasserstoff handeln wie mit Bananen“

Der Stuttgarter Energiewissenschaftler André Thess erwartet künftig eine zunehmende Vielfalt an Technologien im System der Energieversorgung – mit Wasserstoff als wichtigem Baustein.

Das Gespräch führte RALF BUTSCHER, Fotos: WOLFRAM SCHEIBLE

## Prof. Dr. André Thess

(\*1964) ist seit 2014 Direktor des Instituts für Technische Thermodynamik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie Professor für Energiespeicherung an der Universität Stuttgart. Thess promovierte an der Technischen Universität Dresden in Physik. Anschließend forschte er in Lyon, Grenoble, Princeton (USA) und wieder in Dresden. Im Alter von 34 Jahren wurde er als Professor für Thermodynamik an die TU Ilmenau berufen. Parallel dazu hatte er Gastprofessuren in Nagoya (Japan), Stanford (USA) und Shenyang (China) inne.

## Herr Professor Thess, befinden wir uns auf dem Weg in eine klimaneutrale Wasserstoff-Wirtschaft?

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass man die Zukunft nur sehr beschränkt voraussagen kann. Daher denke ich, wenn es um die Energiezukunft geht, in Korridoren – und betrachte sowohl den Best Case als auch den Worst Case. Einerseits hat Jules Verne bereits 1875 eine optimistische Vision formuliert. Er schrieb: „Wasser ist die Kohle der Zukunft. ... Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“ Doch es gibt auch kritische Aussagen, die wir nicht ignorieren dürfen: „Der Wasserstoff ist die Kernfusion unter den klimaneutralen Technologien“ Also: Die Wasserstoff-Wirtschaft erscheint stets gleich weit in der Zukunft. Auch wenn in Wissenschaft, Politik und Medien manchmal der Eindruck erweckt wird, es sei klar, was kommt, denke ich: Heute kann niemand belastbare Aussagen darüber treffen, wann, zu welchen Kosten und in welchem Umfang Wasserstoff zur Dekarbonisierung der Gesellschaft beitragen wird.

## Dann sind Zeitskalen, die für die Entwicklung beim Wasserstoff genannt werden, wertlos?

Man kann Szenarien analysieren und auch Berechnungen anstellen. Doch man muss sich dabei im Klaren sein, dass darin viele unsichere Parameter stecken. Daher sind solche Vorhersagen mit großer Vorsicht zu genießen. Auf der anderen Seite gibt es das Bauchgefühl von Experten aus Forschung und Industrie. Das taugt bei solch komplexen Fragen nach meiner Überzeugung mindestens genauso viel wie mathematische Analysen.

## Ähneln sich die Bauchgefühle der Experten?

Über die Vor- und Nachteile des Wasserstoffs ist man sich in der Forscher-Community einig. Und das gilt auch für die Herausforderungen, die wir noch meistern müssen, um einen Markthochlauf und eine breite Anwendung der Technologie zu ermöglichen.

## Worin liegen die Vorteile des Wasserstoffs?

Ein Vorteil ist seine große Energiespeicherfähigkeit, bezogen die Masse. Sie beträgt über 30 Kilowattstunden pro Kilogramm. Das ist dreimal so viel wie bei Benzin oder Diesel – ein riesiger Vorteil. Hinzu kommt: Die Herstellung von Wasserstoff kann CO<sub>2</sub>-neutral ablaufen.

## Und was sind die Nachteile?

Zwar hat der Wasserstoff eine hohe Energiedichte pro Kilogramm, aber nicht pro Liter. Wenn Sie ihn einsperren in einem kryogenen, stark gekühlten Tank oder in einem Drucktank, dann ist die Energiedichte des Gesamtsystems nur etwa ein Zehntel so groß wie bei Benzin, Diesel oder Kerosin. Das macht die Anwendung wieder schwieriger. Ein weiteres Manko: Wasserstoff ist bei einer CO<sub>2</sub>-neutralen Herstellung wesentlich teurer als die derzeit für Verbrennungsmotoren genutzten fossilen Energieträger.

## Daraus ergeben sich vermutlich die erwähnten großen Herausforderungen für die Forschung?

Genau. Die meisten Forscher sind sich darin einig, wohin die Reise gehen muss: Zum einen geht es um die Steigerung der speicherbaren Energiemenge im Gesamtsystem. Zum anderen ist es nötig, die Kosten für das Gesamtsystem zu senken. Das bedeutet: geringere Kosten für die Wasserstoff-Herstellung, die Aufbewahrung und – bei einer kryogenen Art von Transport und Lagerung – auch für die Verflüssigung des Wasserstoff-Gases. Diese beiden Parameter – Speicherdichte und Kosten – entscheiden alles. Da sind sich die meisten Forscher einig.

## Gibt es auch kontroverse Punkte?

Worüber die Meinungen der Forscher auseinandergehen, sind Fragen wie diese: Wann kommt die Wasserstoff-Technologie in der Breite? Und was ist dafür zu tun? Soll der Staat mit Subventionen in die Entwicklung eingreifen oder soll man alles den Kräften des freien Markts überlassen?





### Zurück zu den Kosten: Um wieviel teurer ist Wasserstoff gegenüber fossilen Energieträgern?

In einem Kilogramm Diesel oder Benzin sind reichlich 10 Kilowattstunden chemische Energie gespeichert. Ein Kilogramm Wasserstoff hingegen enthält etwas über 30 Kilowattstunden. Ohne Steuern gerechnet, kostet ein Kilogramm fossiler Sprit in der Erzeugung rund 60 Cent. Ein Kilogramm Wasserstoff hingegen kostet – wenn man ihn CO<sub>2</sub>-neutral, also mit erneuerbarer Energie herstellt – etwa 6 Euro. Sowohl pro Kilogramm als auch pro Kilowattstunde ist Wasserstoff somit wesentlich teurer als fossile Energieträger. Je schneller dieser Unterschied schrumpft, desto früher werden wir Anwendungen des Wasserstoffs in der Praxis sehen.

### Wie lässt sich die preisliche Differenz verringern?

Da gibt es Herstellung, Transport und Nutzung des Wasserstoffs in Brennstoffzellen oder durch direkte Verbrennung. Um bei der Herstellung die Kosten pro Kilowattstunde CO<sub>2</sub>-neutralen Wasserstoff zu reduzieren, müssen beim Einsatz von Wind- oder Solarenergie die Stromerzeugungskosten weiter sinken. Zudem kommt es bei beiden Energiequellen darauf an, entweder Elektrolyseure zu entwickeln, die an die witterungsbedingt schwankende Verfügbarkeit angepasst sind – und sich so kostengünstiger betreiben lassen. Oder Wind- und Solarstrom werden – auf dem Umweg über Energiespeicher – in einen konstant fließenden Grundlaststrom verwandelt. Dafür ist jedoch die Entwicklung preiswerter Speicher erforderlich.

### Und dafür kommt Wasserstoff infrage?

Ja, man kann Wasserstoff als wesentlichen Speicher nutzen. Denn Wasserstoff wäre viel eher in der Lage, die Speicherfunktion zu erfüllen als etwa Batterien. Diese taugen nicht als Langzeitspeicher für große Mengen an Energie und könnten uns nicht über eine Dunkelflaute hinwegretten – wenn weder Wind weht noch die Sonne scheint. Erdgas, sogenannte synthetische Kohlenwasserstoffe und auch Wasserstoff könnten das hingegen leisten.

### Gäbe es den ausreichend Speicherkapazitäten?

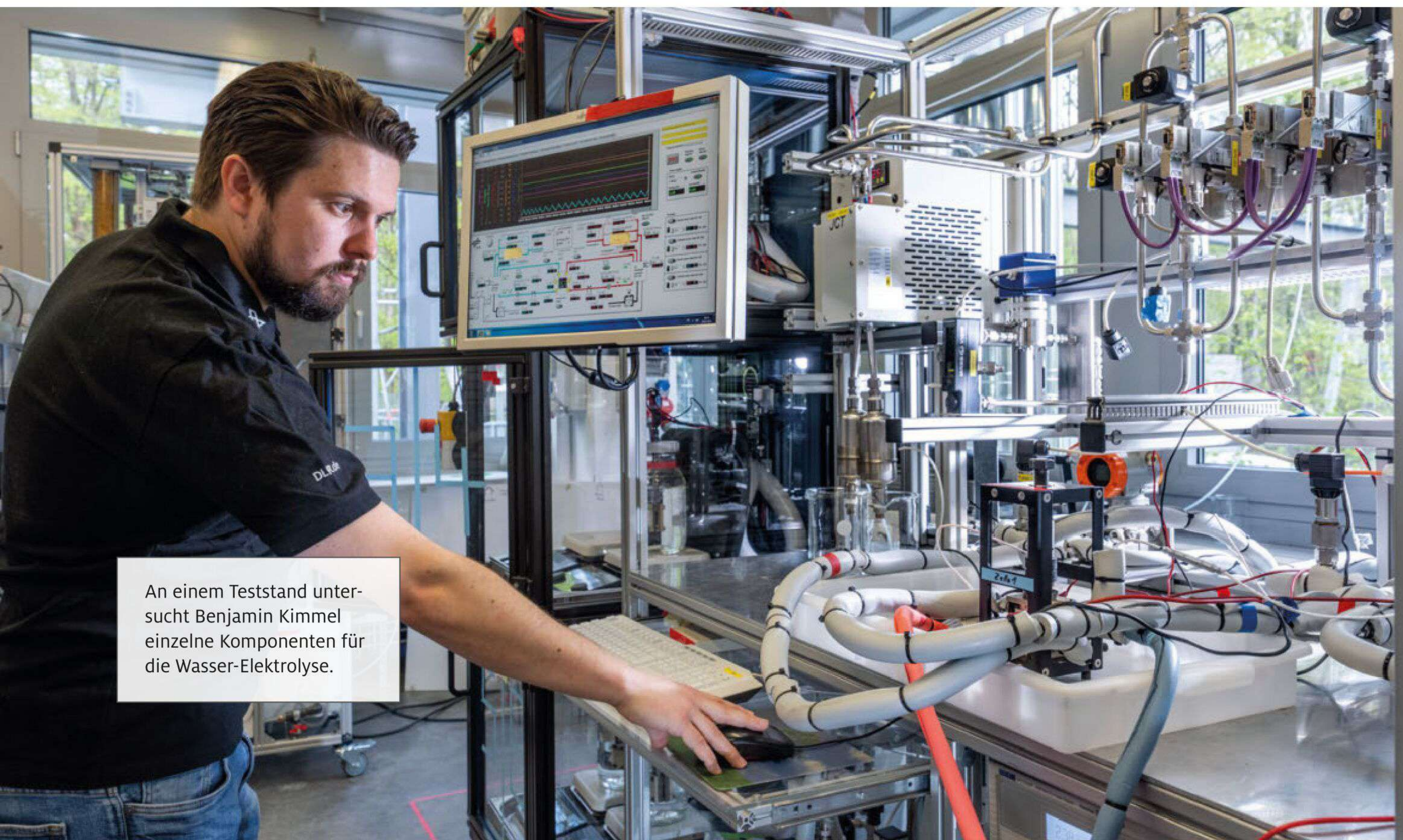
Deutschland hat relativ große unterirdische Kavernen, wo die Möglichkeit der Wasserstoff-Speicherung schon heute in Demonstrationsprojekten unter Beweis gestellt wird. Wenn man eine Wasserstoff-Infrastruktur hätte, könnte man in diesen Kavernen sicher eine große Menge davon speichern. Dass man damit über alle Dunkelflauten hinwegkommt, würde ich tendenziell eher mit „ja“ als mit „nein“ beantworten. Allerdings: Die Prämisse, dass eine klimaneutrale Produktion von Wasserstoff zwingend mit regenerativen Quellen wie Wind oder Sonnenlicht erfolgen muss, teile ich nicht. Deshalb betrachte ich das Wasserstoff-Speicherproblem auch nicht als den zentralen „Show-Stopper“.

### Was wäre die Alternative zu Wind und Sonne?

Neben dem damit hergestellten „grünen“ gibt es auch „gelben“ Wasserstoff. Das ist Wasserstoff, der mit Energie aus Kernkraftwerken erzeugt wird. Der Vorteil dieser

»Pro Kilogramm ist Wasserstoff wesentlich teurer als fossile Energieträger«

»Ich halte das Speicherthema nicht für zentral«



An einem Teststand untersucht Benjamin Kimmel einzelne Komponenten für die Wasser-Elektrolyse.



»Bei einem Kernkraftwerk lassen sich Strom und Abwärme nutzen«

•  
»Alternative Elektrolyse-Techniken benötigen teure Metalle«

Variante besteht darin, dass dort gleichzeitig Strom und Wärme anfallen. Durch diese gleichzeitige Verfügbarkeit, die übrigens auch bei solarthermischen Kraftwerken gegeben ist, lässt sich der Wasserstoff besonders effizient herstellen.

### **Inwiefern?**

Für die Elektrolyse von Wasserstoff muss man eine bestimmte Menge an Energie aufwenden, wobei man innerhalb gewisser Grenzen zwischen Strom und Wärme variieren kann. Wenn man verfügbare Wärme nutzt, lässt sich der Strombedarf verringern. So kann man die Energie effizienter einsetzen und zudem das Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage ausgleichen.

### **Ist denn die nukleare Stromerzeugung wirklich klimaneutral?**

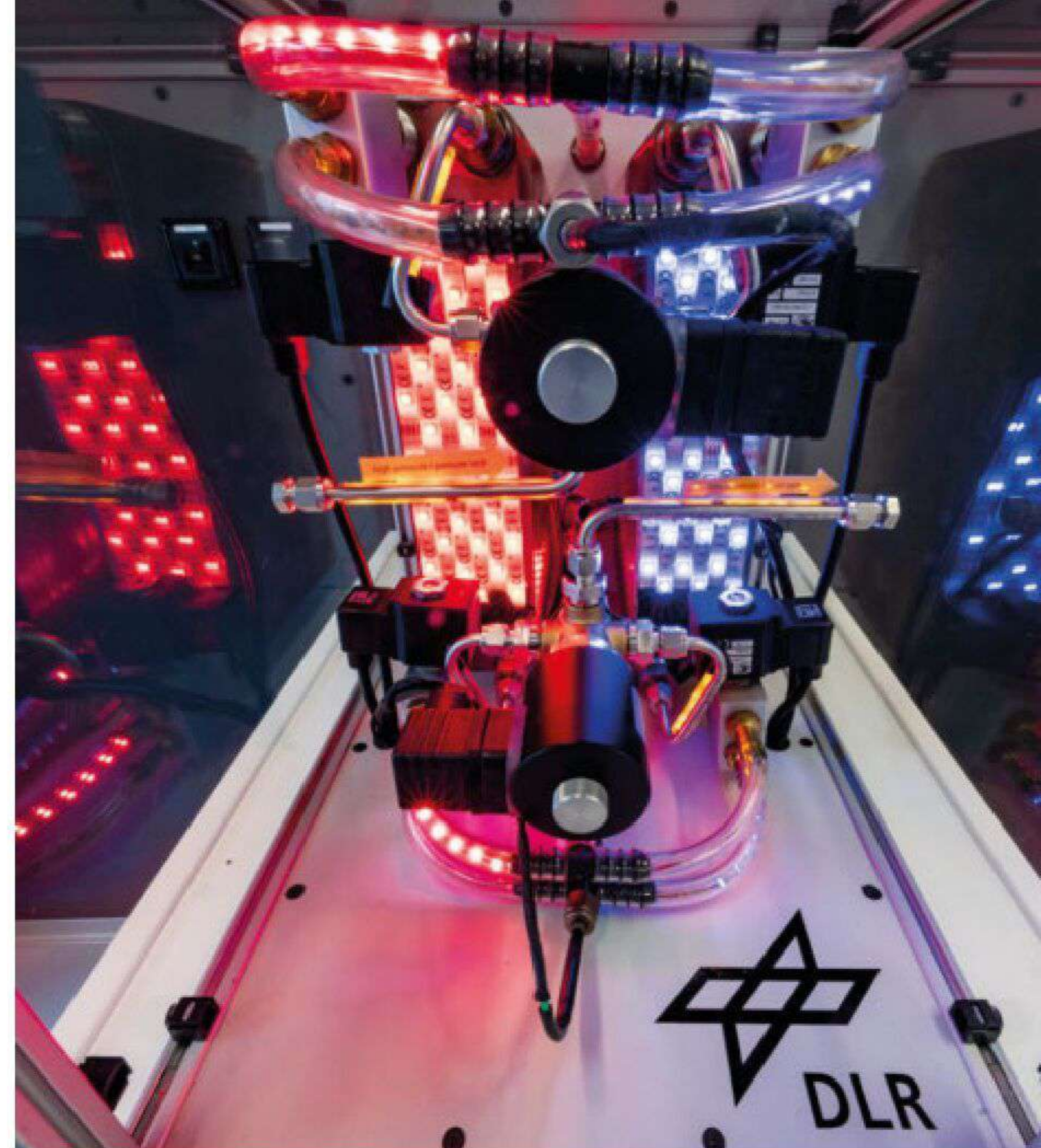
Ich verweise immer darauf, dass in den Dokumenten des Weltklimarats (IPCC), die ja auch in Deutschland gern zitiert werden, schon 2014 auf Seite 20 als CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequellen, neben Wind und Sonne auch die Kernenergie genannt wird. Egal, was man persönlich von der Kernenergie hält – die Faktenlage im IPCC ist eindeutig.

### **Lassen Sie uns nochmal auf die Elektrolyseure zurückkommen. Worin liegt bei deren Anpassung an Wind- oder Solarstrom die Herausforderung?**

Die Technik der sogenannten Alkali-Elektrolyseure gibt es bereits seit rund 100 Jahren. Sie werden auch für die Wasserstoff-Herstellung verwendet. Doch diese Elektrolyseure sind nur dann besonders effizient, wenn sie mit einem konstanten Energieangebot versorgt werden. Wenn man den Weg gehen würde, Wind- oder Sonnenstrom durch Energiespeicher zeitlich zu glätten, ließe sich die Elektrolyse auf effiziente Weise betreiben. Die Herausforderung, an der wir am DLR sowie andere Forschungsinstitute arbeiten, besteht allerdings darin, alternative Elektrolyse-Technologien nutzbar zu machen. Doch diese Elektrolyseure benötigen teure Metalle wie Platin. Daher arbeiten wir an der Frage, ob und wie sich die gleichen Leistungsparameter mit deutlich weniger Edelmetallen und anderen strategischen Materialien erzielen lassen. Das würde sich auch im Preis von Wasserstoff niederschlagen. Auch der Wirkungsgrad spielt eine Rolle. Er liegt derzeit bei 70 Prozent. 100 Prozent werden nie erreichbar sein. Da erlegt uns die Physik prinzipielle Grenzen auf.

### **Es gibt noch andere Farben als grün und gelb ...**

Ja, es gibt unter anderem auch türkisen und blauen Wasserstoff. Der blaue Wasserstoff ist der, bei dessen Herstellung man das entstehende CO<sub>2</sub> abscheidet und unter der Erde verpresst, etwa in ehemaligen Erdgasfeldern. Das ist zwar technisch machbar. Doch was es ökonomisch bedeutet, ist mit Unsicherheiten behaftet. Und: Die Technologie leidet unter einem Verifizierungsproblem. Denn es ist unmöglich festzustellen, ob zum Beispiel in



einem Erdgas-Förderfeld in Alaska oder Sibirien – wo CO<sub>2</sub> in den Untergrund verpresst werden könnte – eine auf Satellitenbildern wie eine Kompressorstation aussehende Anlage auch tatsächlich eine Kompressorstation oder nur eine Attrappe ist.

### **Und es gibt außerdem ein Akzeptanzproblem ..**

Es gab am Standort Schwarze Pumpe in Brandenburg mal ein Versuchskraftwerk von Vattenfall. Dort hat man CO<sub>2</sub> abgeschieden und später in der Nähe von Salzwedel in Sachsen-Anhalt im Untergrund verpresst – und damit demonstriert, dass das möglich ist. Doch das Ganze ist letztlich an fehlender Akzeptanz in der Bevölkerung gescheitert. Aber auch hier weise ich auf den Weltklimarat hin. Der sieht die sogenannte Sequestrierung von CO<sub>2</sub> klar als Möglichkeit zur Minderung der Klimagas-Emissionen.

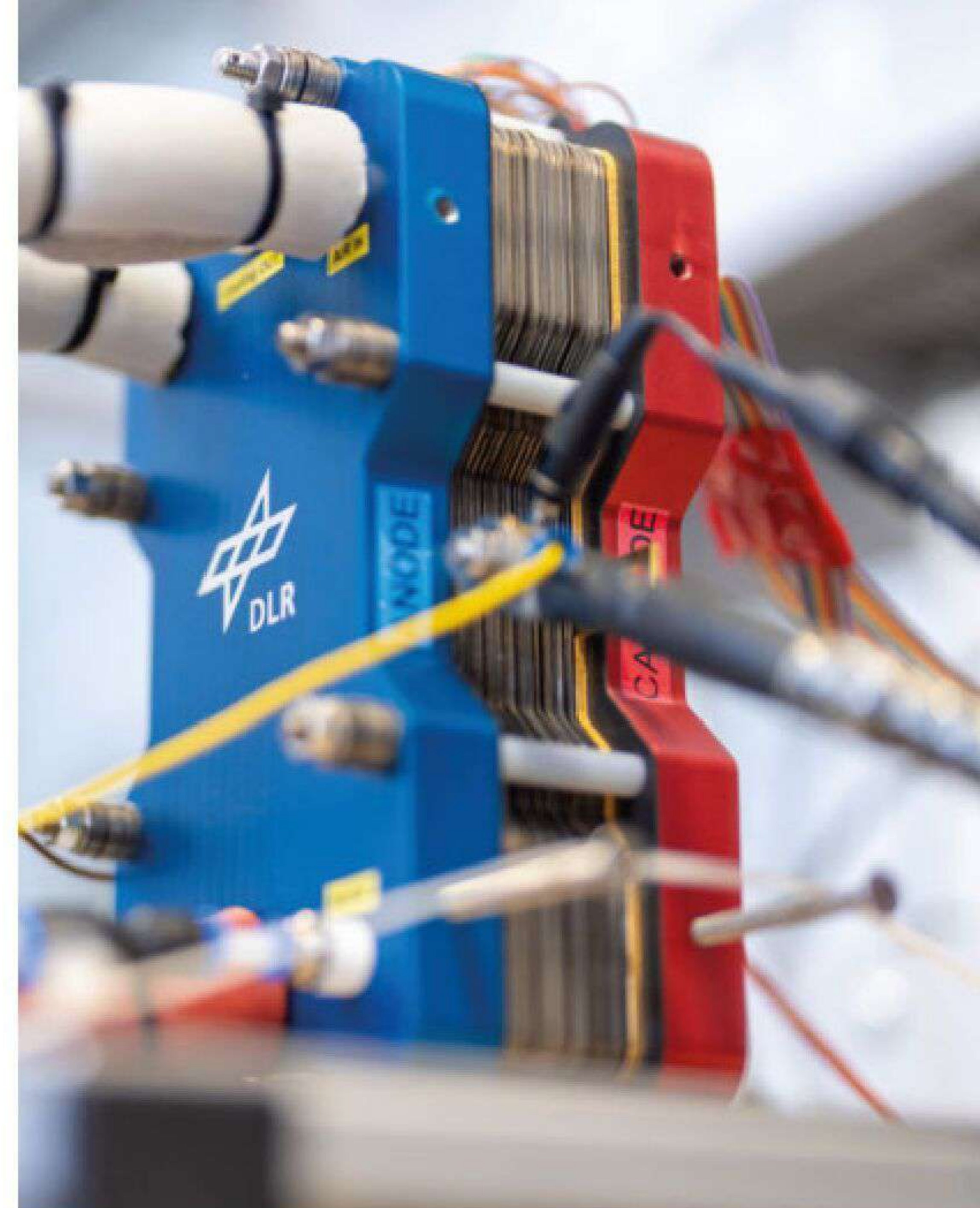
### **Wie wichtig ist Wasserstoff als Energiespeicher?**

Es gibt drei großen Speichertechnologien: thermische, elektrochemische und chemische Speicher. Wasserstoff ist ein chemischen Energiespeicher. Dasselbe gilt für synthetische Kohlenwasserstoffe – künstlich, also nicht aus Rohöl, hergestelltes Benzin, Diesel oder Kerosin. Und da muss man differenzieren. Beim Blick auf den grünen Wasserstoff hat sich in den letzten Jahren die Erkenntnis in der Gesellschaft durchgesetzt, dass er ein großes Potenzial als Energiespeicher hat. Auf der Straße, auf der Schiene, im Schiffsverkehr und vor allen Dingen im Luftverkehr kann er wesentliche Beiträge zur CO<sub>2</sub>-Reduktion leisten. Das zeigt sich mittlerweile in einer beachtlichen Zahl von Projekten, in denen etwa die Nutzung Wasserstoff für das elektrische Fliegen demonstriert wird.

### **Können Sie uns ein Beispiel nennen?**

Vor einigen Jahren haben wir in Kooperation mit dem Startup-Unternehmen H2FLY ein mit Wasserstoff betriebenes Brennstoffzellen-Flugzeug für bis zu vier Personen





entwickelt und demonstriert. Nun sind wir gemeinsam mit Partnern dabei, Brennstoffzellen-Flugzeuge in einem Leistungsbereich über einem Megawatt zu entwerfen. Solche Flugzeuge sollen in naher Zukunft etwa 20 Personen befördern können, später auch noch mehr.

### **Sie haben gerade synthetische Kohlenwasserstoffe erwähnt. Was hat es damit auf sich?**

Diese Kraftstoffe lassen sich chemisch aus kohlenstoffhaltigen Verbindungen und Wasserstoff herstellen, mithilfe von elektrischem Strom. Sie werden daher auch als E-Fuels bezeichnet. Die Technologie, um sie für die Luftfahrt bereitzustellen, ist im Prinzip seit Jahren bekannt. Dank ausführlicher Analysen wissen wir mittlerweile auch sehr genau, was dafür benötigt wird und wieviel die Herstellung kostet. Die gute Nachricht: Man kann die Herstellung mit der heutigen Technik bewältigen. Die schlechte Nachricht: Der finanzielle Mehraufwand gegenüber herkömmlichem Flugzeugtreibstoff, dem Kerosin, liegt bei etwa drei Euro pro Liter. Das ist viel. Dieser Betrag führt zu erheblichen Mehrkosten, wenn ein Flugzeug mit synthetischem Kerosin betrieben werden soll.

### **Wie ließen sich die Kosten der E-Fuels senken?**

Den Löwenanteil an den Kosten verursacht die Herstellung des Wasserstoffs. Damit sind wir wieder da, wo wir vorhin schon waren. Wenn es gelingt, den Wasserstoff zum halben Preis herzustellen, dann halbiert sich, Pi mal Daumen, auch der Aufpreis von E-Fuels im Vergleich zu Kerosin. Also auch hier müssen wir den Wasserstoff preiswerter gestalten, um auf wettbewerbsfähige Weise den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren.

### **Welchen Stellenwert könnten E-Fuels haben?**

Wenn es uns gelingen würde, E-Fuels zum gleichen Preis herzustellen wie das heutige fossile Kerosin, dann hätten wir fast alle Klimaschutzaufgaben für den Luftverkehr

gelöst. Wir müssten dann die Entwicklung im Bereich elektrisches Fliegen mit Wasserstoff und Brennstoffzellen nur noch für kleinere Nischenmärkte betreiben. Dagegen ließe sich der gesamte Langstrecken-Flugverkehr mithilfe von synthetischen Kohlenwasserstoffen dekarbonisieren.

### **Sind E-Fuels damit der „bessere Wasserstoff“?**

Es wird in der Öffentlichkeit häufig der falsche Eindruck erweckt, als wäre es für das Erreichen der Klimaschutzziele alternativlos, auf Wasserstoff umzusteigen. Doch das ist nicht korrekt. Man kann entweder auf Wasserstoff umsteigen und diesen Wasserstoff in Brennstoffzellen oder Gasturbinen einsetzen. Oder man kann, zum Beispiel den Luftverkehr, von den Klimagasemissionen befreien, indem man das bisher genutzte fossile Kerosin durch E-Fuels ersetzt. Andererseits kann niemand zuverlässig vorhersagen, wie sich die Kosten der beiden alternativen Technologien in den nächsten Jahrzehnten entwickeln werden.

### **Aber ohne Wasserstoff geht es nicht – auch nicht bei synthetischen Kohlenwasserstoffen?**

Wasserstoff ist für beide Energiespeicher-Alternativen eine wichtige Voraussetzung – sowohl für die direkte Nutzung in einer Brennstoffzelle oder Gasturbine als auch für die Herstellung von E-Fuels. Allerdings: Synthetische Treibstoffe lassen sich auch aus Biomasse herstellen statt mit Wasserstoff. Doch dann würde wohl sofort eine Diskussion entbrennen über „Teller oder Tank“, Nachhaltigkeit und klimaschädliche Emissionen der Landwirtschaft. Da ist die Gewinnung auf Basis von Wasserstoff wohl die bessere Variante. Was die optimale Lösung wäre, erkläre ich immer gerne anhand eines hypothetischen „Goldstandards“ für die Erzeugung von synthetischen Kohlenwasserstoffen – einem Verfahren, das allen Randbedingungen genügen würde.

---

Mit einer neuen Technik lässt sich in Fahrzeugen mit Brennstoffzellen-Antrieb ein Teil der zum Komprimieren des Wasserstoffs im Drucktank erforderlichen Energie nutzen, um das Wageninnere zu klimatisieren. Das gelingt mit Metallhydriden (links). Mitte und rechts: In einem Langzeitversuch im Labor untersucht Carina Heike Dölz die Eigenschaften von Brennstoffzellen-Stapeln, sogenannten Stacks.

---





### Wie sieht dieser hypothetische Goldstandard bei der Produktion synthetischer Kraftstoffe aus?

Man umgibt in diesem Gedankenexperiment eine Fläche von einer bestimmten Größe mit einem Zaun. Darin baut man entweder ein Wind-, Solar- oder Kernkraftwerk, mit dessen Strom oder Wärme man Wasserstoff herstellt. Zusätzlich errichtet man eine Anlage, mit der sich CO<sub>2</sub> aus der Luft extrahieren lässt. Man braucht also nur Wasser, Luft und preiswerte Energie, um ohne Biomasse und ohne Klimaschäden synthetische Kraftstoffe herzustellen.

### Wäre das heute bereits machbar?

Nein, technologisch ist das noch nicht ausgereift und ökonomisch nicht wettbewerbsfähig. Wenn die Herstellung von E-Fuels nach dem Goldstandard heute schon möglich wäre, dann wäre die US-Armee sicher die erste Organisation, die das nutzen würde. Denn sie hätte dann keine Treibstoffprobleme mehr. Dann würden die Militärs ihre Flugzeugträger nicht alle paar Monate mit neuem Kerosin für die Flugzeuge versorgen müssen, sondern könnten synthetisches Kerosin auf See selbst produzieren. Auf einem atomgetriebenen Flugzeugträger gibt es alles Notwendige: Energie, Wasser und Luft.

### Gelten die Vorteile der E-Fuels nur beim Fliegen?

Nein, sie gelten überall, auch im Schiffs- und Straßenverkehr. Sie gelten übrigens genauso für die Ölheizung zu

Hause: Es heißt zwar immer, um klimaneutral zu werden, müsse man Ölheizungen ersetzen – aber das stimmt nicht. Wenn man die Ölheizung dekarbonisieren will, kann man das auch tun, indem man das fossile Heizöl durch synthetisches Öl ersetzt. Damit ließen sich auch Dieselgeneratoren betreiben und man könnte daraus etwa Kunststoffe machen. Also: Wenn es gelingen würde, die synthetischen Kohlenwasserstoffe preiswert und in Massen herzustellen, wären zwar nicht alle, aber sehr viele unserer Klimaprobleme gelöst.

## Die großen Vorteile von E-Fuels gelten überall

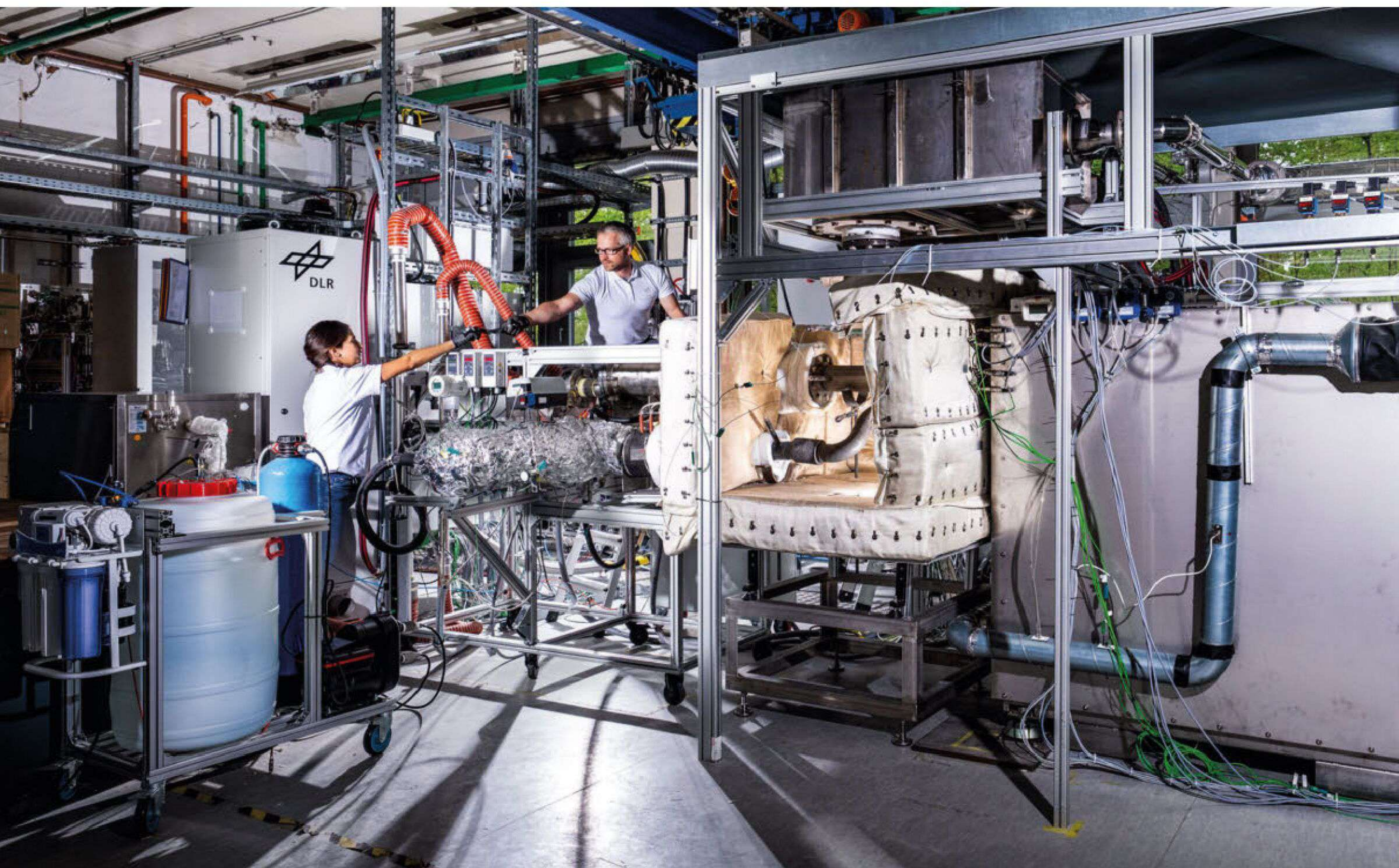
### Der Preisanstieg bei den fossilen Brennstoffen hilft da sicher, weil sich die Kosten angleichen?

Ja, es gibt ja zwei Tendenzen. Zum einen wird hoffentlich das synthetische Kerosin oder Benzin oder der synthetische Diesel durch den technologischen Fortschritt immer preiswerter. Dagegen werden fossile Kraftstoffe wie Benzin und Kerosin teurer. Die Gründe dafür sind zum einen die steigende Nachfrage, vor allem in China und Indien, zum anderen die Tatsache, dass in Zukunft bei der Weiterentwicklung des CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarkts

---

In der Versuchsanlage „Galactica“ werden Hochtemperatur-Brennstoffzellen und Module für Hochtemperatur-Elektrolyseure getestet. Die Bauteile sollen künftig unter anderem auf Kreuzfahrtschiffen zum Einsatz kommen, die mit Wasserstoff betrieben werden. An der Anlage arbeiten die DLR-Forscherin Diana Maria Amaya Duenas (links) und ihr Kollege Dirk Ullmer.

---







oder der Einführung einer globalen CO<sub>2</sub>-Steuer der Preis regulatorisch angehoben wird. Irgendwann schneiden sich vielleicht die beiden Preiskurven für fossile und synthetische Kraftstoffe. Doch wie lange es bis dahin noch dauern wird, lässt sich nicht seriös vorhersagen.

### **Aber es gibt solche Prognosen ...**

Viele Leute glauben, wenn man nur ein Simulationsprogramm entwickelt und das mit vielen Parametern füttert, lassen sich damit präzise Vorhersagen treffen. Das ist aber nach meiner Erfahrung für Energiesysteme nicht der Fall, weil sich die reale Welt nicht nach der Simulation richtet – siehe die aktuellen Gaspreise. Anders ist es beispielsweise bei der Simulation der Strömung um ein Flugzeug. Die lässt sich gut vorhersagen, denn die zugrundeliegenden Modelle können durch Windkanal-Experimente validiert werden. Simulationsmodelle für das Energiesystem der Zukunft hingegen mögen mathematisch korrekt sein, aber auf ihre Zuverlässigkeit prüfen lassen sie sich nicht im gleichen Sinne wie Aerodynamik-Simulationen

### **Sollte man die Forschung an Brennstoffzellen und batterie-elektrischen Autos dann nicht sein lassen – und sich auf die E-Fuels fokussieren?**

Diese Frage ist völlig berechtigt. Doch die Verfechter der Brennstoffzelle und der Batterieelektrik könnten sie in ähnlicher Weise stellen. Ich würde auf Ihre Frage mit dem

Zitat eines japanischen Kollegen antworten, der sagte: „Energiediversität ist genauso wichtig wie Biodiversität.“ Solange man sich nicht 100prozentig sicher ist, dass der Weg über den synthetischen Treibstoff der richtige ist, bin ich der Überzeugung: Unter forschungspolitischen Gesichtspunkten ist es gut, sich technologisch breit aufzustellen – und es dann den Mechanismen des Marktes zu überlassen, wohin sich die Technologien entwickeln und welche sich durchsetzen. Was gut und preiswert ist, setzt sich letztlich durch – was untauglich und teuer ist, nicht.

### **In welchen Segmenten werden sich Anwendungen des Wasserstoffs wohl zuerst durchsetzen?**

Wenn man regulatorisch das CO<sub>2</sub> teurer machen würde – etwa durch einen Preis für CO<sub>2</sub>-Emissionen –, dann ließe sich das so beantworten: In einem rein marktwirtschaftlichen System verläuft die Dekarbonisierung von den Maßnahmen mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten hin zu Maßnahmen mit hohen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten.

### **Das klingt sehr akademisch. Können Sie das an einem Beispiel erläutern?**

Gerne. Der Begriff der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten lässt sich aus dem Blickwinkel der berühmten „schwäbischen Hausfrau“ beschreiben: „So viel Geld muss ich auf den Tisch legen, und so viel CO<sub>2</sub> spare ich damit ein.“ Würde etwa mit deutscher Technologie ein indisches Kohlekraftwerk modern ausgerüstet – ein Projekt, das total unsexy ist –, ließen sich zu geringen Kosten große Mengen an CO<sub>2</sub> einsparen. Die Vermeidungskosten lägen unter 100 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>. Wird hingegen in Deutschland der Kauf von Elektroautos mit Steuergeld subventioniert, um CO<sub>2</sub> zu sparen, reden wir von CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten zwischen 500 und 1000 Euro pro Tonne. Die Zahlen können Sie anhand von Kapitel 3 meines Buches „Sieben Energiewendemärchen?“ für Ihren nächsten Elektroautokauf nachvollziehen.

### **Und was bedeutet das für den Wasserstoff?**

Wenn man den Preis von CO<sub>2</sub> anheben würde, dann würden zunächst diejenigen Klimaschutzmaßnahmen aktiviert, die als erste „mit dem Kopf im Wasser stehen“ – also die mit den niedrigsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Bei Wasserstofftechnologien könnte dazu die Stahlindustrie gehören, wo Wasserstoff statt Koks für die Reduktion von Eisen eingesetzt werden kann. Ich kann mir vorstellen, dass auch einige Verkehrsanwendungen unter den ersten wären: möglicherweise der Flugverkehr. Um das besser abschätzen zu können, müsste man für die Wasserstoff-Technologien die Rangfolge der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten analysieren. Doch das hat meines Wissens noch niemand getan.

### **Das ist erstaunlich ...**

In einer Marktwirtschaft bräuchte sich darum auch niemand zu kümmern. Ich kann mich schließlich auch an

»Die Welt richtet sich nicht nach einer Simulation«

•

»Was gut und preiswert ist, wird sich letztlich durchsetzen«





keinen Beamten erinnern, der berechnen musste, wie schnell Telefonbücher durch Smartphones ersetzt werden. Das hat der Markt ganz allein geregelt.

**Klar ist jedenfalls: Das Angebot an klimaneutral erzeugtem Wasserstoff ist begrenzt. Was lässt sich dagegen tun?**

Ja, das Angebot an Wasserstoff ist zurzeit begrenzt. Da es bislang keine große Nachfrage nach dem grünen Wasserstoff gibt, wird er auch nicht in großem Umfang produziert. Aber das ist kein Anlass zu Sorge. Das möchte ich Ihnen in einer Metapher erläutern: Falls heute die Nachfrage nach Champagner für 60 Euro die Flasche explodiert, dann werden Landwirte ihre Produktion von Weizen morgen auf Weintrauben umstellen. Dann wird es übermorgen dreimal so viel Champagner geben. Der Markt wird sich an die Nachfrage anpassen. Und so ähnlich wäre es, wenn – etwa durch regulatorische Maßnahmen – der aus Erdgas erzeugte, graue Wasserstoff plötzlich ähnlich teuer würde wie grüner Wasserstoff: Dann zöge automatisch die Nachfrage nach der grünen Variante an. Deshalb bin ich dafür, die Preise durch regulatorische Maßnahmen anzuheben, statt die sogenannten Markthochläufer durch Subventionen zu fördern. Das ist nach meiner Ansicht kein nachhaltiger Ansatz.

**In Deutschland ließe sich eine große Nachfrage nach grünem Wasserstoff gar nicht decken. Man bräuchte Import. Wäre das gut und nachhaltig?**

Ich finde es immer wieder lustig, dass die Deutschen einerseits kein Problem damit haben, dass in Deutschland keine Bananen wachsen und man deshalb in Deutschland keine „Bananen-Autarkie“ hat. Die Früchte werden einfach aus anderen Ländern eingeführt. Andererseits machen sich viele Menschen Sorgen darüber, ob

Deutschland energieautark ist. Fakt ist: Deutschland kann weder heute noch in absehbarer Zukunft seinen Energiebedarf autark decken. Und in einer globalisierten und vernetzten Welt ist es auch nicht schlimm, wenn Deutschland einen Teil seiner Energie importiert – sofern die Bezugsquellen diversifiziert sind

## *Der Markt für grünen Wasserstoff wird sich an die Nachfrage anpassen*

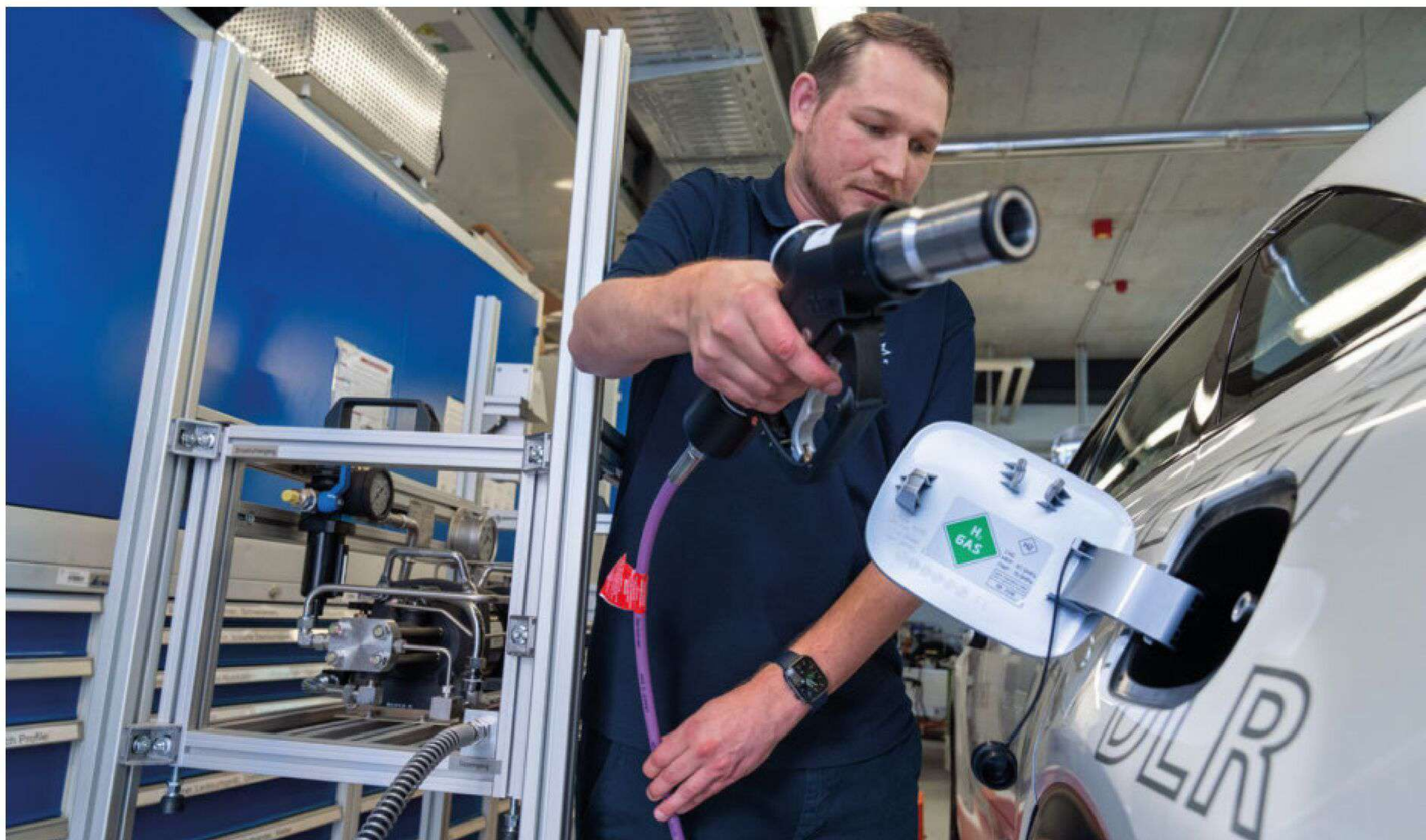
**Wird sich also eine Art Weltmarkt für grünen Wasserstoff entwickeln?**

Ich glaube, wenn man den Wasserstoff der Zukunft in einer CO<sub>2</sub>-neutralen Weise erzeugen kann, dann wird sich ein Markt dafür herausbilden. Und wenn die Preise wettbewerbsfähig sind, werden wir unseren Wasserstoff weltweit einkaufen – genauso wie wir heute Kiwis und Bananen auf dem Weltmarkt kaufen. Ich bin der Meinung, dass von der Globalisierung alle profitieren. Daher sehe ich keinen Grund, warum dieses Konzept nicht auch bei Energie tragfähig sein soll. Die fossilen Energieträger werden dann ersetzt durch erneuerbare. Und es kommen neue Akteure ins Spiel, zum Beispiel in Afrika. Wir müssen beim Energieversorgungssystem zwar diversifizieren, aber ich halte es für kein Problem, wenn Deutschland einen großen Teil seiner Energieträger importieren muss. Dem Import muss allerdings ein angemessener Gegenwert gegenüberstehen. Und da bin ich mir angesichts unseres heutigen Bildungswesens nicht ganz so sicher.

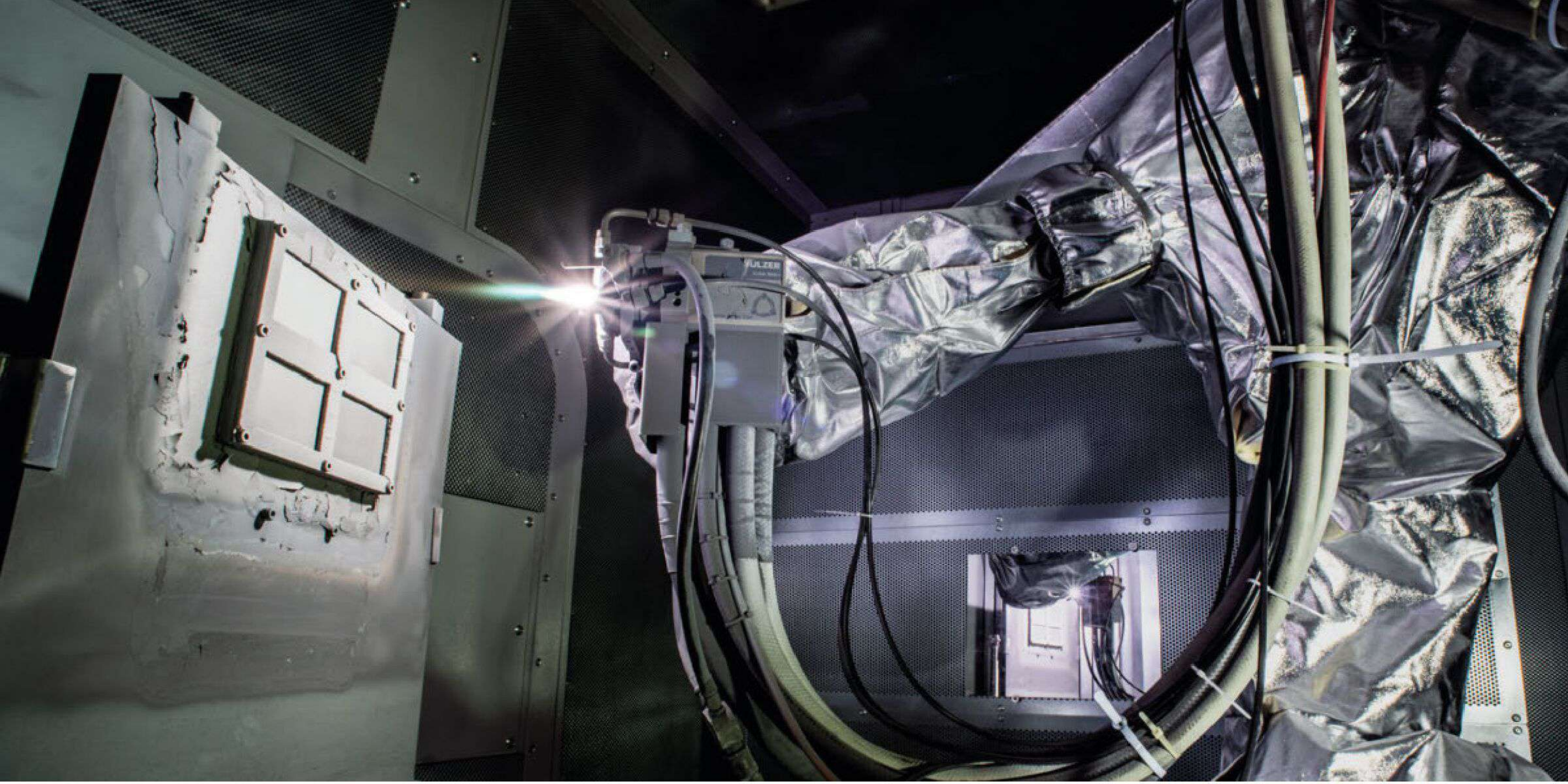
---

Eine mobile Wasserstoff-Kompressionsanlage mit Brennstoffzellen-Auto: Mit der Anlage am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte lassen sich unterschiedliche Versuchsfahrzeuge im Labormaßstab flexibel mit Wasserstoff betanken, wie der Forscher Tobias Schneider demonstriert.

---







### **Lässt das Bildungsniveau nach?**

Ja. Das kann ich anhand der Korrektur meiner Thermodynamik-Klausuren objektiv in jedem Jahr beobachten. Da sehe ich klar, dass die Leistungsfähigkeit der Studenten im Durchschnitt immer geringer geworden ist. Das ist ein Fakt, den auch anderen Fachkollegen feststellen.

### **Was müsste geschehen, damit sich das ändert?**

Ich bin der Meinung: Was das Universitätssystem braucht, sind Eingangsprüfungen für alle Fächer und Studiengebühren. Jeder, der studiert, sollte einen Eigenbeitrag leisten. Es ist für mich unbegreiflich, dass eine Nation, die pro Jahr über 70 Milliarden Euro für Urlaubsreisen ausgibt, vom Staat die Vollfinanzierung des Hochschulwesens erwartet. Ich halte es hier mit dem Sprichwort: „Was nichts kostet, ist auch nichts wert.“ Und ich empfehle einen Blick auf die Wertschätzung von Bildung in China und Indien.

### **Zurück zur künftigen Energieversorgung: Wir haben in Deutschland gerade das Problem einer starken Abhängigkeit, vor allem beim Erdgas. Wenn morgen jemand grünen Wasserstoff in Hülle und Fülle anbieten würde, wäre es dann möglich, Erdgas einfach dadurch zu ersetzen?**

Es wäre schön, wenn man die Erdgaslieferungen schnell und eins zu eins durch Wasserstoff ersetzen könnte. Aber das geht leider in dieser Form nicht. Man kann in den Gasnetzen einen gewissen Teil des Gases mit Wasserstoff anreichern, aber man kann das nicht komplett ersetzen. Denn die Geräte – vom heimischen Gasherd bis zu den Industrieöfen – sind auf Erdgas eingestellt. Sie lassen sich daher allenfalls mit kleinen Beimengungen von Wasserstoff zum Erdgas betreiben.

### **Worin genau liegen die Schwierigkeiten?**

Die technischen Einzelheiten reichen von der Verteilung des Gases über seine Nutzung in Kraftwerken bis hin zur Verbrennung in Industrieöfen.

### **Wie wäre das mit der Ölheizung? Würde die auch mit einem E-Fuel funktionieren?**

Ölheizungen sind recht robust. Wenn man es generell schafft, preiswerte synthetische Kohlenwasserstoff herzustellen, gibt es zwischen Heizöl, Benzin, Diesel und Kerosin keine fundamentalen Unterschiede. Da macht mir das Heizöl am wenigsten Sorgen.

### **Und wo sind Ihre Sorgen am größten?**

Der Flugzeugturbinen-Treibstoff ist der mit den höchsten Anforderungen.

### **Brennstoffzellen wären ein wichtiger Teil eines auf Wasserstoff basierenden Energiesystems. Sind die schon reif für eine breite Nutzung?**

Es gilt bei den Brennstoffzellen noch etliche Herausforderungen zu lösen. Doch da muss man differenzieren zwischen den Brennstoffzellen im kleinen Leistungsbereich, etwa für Pkw, und denen im größeren Leistungsbereich, für Flugzeuge, Schiffe und stationäre Anwendungen. Bei Pkw-Zellen lässt sich relativ klar sagen: Es geht vor allem um die Kosten. Man muss den Gehalt an Platin und anderen strategischen Materialien reduzieren und die Fähigkeit zu Herstellung in großem industriellem Maßstab vorantreiben. Mehr Entwicklungsarbeit sehe ich bei großen Brennstoffzellen-Systemen. Und da komme ich zu einem ganz wichtigen Thema unseres Instituts. Wir entwickeln Brennstoffzellen-Systeme im Leistungsbereich über einem Megawatt.

---

Eine Brennstoffzelle besteht aus zahlreichen dünnen Schichten, von denen jede eine andere Aufgabe hat. Durch sogenanntes atmosphärisches Plasma-Spritzen (APS) lassen sich die elektrochemischen Funktionsschichten in einer normalen Luftumgebung herstellen. Dabei werden in dem Plasmastrahl Temperaturen von etlichen Tausend Grad Celsius erreicht.

---





»Das Manko beim Skalieren von Brennstoffzellen: Sie sind zweidimensionale Gebilde«

•

»Bei kleinen Flugzeugen sind die technischen Herausforderungen zu meistern«

### Welche Fragen sind da besonders knifflig?

Eine Frage wird mir oft gestellt: Wenn wir etwa ein Flugzeug oder ein Schiff haben, das eine Antriebsleistung von 10 Megawatt benötigt, warum nehmen wir dann nicht einfach 100 Exemplare von 100-Kilowatt-Brennstoffzellen-Systemen und schalten die zusammen? Das kann man zwar machen, doch das ist keine effiziente Lösung. Und die Historie zeigt auch, dass sich die Technik anders entwickelt hat. Man hätte beim Übergang von kohlebetriebenen Dampfmaschinen zum Schiffsdiesel so vorgehen können. Doch man hat sich klargemacht: Beim Antrieb von Schiffen man hat andere Randbedingungen als etwa auf der Straße. Man hat andere Geschwindigkeiten, und man muss nicht innerhalb von wenigen Sekunden von 0 auf Tempo 100 beschleunigen. Deshalb wurden nicht einfach viele Dieselmotoren zusammengeschaltet, sondern man hat den Schiffsdiesel neu entwickelt. Das ist ein hausgroßes Aggregat mit mehreren Megawatt Leistung. Und obwohl es auf demselben Prinzip wie ein Pkw-Dieselmotor beruht, stecken in einem Schiffsdiesel viele Innovationen. Sie erschließen sich allerdings erst, wenn man sich mit dem Thema der Größe von Maschinen und ihrer Skalierung auseinandersetzt.

### Worum geht es da?

Es geht um Materialfragen, Wärmemanagement, Luftzufuhr und Hochspannungstechnik. Und: So wie der Sprung vom 100 Kilowatt-Motor im Pkw zum 10-Megawatt-Schiffsdiesel kein trivialer Sprung ist und viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit benötigt, so wenig trivial ist auch der Sprung von den heutigen 100-Kilowatt-Brennstoffzellen-Systemen zu Brennstoffzellen-Systemen mit 1,5 Megawatt, die man in einem Flugzeug braucht. Da müssen Sie jedes Detail – Schichten und einzelne Elemente – im Hochleistungscomputer simulieren und optimieren. Sie müssen jedes Teilelement separat vergrößern – zum Beispiel die Strömungskanäle für Wasserstoff, Sauerstoff und Wasser.

### Was ist der Grund für diese Komplexität?

Brennstoffzellen-Systeme stehen unter Druck. In dem System zirkulieren Wasserdampf, Wasserstoff und Sauerstoff. Deshalb ist es nicht damit getan, dass man alle Maße etwa mit dem Faktor zwei multipliziert. Man muss unter anderem die einzelnen Strömungskanäle anpacken und optimieren – denn ein großer Kanal hat einen anderen Widerstand als ein kleiner. Für diese Aufgaben haben wir am Institut eine ganze Simulationsabteilung, die nicht nur mit konventionellen Rechenmethoden arbeitet, sondern schon das Quantencomputing im Blick hat. Es sind 1000 kleine Dinge, die man alle einzeln analysieren muss. Dazu laufe viele Forschungsprojekte. Und gerade sind wir gemeinsam mit der Luftfahrtindustrie dabei, eine Forschungsinfrastruktur für solche großen Brennstoffzellen-Systeme zu schaffen.

### Für welche Art von Flugzeugen kommt die Brennstoffzellen-Technik überhaupt infrage?

Mit elektrifizierten Flugzeugen, an denen wir am DLR in Kooperation mit der Industrie gerade arbeiten und die Platz für 20 bis 40 Personen bieten, ließe sich der regionale Luftverkehr abdecken. Solche Flugzeuge wollen wir durch wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Systeme elektrifizieren. Die nächste Stufe wären Maschinen von der Größe eines Airbus A320, der über 100 Fluggäste befördern kann.

### Gibt es eine Grenze nach oben?

Prinzipiell wäre die Nutzung der Brennstoffzellen-Technik auch für Großraumflugzeuge denkbar. Aber es wird umso schwieriger, je größer die Flugzeuge sind. Daher bin ich mir nicht sicher, wie weit man hinsichtlich Passagierzahl und Reichweite kommt. Bei kleineren Regionalflugzeugen dagegen bin ich überzeugt, dass sich die technischen Herausforderungen meistern lassen. Ob das auch für die ökonomischen Herausforderungen gilt, wird sich zeigen.

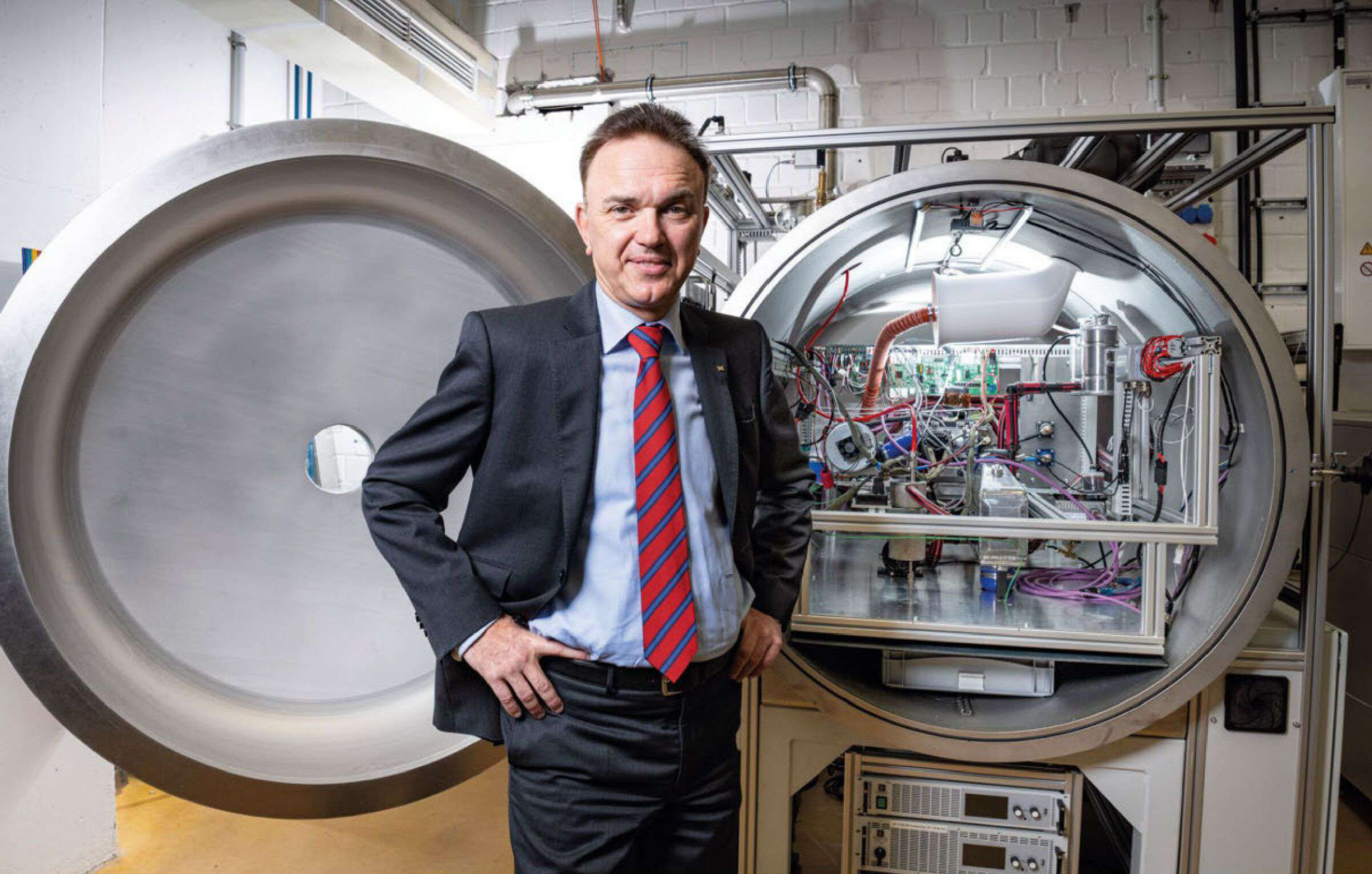
### Worin liegen die Hemmnisse beim Bau eines Brennstoffzellen-Großraumflugzeugs?

Es gibt einen entscheidenden Unterschied zur Gasturbine. Diese ist ein dreidimensionales Aggregat, während eine Brennstoffzelle ein quasi-zweidimensionales Gebilde ist. Das bedeutet: Wenn man bei einer Gasturbine alle technischen Maße beispielsweise mit dem Faktor zwei multipliziert und sie so baut, kommt wieder eine Gasturbine heraus, die im Prinzip auch funktioniert. Wenn man hingegen bei einer Brennstoffzelle alle Maße mit dem Faktor zwei multipliziert, entsteht etwas, das nicht funktioniert – wegen der quasi-zweidimensionalen Zellstruktur. Die lässt sich zwar in zwei Richtungen vergrößern, doch in der dritten Dimension – der Bauhöhe – gilt: Die einzelnen Schichten der Zelle müssen aus Gründen der Elektrochemie ganz bestimmte Abstände aufweisen. Wo die genauen Grenzen der Hochskalierung von Brennstoffzellen liegen, muss die Forschung noch beantworten. Daher gehe ich davon aus, dass die großen Flugzeuge auch künftig mit konventionellen Triebwerken ausgestattet sein werden – aber mit synthetischem Kraftstoff fliegen.

### Hat die Brennstoffzelle auch ein Problem, wenn es ums Verkleinern geht? Wäre es zum Beispiel möglich, ein Smartphone damit auszurüsten?

Wenn es gelingt, einen Wasserstoff-Speicher zu integrieren: ja. Kürzlich habe ich gelesen: Das Friseurhandwerk wünscht sich einen schnurlosen Haartrockner. Und es gibt sogar ein Patent für einen Haartrockner, der mit Brennstoffzelle und Wasserstoff betrieben wird. Der ist nur noch nicht kommerziell realisiert. Und es gibt noch mehr interessante Anwendungen: zum Beispiel Lastenfahräder oder schnurlose Bohrmaschinen. Allerdings: Da steht die Brennstoffzelle in Konkurrenz zur Batterie.





Und: es geht dann um Fragen der Kosten, und der Bequemlichkeit bei der Nutzung. Es ist einfacher, ein Gerät mit Akku an die Steckdose zu stecken, als eine Wasserstoff-Kartusche aufzufüllen oder auszuwechseln.

**Wäre die Logistik für die Versorgung mit Wasserstoff ein Problem, etwa beim Tanken?**

Ich sehe kein technisches Problem darin, eine doppelte oder gar dreifache Infrastruktur für die Mobilität von morgen zu entwickeln: für die flüssigen Treibstoffe, den Strom für die elektrisch betriebenen Wagen und den Wasserstoff. Ich meine, man kann alle drei Technologien parallel entwickeln. Ich finde allerdings auch, dass es nicht die Aufgabe des Staates sein sollte, diese Infrastruktur vorzuhalten. Die Infrastruktur für die Mobilität von morgen müssen meiner Meinung nach diejenigen bezahlen, die sie nutzen.

**Wäre es rentabel, Wasserstoff in Methan, also Erdgas, zu verwandeln, um es etwa in Kraftwerken zu verbrennen? Man denke an den Wirkungsgrad.**

Technisch wäre das tatsächlich eine Perspektive. Und: Auch wenn der thermodynamische Wirkungsgrad einer Technologie miserabel ist – er ist im Grunde eine Größe, die nur für Insider interessant ist. Damit lässt sich eine Technologie nicht überzeugend bewerten. Für die Marktwirtschaft ist das Einzige, was für eine Bewertung zählt:

der Euro. Wenn Sie klimaneutrales Methan mit einem grottenschlechten Wirkungsgrad herstellen, aber das Produkt am Ende nur zehn Cent kostet, dann wird sich niemand dafür interessieren, wie groß der Wirkungsgrad war. Dann wird man Ihnen das Methan auf jeden Fall aus den Händen reißen.

**Bei unserem letzten Gespräch 2016 sagen Sie: „In Deutschland wünsche ich mir beim Umsetzen der Klimaziele einen schärferen Blick auf die Frage: Ist das, was wir planen, wirklich effektiv und effizient?“ War das so in den letzten sechs Jahren? Ist Ihr Wunsch in Erfüllung gegangen?**

Nein. Was wir in den letzten Jahren gesehen haben, war weder effektiv noch effizient. Anderenfalls müsste mir jemand erklären, wieso Frankreich pro Kopf der Bevölkerung nur halb so viel CO<sub>2</sub> emittiert wie Deutschland. Wie der Ökonom Hans-Werner Sinn in zahlreichen Stellungnahmen begründet hat, geht vom EEG, dem Erneuerbare-Energien-Gesetz, keine nennenswerte Klimaschutzwirkung aus. Und die in der Öffentlichkeit so beliebte Subventionierung von Elektroautos ist eine Maßnahme mit hohen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Deshalb ist mein Fazit: Diesen Satz würde ich heute genauso wieder formulieren. Doch leider hat sich in der Energie- und Klimapolitik Deutschlands der Effizienz- und Effektivitätsmaßstab bisher nicht durchgesetzt. ■

---

Beruflich leitet André Thess unter anderem als Direktor das Institut für Technische Thermodynamik am DLR (hier vor einer Versuchskammer für innovative Batteriekonzepte). In seiner Freizeit hingegen widmet er sich mit Leidenschaft der „kulinarischen Thermodynamik“ – dem Kochen.

---

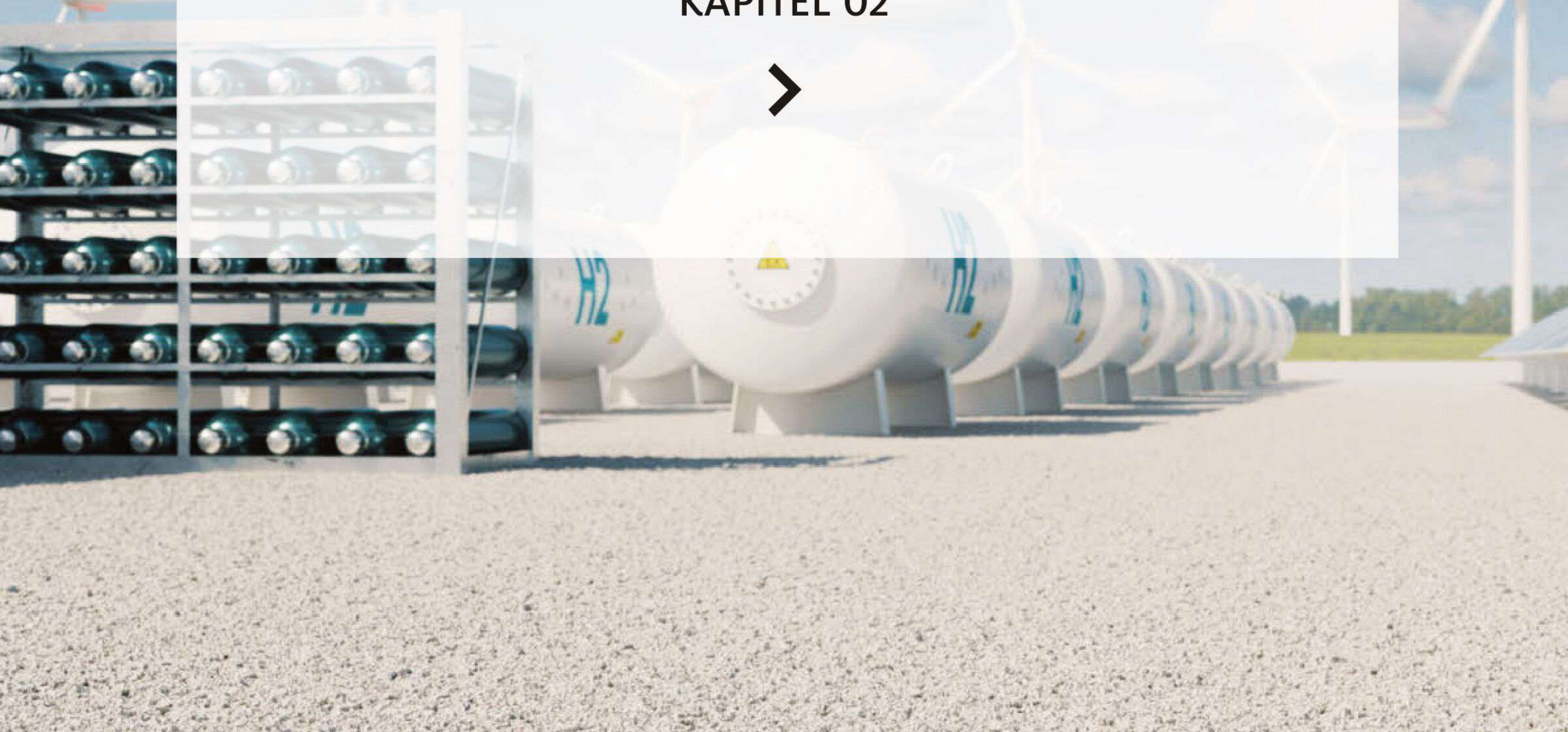


---

# Die Wege zum Wasserstoff

---

KAPITEL 02









---

# Heiß begehrt

---

Die Nachfrage nach grünem Wasserstoff wird wohl kräftig wachsen. Um das Gas auf saubere Art herzustellen, feilen Forscher an neuen Techniken – beispielsweise nach dem Vorbild der Photosynthese.

von RALF BUTSCHER

**B**ereits heute ist Wasserstoff ein gefragtes Gut. Er dient unter anderem als Basisstoff für die Herstellung von künstlichen Düngemitteln, als Kühlmittel in Kraftwerken und als Chemikalie zur Raffinierung von Mineralöl. Allerdings: Der dazu verwendete Wasserstoff bringt dem Klima keine Entlastung, sondern trägt im Gegenteil enorm zur Emission von Treibhausgasen bei. Denn bisher wird der meiste Wasserstoff aus Erdgas gewonnen – durch sogenannte Dampfreformierung: ein energieaufwendiges chemisches Verfahren, bei dem die Methan-Moleküle im Erdgas chemisch gespalten werden. Dazu sind große Mengen an Wasser und Wärme erforderlich. Und es entstehen pro Tonne produziertem Wasserstoff rund zehn Tonnen des Klimagases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>).

Fachleute sprechen bei dem aus der Erdgas-Reformierung hervorgehenden Produkt von „grauem“ Wasserstoff. Allein in Deutschland gelangen durch seine Erzeugung pro Jahr etwa 20 Millionen Tonnen an Treibhausgasen in die Atmosphäre. Das entspricht rund drei Prozent der Gesamtemissionen.

## Aus Grau soll Grün werden

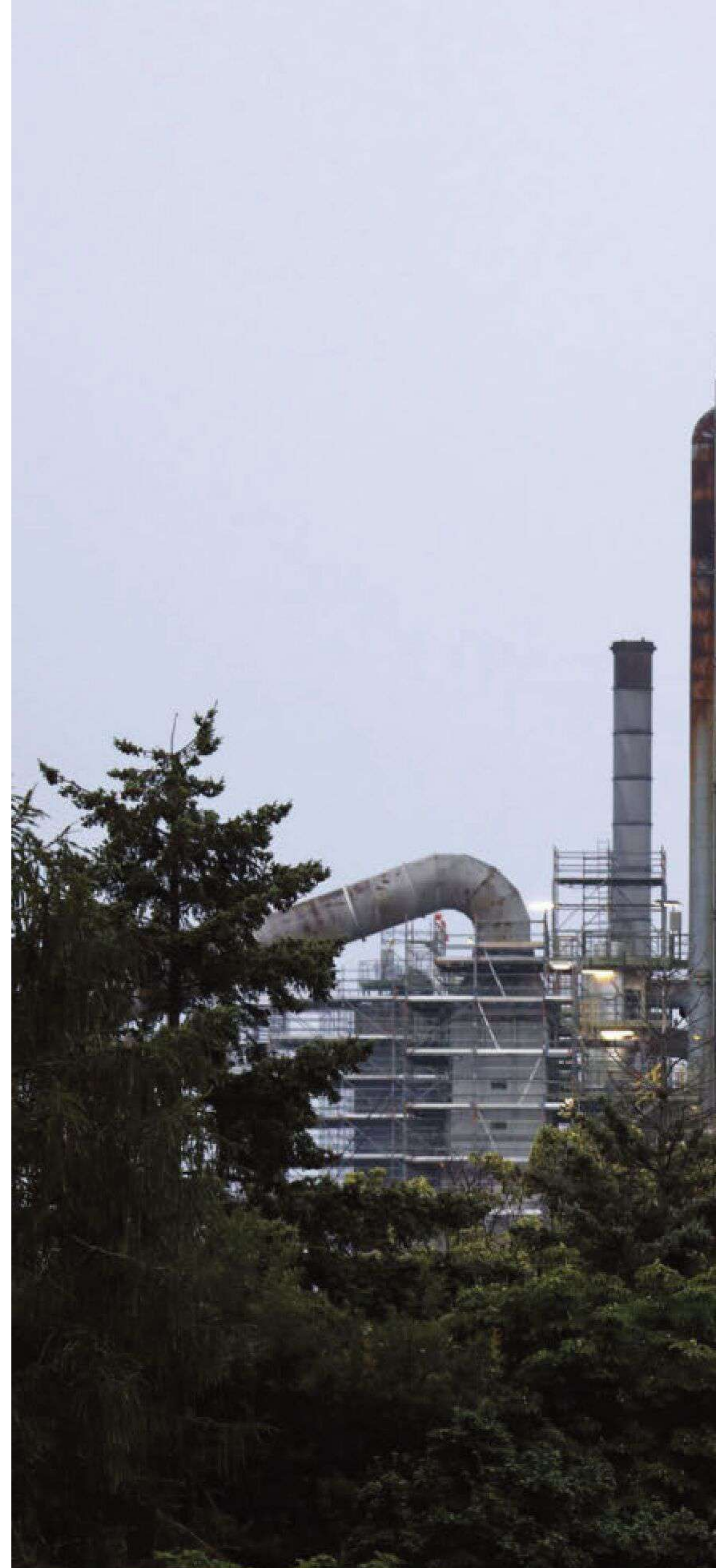
Das Ziel ist daher, künftig vor allem „grünen“ Wasserstoff herzustellen – klimaneutral, auf Basis erneuerbarer Energiequellen. Eine Möglichkeit dazu bietet die sogenannte Power-to-Gas-Technik, die beispielsweise in einer Pilotanlage in Werlte im Emsland verwirklicht ist. Dort wird mittels elektrischem Strom aus Windkraftanlagen Wasser durch Elektrolyse gespalten, wobei Sauerstoff und Wasserstoff entstehen. Dasselbe gelingt auch mit elektrischem Strom aus Solarzellen.

Das Manko: Bei jedem Verfahrensschritt gibt es Verluste, und vor allem bei der Elektrolyse geht viel kostbare, zuvor in Windkraft- oder Solaranlagen gewonnene Energie verloren. Bei der Elektrolyse werden Wasser-Moleküle in Sauerstoff und Wasser-

stoff aufgetrennt, indem man das Wasser unter eine elektrische Spannung setzt. Chemiker nennen diesen Vorgang eine Redoxreaktion. Danach enthält der erzeugte Wasserstoff noch ungefähr 70 Prozent der eingesetzten Energie. Stammt der elektrische Strom aus regenerativen Quellen, wird bei der Herstellung des Wasserstoffs kein klimaschädliches Gas freigesetzt.

## Mit Kalilauge und Membran

Die Elektrolyse-Anlage, der sogenannte Elektrolyseur, besteht aus zwei beschichteten Elektroden, dazwischen befindet sich ein Elektrolyt. Das heute meist genutzte Verfahren ist die Alkali-Elektrolyse, bei der Kalilauge – chemisch korrekt: eine wässrige Lösung von Kaliumhydroxid – als Elektrolyt dient. Eine Membran verhindert, dass sich die Spaltprodukte des Wassers – Sauerstoff und Wasserstoff –







In Wesseling bei Köln ist seit Juli 2021 die größte Elektrolyse-Anlage mit PEM-Technologie in Betrieb.

vermischen. Sie lässt aber den Transport von Ionen zu, die als Zwischenprodukte entstehen.

Das Manko dieser etablierten Technologie: Ihre Betriebsweise passt schlecht zu der schwankenden Verfügbarkeit von Wind- oder Sonnenstrom. Das macht den Einsatz der Technik recht ineffizient. Andere Verfahren wie Festoxid- und PEM-Elektrolyse kommen besser mit dem Auf und Ab der Stromproduktion in Windkraft- und Solaranlagen zurecht. So lässt sich ein PEM-Elektrolyseur (PEM steht für Proton Exchange Membrane), der statt einer Flüssigkeit einen festen Stoff als Elektrolyt enthält, in einem breiten Bereich zwischen 10 und 100 Prozent der vollen Leistung regeln. Das benötigt nur wenige Sekunden und ermöglicht es, die Anlage stetig an Schwankungen des Stromangebots anzupassen. Ein Problem sind die Kosten, denn die Elektrolyseure enthalten teure Materialien als Katalysator.

Die nach eigenen Angaben größte PEM-Elektrolyse-Anlage Europas betreibt das niederländische Mineralölunternehmen Shell seit Juli 2021 in der Rheinland-Raffinerie in Wesseling bei Köln. Die Anlage namens REFHYNE hat eine Leistung von maximal 10 Megawatt und kann pro Jahr bis zu 1300 Tonnen Wasserstoff CO<sub>2</sub>-emissionsfrei herstellen. Der Bau eines weiteren Elektrolyseurs dieser Technologie mit der zehnfachen Leistung von 100 Megawatt Leistung ist bereits geplant.

#### **Pflanzen als Vorbild**

Doch Forscher weltweit arbeiten auch an ganz neuen Ansätzen, um Wasser elektrolytisch zu spalten. Eines dieser Konzepte basiert darauf, den Zwischenschritt über die Stromerzeugung zu umgehen und stattdessen Sonnenlicht direkt in Wasserstoff umzuwandeln. Als Vorbild dafür dient der natürliche







Der Blick ins Innere eines leistungsfähigen Elektrolyseurs lässt die Komplexität der Technologie erahnen.

Mechanismus der Photosynthese, mit dem Pflanzen, Algen und manche Bakterien Energie aus Licht schöpfen. Das Funktionsprinzip der Photosynthese: Licht zerlegt mithilfe von Proteinkomplexen Wasser in seine Bestandteile. Am Ende entstehen Kohlenhydrate: lebenswichtige organische Verbindungen.

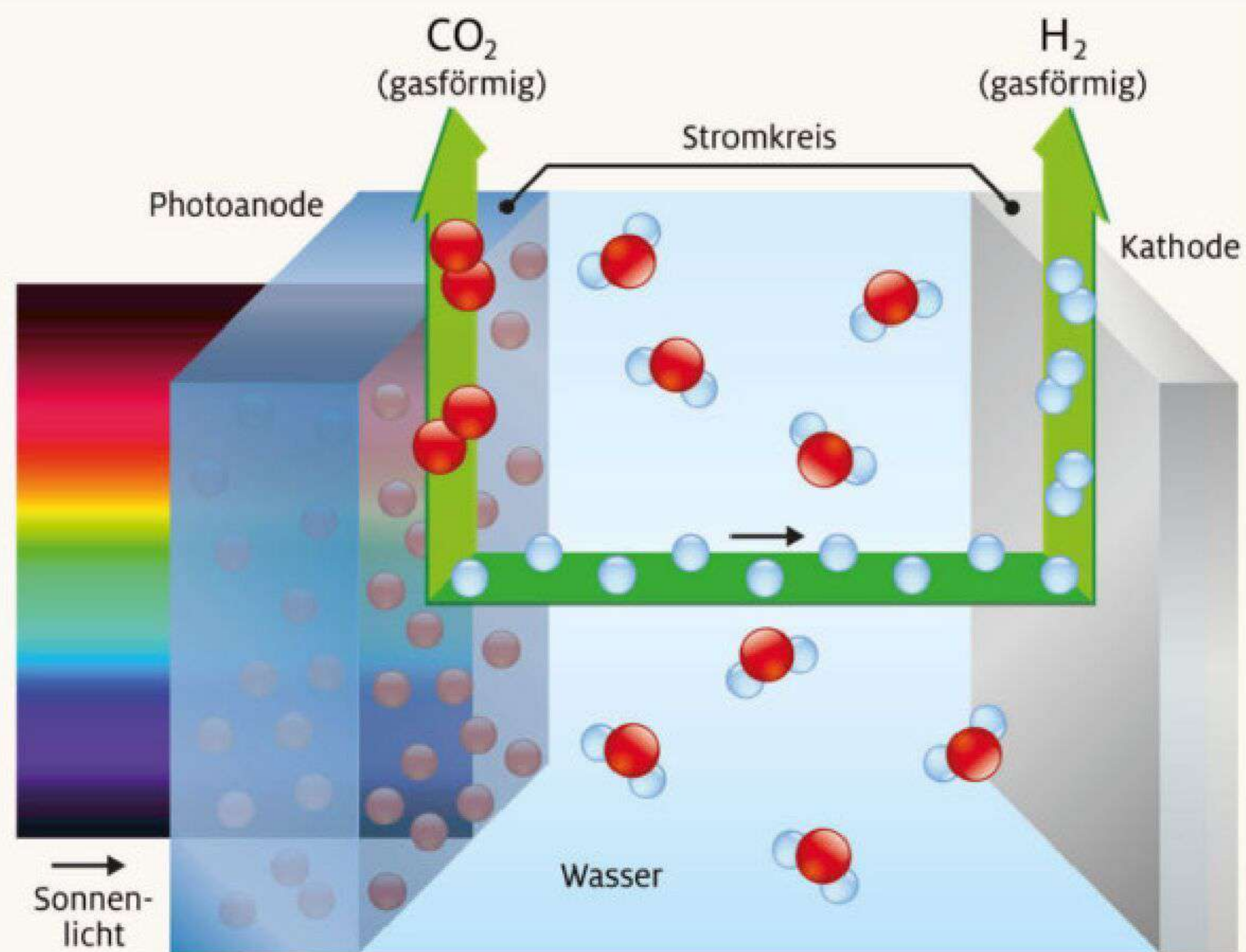
Wissenschaftler an der Universität Kiel haben Bakterien dazu gebracht, anstatt Kohlenhydraten Wasserstoff zu produzieren. Andere Forscher setzen

darauf, grünen Wasserstoff durch eine direkte chemische Spaltung von Wasser in einem „künstlichem Blatt“ herzustellen. Dazu imitieren sie die Photosynthese mit einer trickreichen Technik und speziellen Materialien. Die für die Photosynthese verantwortlichen Zellbestandteile der Pflanzen oder Algen ersetzen sie durch Schichten aus Halbleiter-Materialien und die Proteinkomplexe durch chemische Katalysatoren, die meisten davon Metalle.

### Der Blick in ein künstliches Blatt

Eine photoelektrochemische Zelle, die mitunter auch als „künstliches Blatt“ bezeichnet wird, nutzt das Sonnenlicht zum Erzeugen von Wasserstoff aus Wasser. Sie funktioniert in Teilen ähnlich wie eine zum Beispiel eine normale Silizium-Solarzelle. Doch anders als diese produziert das künstliche Blatt aus der Energie des Sonnenlichts keinen elektrischen Strom. Stattdessen wird das Licht – wie bei dem Prozess der Photosynthese in Pflanzenblättern – unmittelbar dazu verwendet, Wasser zu zerlegen. Dabei entsteht unter anderem Wasserstoff.

Die beiden Elektroden der photoelektrochemischen Zelle sind dazu in das Wasser eingetaucht. Sonnenlicht, das auf die Anode trifft, spaltet die Wasser-Moleküle in Sauerstoff, Protonen und Elektronen. Die Protonen sind nichts anderes als Wasserstoff-Atomkerne. Sie bewegen sich hin zur Kathode, wo sie sich mit den Elektronen vereinen. Das Resultate: Wasserstoff-Gas entsteht. Ein äußerer elektrischer Stromkreis, in den die Zelle eingebunden ist, dient dazu, die Elektronen und Protonen an der Kathode zusammenzubringen.





Auch andere Forscher, unter anderem an den Technischen Universitäten Ilmenau und München, den Helmholtz-Zentren Berlin (HZB) und Geesthacht (HZG), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie dem Freiburger Fraunhofer-Institut für Solare Energieforschung (ISE), nutzen eine künstliche Form der Photosynthese, um Wasserstoff aus Sonnenlicht zu gewinnen. Dazu verwenden sie eine sogenannte photoelektrochemische Zelle. Sie besteht aus einer Solarzelle, um das Licht einzufangen, und zwei Elektroden, die in ein mit Wasser gefülltes Gefäß getaucht sind. An einer der Elektroden, der sogenannten Photoanode, die mit der Solarzelle kombiniert ist, geschieht der entscheidende Schritt: Dort werden Wasser-Moleküle in Sauerstoff, Elektronen und Protonen – also Wasserstoff-Kerne – zerlegt.

Die Protonen gelangen dann durch das Wasser an die Kathode, wo sie sich mit den Elektronen vereinigen. Dabei entstehen atomarer Wasserstoff. Durch eine weitere Reaktion mit Kohlendioxid lassen sich daraus zum Beispiel auch etwa Methan oder andere Kohlenwasserstoffe gewinnen (siehe Grafik links, „Der Blick in ein künstliches Blatt“).

#### Die Hürden: Korrosion und hohe Kosten

Das Prinzip ist einfach, doch die technische Umsetzung stellt in verschiedener Hinsicht eine Herausforderung dar. So dürfen die empfindlichen Halbleiter im Wasser nicht korrodieren. Um sie davor zu schützen, kann beispielsweise eine hauchdünne, lichtdurchlässige, zugleich aber robuste Beschichtung aus Titandioxid dienen. Außerdem muss die Zelle möglichst viel vom Sonnenlicht für die Erzeugung von Wasserstoff nutzen – diese Ausbeute bestimmt den Wirkungsgrad. Und der geht in die Kosten der photoelektrochemischen Wasserstoff-Herstellung ein – und ist somit für künftige industrielle Anwendungen eine entscheidende Größe.

Daher verwendet etwa ein Forscherteam am HZB Tandemsolarzellen als Lichtfänger. Sie bestehen aus zwei übereinanderliegenden Solarzellen, die aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen. Jede Zelle absorbiert Licht aus einem anderen Bereich des solaren Spektrums. So lässt sich insgesamt ein größerer Teil der Sonnenenergie nutzen als etwa mit einer einfachen Zelle, zum Beispiel aus Silizium.

Bislang gelingt es den Forschern durch künstliche Photosynthese nur, ungefähr 100 Stunden lang Wasserstoff zu produzieren. Danach werden die sensiblen Materialien vom Wasser angegriffen. Ziel ist es, mit neuen Kombinationen unterschiedlicher Werkstoffe über mehrere Jahre hinweg einen stabilen Betrieb zu erreichen. Zudem arbeiten Wissenschaftler, unter anderem in Berlin und Geesthacht, an der Entwicklung von effizienteren Solarzellen



Manche Algen können Wasserstoff produzieren. Doch sie lassen sich auch als Basis für E-Fuels nutzen.

und Photoelektroden. Damit soll sich die Energieausbeute noch deutlich verbessern lassen.

In Laborexperimenten erreichen die Forscher bislang Wirkungsgrade von ungefähr 20 Prozent. Doch das ist deutlich zu wenig, um mit anderen Herstellungstechniken konkurrieren zu können. Auch die Kosten für die Fertigung von photoelektrochemischen Zellen sind im Vergleich noch zu hoch. Bis Wasserstoff, der auf direktem Weg aus Wasser und Sonnenlicht gewonnen wird, bereitsteht, um die Energiewende zu beflügeln, wird es deshalb wohl noch eine Weile dauern.

#### Algenfarmen für synthetischen Treibstoff

Auch Algen könnten den Wandel hin zu einem klimaneutralen Energiesystem beflügeln. Zum einen lassen sich bestimmte Algenarten dazu einsetzen, um Wasserstoff herzustellen. Zum anderen ließen sich Algen nutzen, um aus Wasser und CO<sub>2</sub> Kohlenstoff-Verbindungen zu produzieren. Die wiederum wären eine gute Basis für die Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe aus biologischem Material. Die sogenannten E-Fuels sind ein klimaschonere Ersatz für fossile Kraftstoffe wie Benzin, Diesel oder Kerosin. Die Algen als Lieferant der Biomasse dafür ließen sich in Farmen im Meer kultivieren oder durch sogenanntes Vertical Farming in großen Gebäuden in der Stadt. Vielleicht kommt also der Treibstoff in Zukunft aus Hochhäusern zur Tankstelle. ■



# Wasserstoff aus dem Biomüll



Große Mengen an Speiseresten, Grünschnitt sowie verdorbenem Obst und Gemüse landen auf dem Müll. Dabei wären sie eine gute Basis, um klimaschonend Wasserstoff zu gewinnen.

von RALF BUTSCHER

**E**in großer Teil dessen, was die Natur hervorbringt, wird am Ende zu Unrat. So füllten die Menschen in Deutschland ihre Biomüll-Tonnen 2021 nach Angaben des Bundesumweltamts mit insgesamt 4,6 Millionen Tonnen Abfällen: Speisereste, Bananen-, Kartoffel- oder Zwiebelschalen, Grünschnitt oder das frisch gemähte Gras.

Zusätzlich fallen in öffentlichen Gärten und Parks große Mengen an biologischen Abfällen an, Klärschlamm als Überrest der Abwasserreinigung sowie Abfälle aus Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie. Insgesamt kommt so in Deutschland pro Jahr ein Berg an Biomüll zusammen, der rund 15 Millionen Tonnen wiegt. Davon werden rund 60 Prozent in speziellen Anlagen zu Kompost verarbeitet, der Rest wird vergoren oder verbrannt. Dabei entsteht zwar letztlich nutzbare Energie – aber auch große Mengen an klimaschädlichem CO<sub>2</sub>.

## Die Emission von Klimagas verhindern

Das wollen Forscher, etwa am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart. Für die bisherige Form der Verwertung sind die sogenannten biogenen Abfälle viel zu schade, findet IPA-Forscher Johannes Full: „Sinnvoller wäre es aus dem Material Wasserstoff zu erzeugen und das dabei entstehende CO<sub>2</sub> abzuscheiden, zu speichern oder langfristig zu nutzen.“ So

könnten Grüngut und Speisereste dazu beitragen, den Bedarf an klimaneutral erzeugtem Wasserstoff zu decken.

Um Biomasse in Wasserstoff zu verwandeln, haben Wissenschaftler weltweit in den letzten Jahren verschiedene Verfahren entwickelt. Eines davon setzt auf die Unterstützung durch Purpurbakterien. Diese Mikroorganismen ernähren sich besonders gern von zuckerhaltigen Obst- oder Molkereiabfällen. Die darin steckende Fructose zersetzen sie unter anderem in Nährstoffe – und Wasserstoff. Die dafür benötigte Energie beziehen die Bakterien beispielsweise aus dem Sonnenlicht.

## Photosynthese im Dunkeln

„Das biotechnologische Potenzial dieser Bakterien haben wir jahrelang übersehen“, sagt Robin Ghosh, Leiter der Abteilung Bioenergetik am Institut für Biomaterialien und biomolekulare Systeme der Universität Stuttgart. Mit seinem Team hat der Ghosh das Purpurbakterium *Rhodospirillum rubrum* genetisch so verändert, dass es für seine Stoffwechsellvorgänge beim Zersetzen von Fruchtzucker kaum Licht benötigt (siehe bdw Spezial 2021 „Biointelligenz“, S. 68, „Wasserstoff aus der Mülltonne“). Die Wissenschaftler sprechen bei diesem Prozess von einer Dunkel-Photosynthese.

Sie lässt sich in kleinen oder mittelgroßen biotechnologischen Reaktorgefä-

ßen, sogenannten Fermentern, nutzen, um biologische Abfälle und Reststoffe durch die gentechnisch optimierten Purpurbakterien verwerten zu lassen – und nebenbei kostbaren grünen Wasserstoff zu produzieren. Das Klimagas CO<sub>2</sub>, das bei den Stoffwechselprozessen ebenfalls entsteht, lässt sich abscheiden und könnte beispielsweise als Rohstoff für die chemische Industrie dienen. So lassen sich gleich mehrere Fliegen mit einer Klappe schlagen.

In einem Projekt, an dem auch Forscher des Fraunhofer IPA und der Hochschule Biberach sowie Experten der Ingenieurbüros KE-Technologie beteiligt sind, untersuchen die Forscher verschiedene Aspekte dieser Einsatzmöglichkeit. Auf diese Weise wollen sie die Effizienz des Verfahrens, bei dem bislang noch recht viel biochemische Energie ungenutzt bleibt, verbessern und die Ausbeute an Wasserstoff durch die Nutzung einer energiesparenden LED-Beleuchtung erhöhen. Zudem analysiert das Team am Fraunhofer IPA, welche Perspektiven für die Vermarktung das Verfahren bietet, und bewertet, wie nachhaltig der Ansatz wirklich ist.

Das langfristige Ziel der Forscher ist eine Markteinführung der neuen Biotechnologie. Dazu sollen sich in den nächsten weitere Forschungsprojekte anschließen, an denen auch Partner aus der Industrie mitwirken. ■





# Aus Altholz wird Wasserstoff

Forscher wollen im Schwarzwald Holzreste und -abfälle als Rohstoff für die Herstellung von grünem Wasserstoff nutzbar machen. Dabei helfen ihnen emsige Mikroorganismen.

von RALF BUTSCHER

**G**rüner“ Wasserstoff wird in Zukunft wohl immer mehr zu einem begehrten Energieträger. Denn der Bedarf an regenerativ erzeugtem Wasserstoff für eine klimafreundliche Wirtschaft ist immens: unter anderem in Industrie, Verkehr und zur Wärmeversorgung. Zugleich fallen beim Verarbeiten von Holz zu Möbeln oder Baustoffen sowie beim Abbruch alter Gebäude stattliche Mengen an Holzabfällen an. Ein großer Teil davon wird bislang teuer entsorgt – und allenfalls die darin steckende Energie wird in Holzverbrennungsanlagen genutzt. Forscher in Baden-Württemberg wollen nu beides miteinander verbinden – und Altholz zu einem Rohstoff zum Herstellen von „Bio-Wasserstoff“ machen. Ihren Fokus richten sie dabei auf den Schwarzwald – eine Region, wo das Holz traditionell das wichtigste Wirtschaftsgut ist.

Ziel der Forscher mehrerer Fraunhofer-Institute und des Centrums für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit (Campus) Schwarzwald ist letztlich eine Kreislaufwirtschaft auf Basis von Holz. „Dazu wollen wir mithilfe biotechnologischer Prozesse sowohl klimaneutralen Biowasserstoff als auch zusätzliche, verwertbare Stoffe wie Carotinoide oder Proteine aus Altholz und Holzabfällen herstellen“, sagt Ursula Schließmann, Wissenschaftlerin am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrens-

technik (IGB) ins Stuttgart und Koordinatorin des im Sommer 2021 gestarteten Projekts „H2Wood – Black Forest“, das vom Bundesforschungsministerium mit 12 Millionen Euro gefördert wird.

## Verarbeitung in zwei Schritten

Ursula Schließmanns Team am Fraunhofer IGB entwickelt die notwendigen Techniken und untersucht experimentell, wie sie sich in der Praxis umsetzen lassen. Der erste Schritt und die Voraussetzung für die biotechnologische Umwandlung ist eine Vorbehandlung des Alt- und Restholzes. „Da stehen wir vor einer ziemlichen Herausforderung“, betont die Forscherin. „Denn Holzabfälle aus Hausabbruch, Möbelbau und Baustoffproduktion, zu denen etwa Span- und sogenannte MDF-Platten gehören, enthalten Klebstoffe wie Harze und Phenole oder auch Lacke.“ Diese chemischen Bestandteile müssen zunächst entfernt werden, damit die Bakterien und Mikroalgen – die Akteure der biotechnologischen Wasserstoff-Produktion – ihre Arbeit erledigen können. Zudem gilt es, das Holz in seine Bausteine zu zerlegen und die dabei gewonnene Cellulose in einzelne Zuckermoleküle zu spalten. Denn die dienen den wasserstoffproduzierenden Mikroorganismen als Futter.

Für die Umwandlung der Holzzucker haben die Stuttgarter Fraunhofer-Forscher zwei Fermentationsverfahren etab-

liert und miteinander verknüpft. Das eine setzt auf Bakterien, die bei ihrem Stoffwechsel Wasserstoff produzieren. Sie zersetzen dazu die Zuckerarten in Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), organischen Säuren und Ethanol – wichtige Grundstoffe etwa für die chemische Industrie. Diese Stoffwechselprodukte der Bakterien sind dann die Nahrung für Mikroalgen, die daraus Carotinoide oder Proteine synthetisieren – und nebenbei ebenfalls Wasserstoff freisetzen.

## Demoanlage in Freudenstadt geplant

Dieses mehrstufige Bio-Verfahren wollen die Projektpartner in eine Demonstrationsanlage am Campus Schwarzwald in Freudenstadt überführen – als Beleg für die Praxistauglichkeit der neuen Methode. Zudem erstellen die Forscher eine „Wasserstoff-Roadmap“ für die Schwarzwaldregion. Sie soll zeigen, wie lokale Betriebe und Energieversorger den erneuerbaren Energieträger nutzen können. Das Treibhausgas Kohlendioxid lässt sich dabei auf zweierlei Wegen einsparen: Zum einen ersetzt der grüne Wasserstoff aus Holz bisherige fossile Energieträger wie Öl oder Gas, zum anderen das bei der Verwertung von Rest- oder Altholz freigesetzte CO<sub>2</sub> in den Nebenprodukten gebunden – „und so in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf zurückgeführt“, betont Umweltexpertin Schließmann. ■



# Die Wasserstoff-Farbenlehre

Wasserstoff ist ein farbloses Gas. Dennoch werden ihm häufig bestimmte Farben zugeschrieben. Sie weisen darauf hin, wie der Wasserstoff hergestellt worden ist. Und die Art seiner Erzeugung ist ein Kennzeichen dafür, ob der Wasserstoff als klimaneutral gelten kann oder nicht.

## Grüner Wasserstoff

Das farbliche Attribut „grün“ signalisiert: Der Wasserstoff wurde durch Elektrolyse von Wasser produziert – also durch elektrochemische Spaltung von Wasser-Molekülen in ihre Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff. Die Energie dafür liefert elektrischer Strom, gewonnen aus regenerativen Quellen wie Sonnenlicht oder Wind. Experten sprechen dabei auch von Power-to-Gas-Technologie. Damit ist die Herstellung von grünem Wasserstoff CO<sub>2</sub>-neutral – wenn auch bisher noch mit einem großen Energieaufwand verbunden.



## Grauer Wasserstoff

Dieser Wasserstoff wird durch die Dampfreformierung fossiler Brennstoffe wie Erdgas, Kohle oder Öl erzeugt. Die Dampfreformierung ist eine Reaktion, die durch Wärmezufuhr von außen in Gang gesetzt und gehalten werden muss. Dabei entsteht als Nebenprodukt das Treibhausgas CO<sub>2</sub>, das in die Luft gelangt. Grauer Wasserstoff ist daher nicht klimaneutral – seine Herstellung trägt zur Klimaerwärmung bei. Derzeit ist in Deutschland der meiste in der Industrie benötigte Wasserstoff „grau“.





### Blauer Wasserstoff

Er entsteht ebenso wie grauer Wasserstoff durch Dampfreformierung. Der Unterschied: Bei blauem Wasserstoff wird das entstandene CO<sub>2</sub> danach unterirdisch verpresst – durch „Carbon Capture and Storage“ (CCS), auf Deutsch: Kohlenstoffabscheidung und -speicherung. Auf diese Weise gelangt das klimaschädliche Gas nicht in die Atmosphäre – das Verfahren ist somit klimaneutral.



### Gelber Wasserstoff

Um gelben Wasserstoff zu erzeugen, wird – wie bei der Herstellung von grünem Wasserstoff – das Verfahren der Elektrolyse genutzt. Doch der dafür verwendete elektrische Strom stammt aus der Kernenergie. Klimaschädliches CO<sub>2</sub> entsteht dabei nicht, wohl aber radioaktiver Abfall, der dauerhaft und sicher endgelagert werden muss.



### Türkiser Wasserstoff

Er ist das Ergebnis einer sogenannten Pyrolyse von Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas. Dabei wird das Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten. Fester Kohlenstoff ist ein Granulat, das sich zum Beispiel in alten Bergwerksstollen sicher lagern und später bei Bedarf wiederverwenden lässt. Dadurch gelangt kein CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Stammt die für die Methan-Pyrolyse benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen, so ist die Erzeugung von türkischem Wasserstoff klimaneutral.





# Empfehlen Sie bild der wissenschaft

Werben Sie jetzt einen neuen Leser und sichern Sie sich eine Top-Prämie nach Wahl!

1

## Beurer Aktivitätssensor

Optimale Aktivitätskontrolle und Schlafanalyse mit kostenfreier HealthManager App. Übertragung per Bluetooth Smart Technologie. **Aktivitätstracking:** Anzahl der Schritte, zurückgelegte Strecke, Ermittlung des Kalorienverbrauchs, Aktivitätsdauer und Erreichung des täglichen Bewegungsziels. **Schlaftracking:** zeichnet die Schlaf-Bewegungsaktivität und Schlafdauer auf.

Keine Zuzahlung



Top  
Prämie!

2

## Mini-Drohne

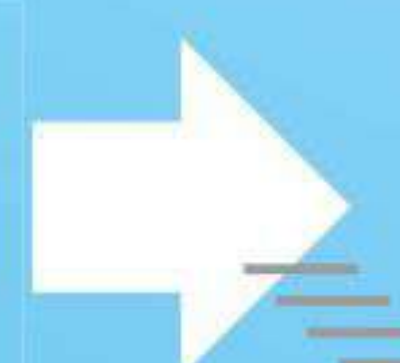
4 kraftvolle, durchzugsstarke Rotoren sorgen für eine bis zu 30 Km/h schnelle Drohne. Es gibt 3 Flugmodi langsam, mittel und schnell. Die Drohne verfügt über einen Start- und Lande-Assistent und hat eine automatische Höhenregulierung. Größe: 33 mm. Betriebsdauer: 10 min. Lieferung solange Vorrat reicht. Eventuell dann Modellabweichungen möglich.

Keine Zuzahlung



DIGITAL

- Auch als Digitalabo erhältlich
- Für nur 95,20€ statt 118,60€
- Top-Angebote auf [direktabo.de](http://direktabo.de)



Herunterladen



3

### 50,- € in bar

50,- € für Sie und wofür immer Sie wollen. Genau das Richtige, um sich zwischendurch etwas zu gönnen.



**Übrigens: Um einen neuen Leser zu werben, müssen Sie selbst kein Abonnent sein!**

**Wissenschaft in Bestform**

## Gleich online bestellen:

www.direktabo.de

**direktabo.de**

Oder Coupon einsenden an:  
*bild der wissenschaft* Leserservice  
Postfach 810580, 70522 Stuttgart

Phone 0711/72 52-201

Fax 0711/72 52-399

### Ich habe den neuen Leser geworben

und erhalte als Dankeschön die Prämie meiner Wahl wie angekreuzt nach Zahlungseingang.

- 1 Beurer Aktivitätssensor [12365AL]
- 2 Mini-Drohne [12366AL]
- 3 50,- € Barprämie [12367AL]

Vorname, Name

Straße, Nr.

PLZ Ort

Geb.-Datum

E-Mail

Phone, Fax

### Ich bin der neue Abonnent

Vorname, Name

Straße, Nr.

PLZ Ort

Geb.-Datum

E-Mail

Phone, Fax

Ja, ich willige ein, dass mir die Konradin Medien GmbH und deren verbundene Unternehmen (Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH, Konradin Business GmbH, Konradin Selection GmbH, Konradin Mediengruppe GmbH, Dr. Curt Haefner Verlag GmbH, MMCD NEW MEDIA GmbH, Visions Verlag GmbH, Dialog GmbH) Fachinformationen der Redaktionen, Einladungen zu Messen, Fachveranstaltungen sowie Informationen und Angebote zum Zwecke der Werbung telefonisch, per E-Mail und Post übermittelt. Ich kann meine Einwilligung jederzeit mit Wirkung für die Zukunft gegenüber Konradin per E-Mail an datenschutz-online@konradin.de widerrufen.

**SEPA-Lastschriftmandat** (Mandatsreferenz wird separat mitgeteilt). Ich ermächtige die ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Gläubiger-Identifikationsnummer DE34 AVSO 0000 0204 06, Zahlungen von meinem Konto mittels Lastschrift einzuziehen. Zugleich weise ich mein Kreditinstitut an, die von der ZENIT Pressevertrieb GmbH, 70523 Stuttgart, auf mein Konto gezogenen Lastschriften einzulösen. Hinweis: Ich kann innerhalb von 8 Wochen, beginnend mit dem Belastungsdatum, die Erstattung des belasteten Betrags verlangen. Es gelten die mit meinem Kreditinstitut vereinbarten Bedingungen.

**Mein Zahlungswunsch:**  per Bankeinzug  gegen Rechnung

BIC IBAN

Geldinstitut

Datum, Unterschrift

Vorzugspreis (14 Ausgaben) 118,60€ (Ausland: 130,70€ / 166,20 CHF). Das Abo läuft zunächst für 1 Jahr und kann anschließend jederzeit gekündigt werden.

**Hinweis:** Das Dankeschön wird nach Bezahlung der Abrechnung versandt. Angebot nur gültig innerhalb der EU.

**Widerrufsrecht:** Sie haben das Recht, binnen vierzehn Tagen ohne Angabe von Gründen diesen Vertrag zu widerrufen. Die Widerrufsfrist beträgt vierzehn Tage ab dem Tag, an dem Sie oder ein von Ihnen benannter Dritter, der nicht der Beförderer ist, die erste Ware in Besitz genommen haben bzw. hat. Um Ihr Widerrufsrecht auszuüben, müssen Sie uns (ZENIT Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, 70523 Stuttgart, Tel. 0711/72 52-201, bdw@zenit-presse.de) mittels einer eindeutigen Erklärung über Ihren Entschluss, diesen Vertrag zu widerrufen, informieren. Sie können ein Muster-Widerrufsformular oder eine andere eindeutige Erklärung auch auf unserer Webseite unter [www.direktabo.de/widerrufsformular](http://www.direktabo.de/widerrufsformular) elektronisch ausfüllen und übermitteln. Machen Sie von dieser Möglichkeit Gebrauch, so werden wir Ihnen unverzüglich (z. B. per E-Mail) eine Bestätigung über den Eingang eines solchen Widerrufs übermitteln.

Zur Wahrung der Widerrufsfrist reicht es aus, dass Sie die Mitteilung über die Ausübung des Widerrufsrechts vor Ablauf der Widerrufsfrist absenden.

Verlag: Konradin Medien GmbH, Ernst-Mey-Str. 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen, Geschäftsführer: Peter Dilger, Amtsgericht Stuttgart, HRB 222257.

Abo-Vertrieb: Zenit Presseservice GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, 70597 Stuttgart, Geschäftsführer Joachim John.

**GRATIS: Bei Zahlung per Bankeinzug erhalten Sie diese klassische Armbanduhr mit hochwertigem Uhrwerk!**





---

# Mission Meer-Wasserstoff

---

Grüner Wasserstoff lässt sich direkt auf hoher See erzeugen – theoretisch. Praktisch klafft zwischen Vision und Wirklichkeit der technischen Umsetzung noch eine große Lücke. Das zeigt auch ein Megaprojekt vor Helgoland.

von KATJA MARIA ENGEL





**B**ei stürmischem Wind könnten Windkraftanlagen besonders viel erneuerbare Energie ernten, doch gerade dann stehen die meisten Windräder still. Grund dafür ist nicht etwa, dass die Anlagen durch die wütenden Böen zerstört werden könnten. Stattdessen schalten die Netzbetreiber die Anlagen ab, um eine Überlastung des Stromnetzes zu vermeiden. Eine weit über dem üblichen Volumen liegende Menge an Strom könnte das Netz so kurzfristig nicht aufnehmen.

Wären die Rotoren dagegen Teil von Offshore-Windkraftanlagen auf dem offenen Meer und würden diese statt elektrischem Strom Wasserstoff produzieren, könnten sie sich auch bei starkem Wind weiterdrehen, sogar bei einem Sturm vom Kaliber des Orkantiefs „Ylenia“, das Mitte Februar vor allem über den Norden Deutschlands hinweggefegt ist.

Neue Pläne sehen genau das vor: Windräder sollen künftig abgekoppelt vom Stromnetz auf dem Meer Wasserstoff herstellen – und dann auch bei großer Windstärke laufen. Vereinfacht gesagt: „Die Anlagen zur Wasserstoffproduktion nehmen dann alles mit, was der Wind liefert“, sagt Jan Wenske, Technischer Direktor des Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme IWES in Bremerhaven. Überhaupt könne das gesamte Design von Windkraftanlagen neu gedacht werden, wenn die Restriktionen für die Stromversorgung über das Netz nicht beachtet werden müssten. Auch einen teuren Netzanschluss bräuchten die Anlagen dann nicht. Und das offene Meer bietet weitere Vorteile: es gibt auf hoher See keine Häuser mit Abstandsregeln zu den Rotoren, viel und stetig wehenden Wind sowie reichlich Wasser als Ausgangsprodukt für die Gewinnung von Wasserstoff. Allerdings: Viele technische und rechtliche Fragen sind noch ungeklärt.

### Das Riesenprojekt in der Deutschen Bucht

Ob die Vision vom Wasserstoff aus Windenergie in naher Zukunft Wirklichkeit werden kann, wird ein Projekt in der Nordsee zeigen: In der Deutschen Bucht nicht weit vor der Insel Helgoland könnte schon in den nächsten Jahren eine der weltweit größten Anlagen zur Wasserstoff-Erzeugung auf See entstehen. Motor hinter dieser Idee ist der Förderverein Aquaventus mit Sitz auf Helgoland. Nach Überzeugung seiner Mitglieder ist in dem ausgewählten Gebiet Platz für einen Windpark mit einer Leistung von 10 Gigawatt, der rund eine Million Tonnen Wasserstoff jährlich erzeugen könnte. Akteure in dem 2020 gegründeten Verein sind mehr als 90 Unternehmen aus der Energiebranche, darunter EnBW, RWE und E.ON, Ölkonzerne wie Avia, Shell und Total sowie einige Finanzdienstleister.

Schon ab 2035, so die Vorstellung des Vereins, könnte diese „Gigafactory“ für Wasserstoff in der

Konzept für die Nordsee: Elektrolyseure, die wie Baumhäuser an Windkraftanlagen hängen, gewinnen Wasserstoff mit Windstrom.



Nordsee den Betrieb aufnehmen. Ihr geplanter Output von einer Million Tonnen Wasserstoff entspricht etwa der Menge des Gases, die die chemische Industrie in Deutschland pro Jahr verbraucht, um daraus unter anderem Dünger, Pflanzenschutzmittel und eine Vielzahl von Grundchemikalien zu produzieren. Bisher bilden die Grundlage dafür fossile Rohstoffe wie Erdgas oder Kohle, aus denen „grauer“ oder „schwarzer“ Wasserstoff gewonnen wird (siehe S. XX, „Die Wasserstoff-Farbpalette“). Künftig könnten Windenergie und Meerwasser diese Aufgabe übernehmen – und „grünen“ Wasserstoff liefern.

### **Die Wasserstoff-Baumhäuser**

Wie so eine Fabrik für grünen Wasserstoff auf hoher See aussehen könnte, zeigt Aquaventus in einem animierten Video. Alles darin ist groß, angefangen bei den Türmen der Offshore-Windräder mit etlichen Megawatt installierter Leistung. Sie sind fast so hoch wie der Eiffelturm – und erzeugen schon mit einer halben Umdrehung ihrer Rotoren so viel elektrischen Strom wie ein durchschnittlicher Haushalt an einem Tag verbraucht. Die sogenannten Elektrolyseure – die Anlagen zum Spalten von Wasser in seine chemischen Bestandteile – befinden sich ähnlich wie Baumhäuser direkt an den Türmen



Die Insel Helgoland ist auf dem Weg zu einer Musterregion für saubere Energie.



der Windräder oder stehen in Stockwerken übereinander gestapelt auf einer Sammelplattform. Sie nutzen die von den mächtigen Windkraftanlagen gelieferte elektrische Energie, um Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zu zerlegen. Der auf diese Weise auf See produzierte Wasserstoff muss dann nur noch an Land transportiert werden – per Schiff oder Pipeline.

Nach den Plänen von Aquaventus soll ein Teil des grünen Wasserstoffs zum nahegelegenen Hafen von Helgoland gelangen und dort helfen, das Urlaubsrefugium in der Nordsee CO<sub>2</sub>-neutral zu machen. Der Großteil des grünen Kraftstoffs soll aber bis an die Elbmündung transportiert und an Tankstellen, Industriebetriebe und Raffinerien geliefert werden.

### Hoch gepokert

Das Konzept klingt vielversprechend – doch ist es umsetzbar? Offshore-Windkraftanlagen zur Stromerzeugung sind zwar eine etablierte Technik, aber bislang wird nirgendwo Wasserstoff in großem, industriellem Maßstab aus der ständig schwankenden Windenergie produziert. Erste, vergleichsweise kleine Pilotanlagen sollen im Spätsommer 2022 in Betrieb gehen, darunter eine schwimmende Meerwasser-Elektrolyseanlage vor der französischen Atlantikküste bei Le Croisic im Bezirk Nantes. Andere Projekte reichen weiter in die Zukunft.

Auch auf Helgoland wird wohl erst 2026 der erste mit der Energie aus zwei Windkraftanlagen erzeugte Wasserstoff ankommen. Zwei Jahre später sollen dafür immerhin 280 Megawatt installierte Leistung nutzbar sein. Doch auch das ist nur ein kleiner Schritt hin zu den visionären 10 Gigawatt Windkraftleistung für die Wasserstoff-Produktion in Massen.

Vor der niederländischen Nordseeküste wollen der Energiekonzern RWE und eine Ölförderfirma in einem Projekt namens „H2opZee“ bis 2030 Elektrolyseure mit einer Leistungskapazität bis zu 500 Megawatt aufbauen. Die Pipeline, um den damit erzeugten Wasserstoff an Land zu bringen, ist bereits verlegt. Jedoch gibt es noch keine Machbarkeitsstudie für das Großprojekt. Sie soll erst in diesem Jahr erstellt werden.

Bislang habe man noch nie ernsthaft versucht, Wasserstoff auf See zu produzieren, sagt Andreas Reuter, Co-Direktor des Fraunhofer IWES. Er hält die Pläne von Aquaventus für „extrem ambitioniert“ und weiß, wovon er spricht. Er forscht mit seinem Team in Bremerhaven zu grünem Wasserstoff aus Wind und Meerwasser. Sein Projekt „H2Mare“ startete Mitte 2021 und ist eines von drei Wasserstoff-Leitprojekten, gefördert von der Bundesregierung, mit denen die Techniken für die Wasserstoff-Erzeugung auf dem Meer verbessert werden sollen. Auch das Ziel der Fraunhofer-Forscher ist ambitioniert:



In Bremerhaven planen die Forscher eine Testhalle für Offshore-Anlagen.

Sie wollen bis 2025 Elektrolyseure und Wasserstoff-Speicher entwickeln, die in Offshore-Windparks mit Windstrom fast völlig autark arbeiten können. Doch noch fehlt das IWES-Team an den Grundlagen für eine wirtschaftliche Produktion von Wasserstoff aus Offshore-Windenergie.

### Das entscheidende Plus an Wind

Moderne Offshore-Windräder erreichen auf dem Meer eine Auslastung von 40 bis 50 Prozent Volllaststunden – das ist fast doppelt so viel wie an Land. Der Nachteil ist jedoch, dass die Windstärke auf See stark schwankt. Das passt schlecht zu den heute verfügbaren Elektrolyseuren, die auf eine möglichst konstante Last ausgelegt sind. Ein besseres Zusammenspiel der Komponenten würde die Gesamtauslastung deutlich erhöhen, sind die Fraunhofer-Forscher überzeugt. Daher müssen die Leistungsprofile der Windkraftanlagen und der Wasserstoff-Erzeuger komplett neu aufeinander abgestimmt werden – eine Aufgabe, die Andreas Reuter zusammen mit seinem Team lösen will.

Dazu haben die Forscher noch etliche Fragen zu klären: „Wie lege ich die Leistungen der Elektrolyseure so aus, dass sie unter den Bedingungen auf See optimal arbeiten?“, nennt Reuter ein Beispiel. Andere sind: Wie reagieren die Membranen des Elektrolyseurs auf die schwankende Produktion, wie altern sie, wie zuverlässig sind sie, wenn der Strom auch mal weg ist? Oder auch: Wie stark müssen die Anlagen gekühlt werden, damit sie möglichst wenig verschleifen?







Fundamente für Offshore-Windkraftanlagen warten auf ihren Abtransport.

„Es gibt noch nicht einen einzigen Elektrolyseur auf See“, stellt IWES-Direktor Jan Wenske fest. „Beim Bau von Elektrolyseuren existiert keinerlei Offshore-Erfahrung.“ Die Fraunhofer-Forscher in Bremerhaven planen gerade eher eine Art „Near-Shore“-Testfeld in der Halle des ehemaligen Regionalflughafens in Bremerhaven. Immerhin werden die Elektrolyseure dort nur wenige Hundert Meter vom Meerwasser entfernt stehen. Sie erhalten auch eine Entsalzungsanlage und werden mit Windstrom betrieben. Doch Wenske wünscht sich ein Testfeld für Elektrolyseure, um sie für den Einsatz im Meerwasser zu optimieren. Dazu will er solche Anlagen künftig in den Hafen setzten und mobil auf einem Ponton schwimmen lassen, bevor sie auf eine Plattform auf hoher See umziehen dürfen. Das wären dann die ersten echten Praxistests in Deutschland. Sie sollen 2023 starten.

Allerdings: Noch muss die Halle genügen. Sie ist für ihren Einsatz längst gefegt, doch auch hier zeigt sich eine Engstelle: die Lieferzeit für einen Elektrolyseur mit mehreren Megawatt Leistung liegt bei rund anderthalb Jahren. Mitte 2021 haben die Fraunhofer Forscher ihre Bestellung aufgegeben – noch bis Ende 2022 müssen sie warten, bis die ersten Bauteile in Bremerhaven eintreffen.

#### Die Anlage als Ganzes überdenken

Neben einer reinen Optimierung des Zusammenwirkens von Windrad und Elektrolyseur, steht auch der Gedanke im Raum, das Design der Windkraftanlage grundlegend zu überarbeiten. Der Turm, die Rotorblätter und das Fundament einer bisher auf das Stromnetz ausgerichteten Anlage müssen für eine Gewinnung von Wasserstoff möglicherweise vollkommen neu konzipiert werden. „Vielleicht hat das ideale Windrad den Rotor von einer 14 Megawatt-Anlage – aber die Turbine einer 10 Megawatt-Anlage“, spekuliert Andreas Reuter. Darüber hinaus könnte es sinnvoll sein, das Fundament einer neuen Bauart von Windkraftanlagen völlig anders als bislang üblich auszulegen.

Ekaitz Zulueta-Guerrero widmet sich einer dieser Herausforderungen. Die Ingenieurin forscht an der Universität des Baskenlandes in Bilbao daran, die Aerodynamik von Windrädern, die mit Elektrolyseuren kombiniert sind, zu verbessern. Dazu testet sie Bauteile, mit denen sich die Strömung durch die Turbinen steuern lässt: etwa einen Wirbelgenerator – ein künstliches Störelement, das die Luftströmung gezielt verändert. Getestet werden in Bilbao auch sogenannte Gurney-Klappen. Diese zusätzlich an den Rotorblättern angebrachten, Laschen ähneln-





Bislang noch eine Vision:  
Wasserstoff-Anlage als Herz  
eines Meeres-Windparks.

den Bauteile stabilisieren die Strömung, wodurch deren Schubkraft und damit die Aerodynamik in der Turbine verbessert wird. Anfang 2022 berichtete die spanische Forscherin in einem Fachjournal, dass eine mit diesen Klappen ausgerüstete 5 Megawatt starke Turbine rund drei Prozent mehr Energie produzieren kann.

### Die Krux mit dem Salzwasser

Dass draußen auf See das Wasser zur Gewinnung von Wasserstoff im Überfluss vorhanden ist, scheint ideal – doch es handelt sich um Salzwasser. Und Elektrolyseure funktionieren am besten mit destilliertem, salzarmem Wasser. Aus diesem Grund müssen zusätzlich Meerwasser-Entsorgungsanlagen an den Türmen der Windkraftanlagen angebracht werden: ein Posten, der in die Investitionskosten für die Anlage eingeht und auch während des Betriebs drei bis fünf Prozent der Windenergie abzweigt. Das hat eine Schätzung durch den Aquaventus-Verein ergeben.

Doch laut Peter Strasser besteht Hoffnung, dass diese Verluste künftig vermeidbar sein werden. Der Leiter der Forschungsgruppe Technische Chemie am Institut für Chemie der Technischen Universität Berlin arbeitet daran, die zusätzliche Meerwasser-

raufbereitung einzusparen und eine Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff auch ohne Entsalzung und Reinigung möglich zu machen. Dazu entwickelt der Experte für Elektrochemie und -katalyse Elektrolyseure, die direkt mit Meerwasser oder nur grob gereinigtem Wasser arbeiten können. Was im Labor bereits funktioniert, will Strasser demnächst auch unter realitätsnahen Bedingungen testen. Bislang sei das Thema Wasserqualität in der Elektrolyseforschung „weitgehend vernachlässigt worden“, kritisiert er.

Doch das Salz im Wasser ist jedoch noch nicht das ganze Problem, auch die salzhaltige Luft setzt den Anlagen zu. Die salzige Gischt greift viele in den Elektrolyseeinheiten enthaltene Materialien an, lässt sie korrodieren oder verspröden. Zudem müssen die Elektrolyseure noch einer Bedrohung standhalten: filmartigen Ablagerungen von Mikroorganismen, dem sogenannten Biofouling.

### Schutz vor der rauen Umgebung

Eine Lösung schlägt Marius Holst vor. Er ist Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg und entwickelt gemeinsam mit Industriepartnern ein Konzept für eine Offshore-Wasserstoff-Produktion auf einer Plattform. >





Die Fabrik für grünen Wasserstoff ruht fest auf dem Meeresgrund.

Sein Lösungskonzept sieht eine speziell eingehauste, also baulich gegen die Umgebung abgeschirmte, Anlage vor, in der ein Luftmanagement Elektrolyseure, Pumpen, Gasreinigung und die Leistungselektronik vor schädlichen Umwelteinflüssen schützt.

Allerdings: Ganz wasserdicht ist das Konzept nicht, merkt Mark Richter dazu an. Denn irgendwann muss die Tür zu der Einrichtung geöffnet oder die Anlage gewartet werden. Richter leitet das Geschäftsfeld Klimaneutraler Fabrikbetrieb des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Chemnitz. Der Elektroingenieur und sein Team machen Komponenten mit geeigneten Materialien fit für den gezielten Einsatz im Offshore-Bereich. Für die maritime Wasserstoffgewinnung arbeiten die Wissenschaftler daran, neue Bipolarplatten an die harschen Bedingungen auf dem offenen Meer anzupassen. Diese Platten sind die Kernelemente der sogenannten Stacks, in denen der Wasserstoff erzeugt wird.

#### **Aufwendige Anpassung der Technik**

Mark Richter denkt an ein komplettes „See-Paket“, das nicht nur neue Komponenten berücksichtigt, sondern auch andere Arbeitsabläufe: den Transport zum Windpark, Montage, Reparaturen bis hin zu ei-

nem späteren Austausch defekter Bauteile auf hoher See. Dort herrscht dann nicht nur ein raues Klima, es gibt auch keinen Stapler oder Kran. Zwei Jahre hat der Chemnitzer Forscher mit seinem Team noch Zeit für die Anpassung der Technik an die speziellen Hochsee-Bedingungen. Das ist eine „sehr sportliche Aufgabe“, meint Richter.

Nicht nur technische Probleme sind noch zu lösen, wenn es um eine großangelegte Produktion von Wasserstoff auf dem Meer geht. Es fehlt auch noch der nötige Rechtsrahmen, etwa was die Ausweisung von Flächen oder die Genehmigungsverfahren für den Bau der Anlagen betrifft. Erst im Januar 2022 hat das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) einen neuen Flächennutzungsplan vorgelegt, der eine Nutzung von insgesamt 57,5 Gigawatt installierter Windenergieleistung in deutschen Meeresgewässern vorsieht – allerdings nur für die Stromerzeugung. Politisch verkündet wurden Ausbauziele in der deutschen Nordsee von 30 Gigawatt bis 2030, 40 Gigawatt bis 2035 und 70 Gigawatt bis 2045.

Anfang 2022 hat das BSH damit begonnen, Flächen im Meer für zunächst drei Gigawatt installierter Windkraftleistung kartieren zu lassen. Die Produktion von Wasserstoff ist dabei nur in winzigen



Mengen vorgesehen. Mitte 2022 soll eine erste Fläche für 300 Megawatt installierter Leistung ausgeschrieben werden. Es ist eine Art Restfläche, die sich nicht für die Stromgewinnung eignet.

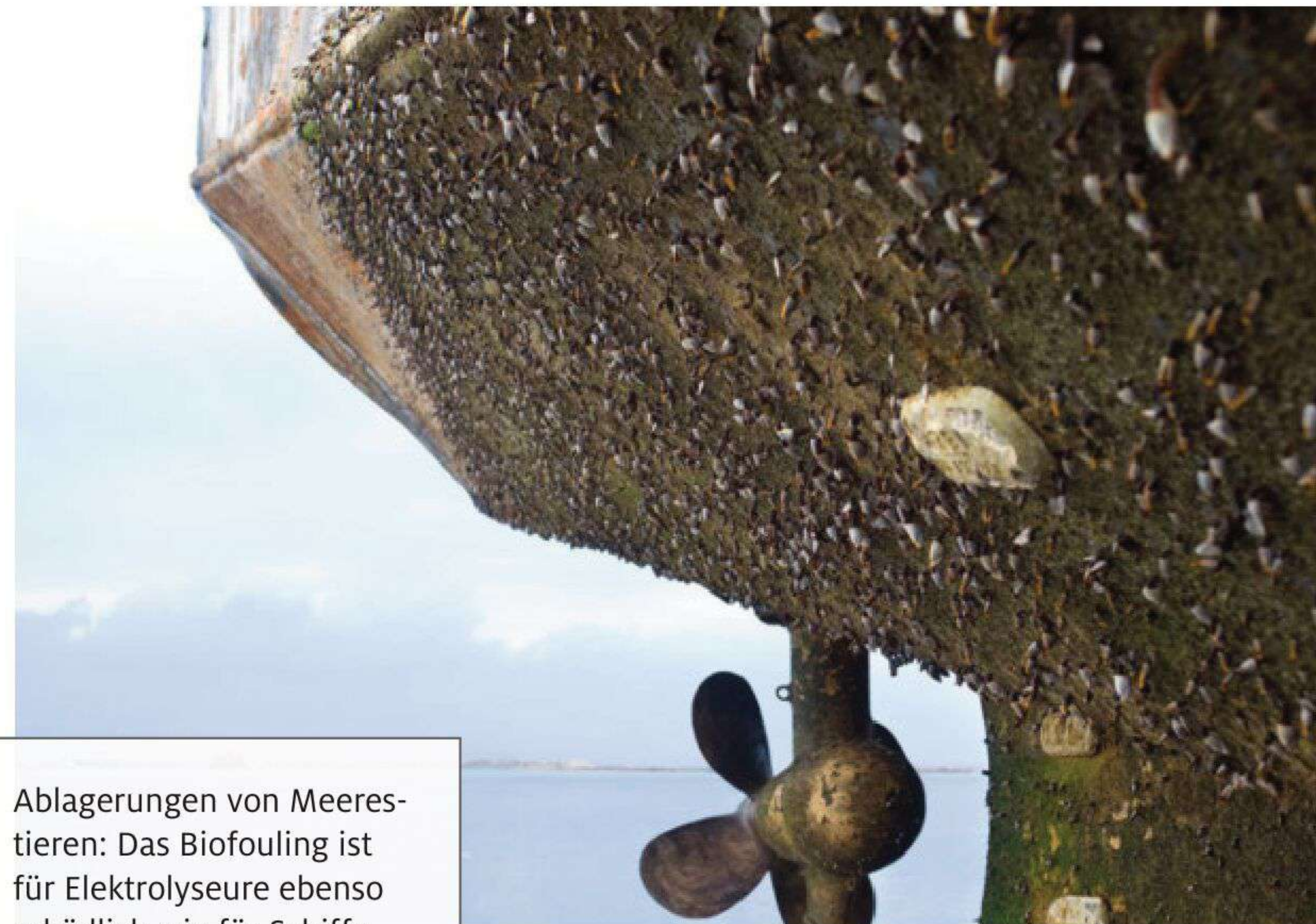
### Es mangelt an einer Strategie

Eine echte Strategie, um die Offshore-Wasserstoff-Produktion zu beflügeln, sei nicht erkennbar, kritisiert Fraunhofer-IWES-Direktor Jan Wenske. Technische Gründe für die aktuelle Vorgabepaxis gebe es nicht. Wenn es nicht erlaubt sei, auf den Flächen zur Stromerzeugung alternativ Wasserstoff zu erzeugen, sei das, als ob ein Landwirt nur Mohrrüben anbauen dürfe und keine Kartoffeln.

Fragt man Co-Direktor Andreas Reuter, welches das schwierigste Problem auf dem Weg zur Produktion von Wasserstoff aus Offshore-Windstrom sein wird, antwortet er spontan: „alles“. Dennoch spürt er eine Aufbruchsstimmung und hofft auf einen „Boost“ für diese Technologie. Wenn man es ernsthaft will, meint Reuter, kann es klappen. Gerade jetzt sei genug Druck auf dem Kessel, um die Vision zu realisieren.

### Ein eindringlicher Appell

Druck kommt auch von ungewöhnlicher Seite. So meldet sich die Meeresforscherin Antje Boetius mit einem Appell zu Wort. Allzu lange dürfte es nicht dauern, sagt sie in einem Video-Statement auf der Internetseite von Aquaventus. „Die Zeit läuft uns weg“, mahnt die Leiterin des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI). Die Nordsee biete Lösungen im Hinblick auf die Klimaerwärmung und die deshalb drängende Energiewende – nicht nur für die Erzeu-



Ablagerungen von Meerestieren: Das Biofouling ist für Elektrolyseure ebenso schädlich wie für Schiffe.

gung von elektrischem Strom, sondern auch für grünen Wasserstoff.

Und nicht nur Deutschland hat sich in Sachen Wasserstoff aus dem Meer in Bewegung gesetzt. Japan beispielsweise setzt ebenfalls auf Offshore-Wasserstoff, um seine Klimaziele zu erreichen. Produziert werden soll er vor den Küsten Chinas. Forscher unter anderem der Harvard University in den USA und der chinesischen Universität Shandong schätzen, dass sich dort jährlich bis zu zwölf Petawattstunden an elektrischem Strom aus Windenergie gewinnen lassen – und etwa ab 2030 damit hergestellter Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Kosten an Japan geliefert werden kann. ■

## Schutz für die Natur und das Meer

Bevor Karen Wiltshire die ökologischen Folgen des Ausbaus in der Nordsee benennt, spricht sie zuerst vom Klimawandel als „Monsterproblem“, das auf uns zukomme. „Auch wenn das Meer wohl dafür herhalten muss“, es stehe an erster Stelle, dass „wir jetzt etwas tun“, sagt die engagierte Meeresforscherin und Direktorin des Standortes des Alfred-Wegener-Instituts auf Helgoland. Denn der Klimawandel erwärmt und verändert schon jetzt spürbar das Leben in der vergleichsweise flachen Nordsee. Die sei auch kein unberührtes Paradies, sondern eher ein urbanisiertes Meer. Sorgen macht sie sich um den künftigen Lärm. Zwar können die Fundamente für die Offshore-Windräder mit einem

schallabsorbierenden Blasen Teppich in den Boden gerammt werden, doch drehen sich die Riesenflügel erst einmal, wird deren Schall nach unten geleitet. Robben und Tümmler könnten fliehen, aber wie sich Kleintiere wie Krebse verhalten, ist noch unbekannt. „Noch wissen wir viel zu wenig über diese Veränderungen“, sagt Wiltshire. Andererseits bewachen die Sockel der Pylone, und für Fische gebe es dann hier viel zu holen. Es gebe halt noch viele offene Fragen, zum Beispiel wie sich die Strömungsverhältnisse im Wasser verändern. Allerdings: Wenn man wolle, könnte man ökologisch einiges besser machen, ist die Wissenschaftlerin überzeugt, auch zum Schutz der Vögel.





---

# Wasserstoff aus Wüstenstrom

---

Der Bedarf an grünem Wasserstoff in Deutschland wird wohl bald kräftig steigen – und die heimischen Produktionskapazitäten sprengen. Woher soll das Gas kommen? Ein Teil der Antwort könnte in Afrika zu finden sein.

von RALF BUTSCHER



Riesige Solarkraftwerke in Marokko liefern kostengünstig Strom für das Land.



**S**chier endlos weite Landschaften voll unberührter Natur, eine wohlthuende Stille und meistens gutes Wetter: Davon schwärmen Menschen aus dem dicht bevölkerten, hektischen und oft nass-grauen Mitteleuropa, die zum Urlaub nach Namibia reisen. Viele Regionen des Landes im Südwesten des afrikanischen Kontinents sind weitgehend menschenleer. Im Durchschnitt über das ganze Land leben in Namibia weniger als drei Einwohner pro Quadratkilometer. Zum Vergleich: In Deutschland sind es etwa hundertmal so viele.

### Ein Eldorado der Erneuerbaren

Die Leere des Landes bietet viel Platz, um Energie aus erneuerbaren Quellen zu gewinnen – vor allem aus Wind und Sonnenlicht. Von beidem ist in der Südwestecke Afrikas reichlich vorhanden. Mit durchschnittlich teils über 3500 Stunden pro Jahr scheint die Sonne in Namibia – dem trockensten afrikanischen Land südlich der Sahara – mehr als doppelt so oft wie in den meisten Regionen Deutschlands. Und häufig bläst außerdem ein strammer Wind. Das zusammen macht Namibia zu einem Eldorado für die Nutzung regenerativer Energiequellen, um klimaschonend elektrischen Strom zu erzeugen – und bald vielleicht auch grünen Wasserstoff.

Denn die günstigen Bedingungen locken auch Wasserstoff-Pioniere an, nicht zuletzt aus Deutschland. In Namibia, so die Hoffnung, könnte künftig ein erklecklicher Teil des klimaneutralen Wasserstoffs produziert werden, mit dem deutsche Industriebetriebe ihren Ausstoß an klimaschädlichem CO<sub>2</sub> Richtung null drängen können, zum Beispiel Chemieunternehmen- und Stahlwerke. Auch Automobile, Lastwagen, Züge und Flugzeuge könnten dereinst emissionsfrei mit Wasserstoff aus Südwestafrika unterwegs sein. Die Vision vom Wasserstoff aus der Wüste erlebt eine kraftvolle Renaissance.

Neu ist diese Vorstellung keineswegs. Bereits vor-Jahrzehnten träumten Wissenschaftler und technische Vordenker davon, in Afrika oder Arabien elektrischen Strom aus natürlichen Quellen wie Sonnenlicht, Wind oder Wasserkraft zu schöpfen. Damit wollen sie Wasser che-



Dünnbesiedelte, sonnige Regionen sind ideal für saubere Energiegewinnung.

misch zerlegen – unter anderem in Wasserstoff. Der sollte mit Schiffen oder in teils durch das Meer verlaufenden Pipelines nach Europa gelangen. Allerdings: Realisiert wurden diese Konzepte bis heute nicht. Ihre Umsetzung wäre zu teuer und unrentabel gewesen. Die Pläne verschwanden wieder in der Schublade.

### Pioniertat in Saudi-Arabien

Einen ersten Schritt hin zu einer technischen Realisierung wagten Forscher aus Deutschland und Saudi-Arabien gemeinsam in dem 1985 gestarteten und über zehn Jahre laufenden Projekt „HYSOLAR“. Das griffige Kürzel stand für die Verbindung von Wasserstoff – lateinisch: Hydrogenium – mit der Energie des Sonnenlichts. Im Rahmen dieses Projekts entstand in Deutschland und in der saudi-arabischen Wüste unter anderem eine Anlage zur elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff aus Solarstrom mit einer Leistung von 350 Kilowatt – weit mehr als zuvor technisch realisiert worden war (siehe Beitrag S. 50, „Wir forschten unter Raketenbeschuss“).

„Das Projekt war seiner Zeit weit voraus“, sagt K. Andreas Friedrich, Leiter Elektrochemische Energietechnik am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart. „Doch da-

mals ging es nicht um die Klimaproblematik“, sagt Friedrich. Stattdessen war das Ziel, wegzukommen von der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern wie dem Erdöl – ein Vorhaben, das auch heute wieder weit oben auf der politischen Agenda steht.

Saudi-Arabien hatte die Hoffnung, mit der Produktion von Wasserstoff einen neuen Exportschlager zu gewinnen. Doch obwohl die Forscher im Rahmen von HYSOLAR gezeigt haben, dass das mit Solarstrom und leistungsfähigen Elektrolyseuren technisch machbar ist, erschien auch dieser Plan letztlich unwirtschaftlich. Die Forscher konzentrierten sich nach Ende des Projekts stattdessen mehr und mehr auf die Entwicklung von Brennstoffzellen als Technik zur Anwendung von Wasserstoff. Ein Beispiel war der Automobilkonzern Daimler-Benz, der plante, bald erste Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb auf den Markt zu bringen.

### Desertec: Projekt mit Fehlzündung

Etliche Jahre später wurde auch die Idee des Exports von Energie aus dem Sonnenlicht wiederbelebt, wenn auch unter einer etwas anderen Perspektive: Nach der Jahrtausendwende warben vor allem Wissenschaftler, Politiker und Unternehmen aus Frankreich und Deutsch-



land für das Projekt „Desertec“. Auch sein Konzept fußte auf riesigen Solarkraftwerken, die in der Sahara oder der Arabischen Wüste elektrischen Strom aus Sonnenlicht produzieren sollten. Der Strom sollte nach den Plänen, deren technische Grundlage ein Team von Wissenschaftlern am DLR entworfen hat, allerdings nicht zur Herstellung von Wasserstoff genutzt werden. Stattdessen sah das Konzept von Desertec vor, einen Teil des elektrischen Stroms ohne den Zwischenschritt der Wasserstoff-Herstellung direkt nach Europa zu leiten. Dafür standen mächtige sogenannte Hochspannungsgleichstrom-Übertragungskabel quer durch das Mittelmeer auf dem Plan.

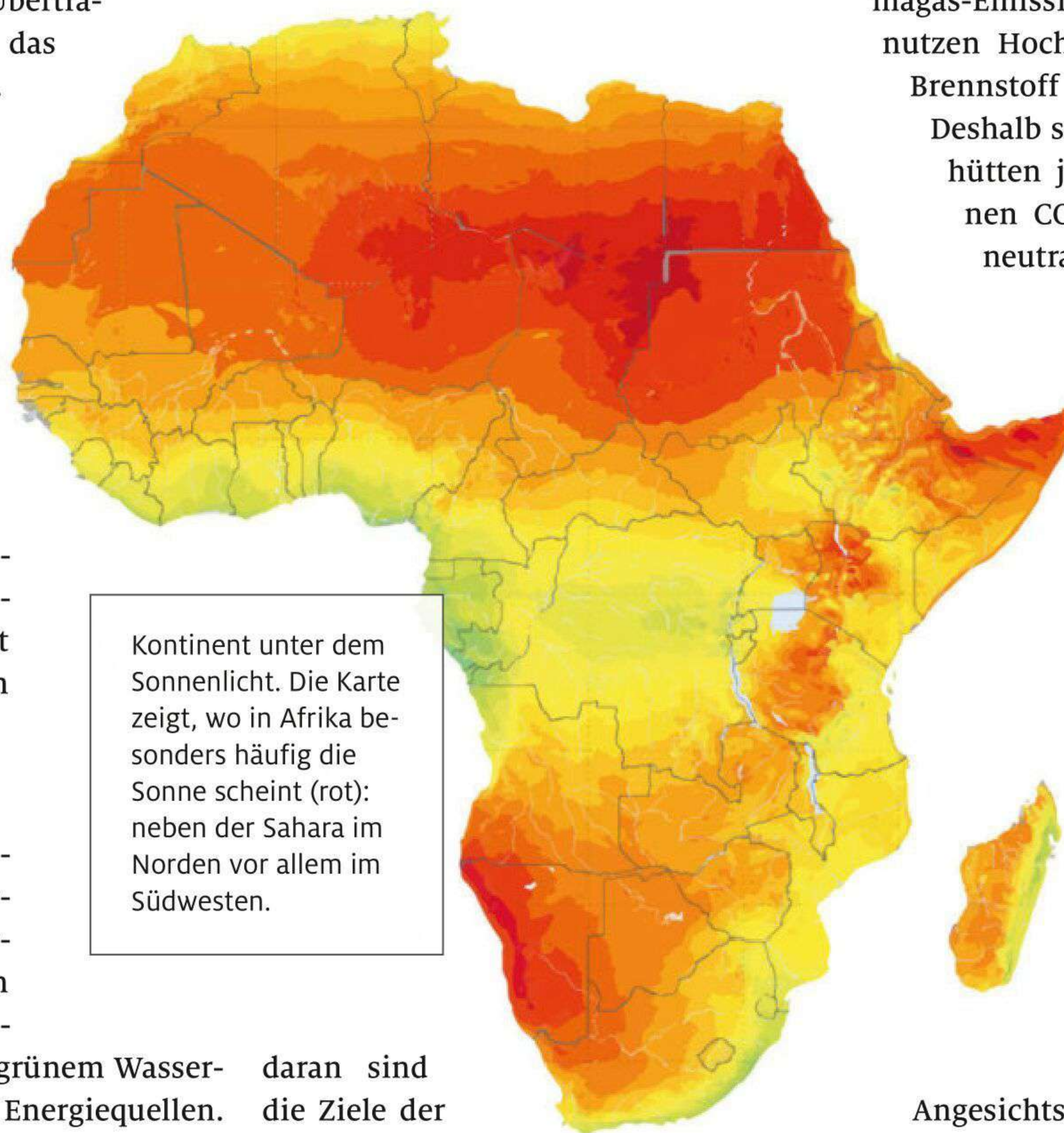
Doch auch daraus ist erst einmal nichts geworden. Neben politischen Widrigkeiten – die gesellschaftlichen Unruhen im Zuge des „Arabischen Frühlings“ platzten in das Projekt hinein – und internem Zank mangelte es auch hier vor allem an Wirtschaftlichkeit (siehe Beitrag S. 52, „Im Sand zerronnen“).

### Ein teures Gut

Nun stehen sonnenreiche Wüstengebiete erneut im Fokus der Energiestrategen – und deren vorrangiges Ziel ist wieder die Herstellung von grünem Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen. Er soll das „neue Erdöl“ werden: ein Grundstoff für ein Fülle von Anwendungen. Doch um ihn für das Erreichen der gesteckten Klimaziele nutzen zu können, braucht es eine große Menge von dem klimaneutral erzeugten gasförmigen Energieträger. Und der Bedarf, der in den nächsten Jahren rapide wachsen könnte, lässt sich in Deutschland und anderen europäischen Ländern schwerlich aus eigenen Energiequellen decken.

Eine Studie des Energieversorgers Greenpeace Energy – eines Unternehmens der internationalen Umwelt-

schutzorganisation – schätzt die erforderliche Kapazität an Elektrolyse-Leistung, um grünen Wasserstoff für ein künftig klimaneutrales Deutschland herzustellen, für das Jahr 2035 auf bis zu 115 Gigawatt. Das entspricht etwa der Leistung von 100 großen Gas- oder Kernkraftwerken. Mit ähnlichen Größenordnungen rechnen die Forscher am Freiburger Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Sie beziffern die Leistung, die voraussichtlich 2050 installiert sein muss, je nach dem zugrundegelegten Szenario, auf 50 bis 120 Gigawatt. Gemessen



Kontinent unter dem Sonnenlicht. Die Karte zeigt, wo in Afrika besonders häufig die Sonne scheint (rot): neben der Sahara im Norden vor allem im Südwesten.

darin sind die Ziele der Nationale Wasserstoff-Strategie bloß ein zaghafter Einstieg. Sie sehen in Deutschland bis 2030 gerade einmal Anlagen zum Erzeugen von grünem Wasserstoff mit einer Gesamtleistung von maximal 5 Gigawatt vor – also etwa die Leistung von fünf Gas- oder Kernkraftwerken. Damit dürfte sich nur ein Bruchteil des erwarteten Bedarfs decken lassen. Die Elektrolyse-Anlagen sollen insgesamt 14 Terawattstunden grünen Wasserstoff produzieren – auch das ist recht bescheiden im Ver-

gleich zum jährlichen Strombedarf in Deutschland von derzeit rund .500 Terawattstunden.

### Kraftakt in der Stahlindustrie

Dabei braucht die deutsche Industrie bereits jetzt jährlich die vierfache Menge an Wasserstoff. Er stammt bislang zum größten Teil aus Erdgas und ist damit keineswegs klimaneutral. Für eine Dekarbonisierung der Wirtschaft muss er ersetzt werden durch Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen. Eine enorme Menge davon wäre allein dafür notwendig, die Stahlindustrie von ihren Klimagas-Emissionen zu befreien: Bisher nutzen Hochöfen Koks aus Kohle als Brennstoff und Reduktionsmittel. Deshalb stoßen die deutschen Stahlhütten jährlich 67 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> aus. Die einzige klimaneutrale Option ist die direkte

Reduktion von Eisenerz mit grünem Wasserstoff. Den zusätzlichen Bedarf an Wasserstoff dafür beziffert die Deutsche Energieagentur auf 2,4 Millionen Tonnen jährlich, also etwa 80 Terawattstunden. Noch mehr wäre nötig, um wichtige Teile des Verkehrssektors von den fossilen Treibstoffen Benzin, Diesel und Kerosin auf grünen Wasserstoff umzustellen.

Angesichts der Zahlen erscheint es illusorisch, den deutschen Bedarf an Ökostrom durch eine heimische Produktion zu decken – selbst mit den aktuell geplanten oder in Bau befindlichen neuen Meereswindparks in Nord- und Ostsee. Statt Erdöl wird Deutschland daher wohl künftig erneuerbare Energie importieren müssen. Und da wird die alte Idee vom Wasserstoff aus Wüstenstrom wieder aktuell. Die Bundesregierung setzt auf Wasserstoff-Importe aus Regionen, in denen die Sonne beständig scheint und wo Platzmangel für den Bau von Windkraftanlagen oder Solarkraftwerken kein The-





Der Hafen von Lüderitz in Namibia wirkt beschaulich. Unweit davon plant das Land einen neuen Hafen für den Wasserstoff-Export.

ma ist. Namibia beispielsweise erfüllt diese Voraussetzungen ebenso wie etwa Australien auch Teile von Chile.

Die Frage nach den Kosten und der Wirtschaftlichkeit erscheint heute in einem neuen Licht. So kostet es in vielen Regionen nur noch etwa vier bis fünf Cent, eine Kilowattstunde elektrischen Stroms mit Photovoltaikanlagen zu erzeugen. In Nordafrika und auf der Arabischen Halbinsel schaffen Solarkraftwerke sogar noch deutlich günstigere Produktionskosten von gerade einmal ein bis zwei Cent pro Kilowattstunde Strom.

### Die Suche nach Energiepotenzialen

Hinzu kommt: Das Potenzial für die Produktion von grünem Wasserstoff ist allein auf dem afrikanischen Kontinent immens. Das zeigen die Ergebnisse einer Analyse, die Wissenschaftler am Forschungszentrum Jülich für das Bundesministerium für Bildung Und Forschung (BMBF) erstellt haben. Sie haben zunächst für die 15 Länder der Westafrikanischen Wirtschaftsunion einen „Potentialatlas Grüner Wasserstoff“ erstellt. Er zeigt im Detail, wo sich im Prinzip wieviel sStrom aus Wind oder Sonnenlicht

gewinnen ließe – als Grundlage für eine mögliche künftige Herstellung von Wasserstoff per Elektrolyse-Technik.

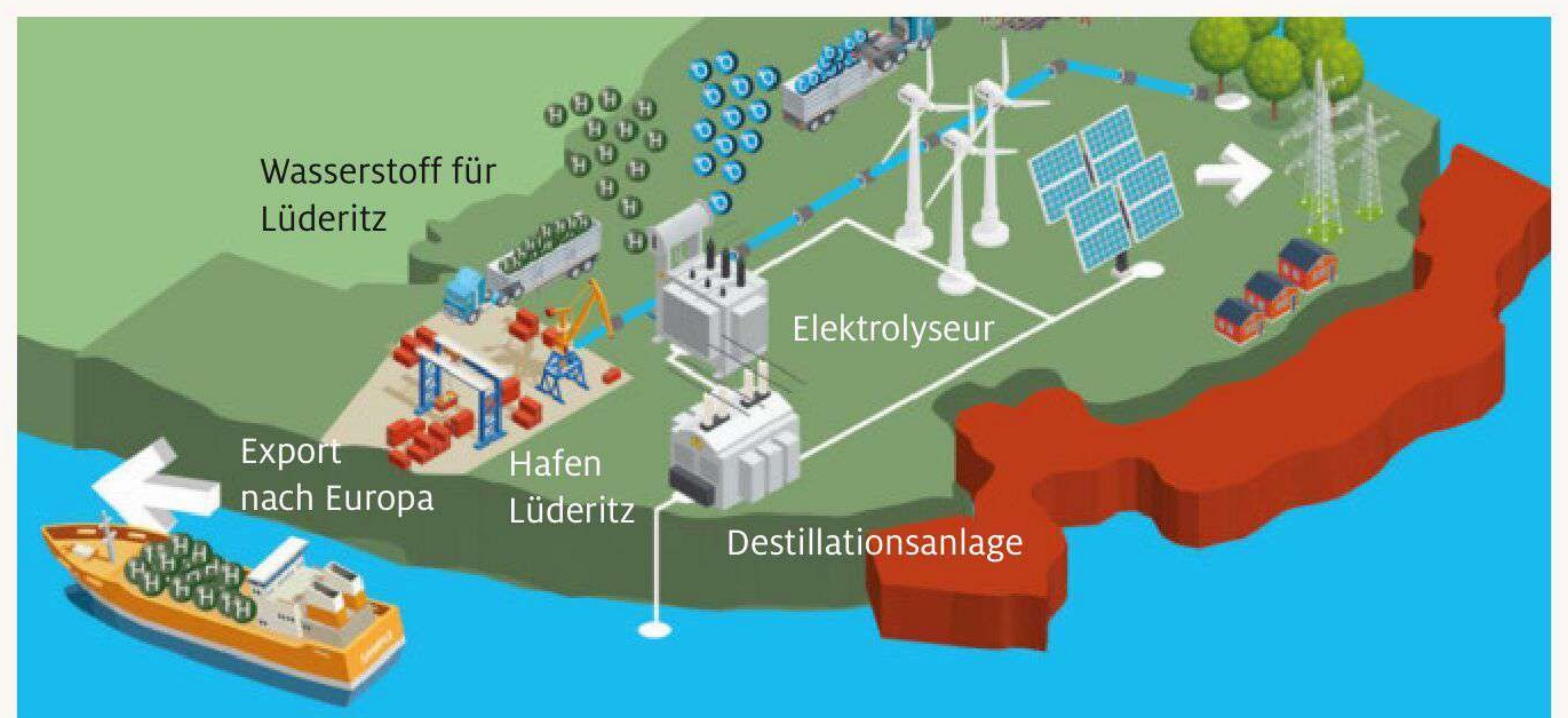
Die Zahlen, die dabei herauskamen, sind imposant. Die Resultate der Forscher aus Jülich summieren das theoretische Potenzial an Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in den Ländern zwischen Sahelzone und Äquatorialafri-

ka auf bis zu 165.000 Terawattstunden pro Jahr. Das ist rund 300-mal so viel wie der jährliche deutsche Stromverbrauch – und ein Vielfaches dessen, was Deutschland nach Expertenschätzungen künftig pro Jahr an grünem Wasserstoff importieren muss.

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse belegen außerdem: Ein Großteil des grü-



### Ein neuer Hafen für Lüderitz – das ist der Plan





nen Wasserstoffs aus Westafrika würde sich zu Kosten von weniger als 2,50 Euro pro Kilogramm gewinnen lassen – und damit deutlich preisgünstiger als in Deutschland. Überdies schließen die Forscher aus der Untersuchung, dass die Länder der Region ihren eigenen Energiebedarf aus Sonnenlicht und Wind decken könnten – und dennoch große Mengen für den Export übrigblieben.

Auch für den südlichen Teil des afrikanischen Kontinents, zu dem Namibia gehört, erarbeiten die Wissenschaftler eine solche Potenzialanalyse. Deren Ergebnisse sollen demnächst veröffentlicht werden. Doch bereits jetzt ist klar: Auch in Namibia und anderen südafrikanischen Ländern herrschen nahezu ideale Bedingungen, um Wasserstoff ohne Klimagas-Emissionen mit elektrischem Strom aus Windkraft oder Sonnenlicht zu erzeugen.

#### **Deutsche Fördermittel für Namibia**

Das hat Energiestrategen aus Deutschland auf den Plan gerufen, die inzwischen gemeinsam mit Experten aus Namibia an einem Konzept für die Nutzung der Energieschätze des südwestafrikanischen Landes zimmern. Das manifestiert sich in einem Abkommen, das im Sommer 2021 die damals noch amtierende Bundesforschungsministerin Anja Kar-

liczek gemeinsam mit dem Generaldirektor der namibischen Planungskommission Obeth M. Kandjoze unterzeichnet hat. Das Dokument über eine Wasserstoff-Partnerschaft hält unter anderem fest, dass Deutschland bis zu 40 Millionen Euro an Fördermitteln für die Zusammenarbeit mit Namibia bereitstellt – Geld, das aus dem Konjunktur- und Zukunftspaket der Bundesregierung entnommen wird.

Mithilfe der finanziellen Unterstützung aus Deutschland untersucht Namibia die Möglichkeiten zur Produktion von grünem Wasserstoff im Land. Dazu gehören auch innovative Technologien, um Meerwasser aus dem Atlantik zu entsalzen – als Ausgangsstoff für die Wasser-Elektrolyse. Denn der Mangel an Süßwasser, das für die Elektrolyse benötigt wird, steht im Gegensatz zum Überfluss an Sonne und Wind in dem Land.

Auch der Export von grünem Wasserstoff nach Deutschland und in andere Länder Europas steht im Fokus der Forscher. Erste Projekte der deutsch-namibischen Kooperation sollen auch in der Praxis zeigen, ob und inwieweit Wasserstoff in Namibia klimaneutral erzeugt und transportiert werden kann.

Entsprechende Ziele haben auch Kooperationen mit anderen Partnerländern zur regenerativen Stromerzeugung und

zur Wasserstoff-Technologie. Ein solches Abkommen besteht etwa seit einigen Jahren mit Marokko. In dem Land am nordwestlichen Zipfel von Afrika und am Westrand der Sahara gingen in den letzten Jahren gleich mehrere riesige Solarkraftwerke in Betrieb: etwa bei der Stadt Ouarzazate, südlich des Atlasgebirges. Dort wird vor allem elektrische Energie für den Bedarf im Land erzeugt. Doch in ähnlichen Anlagen könnte künftig mit Solarstrom und Elektrolyse-Technik auch grüner Wasserstoff für den Export nach Europa produziert werden.

#### **Mit Wasserstoff weg vom Erdgas?**

Gemeinsame Pläne mit dem Ziel, eine Infrastruktur für die Erzeugung von Wasserstoff aufzubauen, gibt es außerdem mit den Vereinigten Arabischen Emiraten. Sie standen im Mittelpunkt von Gesprächen, die Bundeswirtschaftsminister Robert Habeck im März in Abu Dhabi geführt hat, der Hauptstadt der Vereinigten Arabischen Emirate. Angesichts des Kriegs in der Ukraine drückt Habeck aufs Gas. „Je schneller wir mit dem Wasserstoff sind, umso weniger brauchen wir dann auch noch Erdgas“, sagte er bei seinem Besuch. Die Hoffnung ist, dass grüner Wasserstoff von der Arabischen Halbinsel künftig einen Teil des Erdgases aus Russland ersetzen kann.



Das weltweit erste Spezialeschiff für den Transport von ultrakaltem, flüssigem Wasserstoff wurde in Japan entwickelt und gebaut.



### Eine Stadt der Zukunftstechnologien

Auch in Saudi-Arabien – wo inzwischen reichlich grauer Wasserstoff aus Erdgas produziert wird – ist grüner Wasserstoff aus Sonnenstrom wieder ein Thema – zunächst aber auch hier vor allem für den Eigenbedarf. Das Königreich baut in den nächsten Jahren im Westen des Landes, gegenüber der Halbinsel Sinai, eine riesige neue Stadt – voller hochmoderner und teils futuristischer Techniken. Die neue Megacity Neom soll sich auf einer Länge von 170 Kilometern vom Roten Meer bis hinein ins Gebirge erstrecken.

Neom soll zu einem weltweiten Vorbild werden für Energieeffizienz und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Und sie wird, so die Pläne der Saudis, ein Zentrum der Wasserstoff-Wirtschaft, in dem der Energieträger per Elektrolyse aus Meerwasser und Solarstrom produziert wird. Die Technik dafür liefert unter anderem die Firma Uhde, eine Tochter des Essener Thyssen-Krupp-Konzerns.

In Namibia sind derzeit Pläne zum Aufbau einer neuen Infrastruktur bereits recht weit gediehen. Das Land macht Tempo, denn es hat sich zum Ziel gesetzt, bereits 2025 den ersten grünen Wasserstoff zu exportieren. Zudem will Namibia das erste Land auf dem afrikanischen Kontinent sein, das vollkommen klimaneutral ist. Um diese Ziele zu erreichen, hat die Regierung in Windhuk umgerechnet fast 700 Millionen Euro bereitgestellt, um Wasserstoff-Technologien zu erforschen und in die Produktion von grünem Wasserstoff in großem Stil einzusteigen.

### Megaprojekt im Nationalpark

Inzwischen fiel der Startschuss für ein erstes großes Projekt: Im besonders niederschlagsarmen, dafür aber besonders sonnen- und windreichen Südwesten des Landes will Namibia künftig rund 300.000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr erzeugen. Dazu baut ein internationales Unternehmenskonsortium mitten im Tsau-Khaeb-Nationalpark riesige Wind- und Solarparks zur Stromgewinnung sowie Anlagen für die Herstellung und Weiterverarbeitung von Wasserstoff. Das Investitionsvolumen: umgerechnet rund 10 Milliarden Euro. An dem Projekt beteiligt ist über die Projektgesellschaft



Bundeswirtschaftsminister Robert Habeck zu Besuch in Abu Dhabi. Ein Thema: grüner Wasserstoff.

Hyphen Hydrogen Energy auch das deutsche Unternehmen Enertrag aus dem brandenburgischen Schenkenberg – ein Spezialist für die Fertigung von Elektrolyse-Anlagen.

Die Pläne für das Megaprojekt sehen vor, einen Teil des Wasserstoffs chemisch in Ammoniak umzuwandeln – eine Substanz, die vor allem für die Herstellung von Kunstdünger in großer

### Das erste Tankschiff für Flüssig-Wasserstoff auf Jungfernfahrt

Menge benötigt wird. Sie bietet gegenüber Wasserstoff zudem einen Vorteil beim Transport: Ammoniak lässt sich recht einfach als fester Stoff aufbewahren und befördern. Dazu genügt eine vergleichsweise moderate Kühlung auf etwa minus 30 Grad Celsius. Für einen Transport als Flüssigkeit braucht es etwa zehn Bar Druck aber keine Kühlung. Wasserstoff hingegen muss für den Transport bislang entweder bei extrem tiefen Tem-

peraturen unter minus 250 Grad Celsius verflüssigt oder als Gas bei einem hohen Druck von mehreren Hundert Bar in besonders robusten Drucktanks gelagert werden.

### Ein neuer Hafen wird gebaut

Um Wasserstoff und Ammoniak für den Export nach Europa aufzubereiten und verschiffen zu können, baut Namibia nahe der Stadt Lüderitz einen riesigen Industriepark. Daneben entsteht ein neuer Tiefwasserhafen für Tank- und Frachtschiffe. Bislang besitzt der an einer Bucht gelegene Küstenort mit rund 13.000 Einwohnern einen recht kleinen Hafen, den zum Beispiel Firscherboote anlaufen.

Was künftig auf den Ort, dessen deutsch klingender Name auf einen Tabakhändler aus Bremen zurückgeht, zukommen wird, zeigt die „Suiso Frontier“. Es ist das weltweit erste Tankschiff für flüssigen Wasserstoff. Das in Japan entwickelte und gebaute Schiff fuhr im Januar 2022 erstmals mit flüssigem Wasserstoff von Australien nach Japan. Der Anfang ist gemacht. Und wie es scheint, wird es mancherorts in Namibia mit der wohlthuenden Stille bald vorbei sein. ■





# „Wir forschten mitten in der Wüste“

Im Projekt HYSOLAR entwickelten Forscher aus Deutschland und Saudi-Arabien ab 1985 zehn Jahre lang Technologien für solaren Wasserstoff. Ingenieur Andreas Brinner erinnert sich.

Das Gespräch führte RALF BUTSCHER

## Andreas Brinner

(\*1957) ist Elektro- und Maschinenbauingenieur. Er war etliche Jahre am Institut für Technische Physik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in der Entwicklung von Solar- und Wasserstoff-Technologien tätig – etwa für das DLR am internationalen Forschungs- und Testfeld „Small Solar Power Systems“ bei Almeria in Südspanien. Ab 1986 war er verantwortlicher Projektingenieur des zehnjährigen deutsch-saudischen Forschungsprojekts HYSOLAR. In dieser Funktion arbeitete er von 1991 bis 1995 fünf Jahre an einer 350-Kilowatt-Wasserstoff-Elektrolyse-Forschungsanlage nahe der saudischen Hauptstadt Riad. 2011 wechselte Brinner an das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, wo er die Fachgruppe Elektrolyseentwicklung und Standortbegleitung leitet.

### Was war das Ziel von HYSOLAR?

Hinter der dem Projekt steckte die Idee, Solarenergie in sonnenreichen Ländern zu erzeugen, in Form von Wasserstoff zu speichern und in sonnenärmere Länder zu transportieren. Eine Aufgabe war, Elektrolyseure zur Wasserstoff-Produktion mit Sonnenstrom weiterzuentwickeln.

### Wo lagen die größten Herausforderungen?

Die zur Herstellung von Wasserstoff in großer Menge nötigen Anlagen gab es nicht. Wir hatten nur eine 100-Watt-Elektrolyseanlage. Unser Ziel war, sie zu einer Anlagengröße von 15 bis 350 Kilowatt hochzuskalieren. Das war kühn und ohne Vorbild. Es gab keine Erfahrung mit dem Betrieb solcher Anlagen und ihrer Genehmigung. Die brauchten wir, weil das, was wir entwickelten, über Teststände hinausging. Daher mussten wir einen sicheren, geprüften Betrieb gewährleisten und die Apparaturen sowie die Konzepte dafür teils selbst entwickeln.

### Wie verlief die Kooperation?

Insgesamt sehr gut. Aber es gab ein paar Stolpersteine. So hatten die Kollegen in Saudi-Arabien zwar Erfahrung mit Photovoltaik – wir konnten so für die Stromerzeugung ein vorhandenes Photovoltaikfeld nutzen. Doch die Saudis hatten keine Erfahrung in der Arbeit mit Wasserstoff und anderen Medien in einer Elektrolyseanlage wie Kalilauge. Zudem existierten in Saudi-Arabien keine Gebäude für unsere Forschung. Die ganze Infrastruktur mussten wir erst einmal neu schaffen – und das mitten in der Wüste.

### Wo befand sich die Forschungsstätte?

Sie war auf dem Forschungsgelände einer saudischen Forschungsanstalt, dem „Solar Village“ der Organisation King Abdulaziz City of Science and Technology (KACST) – gut 60 Kilometer außerhalb der Hauptstadt Riad.

### Wie groß war Ihr Team?

Das Team aus Deutschland bestand nur aus einem Kollegen und mir. Zudem hat uns in der Bauzeit ein Mitarbei-

ter einer deutschen Firma unterstützt, die für uns unter anderem die Beschaffung von Baumaterialien oder die Abwicklung beim Zoll organisiert hat. Der Rest wurde mit Ortskräften von KACST gemacht, von denen die meisten Arbeiter aus anderen Ländern waren.

### Wie kamen Sie alle miteinander klar?

Das war herausfordernd. Wir alle sprachen mehr oder weniger gut Englisch. Und die meisten von uns konnten keine der arabisch beschrifteten Verkehrsschilder und Hinweistafeln lesen. Weil es auch kein Navi gab, musste man sich anfangs mühsam per Karte durchtasten und sich seine Wege merken – etwa beim Einkaufen in Riad.

### Ihr Aufenthalt in Saudi-Arabien fiel zusammen mit dem ersten Golfkrieg. Wie haben Sie ihn erlebt?

Der Krieg begann 1991. Zum Glück waren wir nicht allzu stark betroffen, da Riad relativ weit weg liegt von Kuwait. So mussten wir keine Bodentruppen und keine Angriffe von Flugzeugen erleben. Doch wir wurden mit Raketen beschossen, die Teile der Gebäude von KACST beschädigt haben. Ab 1992 konnten wir wieder normal arbeiten.

### Was ist Ihnen sonst im Gedächtnis geblieben?

Etwas Besonderes für mich war die Wüste. Nachts war es vollkommen dunkel und still. Doch die Wüstengegend um das Solar Village war so heiß und so abgelegen, dass man immer gut auf sich selbst aufpassen musste: immer jemand Bescheid sagen, wenn man wegfuhr, und genug zu essen und zu trinken sowie etwas zum Übernachten mitnehmen – falls man irgendwo hängenblieb. Da es noch keine Handys gab, hätte man niemand erreichen können.

### Waren Sie häufig unterwegs?

Ja, denn ich habe drei Anlagen an verschiedenen Orten in Saudi-Arabien betreut. Zudem mussten wir möglichst viele Anlagenteile in Saudi-Arabien anfertigen lassen. Das war eine Auflage der Saudis, die das bezahlt haben. Da kam es vor, dass ich quer durchs Land fahren oder fliegen



musste, um etwa einen neuen Behälter anzuschauen. Das waren riesige Distanzen, etwa 1200 Kilometer von Riad nach Jeddah am Roten Meer zu unserem Behälterbauer.

#### **Was empfanden Sie, als das Projekt zu Ende ging?**

Ich war erleichtert. In Saudi-Arabien wurde gegen Ende des Projekts Osama bin Laden aktiv und hat Terror verbreitet. Da war ich froh, wieder weg zu sein. Hinzu kam, dass ich fünf Jahre lang von der Familie getrennt war.

#### **Wie ging es danach weiter?**

Wir hatten nachgewiesen, dass Erzeugung, Speicherung und Transport von solarem Wasserstoff technisch möglich sind. Aber es gab dafür keinen Markt. Daher hat man die Grundlagenforschung für beendet erklärt und alle Projekte auf diesem Gebiet zurückgefahren. Mit den saudischen Kollegen haben wir noch einige Jahre weiter zusammengearbeitet. Doch die Entwicklung von Solar- oder Wind-Wasserstoffanlagen kam für ein Jahrzehnt zum Stillstand. Erst vor etwa zehn Jahren hat man damit begonnen, die Forschungsarbeiten fortzusetzen.

#### **Waren Sie mit dem HYSOLAR-Projekt Vorreiter?**

Technisch, würde ich sagen, ist man heute nicht so sehr viel weiter als damals – nur wirtschaftlich. Die technische Entwicklung, die wir betrieben haben, geht jetzt weiter – mit neuen Zielen: etwa die Senkung des spezifischen Energieverbrauchs. Doch vor allem geht es darum, Elektrolyseanlagen in Serie zu produzieren. Dabei profitiert man auch von der Forschung an Brennstoffzellen, die nach HYSOLAR im Fokus stand. So gibt es inzwischen neue Technologien wie die Feststoff- oder Hochtemperatur-Elektrolyse, die damals noch in den Anfängen steckten. Doch die lange Zeit, in der die Forschung an solarem Wasserstoff brachlag, hat auch Spuren hinterlassen.

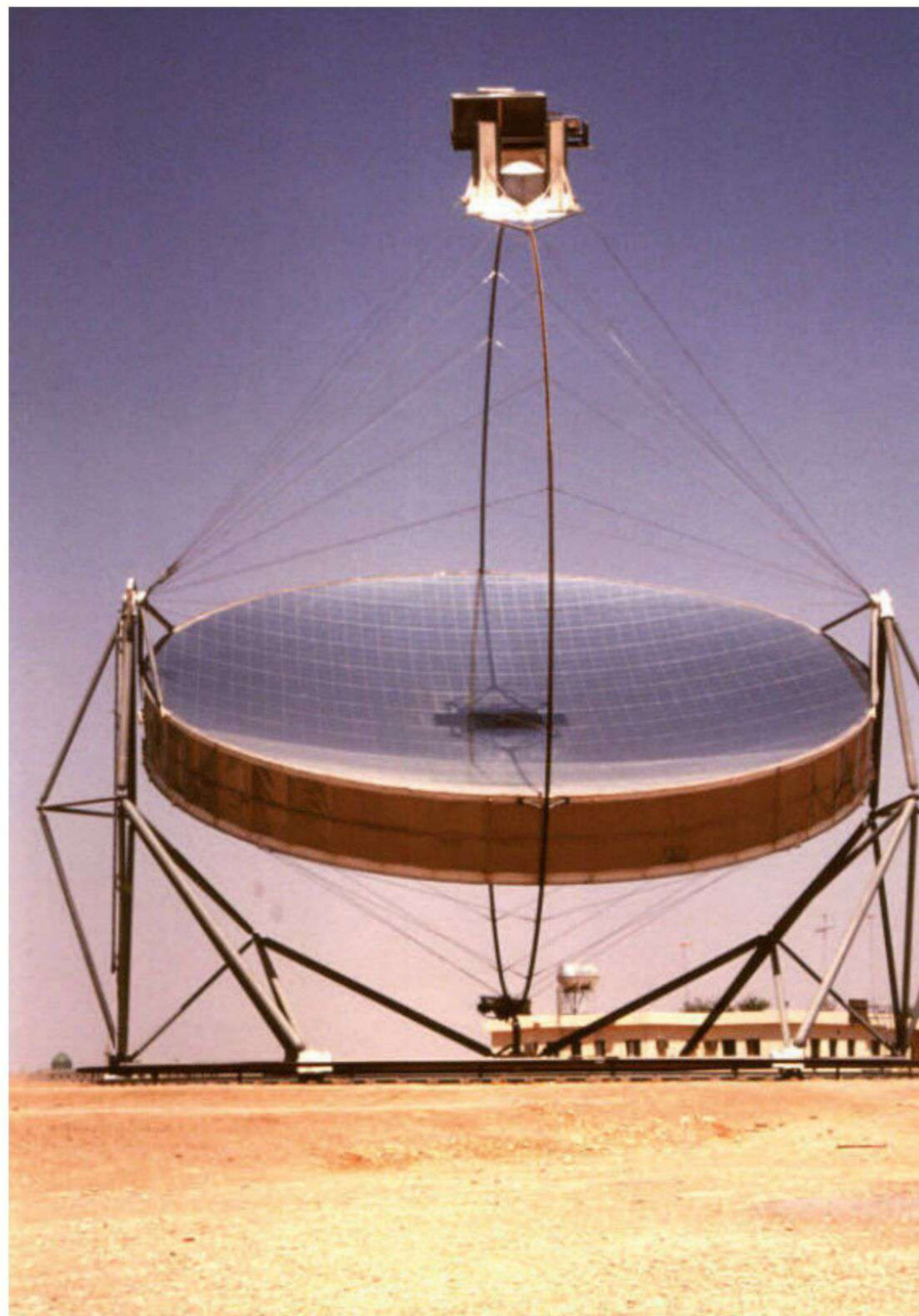
#### **Inwiefern?**

Weil es jahrelang keine kontinuierliche Anpassung an neue Technologien gegeben hat, mussten Entwicklungen wie neue Rechner- und Regelungstechniken, Sicherheitskonzepte und die Möglichkeit zur Fernsteuerung erst in die Technologie integriert werden. Außerdem ist es mitunter schwierig, an das alte Know-how heranzukommen. Ergebnisse, die vor dem Jahr 2000 erzielt wurden, sind kaum elektronisch verfügbar und fast nur in Papierform zugänglich. Da bräuchte es mehr Anstrengungen, um ältere Publikationen elektronisch verfügbar zu machen ■

---

Auf dem Gelände des Solar Village bei Riad legten deutsche und saudische Wissenschaftler eine Basis für die Nutzung von Solarstrom zur Wasserstoff-Erzeugung. Die historischen Bilder zeigen (von oben) ein Photovoltaikfeld, das Laborgebäude und einen mächtigen Spiegel für Sonnenlicht.

---





---

# Im Sand zerronnen

---

Billige und saubere Energie für Europa – auf direktem Weg aus der afrikanischen Wüste: Diese Idee ist nicht neu. Zuletzt wurde sie in Gestalt des Projekts „Desertec“ zu Grabe getragen. Woran ist sein Konzept gescheitert?

von RALF BUTSCHER

**A**uf den ersten Blick erschien es wie ein Klecks auf der Landkarte: Ein Quadrat von etwa 300 Kilometern Seitenlänge – platziert im Herzen der Sahara – verdeutlichte die Fläche an Solar Kollektoren, die theoretisch genügen würde, um den weltweiten Bedarf an elektrischer Energie zu stillen. Die Kollektoren, so die von dem deutschen Physiker Gerhard Knies um die Jahrtausendwende entwickelte Idee, sollten das über der nordafrikanischen Wüste üppig vorhandene Sonnenlicht einfangen – um seine Energie schließlich durch solarthermische Kraftwerke in Strom zu verwandeln.

Darauf basierte ein Megaprojekt namens „Desertec“, das für enormes Aufsehen sorgte – und 2009 auch in einer Titelgeschichte von bild der wissenschaft vorgestellt wurde. Die Vision von Desertec stand für eine Allianz zwischen Europa und Nordafrika, die künftig in beiden Weltregionen eine Versorgung mit „sauberer“, klimaschonend erzeugter Energie sicherstellen sollte.

## Pläne für Hunderte Solarkraftwerke

Die wissenschaftliche Basis dafür hatten Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gelegt, die das Potenzial des Wüstenstroms in einer umfassenden Studie ermittelten. Daraus erwachsen konkrete Pläne, die eine Reihe von Unternehmen, vor allem aus Deutschland, gemeinsam umsetzen wollten: Bis 2050 sollten demnach Hunderte riesiger Solarkraftwerke in Nordafrika und im Nahen Osten so viel elektrischen Strom aus dem Sonnenlicht gewinnen, dass sich damit nicht nur die Menschen dort versorgen, sondern zudem rund 15 Prozent des europäischen Stromverbrauchs speisen ließen – über leistungsfähige und verlustarme Leitungen quer durch das Mittelmeer.

In Hamburg wurde eine Stiftung gegründet, die Desertec Foundation, um für das Konzept zu werben. In München schlossen sich vier Dutzend Unternehmen zur Desertec Industrial Initiative (DII)

zusammen, um es in die Praxis umzusetzen. Doch längst ist klar: Vorerst wird kein Sonnenstrom aus der Sahara nach Europa fließen. Die hochfliegenden Pläne der DII wurden im Oktober 2014 zu Grabe getragen – und die Industrieinitiative löste sich weitgehend auf.

## War das Scheitern programmiert?

Für Gerd Eisenbeiß kam diese Entwicklung nicht überraschend. „Ich habe zwar die Desertec-Initiative bewundert – wegen ihrer visionären Natur“, sagt der Physiker und Energieexperte, der während mehr als drei Jahrzehnten etliche leitende Positionen unter anderem im Bundesforschungsministerium, beim DLR und am Forschungszentrum Jülich innehatte. „Doch die Initiative ist auf eine Schiene gelegt worden, auf der schon viele andere gestartet – und gescheitert – sind.“ Die Vorstellung, Energie für Europa in Afrika zu produzieren, kam jahrzehntelang immer wieder als Thema auf. „Schon in den 1970er-Jahren träumte man von Solarkraftwerken in Wüstenregionen“, berichtet Eisenbeiß, der die Entwicklung „erneuerbarer Technologien“ maßgeblich mit vorangetrieben hat.

Und – ebenfalls kein neuer Gedanke: „Damals gab es auch die Idee, mit Solarstrom Wasserstoff herzustellen, um ihn nach Europa zu bringen.“ Ähnlich wie etwa die deutsche Bundesregierung heute damit liebäugelt, grünen Wasserstoff aus Namibia zu beziehen, sollte damals Wasserstoff auf dem Schwarzen Kontinent erzeugt werden – aus Wasserkraft an einem riesigen Staudamm im zentralafrikanischen Kongo. Doch diese Vorstellungen wurde – wie bislang alle derartigen Konzepte – nicht realisiert.

„Letztlich scheiterten alle Projekte an den hohen Kosten“, sagt der inzwischen pensionierte und vor allem als Publizist tätige Forschungsmanager. „Und so war es auch bei Desertec.“ In Studien war die Rede von 400 Milliarden Euro, um die Idee zu verwirklichen. „Und wer bei diesen Summen von einer ‚In-



vestition' sprach, hatte nichts verstanden“, meint Eisenbeiß. Denn es ging dabei um einen längerfristigen Prozess. „Da sich aber die Investitionen nicht aus den normalen Strompreisen amortisieren würden, brauchte der Plan entweder staatliche Zuschüsse oder Garantien für dauerhaft überhöhte Strompreise, die in Nordafrika nicht zu realisieren sind.“

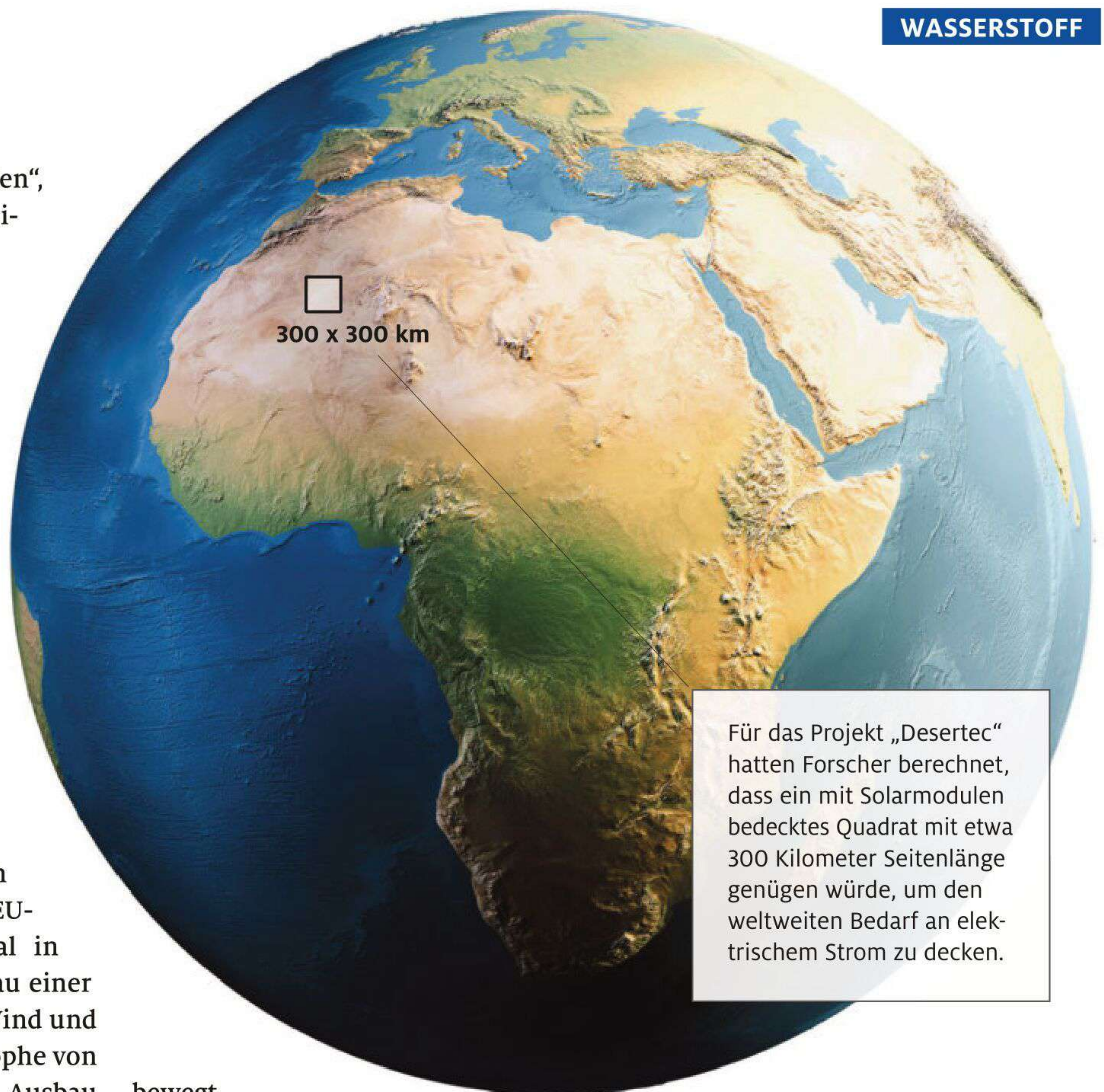
### Die Europäer sollten zahlen

Daher, betont Eisenbeiß, musste man Europa in das Solarstrom-Konzept einbinden: „Die europäischen Verbraucher sollten für Strom aus Nordafrika einen überhöhten Preis zahlen – um zu ermöglichen, dass sich die eigentlich unwirtschaftlichen Solarkraftwerke und -netze dennoch rentabel betreiben lassen.“ Allerdings: „Es ließ sich kein Mäzen für das Projekt finden.“ Die EU-Länder waren dazu nicht bereit – zumal in Europa reichlich Fördermittel in den Aufbau einer dezentralen Stromversorgung aus Sonne, Wind und Biomasse fließen. Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima im Frühjahr 2011 hatte deren Ausbau Vorrang – und das ist bis heute so geblieben. Ein teures Mammutprojekt wie Desertec stieß nicht mehr auf Begeisterung. Den Unternehmen der Industrieinitiative bot sich keine Perspektive mehr für ein tragfähiges Businessmodell. Und der Arabische Frühling, der zwischen 2010 und 2012 etwa in Ägypten, Libyen und Tunesien die politischen Machtverhältnisse umkämpfte, verunsicherte die Firmen.

„Es ehrt die Beteiligten, dass sie wieder mal versucht haben, die Vision vom Wüstenstrom für Europa zu verwirklichen“, sagt Eisenbeiß. „Doch sie hatten keine echte Chance.“ Das Grundkonzept hinter Desertec hält der Physiker aber weiter für sinnvoll – „sofern man sich darauf fokussiert, den Solarstrom in Nordafrika zu verbrauchen, statt ihn nach Europa zu leiten.“ Die Nutzung von Sonne und Wind biete eine exzellente Möglichkeit, die wachsende Bevölkerung sauber und klimaschonend mit ausreichend Energie zu versorgen. „Und ökonomisch ist es für die Länder lohnender, statt Solarstrom Öl oder Gas zu exportieren“, sagt Eisenbeiß.

### Eine Partnerschaft mit Zukunft

Doch langfristig dürfte sich das ändern. Die Kosten für die Produktion von Solarstrom in sonnenreichen Wüstenregionen sind seit Jahren im Sinkflug und liegen inzwischen deutlich unter denen für elektrischen Strom aus Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerken. Daher ist der Grundgedanke von Desertec auch keineswegs tot. Tatsächlich hat sich schon viel



Für das Projekt „Desertec“ hatten Forscher berechnet, dass ein mit Solarmodulen bedecktes Quadrat mit etwa 300 Kilometer Seitenlänge genügen würde, um den weltweiten Bedarf an elektrischem Strom zu decken.

bewegt.

So ging in Marokko 2016 ein riesiger

Solarpark unweit der Stadt Ouarzazate am Rande der Sahara in Betrieb. Die Anlage, die die solarthermische Technologie nutzt, wurde durch zwei weitere Anlagen ergänzt, die beide seit 2018 am Netz sind. Insgesamt haben die drei Kraftwerk Solarkomplexes eine installierte Leistung von über 500 Megawatt. Eine vierte Anlage, die auf der Stromgewinnung durch Photovoltaik basiert, ist geplant. Auch in anderen Ländern der Region wie Algerien, Ägypten, Jordanien und Saudi-Arabien wird der Bau von Solar- sowie auch Windkraftwerken vorangetrieben. Zudem gibt es handfeste Pläne in Namibia (siehe Beitrag S. 44, „Wasserstoff aus Wüstenstrom“).

„Dass die Solarenergie im Sonnengürtel der Erde umfassend genutzt wird, ist eine historische und aus Klimaschutz-Gründen logische Entwicklung“, meint Gerd Eisenbeiß. Sie könnte dazu führen, dass auch eine Kooperation zwischen Nordafrika und Europa wieder zu einem Thema wird – angesichts des Konflikts mit Russland vielleicht schneller als viele Fachleute das erwartet haben. Das wäre für beide Seiten von Vorteil: In den stromproduzierenden Ländern würden die Kosten weiter sinken und für die Europäer ließe sich die Abhängigkeit von Erdgas verringern – zumal von solchem aus Russland. Die Energie-Versorgungssicherheit ließe sich stabilisieren – nicht zuletzt auch durch den Transport von Energie in Form von grünem Wasserstoff. ■



---

# Das Wirken von Wasserstoff

---

KAPITEL 03



zero emission H<sub>2</sub>







# Zellen auf Rädern

Was kommt nach den herkömmliche Verbrennungsmotoren? Wasserstoff könnte im Straßenverkehr der Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Doch er hat auch Nachteile.

von HARTMUT NETZ



**E**in Riss geht durch die Automobilwelt. Klar ist, dass der Verkehr klimaneutral werden muss. Aber der Weg dorthin führt nicht zwangsläufig über batterie-elektrische Antriebe. Auch Autos, die ihre Energie aus wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen beziehen, fahren emissionsfrei, falls der dafür nötige Wasserstoff mit Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird. Die Frage, welcher Antrieb der bessere ist, Batterie oder Brennstoffzelle, spaltet die Branche. Tesla-Chef Elon Musk beantwortet sie, indem er „fuel cell“, den englischen Begriff für Brennstoffzelle, zu „fool cell“ verballhornt, was so viel bedeutet wie „Idioten-Zelle“.

In Asien ist man anderer Ansicht. Toyota in Japan und Hyundai in Südkorea haben bereits seit einigen Jahren Serienfahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzelle im Programm. Beide Hersteller wollen die Produktion ihrer Wasserstoff-Autos weiter hochfahren. Gleichzeitig sollen die bislang hohen Preise sinken.

Auch in Deutschland stehen sich zwei Lager gegenüber. Einerseits bezeichnet VW-Chef Herbert Diess, zu dessen Konzern neben Pkw-Marken wie Seat, Audi oder Porsche auch die Lkw-Hersteller MAN und Scania gehören, bei jeder sich bietenden Gelegenheit die Brennstoffzelle als Irrweg. Andererseits haben sich mit Daimler Trucks aus Deutschland und der Volvo-Group aus Schweden zwei weltweit führende Lkw-Hersteller im Gemeinschaftsunternehmen Cellcentric zusammengesetzt, um ihre Schwerlasten mit Brennstoffzellen fahren zu lassen.

Damit sind sie nicht allein: Bosch, größter Automobilzulieferer der Welt, hat 2019 rund 50 Millionen Euro in die Vorserienfertigung von Brennstoffzellen gesteckt. Mithilfe eines neuartigen Brennstoffzellen-Stacks soll die Technik schon bald serienreif sein. Bei Bosch hofft man, dass sich der neue Geschäftszweig bis 2030 zu einem Milliardengeschäft entwickelt.





Noch ein seltener Anblick: Lastkraftwagen mit Wasserstoff und Brennstoffzellen werden ausgeliefert.

Auch Opel setzt auf die Zelle. Der Autobauer aus Rüsselsheim will noch vor Ende dieses Jahres den Transporter Vivaro-e, der bereits als reine Batterie-Version erhältlich ist, in einer Kleinserie mit wasserstoffbetriebener Brennstoffzellen-Technik auf den Markt bringen. Der Opel Vivaro-e Hydrogen soll mit einer einzigen Tankfüllung über 400 Kilometer weit fahren können. Die dafür nötige Energie liefert eine Brennstoffzelle mit 45-Kilowatt Leistung.

#### Der feine Unterschied

Doch vom Preis abgesehen, worin unterscheidet sich ein Batterie- von einem Wasserstoff-Auto? Wer von einem E-Auto spricht, meint in der Regel die batterie-elektrische Variante, also ein Fahrzeug mit Elektromotor, der von einer Batterie aus parallel und seriell zusammengeschalteten Akkumulatoren gespeist wird. Doch auch unter der Haube von Wasserstoff-Autos arbeitet ein Elektromotor, der seinen

Fahrstrom – zumindest in Teilen – per Batterie bezieht. Den Unterschied macht nur die Art und Weise, wie die jeweilige Batterie geladen wird.

Batterie-Autos werden unterwegs an einer Ladestation oder zu Hause an der „Wallbox“ geladen. Das geschieht ähnlich wie das Laden eines Handys. Man verbindet Batterie und Wallbox per Ladekabel – und der Strom fließt, die Batterie lädt. Das ist einfach, dauert aber recht lange. Wenn man nicht gerade eine spezielle Schnellladestation benutzt, hängt das E-Auto mitunter stundenlang am Kabel.

#### Beim Tanken kann der Wasserstoff punkten

Doch das reicht nicht, um mit einem Wasserstoff-Auto mithalten zu können. Auch der Wasserstoff-Tank wird an speziellen Tankstellen befüllt, die den Treibstoff in Hochdruckspeichern bevorraten. Der Tankvorgang ähnelt im Wesentlichen dem Tanken an einer konventionellen Benzin- oder Dieselsäule. Der Kunde klinkt die Kupplung des Zapfschlauchs in den Tankstutzen seines Fahrzeugs und drückt den Startknopf. Wasserstoff beginnt zu fließen.

Bevor der Treibstoff in den Tank gelangt, muss er verdichtet werden – je stärker die Verdichtung, desto größer die Reichweite. Das erledigt eine vorgeschaltete Verdichtereinheit. Von der komplexen Technik, die dahintersteckt, bekommt der Kunde an der Zapfsäule nichts mit. Alles in allem dauert ein Tankvorgang nur wenige Minuten und damit kaum länger als bei einem Diesel- oder Benzin-Auto.

Aus dem getankten Wasserstoff und zugeführter Luft erzeugt dann eine Brennstoffzelle an Bord des Fahrzeugs elektrischen Strom und – als Abfallprodukt – Wasser, das als Dampf dem Auspuff entweicht. Der Rest des Antriebs ist fast identisch mit dem eines reinen E-Autos: Der erzeugte Strom speist ebenfalls eine – wenn auch deutlich kleinere – Batterie, die wiederum einen Elektromotor antreibt.

#### Strom aus der kalten Verbrennung

Brennstoffzellen verwandeln chemische in elektrische Energie. Genau besehen besteht die gewöhnlich in Autos verbaute sogenannte Proton Exchange Membrane-Fuel Cell (PEMFC) aus mehreren Hundert einzelnen, sehr dünnen Brennstoffzellen. Sie sind zu einem „Stack“, dem Herzstück des Brennstoffzellen-Antriebs, gestapelt und in Reihe geschaltet. In jeder Zelle des Stacks wird per „kalter Verbrennung“ aus der chemischen Reaktionsenergie von Wasserstoff und Luftsauerstoff elektrischer Strom gewonnen (siehe Grafik S. 13, „Die Brennstoffzelle: das Prinzip der kalten Verbrennung“). Dadurch erreichen PEM-Brennstoffzellen Leistungen im zwei- bis dreistelligen Kilowatt-Bereich.

Die Tatsache, dass Brennstoffzellen bislang bloß in recht kleinen Stückzahlen gefertigt werden,





zeigt, dass die Technologie noch erhebliches Entwicklungspotenzial birgt. „Mit leistungsfähigeren Zellen wird sich der Platzbedarf der Stacks noch um einiges verringern“, meint Tom Smolinka, Leiter der Abteilung Chemische Energiespeicherung am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg. Auch der Wasserstoff-Verbrauch pro Kilometer lasse sich noch reduzieren, ist der Wissenschaftler überzeugt.

Statt mit Wasserstoff lassen sich Brennstoffzellen auch mit Methanol füttern, einem niedermolekularen Alkohol. Wird dieser klimaneutral erzeugt, fahren auch Methanol-Autos emissionsfrei. Prinzipiell funktioniert der Antrieb genauso wie der eines wasserstoffbasierten Brennstoffzellen-Autos. Allerdings ist zusätzlich ein Reformer verbaut, der das Methanol-Wasser-Gemisch erhitzt, den Wasserstoff extrahiert und damit die Brennstoffzelle versorgt.

Ein Vorteil des Methanols: Es lässt sich ähnlich schnell tanken wie Benzin oder Diesel, kommt dabei aber ohne komplizierte Technik im Hintergrund aus und ist zudem leicht zu lagern. Ein Kanister aus

Plastik genügt – während in Wasserstoff-Autos kohlenstofffaserverstärkte Drucktanks genutzt werden. Allerdings: Der Wirkungsgrad eines Methanol-Antriebs liegt etwa zehn Prozent unter dem eines Antriebs mit wasserstoffbasierten Brennstoffzellen.

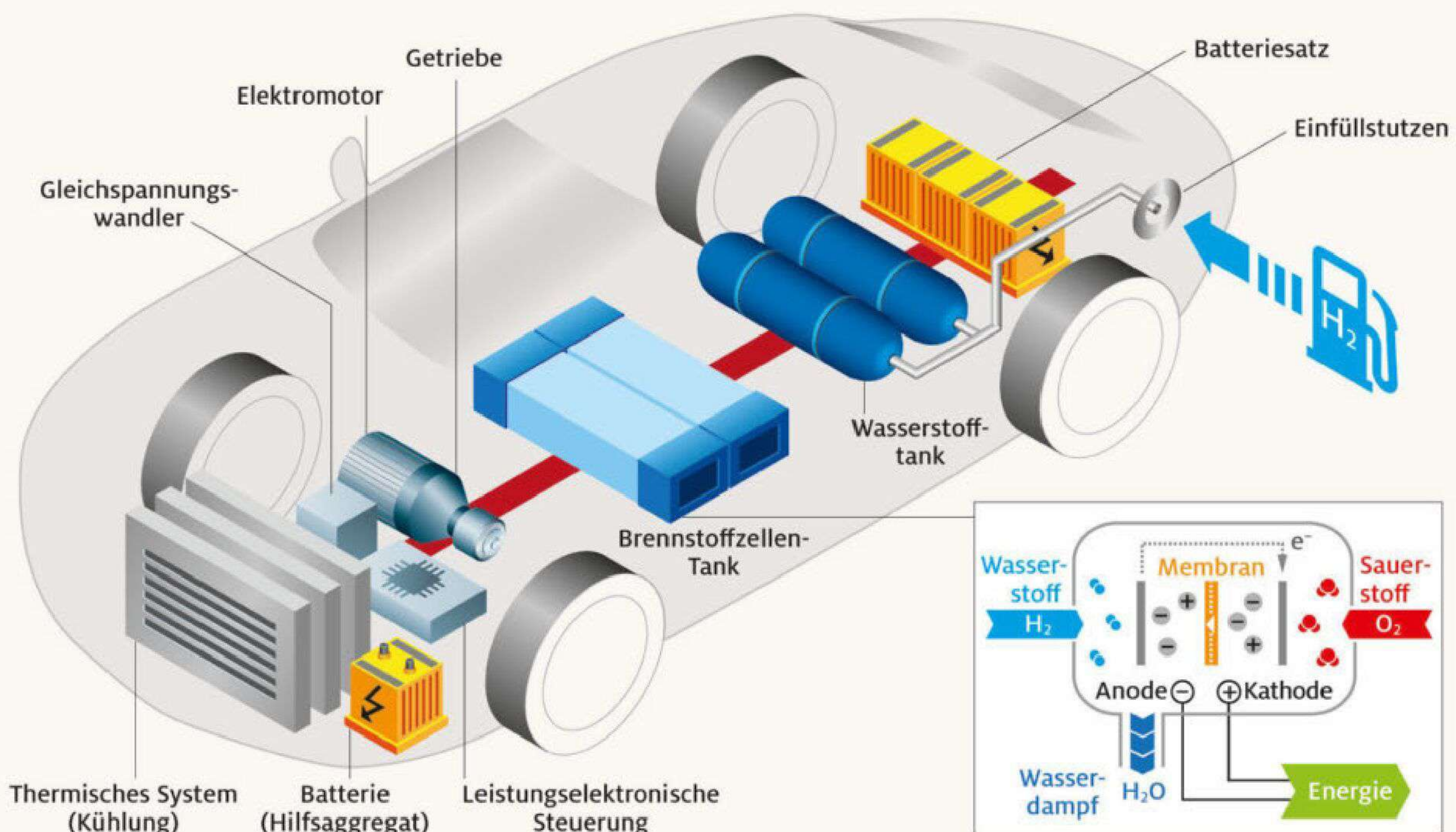
### Der Mix macht es aus

Doch der motorisierte Individualverkehr ist nur eine Facette in der Debatte um die Antriebe der Zukunft. Für Pkw sei „der Zug wohl schon aus dem Bahnhof“, konstatiert Eric Sax, Experte für Autonomes Fahren am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). „Da wird sich die Batterie durchsetzen.“ Anders im Schwerlastverkehr: „Da könnten Methanol-Brennstoffzellen eine interessante Alternative zum wasserstoffbasierten Antrieb sein“, meint der Wissenschaftler. Schließlich müsse die für die Versorgung von Wasserstoff-Fahrzeugen nötige Infrastruktur erst noch aufgebaut werden. „Wir sollten uns auf keine bestimmte Technologie versteifen, sondern möglichst technologieoffen bleiben“, rät Sax. „Aus dem Mix heraus wird sich die Zukunft gestalten.“

## Blick unters Blech: die Technik eines Brennstoffzellen-Autos

Neben Tanks für den gasförmig unter einem Druck von mehreren Hundert Bar oder als tiefkalte Flüssigkeit aufbewahrten Kraftstoff befinden sich in dem Fahrzeug die Brennstoffzellen für die Stromer-

zeugen, der Elektromotor für den Antrieb sowie diverse zusätzliche Aggregate. Die kleine Grafik rechts unten zeigt den Aufbau und die Funktionsweise einer Brennstoffzelle.





Tatsächlich ist die Lage im Schwerlastverkehr noch recht unübersichtlich. Elektromotoren seien zwar am effizientesten, erläutert Ralf Peters vom Forschungszentrum Jülich: „Der Wirkungsgrad von E-Antrieben liegt zwischen 65 und 75 Prozent.“ Doch das Netz an Ladesäulen ist noch löcherig. „Außerdem sind die Reichweiten batterie-elektrischer Lkw zu gering“, stellt der Wissenschaftler fest. In diesem Punkt seien Wasserstoff-Lkw deutlich überlegen, kämen aber wegen der Umwandlungsverluste lediglich auf Wirkungsgrade zwischen 35 und 45 Prozent. Das ist ähnlich wie bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren: Der Wirkungsgrad – also der Anteil des zugeführten Kraftstoffs, den der Antrieb in kinetische Energie umsetzt – beträgt unter Berücksichtigung des Produktionspfades bei einem Diesel bis zu 40, bei einem Benziner knapp 30 Prozent.

### Bescheidene Batterie-Reichweite

Bei MAN, der Lkw-Tochter des VW-Konzerns, die noch 2020 eine neue Modellgeneration mit Dieselantrieb vorstellte, setzt man inzwischen auf den Elektromotor. Ab 2024 will MAN im Münchner Stammwerk die Serienproduktion von E-Lkw starten. Die Schwerlasten sollen 500 Kilometer weit fahren können, bis sie zum Nachladen an die Säule müssen. Im Vergleich zum Diesel, der mit einer Tankfüllung gut 1000 Kilometer durchhält, ist das allerdings recht bescheiden. Der für die nächsten Jahre angekündigte Semi-Truck von Tesla, für den Konzern-Chef Musk 800 Kilometer Reichweite verspricht, ist da deutlich näher dran.

KIT-Wissenschaftler Eric Sax überzeugt das nicht: „Geht man davon aus, dass ein Lkw mit einer Nutzlast von 40 Tonnen pro Kilometer 1,5 bis 2 Kilowattstunden elektrischen Strom verbraucht, muss allein die Batterie zehn Tonnen wiegen“, gibt er zu bedenken. „Das ist wirtschaftlich unattraktiv.“ Daher lässt sich beispielsweise die Antriebsstrategie für die Langstrecke bei Daimler Trucks auf die Formel bringen: Je weiter der Weg und je schwerer die Fracht, desto mehr spricht für den Wasserstoff-Lkw.

„Der wasserstoffbasierte Brennstoffzellen-Antrieb wird im klimaneutralen Lkw-Fernverkehr der Zukunft unverzichtbar sein“, ist Daimler Trucks-Chef Martin Daum überzeugt. Der Konzern ist aktuell dabei, seinen Prototyp Mercedes Benz GenH2 Truck weiterzuentwickeln. Der Wasserstoff-Schwerlasten soll mit einer Tankfüllung an flüssigem Wasserstoff mindestens 1000 Kilometer weit fahren können. Für 2023 sind erste Tests im Alltagsverkehr geplant, ab 2027 soll der 40-Tonner schließlich in Serie vom Band rollen.

In der Schweiz ist man schon weiter. Dort hat der Hyundai-Konzern im Herbst 2020 damit begonnen, serienmäßig hergestellte Wasserstoff-Lkw auszulie-



Ein mit Wasserstoff betriebenes Antriebsaggregat für den Schwerlastverkehr verlässt die Fertigung.

fern. Mit einer Ladekapazität von knapp über zehn Tonnen und Reichweiten von mehr als 400 Kilometern eignen sich die kompakten Laster vor allem zum Beliefen des Einzelhandels. Per Anhänger lässt sich die Ladekapazität auf 36 Tonnen steigern, was die Reichweite allerdings deutlich drücken dürfte. Zu den Kunden, die den Wasserstoff-Lkw im Alltagsbetrieb testen wollen, gehören die Schweizer Post sowie die Lebensmittelhändler Coop, Migros und Schwab-Guillod. Allerdings: Für die H2-Flotte, die bis 2025 auf 1500 Fahrzeuge anwachsen soll, muss das bislang noch weitmaschige Tankstellennetz massiv ausgebaut werden.

### Es mangelt an Zapfsäulen

Die dünne Versorgungsinfrastruktur ist die Achillesferse der Wasserstoff-Mobilität. Denn während Elektroauto-Fahrer ihre Fahrzeuge an derzeit deutschlandweit über 25.000 Ladestationen nachladen können, gibt es für Wasserstoff-Autos nur rund 100 Tankstellen, an denen sich zwar Pkw, nicht jedoch Lastwagen betanken lassen. „Die meisten davon eignen sich nicht oder nur bedingt für Lkw“, heißt es in einer Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI), „da sie weder die benötigten Mengen noch eine zügige Betankung sicherstellen können.“

„Es ist ein typisches Henne-Ei-Problem“, stellt ISE-Wissenschaftler Tom Smolinka fest: „Ohne Tankstellennetz fertigt kein Hersteller Wasserstoff-Autos in Serie. Andererseits brauchen die Tankstellen Abnehmer, um Geld zu verdienen.“ Dabei bräuchte es gar nicht allzu viele Wasserstoff-Zapfsäulen, um den klimaneutralen Straßengüterverkehr zu beflügeln.

Die Forscher am ISI haben ein Szenario durchgerechnet, in dem alle schweren Lkw auf deutschen Straßen mit Brennstoffzellen-Antrieb fahren – und fanden heraus: Bereits ein Netz aus 140 Tankstellen





Tankstellen für Wasserstoff sind in Deutschland bislang Raritäten.

– errichtet an Autobahnen, Transit-Routen und in Industrieregionen – würde reichen, um den gesamten Wasserstoff-Bedarf der Lkw von etwa 1,3 Millionen Tonnen pro Jahr zu decken.

#### Schwerlastverkehr: eine Welt mit eigenen Regeln

Das ist ein Szenario mit Zukunftschancen, denn im Schwerlastverkehr gelten andere Gesetze als im Individualverkehr. „Speditionen arbeiten im Flottenbetrieb und mit detailliert durchgeplanten Betriebsabläufen“, erläutert Tom Smolinka. „Sollte sich die Brennstoffzelle im Lkw-Bereich durchsetzen, wird es schon bald viele betriebseigene Wasserstoff-Tankstellen geben.“

Das Rennen um den Antrieb der Zukunft bleibt also spannend. Doch was macht das mit dem Verbrennungsmotor? Ist damit das Ende klassischer Diesel- und Benzin-Antriebe eingeläutet? Die Ant-

wort lautet: Noch nicht ganz, denn auch ein Auto mit Verbrennungsmotor fährt emissionsfrei, wenn die Tankfüllung klimaneutral hergestellt wurde. E-Fuels heißen solche Kraftstoffe, die mithilfe von Strom synthetisch erzeugt werden.

#### Synthetische Treibstoffe für den Klimaschutz

Dafür spaltet man per Elektrolyse Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Reagiert der Wasserstoff mit  $\text{CO}_2$ , entstehen synthetische Brenn- oder Kraftstoffe wie Gas, Heizöl, Benzin, Diesel oder Kerosin. Entzieht man das für die Reaktion nötige  $\text{CO}_2$ , das beim Verbrennen wieder frei wird, der Atmosphäre, ist der  $\text{CO}_2$ -Kreislauf geschlossen. Und stammt der Strom für die Elektrolyse aus erneuerbaren Quellen, sind synthetische Treibstoffe weitgehend klimaneutral.

Der Vorteil von E-Fuels: Die Motorentchnik bliebe so gut wie unverändert, denn die chemische Zusammensetzung von synthetischem Benzin oder Diesel gleicht der ihrer fossilen Pendanten. Auch die Versorgungsinfrastruktur wäre mit dem bestehenden Tankstellennetz bereits vorhanden. Der Automobilindustrieverband VDA befürwortet deshalb den Einsatz von E-Fuels als die am schnellsten wirkende Maßnahme, um den Straßenverkehr auf Klimakurs zu bringen.

Doch E-Fuels haben auch einen Nachteil: Ihr Wirkungsgrad beträgt nur 15 bis 20 Prozent. Das treibt den Wasserstoff- und damit den Strombedarf in die Höhe. Im Straßenverkehr sei die direkte Nutzung von Elektrizität wirtschaftlich sinnvoller als der Einsatz von E-Fuels, heißt es daher in einer Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung. Es sieht so aus, als ob der Riss durch die Automobilwelt noch eine Weile bestehen bleibt. ■

## Das Risiko ist überschaubar

Wasserstoff brennt sehr leicht und kann sich bereits durch eine elektrostatische Entladung entzünden. Die Flammen des brennenden Gases sind über 2000 Grad Celsius heiß und kaum sichtbar. Wenn sich ausströmender Wasserstoff entzündet, kommt es zu einer Stichflamme, und das Gas brennt vollständig ab. Doch wenn das Wasserstoff-Gas nicht in Brand gerät, verflüchtigt es sich schnell. Denn die Dichte von Wasserstoff beträgt nur ein vierzehntel der Dichte von Luft.

Dass mit dem leicht flüchtigen Gas nicht zu spaßen ist, zeigte sich 1937 beim Absturz des mit Wasserstoff gefüllten Luftschiffs Hindenburg, das bei der Landung in Lake-

hurst an der US-Ostküste in Flammen aufging. Und 2019 explodierte eine Wasserstoff-Tankstelle in Norwegen wegen eines Montagefehlers an einem Hochdrucktank. Auch wenn bei der Explosion niemand zu Schaden kam, führte sie zu Diskussionen.

Forscher betonen: Das Risiko in einem Wasserstoff-Auto zu fahren ist nicht größer als in jedem beliebigen anderen Fahrzeug. Dafür sorgen in Europa strenge Prüfungsrichtlinien. Auch Crashtests haben mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge bestanden. Bisher ist kein folgenschwererer Unfall mit einem solchen Wagen bekannt. Kleinere Unfälle auf freier Strecke habe es hingegen schon gegeben. Doch die

gingen alle harmlos aus, zumindest was das Wasserstoff-System betrifft.

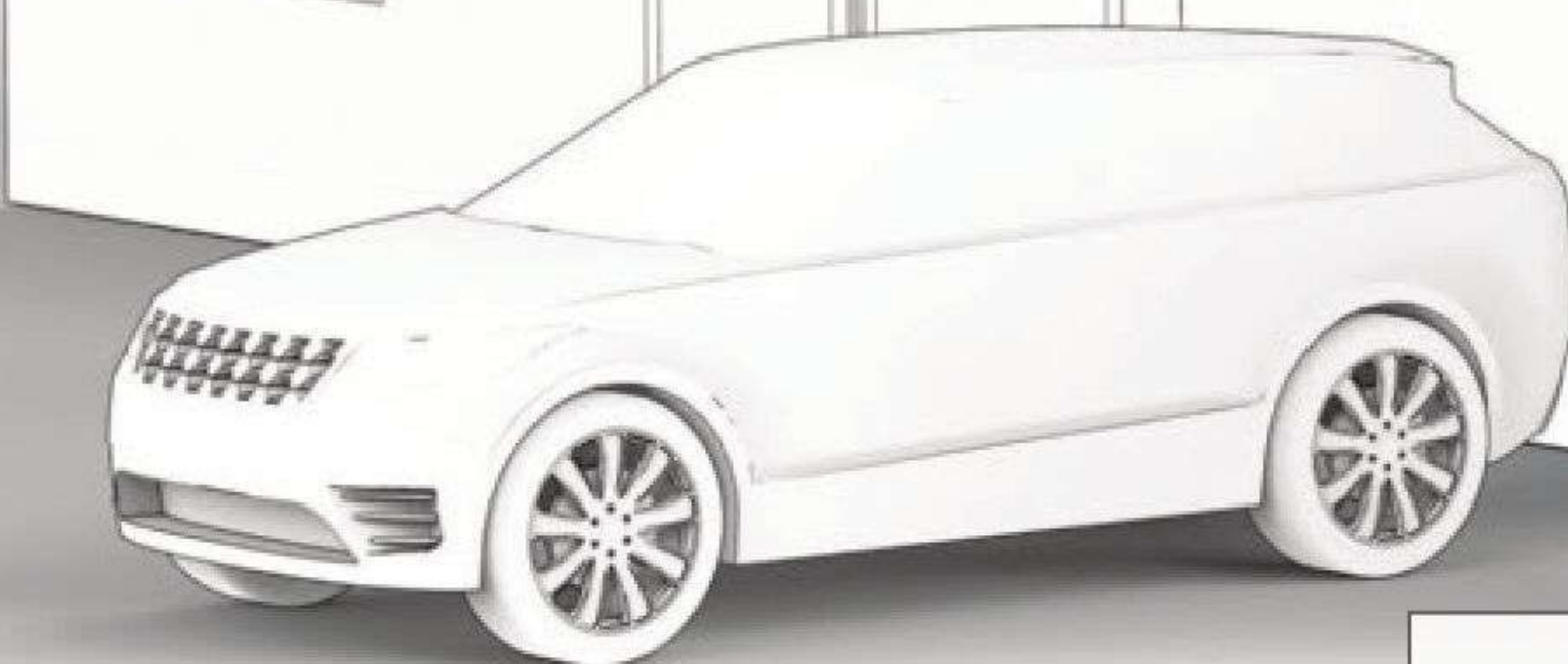
Dafür sorgt eine ausgeklügelte Sicherheitstechnik. So unterbindet die Sensorik im Fahrzeug im Fall eines Lecks im Wasserstoff-Tank sofort den Betrieb. Da das kleine Wasserstoff-Molekül, das nur aus einem Proton und einem Elektron besteht, die größte Diffusionsfähigkeit aller Gase hat, kursieren immer wieder Berichte über sich leerende Fahrzeugtanks. Allerdings: Häufig werden alte Berichte von Fahrzeugen mit Flüssigwasserstoff-Tanks aufgewärmt. In modernen Fahrzeugen, die mit Gas gefüllte Drucktanks an Bord haben, gilt Wasserstoff als sehr sicher eingesperrt.



# Die Zapfsäule für die Garage

Eine Technik aus der Schweiz soll das Betanken von Autos mit Wasserstoff deutlich vereinfachen.

von RALF BUTSCHER



Ein simples Konzept: Der Wasserstoff wird vor Ort erzeugt und getankt.

**W**er einen Wagen fährt, der mit Wasserstoff betrieben wird, könnte bei einem leeren Tank ein Problem haben. Denn Stationen, an denen sich der Kraftstoff nachfüllen lässt, sind rar. Für die Entwicklung einer auf Wasserstoff basierenden Mobilität ist die bislang nur spärlich ausgebaute Tankstellen-Infrastruktur ein Hemmnis.

Das will der Gasversorger Messer Schweiz ändern. Das Unternehmen aus Lenzburg im Kanton Aargau hat eine Wasserstoff-Tankstelle für daheim entwickelt. Die Anlage „H24U“, die in ihrer Größe und Gestalt einer Kühltruhe ähnelt, kann Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb innerhalb von rund fünf Minuten auf simple Weise volltanken.

Betreiben lässt sie sich mit elektrischem Strom aus einer regenerativen Quelle wie einer Photovoltaikanlage auf dem Dach oder mit Strom aus der Steckdose. Durch die Elektrolyse von Wasser entstehen Sauerstoff und Wasserstoff. Während der Sauerstoff in die Luft entweicht, wird der so erzeugte Wasserstoff zu einem Speichermodul geführt.

Das Besondere an der Technik: Zum Aufbewahren des Wasserstoffs dient kein Hochdrucktank, sondern ein Speicher

aus einem sogenannten Metallhydrid – einer hochporösen und recht leichtgewichtigen chemischen Verbindung aus einem Metall und Wasserstoff. Sie ist das Herzstück der Anlage und wirkt für das Gas wie ein Schwamm: In unzähligen winzigen Hohlräumen kann das Metallhydrid große Mengen an Wasserstoff-Molekülen aufnehmen. Ein weiterer Vorteil dieses Werkstoffs: Der Speichervorgang erfolgt bei normaler Umgebungstemperatur.

Die Grundlage für die Technik haben Wissenschaftler um Andreas Züttel entwickelt, Direktor des Materiallabors für erneuerbare Energie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Lausanne. Die Firma Messer war als Partner aus der Industrie daran beteiligt.

## Tanken unter Hochdruck

Wenn ein Fahrzeug mit Wasserstoff aus der Heimzapfsäule betankt werden soll, muss das gespeicherte Gas unter Druck gesetzt werden. Nur so kann es aus dem porösen Speichermodul entweichen und in den Tank strömen. Dazu wird das Metallhydrid durch einen elektrischen Wärmetauscher aufgeheizt, und der Wasserstoff gelangt über ein Zwischen-

volumen in den Tankschlauch – und schließlich in den Wagen. Zwei Druckstufen mit 350 oder 700 Bar sollen an der Tanksäule einstellbar sein. Die Bedienung der Zapfsäule erfolgt über einen berührungsempfindlichen Bildschirm. Der direkt mit der Anlage verbundene Elektrolyseur sorgt dafür, dass jederzeit für Nachschub an Wasserstoff gesorgt ist.

## Angebot für kleine Betriebe

Die Wasserstoff-Tankstelle für zu Hause will Messer ab 2023 zunächst in der Schweiz anbieten – erst einmal für private Nutzer und kleine Betriebe, etwa aus dem Handwerksbereich. Sie sollen damit bis zu vier Fahrzeuge betanken können. Außerdem entwickelt das Unternehmen eine größere Anlage, zum Einsatz beispielsweise in Mehrfamilienhäusern oder Industriefirmen.

Allerdings hat die Technik auch ein Manko: Ihr mangelt es bislang an Effizienz: Um den nötigen Druck zum Tanken des Wasserstoffs zu erzeugen, ist einiges an elektrischem Strom nötig, von dessen Energie ein Teil als Wärme verpufft. Das wirkt sich nachteilig aus im Vergleich zur Nutzung des Stroms in einem batterie-elektrischen Auto. ■



# Der neue Dampfzug

Auf Bahnstrecken, wo bislang noch Dieselloks fahren, könnten Züge mit Brennstoffzellen und Wasserstoff im Tank den Schienenverkehr klimaschonender und leiser machen.

von RALF BUTSCHER

**D**ie Bahnlinie zwischen Hechingen und Gammertingen im Süden von Baden-Württemberg verläuft über die Schwäbischen Alb und überwindet dabei mehr als 230 Meter Höhenunterschied. Die Steigungs- und Gefällstrecken sind ein idealer Parcours für den Härtestest eines neuartigen Zugs. Und der ging dort im Sommer 2021 an den Start: ein Triebwagen mit einem Brennstoffzellen-Antrieb, der das rund 30 Kilometer lange Teilstück im Netz der Zollern-Alb-Bahn mehr als ein halbes Jahr lang fahrplanmäßig befuhr. Erst im Februar dieses Jahres endete der Testbetrieb.

Entwickelt hat das Schienenfahrzeug namens „Coradia iLint“ der französische Technologiekonzern Alstom. Es basiert auf einem Diesel-Triebwagen, der seit etlichen Jahren angeboten wird. Doch das technisch grundlegend umgerüstete Modell unterscheidet sich drastisch von seinem konventionellen Pendant. Denn angetrieben wird der Coradia iLint nicht

von einem Dieselmotor, sondern von Brennstoffzellen. Sie sind unter einer Haube auf dem Dach des Zuges untergebracht. Daneben befinden sich Tanks, in denen Wasserstoff – der „Sprit“ der innovativen Bahn unter hohem Druck von 350 Bar gespeichert wird.

## Weltweit erster Brennstoffzellen-Zug

Diese Art von Antrieb sorgt dafür, dass der Triebwagen unterwegs keinerlei umwelt- oder klimaschädlichen Abgase produziert. In die Umwelt gelangt ausschließlich reiner Wasserdampf in die Luft – das Produkt der „kalten Verbrennung“ in der Brennstoffzelle. Zudem ist der Wasserstoff-Zug deutlich leiser als einer mit normalem Verbrennungsmotor. Das in einem Werk von Alstom im niedersächsischen Salzgitter hergestellte – und 2016 erstmals der Öffentlichkeit präsentierte – Schienenfahrzeug ist der weltweit erste Zug mit einem Brennstoffzellen-Antrieb.

Seine offizielle Zulassung für den regulären Betrieb im deutschen Bahnnetz erhielt der Coradia iLint im Sommer 2018. Wenige Monate danach starteten zwei Prototypen der Triebzüge mit je zwei Wagen zu seinem ersten Praxistest auf einer Bahnstrecke in Niedersachsen. Sie verkehren seitdem im Linienverkehr der Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser zwischen Cuxhaven und Buxtehude – auf einer Strecke, die in einem weiten Bogen über Bremerhaven und Bremervörde verläuft. Weitere Tests folgten, unter anderem in Hessen, den Niederlanden, in Österreich – und eben auf der Schwäbischen Alb.

Die Erfahrungen mit dem neuartigen Schienenfahrzeug fielen offenbar positiv aus, denn das Land Niedersachsen hat nach dem 18-monatigen Test zwischen Elbe und Weser eine Flotte aus 14 Wasserstoff-Zügen angeschafft. Ab dem Fahrplanwechsel 2022/2023 ersetzen 27 Brennstoffzellen-Züge die Dieseltriebwa-







Der Wasserstoff-Zug hat sich im Einsatz bewährt.

gen auf vier Regionalzuglinien im Taunus in Hessen – die größte Flotte an wasserstoffgetriebenen Zügen der Welt. Und auch auf der „Heidekrautbahn“ zwischen dem Berlin-Karow und Groß Schönebeck in Brandenburg sollen bald mehrere Wasserstoff-Züge eingesetzt werden. Die sind zwar teurer als vergleichbare Modelle mit Dieselantrieb, verursachen aber andererseits geringere Kosten für Wartung, Reparaturen und Energie.

Das gilt auch für einen neuen Wasserstoff-Zug von Siemens. Den hat der Münchener Konzern Anfang Mai gemeinsam mit der Deutschen Bahn vorgestellt. Der Doppeltriebzug „Mireo Plus H“ ist vergleichbar mit seinem Konkurrenten von Alstom. Er soll ab 2023 in Baden-Württemberg getestet und ab 2024 auf einer Strecke zwischen Tübingen, Horb und Pforzheim regulär eingesetzt werden.

### Ersatz für Diesellokomotiven

Vorteile bieten die mit Wasserstoff betriebenen Züge vor allem auf Bahnstrecken, die noch nicht elektrifiziert sind und wo der Bau einer elektrischen Oberleitung zu aufwendig oder gar nicht möglich ist. In Deutschland trifft das immerhin für etwa 40 Prozent des gesamten Schienennetzes zu. Dort lässt sich

mithilfe der Brennstoffzellen-Technik recht leicht und schnell ein emissionsfreier Bahnverkehr realisieren – zumindest lokal. „Gegenüber dem vergleichbaren Diesellokomotiv spart jeder Coradia iLint laut Hersteller pro Jahr durchschnittlich 700 Tonnen CO<sub>2</sub> ein. Das entspricht dem jährlichen Ausstoß von 400 Pkw. Allerdings: Die Erzeugung des benötigten Wasserstoffs führt dennoch zu Klimagasemissionen, wenn er etwa aus Erdgas oder mit elektrischem Strom aus fossilen Kraftwerken produziert wird.

Auch die Brennstoffzellen-Züge zwischen Elbe und Weser haben zunächst über eine mobile Tankstelle Wasserstoff bezogen, der als Nebenprodukt in der chemischen Industrie angefallen ist. Inzwischen hat das Gasversorgungsunternehmen Linde in Bremervörde eine große Wasserstoff-Tankstelle mit geschlossenem Elektrolyseur in Betrieb genommen. Sie soll künftig auch „grünen“ Wasserstoff erzeugen – mit elektrischem Strom aus Windkraftanlagen in Norddeutschland.

Die Wasserstoff-Züge haben ähnliche Leistungswerte wie ihre mit Diesellokomotiv betriebenen Geschwister. So bringt es der Brennstoffzellen-Antrieb des Coradia iLint auf eine Höchstgeschwindigkeit

von 140 Kilometer pro Stunde, der Zug von Siemens schafft sogar Tempo 160. Dabei verursachen die Brennstoffzellen-Antriebe deutlich weniger Lärm als ein Dieselmotor. Mit vollgefüllten Wasserstoff-Tanks schaffen sie nach Herstellerangaben eine Reichweite zwischen 800 und 1000 Kilometern. Dazu tragen auch mehrere Lithium-Ionen-Batterien bei, die sich unter dem Boden des Zugs befinden. Darin wird zum einen der in den Brennstoffzellen erzeugte Strom zwischengespeichert – um etwa beim Anfahren und Beschleunigen die maximale Leistung liefern zu können.

### Bremsenergie wird neu genutzt

Zum anderen nehmen die Akkus auch Energie auf, die beim Bremsen des Triebwagens zurückgewonnen wird. Dabei wird Bewegungsenergie in elektrische Energie verwandelt. Im Fachjargon heißt dieser Vorgang Rekuperation. Er wird auch bei modernen E-Loks genutzt. Dort wird die wiedergewonnene Energie über die Oberleitung zurück ins Stromnetz gespeist. Beim Wasserstoff-Zug landet die Bremsenergie in den Batteriespeichern. Bei einem Diesellokomotiv dagegen gehen sie durch die rein mechanischen Bremsen als Wärme verloren. ■



---

# Sauberer fliegen

---

Der Ausstoß an klimaschädlichen Abgasen aus dem Luftverkehr nimmt rapide zu. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, setzen die Forscher auch auf Wasserstoff.

von HARTMUT NETZ



Die ersten Flugzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb bieten vier Personen Platz.

**S**chon seit Langem stehen die Klimagas-Emissionen durch den Flugverkehr im Fokus der öffentlichen Diskussion. Eine wissenschaftliche Studie im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts Clean Sky macht die Luftfahrt für drei bis sieben Prozent des weltweiten Ausstoßes an Klimagasen verantwortlich – Tendenz: rasch steigend. Hinzu kommt die klimaschädliche Wirkung der Kondensstreifen, die sich

durch den ausgestoßenen Wasserdampf bilden. Sie reflektieren zwar an ihrer Oberseite die Sonnenstrahlung, aber an ihrer Unterseite werfen sie die von der Erde aufsteigende Wärmestrahlung zurück und verstärken damit den Treibhauseffekt. Das Resümee: Fliegen muss umweltverträglicher werden.

Doch um die negativen Folgen des Luftverkehrs auf das Klima zu verringern, sind enorme Anstrengungen und

Investitionen der gesamten Branche nötig. Der internationale Luftfahrtverband IATA (International Air Transport Association) hat als Ziel ausgegeben, den Luftverkehrssektor bis 2050 klimaneutral zu machen. Dafür müssen vor allem neue Antriebe sowie andere Energiequellen her – ein Umstieg mit hohen technischen Hürden.

Mittelfristig sollen energieeffizientere Maschinen die Emissionen um 50 Pro-



zent reduzieren. Den Rest müssten klimaneutrale Kraftstoffe und Antriebe besorgen. Zum Beispiel batterie-elektrische Antriebe: Sie sind die einzige Antriebstechnik, die völlig emissionsfrei arbeitet – vorausgesetzt, der Batteriespeicher wird mit elektrischem Strom aus erneuerbaren Quellen aufgeladen.

### Batterien für Kleinflugzeuge

An der vollelektrischen Zukunft der Luftfahrt versucht sich schon seit einigen Jahren eine Riege neu auf den Markt drängender Hersteller. Zum Beispiel das italienische Unternehmen Tecnam, dessen neunsitziger Elektro-Flugzeug P-Volt ab 2023 auf einigen kürzeren inländischen Flugverbindungen in Norwegen zum Einsatz kommen soll. Die schwedische Startup-Firma Heart Aerospace entwickelt gemeinsam mit dem US-amerikanisch-israelischen Hersteller Eviation Kleinflugzeuge für Kurzstrecken, die rein elektrisch fliegen sollen.

Die US-Fluggesellschaft United Airlines hat im Sommer 2021 bei Heart Aerospace 200 Maschinen vom Typ ES 19 gekauft. Das 19-sitzige E-Flugzeug, das 2026 erstmals ausgeliefert werden soll, hat eine Reichweite von 450 Kilometern und soll auf Zubringerflügen zu wichtigen Drehkreuzen eingesetzt werden. Ein prominenter Kunde von Eviation ist die Express-Sparte des deutschen Logistikkonzerns DHL, die ab 2024 zwölf Maschinen vom Typ Alice einsetzen will. Das Kleinflugzeug ist für 1,2 Tonnen Fracht und 800 Kilometer Reichweite pro Akkuladung konzipiert.

Allerdings: Die Entwicklung beim batterie-elektrischen Fliegen ist noch recht bescheiden. Zum Vergleich: Ein gängiger Regionalflieger vom Typ ATR72, der ausgelegt ist für entweder 70 Passagiere oder 7 Tonnen Fracht, fliegt mit einer Tankfüllung Kerosin etwa 1500 Kilometer weit. Hingegen beschränken die vergleichsweise geringe Energiedichte von Batterien und das damit einhergehende hohe Gewicht den Einsatz voll-elektrischer Antriebe nach heutigem Stand der Technik auf kleine Flugzeuge und kurze Strecken.

Wo das Problem liegt, zeigt ein Blick auf das Kerosin: Das Flugbenzin speichert mit 12.000 Wattstunden pro Kilo-

gramm Masse (Wh/kg) 30-mal so viel Energie wie heutige Batterien, die auf maximal 400 Wh/kg kommen.

### Wasserstoff für weite Strecken

Zwar steckt in den Batteriesystemen noch Optimierungspotenzial. Doch für den Flugverkehr auf Mittel- und Langstrecken taugen Batterien eher nicht. Für diese Distanzen gelten Wasserstoff und damit verknüpfte Technologien als Hoffnungsträger. Das Gas wiegt bei gleicher Energiedichte nur ein Drittel so viel wie Kerosin. Ein Wasserstoff-Flugzeug könnte also bei gleicher Reichweite weit höhere Nutzlasten transportieren als heutige Maschinen. Hinzu kommt: Spaltet man Wasserstoff durch Elektrolyse mit regenerativ erzeugtem „Grünstrom“ aus Wasser ab, entsteht ein klimaschonender Energieträger, der weder im Betrieb noch bei der Erzeugung CO<sub>2</sub> ausstößt.

## Der Hoffnungsträger am Himmel hat auch technische Tücken

Die Idee, Flugzeuge mit Wasserstoff anzutreiben, ist ein alter Hut – aber noch immer schwer umzusetzen. Denn der Hoffnungsträger hat auch Tücken. So ist sein Volumen unter atmosphärischen Bedingungen um ein Vielfaches größer als das von Kerosin. Entsprechend viel Platz wäre für die Tanks nötig. Doch an Bord eines Flugzeugs ist Platz knapp. Deshalb wird Wasserstoff, wenn er als Energiequelle für Flugzeugantriebe dient, bei minus 253 Grad Celsius verflüssigt und unter hohem Druck komprimiert. Unter diesen Bedingungen rücken die Moleküle enger zusammen, die volumetrische Energiedichte steigt, und das benötigte Tankvolumen schrumpft.

Die Konstruktion der Wasserstoff-Tanks ist anspruchsvoll, erläutert Jens Friedrichs, Leiter des Instituts für Flugantriebe und Strömungsmaschinen der Technischen Hochschule Braunschweig: „Die Behälter müssen leicht sein, die Temperatur halten und hohem Innendruck widerstehen.“ Vor allem die kombinierte Belastung durch hohen Druck

und schwankende Temperaturen bereitet den Konstrukteuren Kopfzerbrechen. Kugeltanks, deren Form ideal wäre, sind nur begrenzt vereinbar mit der aerodynamischen Bauweise heutiger Flugzeuge, deren Treibstoff in den Tragflächen lagert. Zudem fehlt es noch an zugelassenen Werkstoffen, die unter diesen Bedingungen die Haltbarkeit der Tanks über die übliche Betriebsdauer eines Flugzeugs garantieren, sagt Friedrichs. „Doch das sind technische Probleme, die in den nächsten Jahren lösbar sind“, ist der Triebwerksexperte überzeugt.

Wasserstoff lässt sich in der Luftfahrt auf drei verschiedene Arten einsetzen: als Kerosin-Ersatz, der in umgerüsteten Gasturbinen direkt verbrennt, als Rohstoff, aus dem in Reaktion mit CO<sub>2</sub> synthetisches Kerosin entsteht, oder als Energieträger, der sich mithilfe von Brennstoffzellen zu elektrischem Strom verwandelt. Airbus hat für 2035 einen Wasserstoff-Jet angekündigt.

Der europäische Hersteller will dafür zunächst mit drei Varianten experimentieren. Bei zweien davon verbrennen die Turbinen Wasserstoff direkt, und eine Brennstoffzelle liefert zusätzliche elektrische Energie. Die dritte Variante ist als sogenannter Nurflügler konzipiert, bei dem Antrieb, Treibstoff, Fracht und Cockpit innerhalb des Tragflügels untergebracht sind – eine Bauart, die Experten wie Jens Friedrichs als besonders gut geeignet für den höheren Platzbedarf der Wasserstoff-Anlagen halten.

### Das Herzstück: die Brennstoffzelle

Schon weiter ist man an der Universität Ulm. Dort entwickeln Forscher in Zusammenarbeit mit Kollegen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gerade den weltweit ersten Brennstoffzellen-Antriebsstrang im Megawatt-Bereich, der künftig Regionalflugzeuge mit 40 bis 60 Passagier-Sitzplätzen auf Strecken bis zu 1000 Kilometer antreiben könnte. Er umfasst zwei Wasserstoff-tanks, das Brennstoffzellensystem, Elektromotoren sowie die Steuerungs- und Regelungstechnik. Das Herzstück des Antriebs ist die Brennstoffzelle, die aus getanktem Wasserstoff und Sauerstoff aus zugeführter Luft den elektrischen Strom für die Motoren erzeugt.





In der Tragfläche befinden sich der Wasserstoff-Tank und die Antriebstechnik.

Der für die Versorgung nötige Wasserstoff lagert in vakuumgedämmten Tanks von 3 Meter Länge und 1,30 Meter Durchmesser. „Wir nutzen Drucktanks aus der Raumfahrt“, berichtet Josef Kallo, Leiter des Instituts für Energiewandlung und -speicherung an der Universität Ulm und Professor am DLR-Institut für Technische Thermodynamik. Wegen des gro-

ßen Platzbedarfs für den Wasserstoff legt man den Rumpf größer aus als bei heutigen Flugzeugen üblich. Mit einem ersten Prototyp rechnet der DLR-Wissenschaftler bereits für 2024, in Serie gehen soll die Maschine mit 1,5-Megawatt Leistung nach den aktuellen Plänen 2030.

Kallo und sein Team können aus den Erfahrungen von rund 15 Jahren Ent-

wicklungsarbeit schöpfen. Das erste bemannte Brennstoffzellen-Flugzeug der Welt, die DLR-H-2, entwickelt vom DLR, hob erstmals am 7. Juli 2009 in Hamburg ab. Inzwischen hat mit der viersitzigen HY-4, die am 29. September 2016 erstmals startete, bereits die sechste Generation des Antriebs den Jungfernflug hinter sich. Die HY-4 fliegt – je nach Speichertechnik – 750 bis 1500 Kilometer weit. Angetrieben wird die Maschine von einem Hybridsystem, das Brennstoffzelle und Batterie kombiniert. Auf Batterien will Kallo aber künftig verzichten: „Sie sind zu schwer.“ Eine deutlich größer dimensionierte Brennstoffzelle soll Batterieunterstützung überflüssig machen.

### Noch viel Entwicklungspotenzial

Brennstoffzellen gelten im Mittelstreckenbereich als die im Vergleich zur direkten Verbrennung des Wasserstoffs elegantere Antriebsart: „Gasturbinen der Ein- bis Zwei-Megawattklasse haben Wirkungsgrade von nur 25 Prozent“, erläutert Kallo. „Heutige Brennstoffzellen kommen dagegen auf 45 Prozent.“ Und

## Der Weg zu einer klimaneutralen Luftfahrt: Welche Techniken die Forscher favorisieren

			kurzfristig: 2035	langfristig: nach 2050
Urban Air Mobility	Passagiere	bis 4	batterie-elektrischer Antrieb	batterie-elektrischer Antrieb
	Reichweite	0–100 Kilometer (km)	turbo-hybrid-elektrischer Antrieb Brennstoffzellen-Antriebssystem	
Commuter	Passagiere	6–19	alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	turbo-hybrid-elektrischer Antrieb Brennstoffzellen-Antriebssystem alternative Kraftstoffe > Wasserstoff neue thermische Turbomaschinen
	Reichweite	50–600 Kilometer		
Regionalverkehr	Passagiere	20–120	turbo-hybrid-elektrischer Antrieb neue thermische Turbomaschinen alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	
	Reichweite	500–2000 Kilometer		
Kurzstrecke	Passagiere	100–200	alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	
	Reichweite	1000–4000 Kilometer		
Mittelstrecke	Passagiere	180–300	alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	
	Reichweite	2000–8500 Kilometer		
Langstrecke	Passagiere	mehr als 200	alternative Kraftstoffe > synthetische Kraftstoffe	
	Reichweite	5000–18.000 km		

Quelle: Whitepaper „Zero Emission Aviation – Emissionsfreies Fliegen“ (BDLI, DLR)





Noch Zukunftsmusik: das Modell eines „Nurflüglers“ mit Brennstoffzellen.

sie haben noch Optimierungspotenzial. Doch egal, ob Brennstoffzelle oder eine direkte Verbrennung – Wasserstoff-Flugzeuge fliegen zwar ohne CO<sub>2</sub>-Ausstoß, jedoch keineswegs emissionsfrei oder gar klimaneutral. Denn bei beiden Antriebsarten reagiert Wasserstoff mit Luft. Das dabei entstehende Wasser entweicht als Dampf in die Atmosphäre und bildet dort klimarelevante Kondensstreifen – pro Energieeinheit sogar zweieinhalb Mal so viel wie bei der Verbrennung von Kerosin. Zudem werden bei einer Direktverbrennung in der Turbine aufgrund der hohen Temperaturen gesundheitsschädliche Stickoxide freigesetzt.

Hinzu kommt: Beide Antriebsarten eignen sich nur für den Einsatz im Mittelstrecken-Verkehr. Zwar kalkuliert das EU-Forschungsprojekt Clean Sky mit optimistischeren Reichweiten von bis zu 10.000 Kilometern, doch nach heutigem Wissensstand sind Transatlantikflüge mit Wasserstoff nicht möglich. Der größte von Airbus geplante Wasserstoff-Jet soll gerade mal eine Distanz von 7500 Kilometern schaffen. Für die Langstrecke müssen also andere Konzepte her.

#### Der realistische Pfad

Mittelfristig führt der einzig realistische Weg über CO<sub>2</sub>-neutrales Kerosin, das synthetisch oder aus Biomasse erzeugt wird. Die unter dem Kürzel SAF (für „Sus-

tainable Aviation Fuel“) bekannten Treibstoffe unterscheiden sich chemisch kaum von fossilem Kerosin und können wie dieses in herkömmlichen Flugzeug-Triebwerken verbrannt werden.

Beim Verbrennen von Treibstoffen aus Biomasse entsteht zwar CO<sub>2</sub>, jedoch nur so viel, wie die Energiepflanzen zuvor für ihr Wachstum aus der Atmosphäre gezogen haben. Kultiviert werden unter anderem Raps, Algen oder Ölpalmen. Wird allerdings für die Produktion von Palmöl Regenwald abgeholzt, dreht die Klimabilanz ins Katastrophale.

Nachhaltig ist daher nur aus Rest- und Abfallstoffen wie Stroh, Gülle oder altem Speiseöl gewonnenes Kerosin. Dass Bio-Treibstoffe funktionieren, ist durch über 200.000 Flüge belegt, bei denen sie konventionellem Kerosin beige-mischt wurden. Allerdings sind sie aktuell fünfmal so teuer wie fossiles Kerosin. Und die notwendigen Mengen für eine Umstellung der gesamten Luftfahrt dürften kaum produzierbar sein.

Die Hoffnung der Luftfahrtbranche ruht deshalb auf synthetisch erzeugtem Kerosin. Dafür spaltet man per Elektrolyse Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Reagiert der Wasserstoff anschließend mit CO<sub>2</sub>, entsteht unter anderem synthetisches Kerosin. Entzieht man der Atmosphäre das für die Reaktion nötige CO<sub>2</sub>, das beim Verbrennungsvorgang wieder

frei wird, ist der CO<sub>2</sub>-Kreislauf geschlossen. Stammt zudem der Strom für die Elektrolyse aus erneuerbaren Quellen, ist das Kerosin weitgehend klimaneutral.

#### Der Haken: hohe Verluste

Das hört sich erst einmal gut an, hat aber einen Pferdefuß: die hohen Verluste der Umwandlungskette von elektrischem Strom über Wasserstoff zu Kerosin. Nur etwa 40 Prozent der Ursprungsenergie kommen in der Turbine an, und maximal 60 Prozent davon werden dort in Antriebsenergie umgesetzt.

Das kann den Bedarf an Grünstrom in schwindelerregende Höhen treiben. In einem Szenario mit raschem Umstieg auf Wasserstoff-Antriebe rechnet das Clean-Sky-Projekt der EU für 2050 mit einem Bedarf der Luftfahrt an Strom aus erneuerbaren Quellen von 21 Petawattstunden (Billiarden Wattstunden) – der größte Teil davon für die Produktion synthetischen Kerosins. Das Szenario basiert auf Wachstumsraten für den Luftverkehr von jährlich vier Prozent. Zum Vergleich: 2014 betrug die gesamte weltweite Strom-Erzeugung 22 Petawattstunden. Das macht deutlich: Der Umstieg auf neue, klimafreundliche Antriebe und Treibstoffe kostet nicht nur viel Geld – er erfordert zudem enorme Anstrengungen, um die Stromerzeugung aus regenerativen Quellen deutlich zu steigern. ■



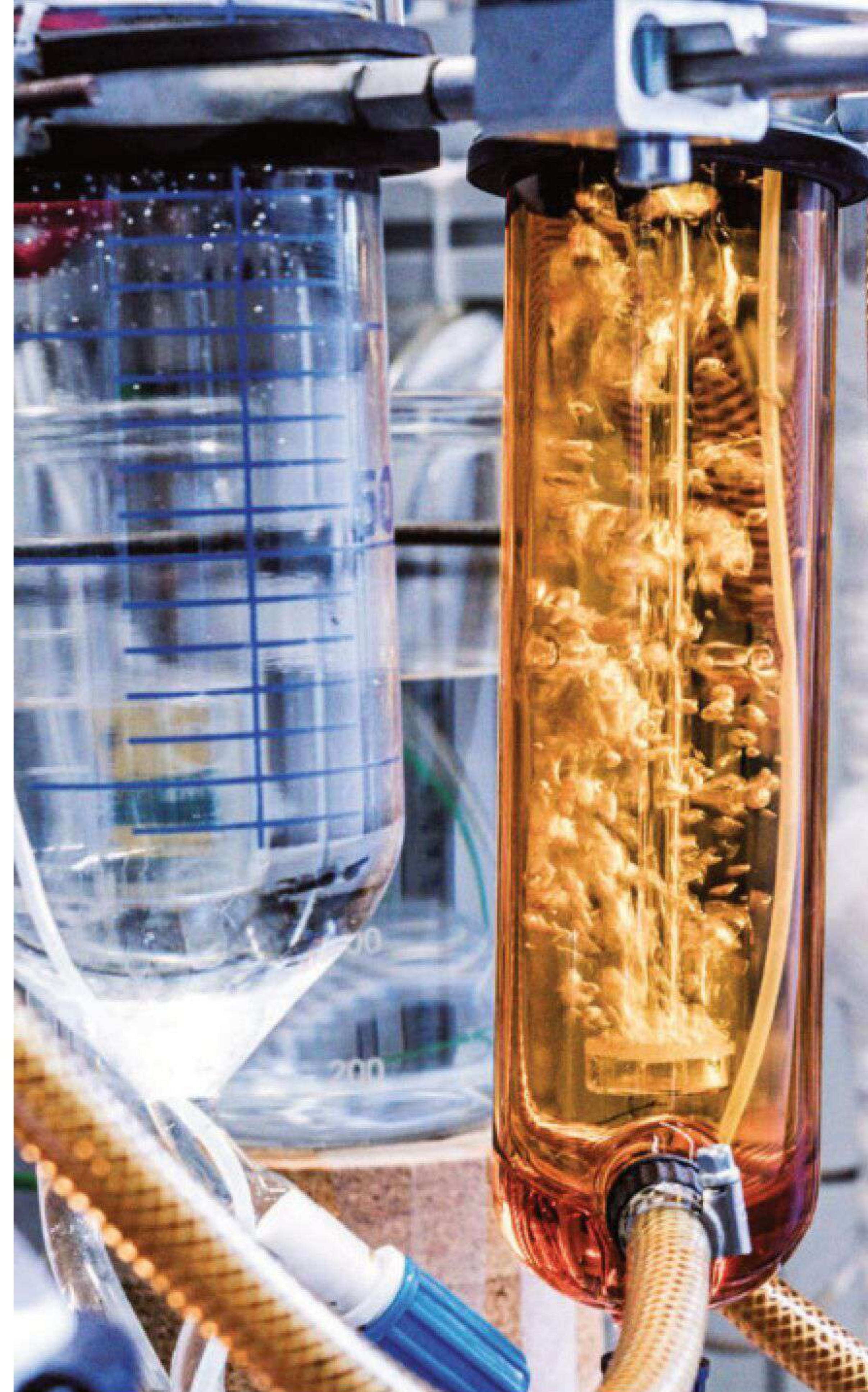
---

# Wasserstoff aus der Pfandflasche

---

Für den Transport des gasförmigen Energiespeichers gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine besonders pfiffige haben Forscher aus Deutschland entwickelt: eine ölige Flüssigkeit, in der sich Wasserstoff chemisch unterbringen lässt.

von RALF BUTSCHER



**W**asserstoff ist widerspenstig. Ihn auf möglichst simple und rentable zu bunkern und zu transportieren, stellt die Ingenieure vor eine knifflige Aufgabe – vor allem, wenn es darum geht, möglichst viel von der energiegeladenen Substanz in ein möglichst kleines Volumen zu packen.

Bei normalen Umgebungstemperaturen ist das chemische Element mit der Ordnungszahl 1 gasförmig. Und es hat eine sehr geringe Dichte von lediglich 24 Kilogramm pro Kubikmeter. Zum Vergleich: Die Dichte von Wasser ist mit fast 1000 Kilogramm pro Kubikmeter 40-mal so groß.

## **Aufwendige und teure Kühlung**

Als Flüssigkeit ist auch Wasserstoff kompakter, doch um das Gas zu verflüssigen, braucht es sehr tiefe Temperaturen. Für eine Aufbewahrung und Beförderung unter kryogenen – also ultrakalten – Bedingungen wird Wasserstoff auf unter minus 250 Grad Celsius gekühlt. Dann lässt er sich in flüssiger Form in speziellen Tanks fassen und transportieren. Doch die starke Kühlung ist technisch aufwendig, teuer und verzehrt Energie.

Eine Alternative zum Transport als ultrakalte Flüssigkeit bietet der Einsatz von starkem Druck. Eine übliche Vorgehensweise ist, den Wasserstoff bei 700 Bar – also dem 700-Fachen des irdischen Luftdrucks – in einen Tank zu pressen. Dann erreicht auch das Gas eine vergleichsweise große Dichte – und lässt sich

mit einem akzeptablen Energiegehalt pro Tankfüllung in ein gut handhabbares Volumen packen. Doch auch diese Methode erfordert viel Aufwand sowie eine besondere Infrastruktur und Sicherheitsvorkehrungen gegen die Kraft des hohen Drucks.

## **Dürrtige Energiedichte im Drucktank**

Hinzu kommt ein weiteres Manko: „Die Energiedichte pro Kilogramm Wasserstoff, die sich auf diese Weise in dem Gesamtsystem erreicht lässt, ist nur etwa ein Zehntel so groß wie die von Benzin, Gas oder Kerosin“, sagt André Thess – obwohl Wasserstoff als chemisches Element betrachtet gerade durch einen besonders großen Energiegehalt punkten kann. „Das macht Anwendungen schwierig“, betont Thess. Doch der Energieforscher und Direktor des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik weist darauf, dass es noch zwei weitere Möglichkeiten gibt, Wasserstoff zu lagern und zu transportieren.

„Eine Variante ist die Umwandlung von Wasserstoff in Ammoniak“, erklärt Thess – eine chemische Verbindung aus Stickstoff und Wasserstoff. Ammoniak gefriert bei minus 31 Grad Celsius. Diese Temperatur ist deutlich einfacher zu erreichen als die viel tiefere Verflüssigungstemperatur von Wasserstoff. Unter einem recht moderaten Druck von ungefähr zehn Bar kann Ammoniak bei Raumtemperatur als flüssiges Material aufbewahrt, befördert und verarbeitet werden.





### Energietransport in Öl

Schließlich gibt es eine noch recht neue Entwicklung: sogenannte flüssige organische Wasserstoff-Träger, im englischen Fachjargon: Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC). „Das sind ölige Substanzen, die in ihrer Konsistenz etwa Sonnenblumenöl ähneln und in denen sich der Wasserstoff chemisch auflösen lässt“, erklärt Thess. Dabei wird der Wasserstoff durch eine chemische Reaktion fest an eine geeignete Trägerflüssigkeit gebunden, aus der er von selbst nicht mehr entweichen kann. Der Wasserstoff bleibt beliebig lange sicher in der Flüssigkeit verpackt. Und die kann eine Menge des Gases aufnehmen: In jedem Liter Trägermedium lassen sich rund 650 Liter Wasserstoff binden – samt der darin enthaltenen Energie.

Zudem kann der Energieträger per LOHC auf einfache Weise und über beliebig weite Entfernungen transportiert werden. Dafür lassen sich alle Transportmittel nutzen, die auch für flüssige Kraftstoffe wie Benzin, Diesel oder Heizöl verwendet werden: etwa Kessel, Tankwagen, Tankschiffe oder Pipelines.

Auf diese Weise lässt sich beispielsweise elektrischer Strom, der in einem Windpark oder einem Solarkraftwerk in einer dünn besiedelten Region gewonnen wurde, zunächst in Wasserstoff verwandeln – und dann mit dem organischen Öl dorthin bringen, wo er gebraucht wird: zu den Verbrauchern in Städten und Ballungsräumen. Wasserstoff, der

als Kraftstoff für Autos, Schiffe, Züge oder Flugzeuge dienen soll, kann – chemisch gebunden – von einer Produktionsstätte zu Tankstellen befördert und verteilt werden.

Am Zielort angekommen, lässt sich der Wasserstoff dann durch die umgekehrte chemische Reaktion wie beim Einlagern wieder aus dem ölartigen Trägermaterial entnehmen. Dieses bleibt dabei weitgehend unverändert und kann erneut zum Speichern von Wasserstoff dienen. Mehrere Tausend Be- und Entladungszyklen sind nach Angaben der Forscher möglich, bevor die Trägerflüssigkeit aufbereitet werden muss. Wegen der Ähnlichkeit dieses Kreislaufs mit dem Befüllen und Entleeren von Pfandflaschen im Getränkehandel sprechen die Forscher bei dem LOHC-Konzept auch von einer „flüssigen Pfandflasche“.

### Ein Wärmeträger aus der Industrie

Wissenschaftler am Forschungszentrum Jülich und an der Universität Erlangen-Nürnberg haben dieses pfiffige Speicherkonzept bis zur Anwendungsreife entwickelt. Der Kern ihrer Innovation lag dabei vor allem darin, eine geeignete und einfach zu handhabende Substanz für die Nutzung als flüssige Pfandflasche aufzuspüren. Die Forscher fanden diese in Dibenzyltoluol – einem Stoff, der in der chemischen Industrie bereits seit Langem verwendet wird und unter anderem als Wärmeträger dient. Die orga-

---

Durch eine chemische Reaktion an einem Katalysator lässt sich Wasserstoff in eine ölige Trägersubstanz einbinden (links). Diese wird im englischen Fachjargon Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) genannt. Statt in Druckflaschen (Mitte) kann er dann in einer „flüssigen Pfandflasche“ aufbewahrt und transportiert werden (rechts). Als ideale Substanz dafür haben die Forscher Dibenzyltoluol ausgemacht.

---







Wolfgang Arlt, Peter Wasserscheid und Daniel Teichmann (von links) waren 2018 für den Deutschen Zukunftspreis nominiert.

nische Verbindung aus der chemischen Gruppe der aromatischen Kohlenwasserstoffe ist ungiftig und zeichnet sich durch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Wärme oder Licht aus.

Im Gegensatz zu vielen anderen Chemikalien gilt Dibenzyltoluol nicht als Gefahrstoff, und der Umgang damit ist vielen Anwendern aus der Chemiebranche vertraut. Gewinnen lässt sich die Verbindung aus Toluol, das vergleichbare Eigenschaften hat wie Benzin.

Die Teams um Wolfgang Arlt und Peter Wasserscheid schufen die Grundlagen für das LOHC-Konzept. Arlt ist inzwischen emeritierter Lehrstuhlinhaber für Thermische Verfahrenstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg und Gründungsdirektor des Energie-Campus Nürnberg, Wasserscheid ist Inhaber des Lehrstuhls für Chemische Reaktionstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg und Direktor am Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg für Erneuerbare Energien – einer Außenstelle des Forschungszentrums Jülich. Die Wissenschaftler entwickelten unter anderem chemische Katalysatoren, die die Reaktionen beim Be- oder Entladen des

Trägeröls ermöglichen. Und sie demonstrierten, dass sich die Technologie auch im industriellen Maßstab umsetzen lässt.

Gemeinsam mit dem Ingenieur Daniel Teichmann gründeten Arlt und Wasserscheid 2013 in Erlangen das Unternehmen Hydrogenious Technologies, das Systeme auf Basis der LOHC-Technologie vermarktet. 2018 nominierte die Jury des Deutschen Zukunftspreises die drei Forscher für den Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation.

### Kontinuierliche Weiterentwicklung

Seither haben die Forscher das Konzept kontinuierlich weiterentwickelt. Dabei geht es unter anderem darum, die technischen Apparaturen kompakter und leichter zu machen sowie die chemischen Verfahren zu optimieren. Dadurch soll die Technik auch mobil nutzbar werden, zum Beispiel in wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen oder Zügen. Dort muss sichergestellt sein, dass stets genügend Wasserstoff verfügbar ist – auch beim Anfahren oder an Steigungen. Noch 2022 wollen die Teams in Erlangen und Nürnberg zur Demonstration einen Nahverkehrszug mit Brennstoffzellen-Antrieb und einem Tank auf Basis der LOHC-Technologie ausrüsten. Zudem feilen die Forscher an einer Technik, um Brennstoffzellen direkt mit Trägerflüssigkeit betreiben zu können.

Das Ziel der Wissenschaftler ist es, die flüssige Pfandflasche als Speichermedium für Wasserstoff zu etablieren. Dabei soll unter anderem eine strategische Partnerschaft beitragen, die Hydrogenious Technologies 2021 mit dem Mannheimer Industriedienstleister Bilfinger geschlossen hat. Die beiden Unternehmen wollen gemeinsam Wasserstoff in großem Maßstab in Europa verfügbar machen – und dazu eine Infrastruktur für den Transport aufbauen.

### Riesiges Depot im Rheinland geplant

So plant Bilfinger, bis 2024 im Chemiepark Dormagen unweit der nordrhein-westfälischen Hauptstadt Düsseldorf einen riesigen Speicher für Wasserstoff zu bauen, der in einem flüssigen organischen Trägermaterial gebunden ist. Der Speicher soll Platz bieten für 1800 Tonnen Wasserstoff – und wird nach Angaben von Hydrogenious Technologies die weltweit größte Anlage dieser Art sein.

Profitieren könnte von solchen Depots für Wasserstoff in Öl unter anderem eine künftige, klimaneutrale Luftfahrt. Die Vision: Flugzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb, wie sie derzeit unter anderem mit Beteiligung von Forschern am DLR entwickelt werden, müssten dann beim Zwischenstopp auf einem Flughafen keinen Treibstoff mehr auftanken. Es würde genügen, leere Flüssig-Pfandflaschen zurückzugeben und durch volle zu ersetzen. ■





## Ein Denkspiel wie ein Kunstwerk!

Kunst trifft Logik: Der Niederländer Piet Mondrian gilt als der Vorreiter der geometrischen Kunst. Und genau mit seinen Formen können Sie jetzt spielen – wichtig: Sie dürfen nie den Rahmen sprengen. Auf den Karten finden Sie 88 Puzzle-Aufgaben von Anfänger bis Experte (sehr knifflig). Legen Sie die auf der Karte gezeigten, schwarzen Vorgabe-Formen auf das Spielfeld. Jetzt geht es ans Ausfüllen der Quadratform mit den restlichen Puzzleteilen – wie bei Tetris oder Lego müssen Sie die Formen jetzt passend kombinieren. Am Ende soll ein immer neues komplett harmonisches Kunstwerk im Quadrat entstehen. Um es noch schwieriger zu machen, können Sie auch auf Zeit spielen. Legemuster kann man sich dabei kaum merken – jede Spielrunde ist eine neue Herausforderung!

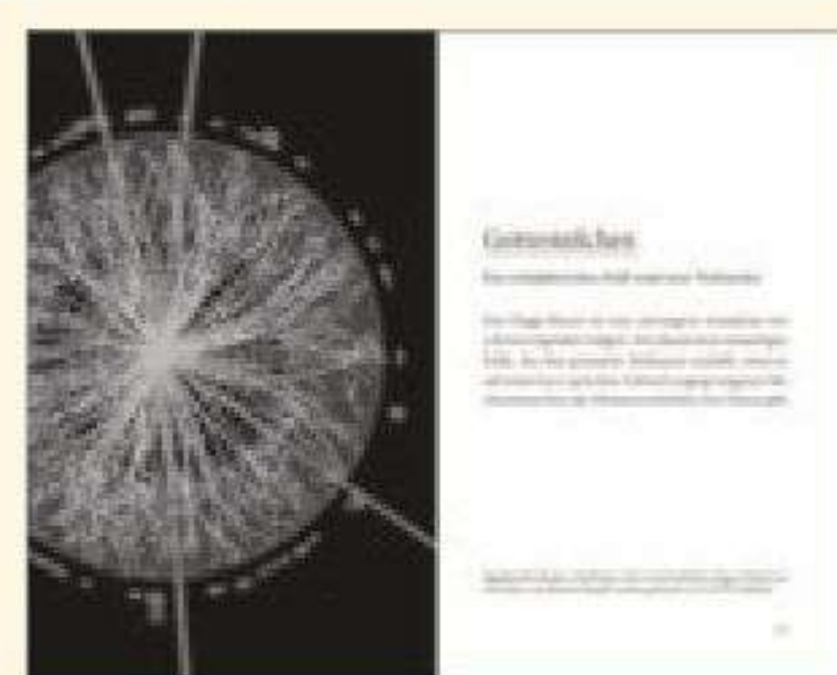
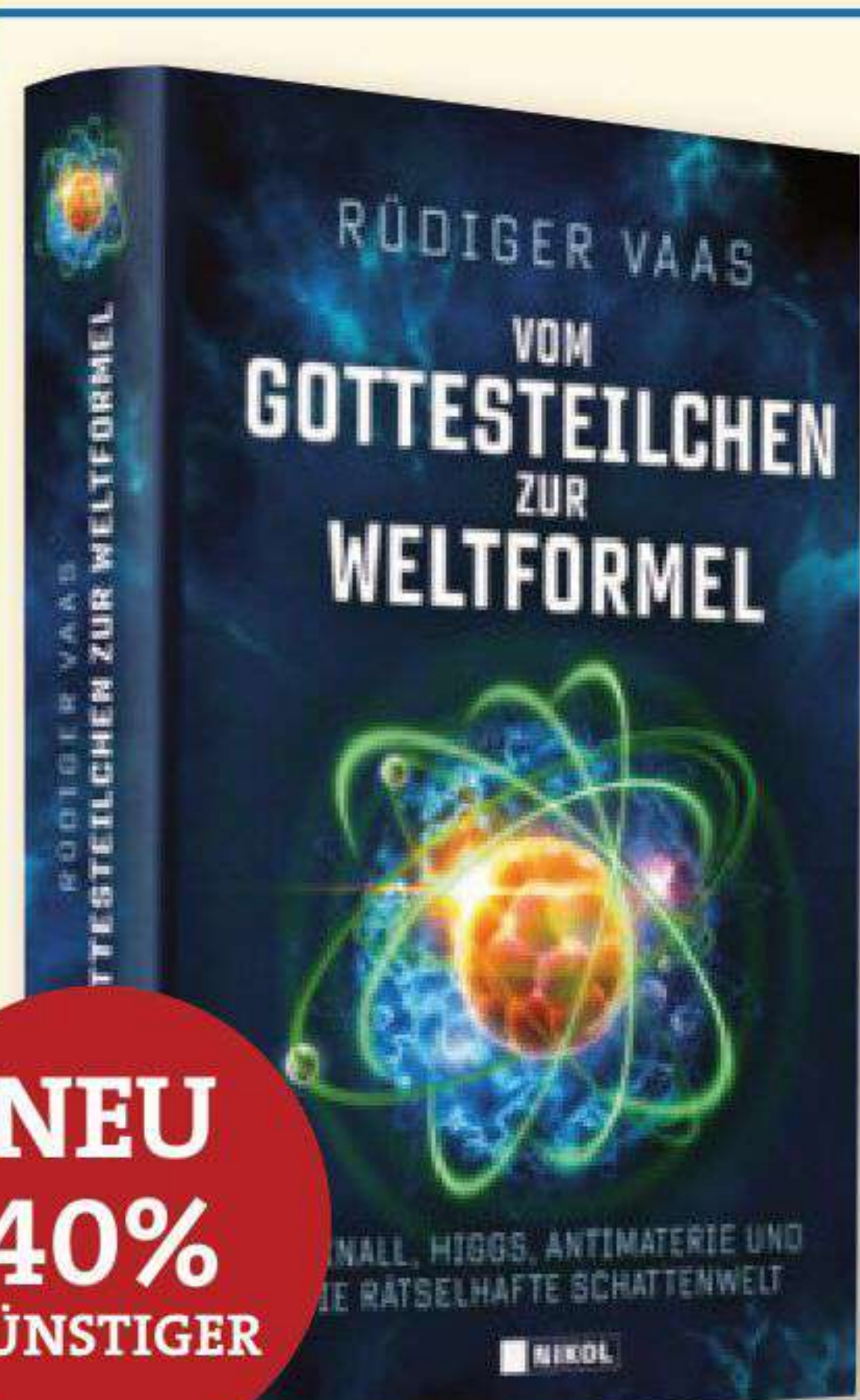
**Vielfach preisgekrönt:** 1. Preis der legendären Yoshigahara Puzzle Design Competition 2019. Mom's Choice Gold Award 2020, Parent's Choice Gold Award 2020. Publikums-Preis der MuseumsShops 2020.

### Mondrian Blocks. BDW Edition 2021.

Ab 8 Jahre. 14 x 15,3 x 3 cm. 11 Puzzle-Formen aus Kunststoff.

Best.Nr. 805 230

**Exklusiv bei uns nur € 19,99**



## Urknall und die rätselhafte Schattenwelt!

Als wir unseren Astronomie-Redakteur Rüdiger Vaas gefragt haben, ob wir dieses Buch neu auflegen sollen, hat er geantwortet: „Das ist mein bestes Buch!“ Hier ist es also: Was ist nach dem Urknall geschehen?

Wie sind die Bausteine des Universums entstanden? Woraus besteht die Welt – und warum gibt es sie überhaupt? Forscher fahnden nach Antiteilchen aus dem All und dem Schattenreich der Dunklen Materie. Rüdiger Vaas spannt einen glasklaren Bogen vom Aller kleinsten zum Allergrößten. Eine einzigartige Exkursion vom Urknall zu anderen Universen und ins Innerste der Materie.

**Inhalt:** Mikrokosmos – Bausteine der Materie. Gottesteilchen – eine verwegene Annahme mit schwerwiegenden Folgen. Antimaterie – die Erforschung der verschwundenen Gegenwelt. Dunkle Materie – der unsichtbare Dirigent. Symmetrie – ein Code der Natur. Weltformel – auf der Suche nach einer „Theorie von Allem“. „Die derzeit beste deutschsprachige Einführung in die Teilchenphysik.“ (Deutschlandradio)

### Rüdiger Vaas: Vom Gottesteilchen zur Weltformel.

2021. 512 Seiten mit Abb., gebunden

statt Original € 24,99

Best. Nr. 805 297

**Sonderausgabe € 14,95**



## Insektenstiche? Jucken Sie nicht mehr!

Der neue Stichheiler der BEURER Ingenieure aus Ulm – er nutzt einfach nur zielgerichtete Wärme bei Stichen und Bissen von Mücken, Wespen, Bienen, Ameisen, Hornissen oder Bremsen, sowie bei unangenehmen Schmerzen durch Brennnesseln oder Quallen. Und so einfach funktioniert er: Ob im Garten, auf Reisen, im Freibad, auf dem Spielplatz oder beim Wandern – platzieren Sie den Stichheiler am besten gleich nach dem Stich mit der Keramik-Kontaktfläche direkt auf dem Einstich. Taste drücken. Es wird eine Temperatur von ca. 50°C erreicht – kurz halten – fertig! Die sogenannte Hyperthermie ist vergleichbar mit einem zielgenauen Sekunden-Fieber. Die Wirkung des Giftes und damit Juckreiz, Schwellung und Schmerz können so hocheffektiv bekämpft werden!

### BEURER BR 60 Stichheiler. German Engineering.

Zur Eigenanwendung. Maße: 9,8 x 3,5 x 1,9 cm. Betrieb: 2 x 1,5V AAA Batterien (enthalten). Zwei Programme: 3Sek Kinder / 6Sek Erwachsene.

Best.Nr. 804 941

**nur € 29,99**



MADE IN GERMANY

## Carl von Linné: Die innere Uhr der Natur!

Exakte Sonnenuhren sind faszinierend. Doch die neue Hora Floris des Ingenieurs und Designers Dr. Carlo Heller kann noch mehr. Sie zeigt ein besonders schönes Stück Wissenschaftsgeschichte: Die Blumenuhr des schwedischen Biologen Carl von Linné. Er fand heraus, dass bestimmte Pflanzen nur zu ganz bestimmten Tageszeiten ihre Blüten öffnen und immer zur gleichen Zeit wieder schließen. Seine Erkenntnisse setzte er in einer echten, gepflanzten Blumenuhr um. Wenn ihn jemand nach der Uhrzeit fragte, genügte Linné ein Blick aus dem Fenster seines Arbeitszimmers auf seine Blumenuhr, um die Uhr bis auf 5 Minuten genau abzulesen! Über die innere Uhr der Natur lässt sich beim Anblick der in einer Porzellanmanufaktur in Thüringen hergestellten Sonnenuhr trefflich sinnieren, während der Schattenzeiger über das wunderschöne Ziffernblatt wandert.

„Der promovierte Ingenieur Carlo Heller schlägt aus dem an sich einfachen Konzept von Sonne und Schatten immer wieder neue Funken, die er in ebenso solide wie exakte, aber auch sehr ästhetische Zeitmesser umsetzt.“ (FAZ)

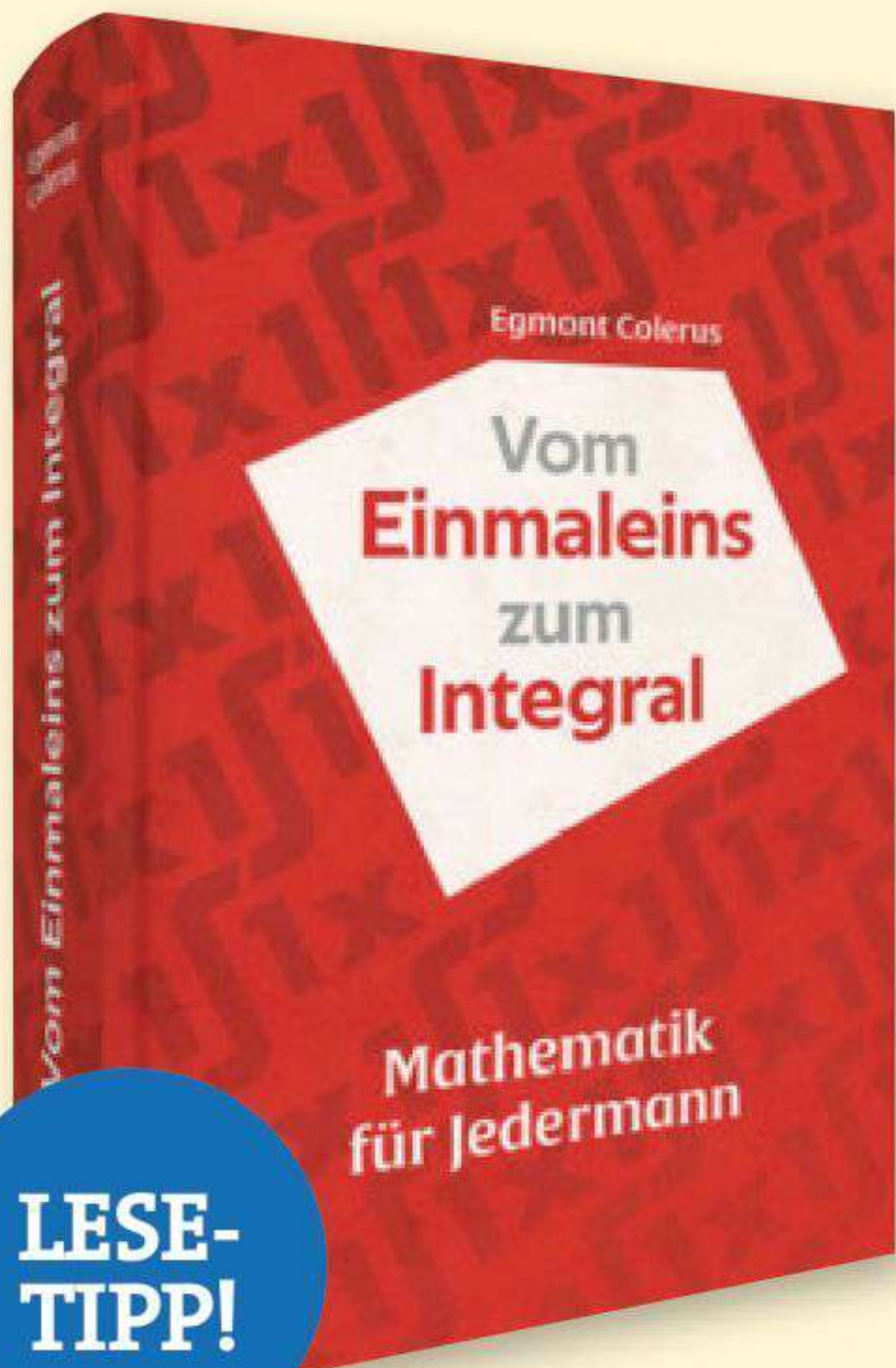
### Hora Floris Sonnenuhr. Blumenuhr-Dekor.

Ø 15,5 cm. Glanzglasur. Porzellan u. Edelstahl. Mit kleinem Kompass zum Einordnen. Anzeige der wahren Sonnenzeit. Für den Außenbereich geeignet.

Best.Nr. 804 601

**€ 64,90**





## Mathematik für Jedermann!

„Wer mit nur einem Buch ein Grundverständnis der Mathematik gewinnen will, dem sei dieses Werk empfohlen.“  
(Thomas Kerstan, DIE ZEIT)

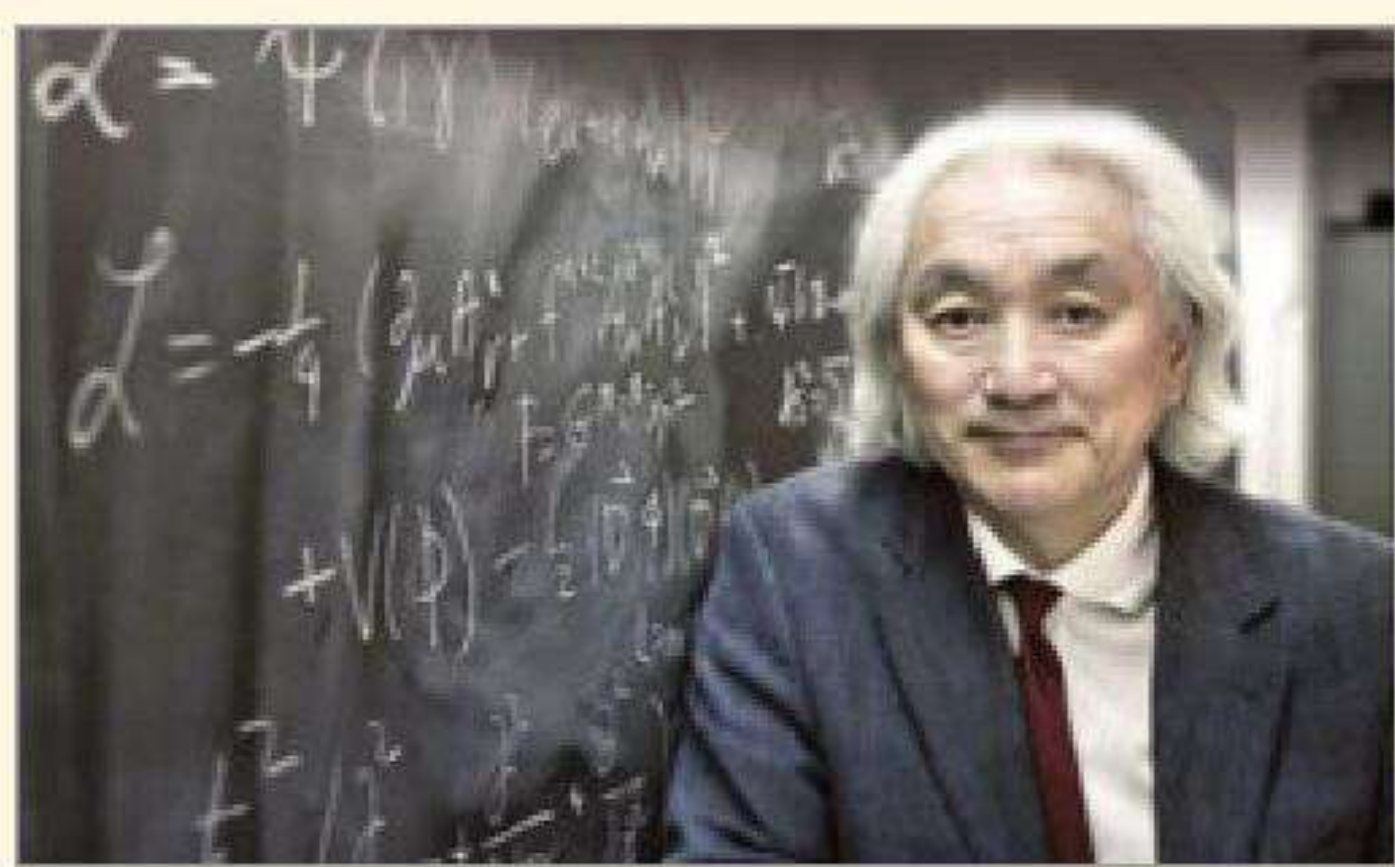
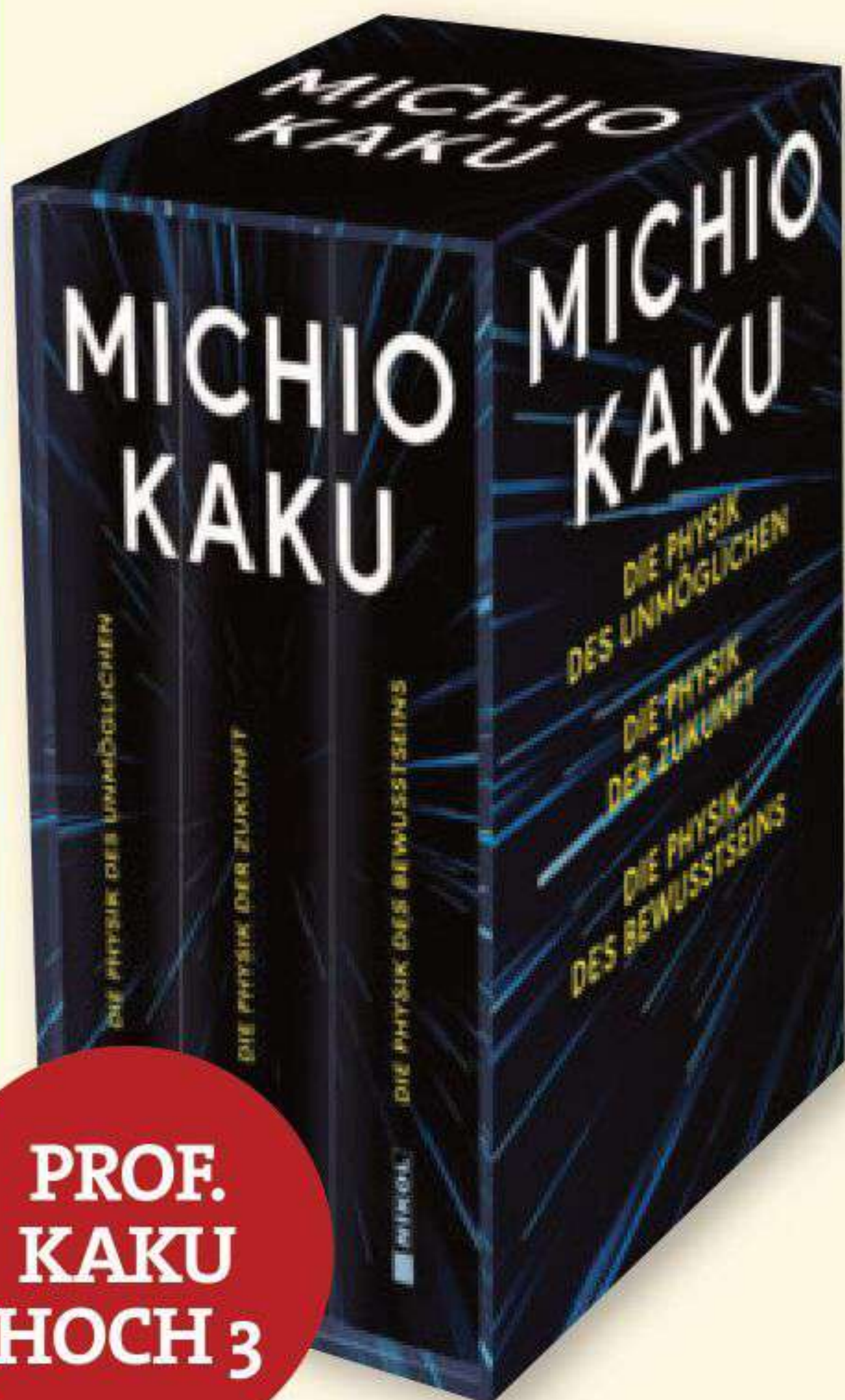
Es ist erstaunlich, aber eine der hellendsten Einführungen in die Mathematik stammt aus dem Jahre 1934 von Egmont Colerus. Geschrieben also von einem Juristen und Schriftsteller, der durch seine Arbeit im statistischen Bundesamt in Wien einen so klaren Blick auf die Mathematik entwickelt hat, dass er die Leserin, den Leser ohne Vorkenntnisse bis auf die Gipfel der höheren Mathematik führen kann. Erstaunlich modern wirkt das Buch dort, wo es – lange bevor es Computer gab – ausführlich ein mathematisches Konzept beschreibt, das heute allgegenwärtig ist: den Algorithmus. Dieser liebevoll gestaltete Reprint der Originalausgabe macht eines der spannendsten Mathematikbücher des 20. Jahrhunderts wieder verfügbar.

**Egmont Colerus: Vom Einmaleins zum Integral. Mathematik für Jedermann.**

2022. Reprint. 368 Seiten mit Illustrationen, gebunden

Best.Nr. 805 472

**Exklusiv bei uns € 14,95**



## Können wir durch die Wand gehen?

Erstmals alle 3 großen Kaku-Bestseller in einem Geschenk-Schuber: Werden wir eines Tages durch Wände gehen? Raumschiffe bauen, die schneller sind als das Licht? Wie sieht die Zukunft der Physik und der Technik aus, wie wird sich unser Bewusstsein verändern?

Prof. Michio Kaku ist einer der bedeutendsten lebenden Physiker. Er hat Forscher aus aller Welt befragt: Medizinische Nanobots werden aufmerksam durch unsere Blut- und Nervenbahnen eilen und sogar Krebs heilen. Informationen können direkt über die Retina ins Kleinhirn projiziert werden. Science-Fiction? Nein, seriöse Zukunftsforschung! Mit Hilfe komplexer Maschinen werden wir Gedanken direkt aufzeichnen können, von Bewusstsein zu Bewusstsein kommunizieren. Michio Kaku ist einer der Väter der Stringtheorie. Er lehrt als Professor für theoretische Physik in New York.

„Kaku erklärt ganz nebenbei die Geheimnisse der Physik von der Quantentheorie bis zu den Superstrings.“ (FAZ)

„Eingängig, unterhaltend, inspirierend.“ (New Scientist)

**Prof. Michio Kaku: Die Physik des Unmöglichen. Die Physik der Zukunft. Die Physik des Bewusstseins.**

2021. 3 Bände im Schuber. Zus. 1.584 Seiten, geb. statt vorher € 74,80

Best.Nr. 805 220 **Sonderausgabe im Schuber € 29,95**

**€ 360,- GÜNSTIGER**



## Bilder einer Aufbruchstimmung!

Schluss mit dem Krisen-Gerede! Den Geist dieser Bilder könnten wir heute wieder gut gebrauchen – ein Gefühl, dass mit genügend Trotz, Willen und Fleiß sogar aus Ruinen etwas entstehen kann! Gerade einmal acht Jahre nach der Kapitulation begann der Fotograf Josef Heinrich Darchinger mit seiner fotografischen Reise durch den Westen des geteilten Deutschland. Darchingers Bilder werfen einen einmaligen Blick auf ein Land im Wiederaufbaufieber. Eine „wunderbare“ Geschenk-Idee für alle, die diese Zeit erlebt haben oder diese Aufbruchstimmung spüren wollen! Die signierte und limitierte Originalausgabe kostete € 400,- und war schon bei Erscheinen ausverkauft. Die unschlagbar günstige Jubiläumsausgabe (gleicher Inhalt, etwas „kleiner“ 30 x 30 cm!) – ist zwar nicht signiert – kostet dafür aber auch nur € 40,- und alle Fotos wurden digital überarbeitet und erstrahlen jetzt in neuem Glanz!

„Darchinger, hat ein Kritiker gesagt, kann mit den Augen denken. Die in Wirtschaftswunder versammelten Fotos zeigen, dass er mit ihnen auch fühlen und sprechen kann.“ (SPIEGEL)

**Josef Heinrich Darchinger: Wirtschaftswunder.**

2021. Sonderausgabe: Format 30 x 30 cm. 292 Seiten, Bildband, gebunden

Best.Nr. 805 407

**Jubiläumsausgabe € 40,-**



**NEU 47% SPAREN**

## Mit Einstein im Fahrstuhl!

Der Doppelband mit mehr als 60 Experimenten und Tüftelfragen: 1. Wer sich mit Einstein in einen Fahrstuhl begibt, lernt nicht nur den berühmtesten Physiker aller Zeiten kennen,

sondern erlebt auch ungeahnte Abenteuer: Angenommen, das Seil des Fahrstuhls reißt. Dann zeigt eine Waage, auf der beide vielleicht stehen, nichts mehr an! Können sie dann überhaupt wissen, dass sie wirklich nach unten fallen und nicht etwa schwerelos im All schweben? 2. Vor über 400 Jahren richtete Galileo Galilei sein Fernrohr auf den Himmel: Prof. Jürgen Teichmann erzählt von den spektakulärsten Entdeckungen, von Pulsaren, Quasaren, gefährlichen Schwarzen Löchern, Galaxien, Roten Riesen, dem Echo des Urknalls und warum die Farbe eines Sternes vielleicht seine Geschwindigkeit verraten kann. So bunt und aufregend ist Wissenschaft – mit wunderschönen Illustrationen! Jürgen Teichmann ist Professor an der LMU und hat mehr als 30 Jahre den Bereich „Bildung und Fortbildung“ im Deutschen Museum betreut.

„Auf diese Weise serviert, macht Physik jede Menge Spaß!“ (SZ)

Prof. Jürgen Teichmann:

**Die überaus fantastische Reise mit Einstein und Galilei.**

2022. Ab 10. 288 Seiten in Farbe, gebunden statt Original € 31,20

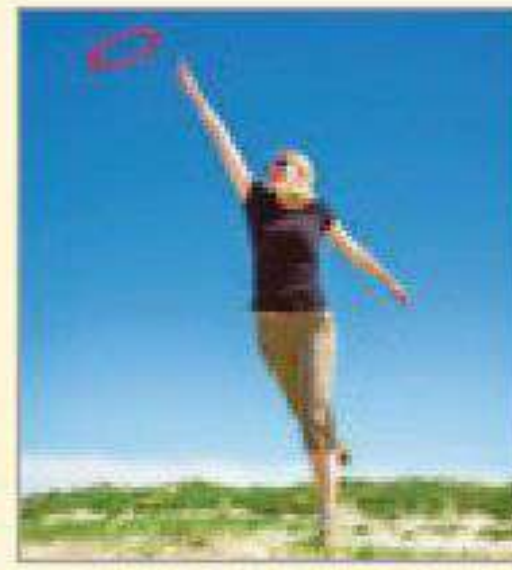
Best.Nr. 805 410 **Sonderausgabe komplett € 16,95**



# Frühlingsgefühle



**WELT-REKORD-DISTANZ 406 METER**



## Er fliegt und fliegt und fliegt...

Dieser schlichtweg geniale Wurfring ist der am weitesten geflogene Gegenstand, der jemals von Menschenhand geradeaus geworfen wurde. Der Eintrag ins Guinness Buch der Rekorde lautet: unglaubliche 406 Meter! Der Grund für die ruhigen, präzisen Weitflüge ist ein wissenschaftlich berechnetes Flugprofil. Erfunden und entwickelt wurde es vom amerikanischen Ingenieur und Stanford-Dozenten Alan Adler. Der patentierte Flugring ist wie eine Tragfläche geformt – deshalb liegt er perfekt in der Luft. Für die notwendige Stabilität sorgt ein harter Kern aus Polycarbonat, für das angenehme und sichere Fangen ein weicher Mantel aus griffigem Gummi. Aber Vorsicht: selbst Anfänger können den Wurfring schnell auf eine Weite von über 100m werfen. Aber auch für kurze Distanzen im Garten geeignet: Der gleichmäßige Flug und der weiche Ring sorgen dafür, dass auch Kinder und ältere Menschen riesigen Spaß an der Bewegung haben. Und wenn dann doch mal ein Ring in Nachbars Baum landet, haben Sie mit unserem 2er-Set immer einen Ersatzring zur Hand. „Jeder kann den Aerobie unglaublich weit und präzise werfen – ein Riesenspaß!“ (S. Zimmermann, Frisbee-Weltmeister)

**Aerobie Wurfring Pro. 2er Set. Made in USA.**

Ø 33 cm. Ab 10 Jahre. Für weiche Untergründe. Farbe leider nicht wählbar. 2 Wurfringe enthalten.

Best.Nr. 803 386

**2er Set nur € 29,95**



## Und sie bewegen sich doch: das himmlische Wind-Rad!

Verzaubern Sie Ihren Garten, den Balkon oder die Terrasse mit diesem neuen Windrad-Mobile bestehend aus Sonne, Mond, Erde und einem kleinen Kometen. Das Windspiel vom Marktführer Invento HQ ist extrem robust und hochwertig verarbeitet. Zur sicheren Montage wird ein Bodenanker mitgeliefert. Magic Wheel besteht aus zwei sogenannten Chinarädern, die sich aufgrund der Bespannung gegenläufig drehen. Schon im Ruhezustand sehen die Farben und Formen sehr dekorativ aus – doch schon ein wenig Wind genügt, und das Schauspiel beginnt. Bei zunehmender Geschwindigkeit der leichtläufigen Räder vermischen sich die Farben und erzeugen einen wunderschönen Blickfang, die Erde beginnt zusätzlich um die Sonne zu kreisen. Das wunderbare Windspiel der Erdumlaufbahn richtet sich mit einem Sichelmond als Windrichtungsanzeiger perfekt nach dem Wind aus und macht von allen Seiten eine gute Figur. Bestellen Sie jetzt einen absoluten Hingucker für Ihren Garten!

**Magic Wheel Kopernikus – HQ Windspiel.**

Stabile Nylonbespannung. Ø 71 cm. H 128 cm.

Best.Nr. 804 525

**Exklusiv bei uns € 24,95**



**MADE IN GERMANY**



## Schwereloses Spiel mit der Balance!

In der beliebten Fernsehshow „Klein gegen Groß“ hat ein Kind mit dem Moonhopper in einer Minute 100 Sprünge mehr geschafft als ein Erwachsener. Was ist der Moonhopper? Es ist ein springender Kreisel – made in Germany – aus hochwertigem Ruton, mit einer extrem stabilen Platte. Das Material Ruton ist geruchsneutral und belastbar bis 110 kg! Was bewirkt das Training? Der Moonhopper schult Koordination, Gleichgewicht und Stabilität. Nicht nur im Alltag sondern auch beim Sporttraining sorgt der Moonhopper für schnelle Verbesserung der Körperspannung. Einerseits können Sie einfache Gleichgewichtsübungen im Stand üben. Darüber hinaus kann der Kreisel aber auch für unterschiedlichste Sprungübungen verwendet werden. Ermöglicht werden Ihre Luftsprünge durch einen 2/3 Luftball, der für die nötige Federung sorgt. Egal ob Draußen oder Drinnen: der Moonhopper bietet schwerlosen Spaß an der Bewegung – also, weg vom Smartphone, rauf auf den Moonhopper!

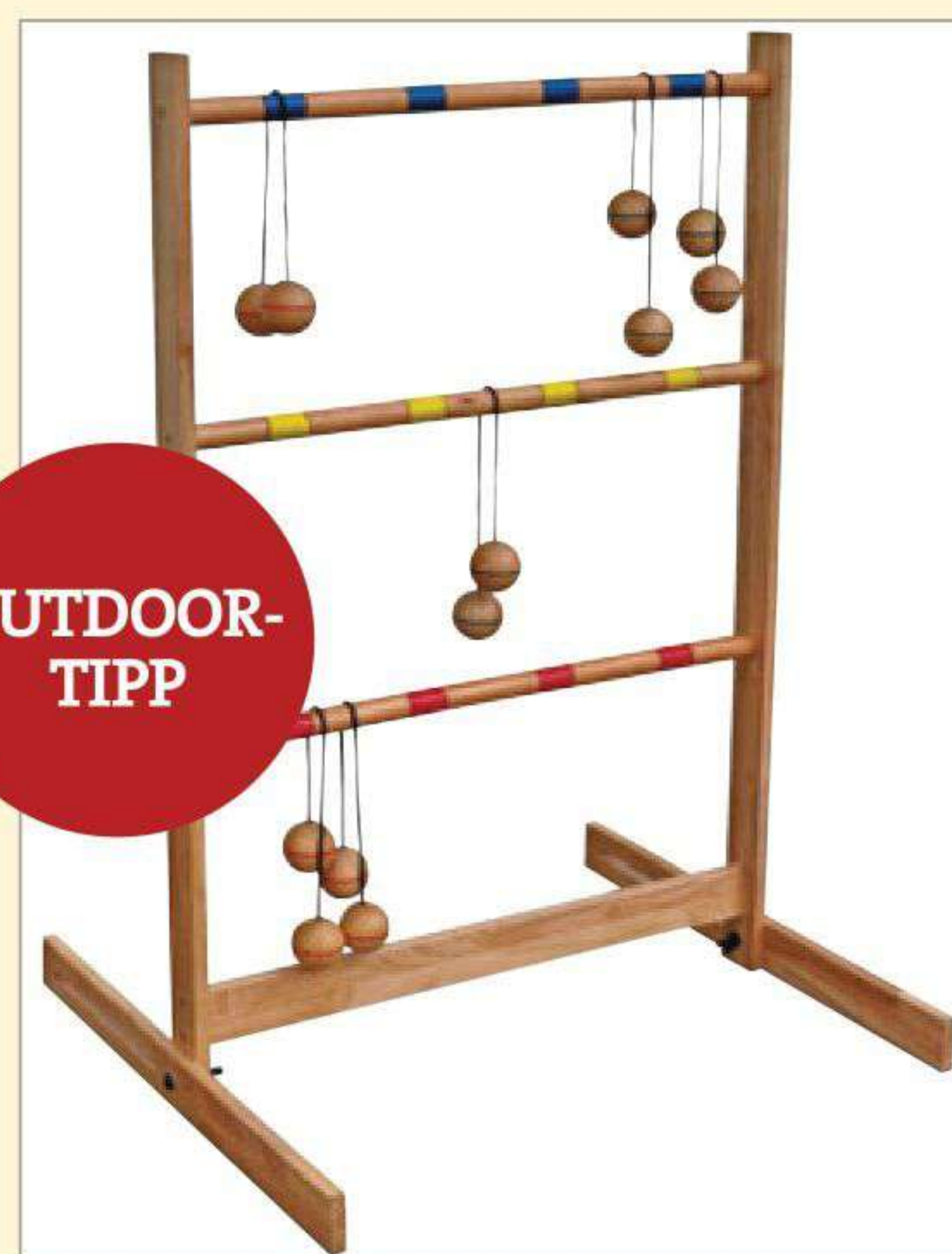
**Gut zu wissen:** 100% made in Germany, höchste Qualitäts- und Umweltsprüche, kein Latex, keine Schwermetalle. Zu 100% aus recyclingfähigen Materialien.

**Moonhopper Sport. Sprung- und Balancebrett.**

Farbe blau/schwarz. Maße: 40 x 30 cm. Gewicht: 1,3 kg. Belastung bis 110 kg.

Best. Nr. 805 102

**€ 45,-**



**OUTDOOR-TIPP**



## Sprosse für Sprosse zum perfekten Wurf!

Vorsicht, dieses Spiel macht süchtig! Denn es ist ein tolles Gefühl, wenn die Bolas durch die Luft wirbeln und sich am Ende um die Zielstange wickeln. Bolas nennt man die Wurfobjekte, die aus ca. 5m Entfernung auf die Leiter geworfen werden. Sie bestehen aus zwei Kugeln, die mit einer Schnur verbunden sind. Das auf der ganzen Welt beliebte Spiel wird in Deutschland auch Leitertopf genannt. Die 2 Spieler oder Mannschaften werfen abwechselnd ihre 3 Bolas. Die Punktezahl hängt davon ab, auf welcher Leitersprosse Ihre Bola hängen bleibt. Die oberste Sprosse zählt 3 Punkte, die mittlere 2 Punkte und die unterste Sprosse 1 Punkt. Einen Bonuspunkt erhalten Sie, wenn sämtliche Bälle auf der gleichen Sprosse landen oder wenn die drei Bälle während einer Runde auf drei verschiedenen Leitersprossen landen. Wer zuerst punktgenau 21 Punkte erzielt hat, hat gewonnen. Wir liefern Ihnen eine sehr hochwertige Version aus hartem Plantagenholz. Die Bola-Sets können selbstverständlich erweitert und nachbestellt werden.

**Leitertopf deluxe. Wurfspiel.**

Holzgestell: 88,5 x 60 x 57cm. 2 kg. 2 Satz Bälle (3 x blau, 3 x rot) Ø 4,6 cm

Seil: 30 cm, Anleitung, Leinenbeutel.

Best.Nr. 803 498

**€ 49,95**





## Sonnenlicht im Einmachglas!

Nachhaltige High-Tech verpackt in einem nostalgischen Einmachglas. Mehrfach ausgezeichnet. Das ist das Sonnenglas. Die Idee ist von Anfang an mit den Menschen verbunden, die es von Hand herstellen. Das Prinzip ist genial einfach: es speichert am Tag Energie, die es nachts in Form von Licht wieder abgibt. Robust, stabil und wasserdicht: Die solarbetriebenen LEDs erzeugen ein wunderschönes Licht, das sogar so hell ist, dass Sie dabei lesen können. Das Sonnenglas ist aber auch eine romantische Dekoration für innen und außen. Gestalten Sie eine beleuchtete „Vitrine“ für alle Jahreszeiten: mit Früchten, Tannengrün, Sand, Blumen, Muscheln, Herbstlaub, Steinen, Fotos... Eine nachhaltige Geschenkidee!

**Neu:** Lithium-Polymer-Akku. Schnellladefunktion zusätzlich über Micro-USB-Anschluss. Wasserdicht nach IP67. Leuchtdauer bis 24 Std.! Tag/Nacht-Automatik durch Helligkeitssensor.

**Sonnenglas™. Fair-Trade handmade in South Africa.**

100% Recyclingglas. 30 Lumen. Ein-/Aus Bügelschalter. 680 g. 12 x 12 x 18 cm.

Best.Nr. 804 605

€ 38,-



**MULTI-MEDIA AM HANDGELENK!**

## SmartWatch SW4 – die kluge Uhr!

Die neue SW4 sieht aus wie ein eleganter Luxus-Chronometer. Machen Sie Ihr Handgelenk zur Schaltzentrale mit modernster Touchtechnologie! Die SW4 misst Ihren Blutdruck, die Herzfrequenz, zählt Schritte, Ihren Kalorienverbrauch und überwacht Ihren Schlaf! Über Bluetooth 5.1 verbinden Sie die Uhr ganz einfach mit Ihrem Smartphone (dringend erforderlich) – egal ob iOS/iPhone oder Android. Mit der kostenlosen App können Sie die Uhr einstellen und die Daten perfekt auswerten! **Neu:** ein eigenes Foto als Hintergrundbild wählen. Ein integriertes Mikrofon und Lautsprecher ermöglichen das Telefonieren direkt am Handgelenk, während Ihr Handy in der Tasche bleibt. Sie können bis zu 20 Lieblingslieder direkt auf der Uhr speichern. Sie erhalten auf Wunsch Push-Nachrichten, wenn sich bei LinkedIn, Twitter, WhatsApp, Facebook & Co. etwas tut. **Außerdem:** mit 2 Armbändern – helles Leder für Ihren Business-Auftritt, Silikon für Sport. Bluetooth-fähige Kopfhörer können direkt mit der Uhr verbunden werden. 10 Sportprogramme, individuelle Ziele. Herzfrequenzalarm. Fernauslöser für Handykamera. 40 Ziffernblatt-Designs. Telefon suchen, Stoppuhr, Countdown...

SmartWatch tonArt SW4.

Best. Nr. 805 315

statt UVP € 179,-

Sparpreis nur € 149,-



## Das Lichtkraftwerk: 1.000 Lumen hell!

Der Taschenscheinwerfer P7 der Lichtpioniere von LED LENSER hat weltweit Millionen Anwender begeistert. Die neue P7R core ist fast dreimal heller und auf vielfachen Wunsch wieder aufladbar! Eines bleibt beim Alten: Die Lampen sind technologisches Dynamit.

Die Lichtleistung ist mit sensationellen 1.000 Lumen (im Boost Modus sogar 1.400) schlicht unglaublich für eine Lampe dieser Größe. Ihr Kernstück bildet das Advanced Focus System. Das am OEC Institut von Prof. Dr. Harald Ries entwickelte Linsensystem wurde weiter verfeinert. Die patentierte Reflektorlinse ermöglicht Ihnen den stufenlosen Übergang von einer breiten, hellen Licht-Kathedrale bis zu scharf fokussiertem, über 200 Meter (!) reichendem Fernlicht. Sparen Sie Geld und schonen die Umwelt: Nie wieder Batterien kaufen. Der neue Li-Ion-Akku kann bis zu 1.000 Mal aufgeladen werden und ist austauschbar. Mit dem extremen Schutz gegen Wasser und Staub übersteht die P7R Core jetzt sogar dauerhaftes Untertauchen. Eine „helle Lösung“ für anspruchsvolle Profi-Anwender!

**LED Lenser P7R core. BDW Edition 2021.**

Aufladbare Profi-Taschenlampe. Xtreme LED 202g. L16,5 cm. Gehäuse Aluminium. Goldkontakte. USB-Ladekabel mit Netzstecker.

Best.Nr. 805 200

Neu – exklusiv bei uns € 99,95



## Alle Wetter & gesunde Raumluft!

Nutzen Sie diesen formschönen Klassiker in neuem Gewand! Die FISCHER Feinmechanik Manufaktur aus dem Erzgebirge bietet Ihnen Qualität made in Germany: Hochexakt, pflege- und wartungsfrei! Alles mechanisch – Sie brauchen weder Strom noch giftiges Quecksilber. Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte werden gleichzeitig gemessen: Die Temperatur mit exakter BI-Metalltechnik, die Feuchte mit einem Spiralhygrometer und der Luftdruck mit einem komplexen Aneroid-Messwerk. So haben Sie die Qualität des Raumklimas immer im Blick. Sie erkennen sofort, wann Sie lüften sollten, die Heizung reduzieren oder die Luftfeuchte zu hoch ist. Über die Veränderung des Luftdrucks können Sie außerdem abschätzen, wie sich das Wetter entwickelt. Die feinmechanischen Instrumente sind in ein pulverbeschichtetes Edelstahlgehäuse mit Mineralglas-Abdeckung eingefasst. Ziffernblatt und Instrumenten-Zeiger bestehen aus beschichtetem Aluminium. Ein wunderschöner Blickfang!

**FISCHER Wetterstation. Made in Germany! Ø 16 cm.**

Für den Innen- und geschützten Außenraum. Mit Anleitung.

Best.Nr. 804 897

€ 129,-





## Der kubus w4 – das Soundsystem der Zukunft!

Der neue kubus w4 ist ein Alleskönner! Mehr Sound geht nicht in das klare, minimalistische Design mit edlem Holzgehäuse: Mit viel Power (20 Watt RMS) und dank eines ausgetüftelten Soundsystems genießen Sie einen fein austarierten Klang! Mehr Musikgeräte brauchen Sie nicht: der kubus w4 bietet Ihnen UKW-, glasklares Digitalradio DAB+ und Internetradio mit mehr als 20.000 Sendern und Podcasts aus aller Welt! Ihre CD-Sammlung (auch mp3-CD) hören Sie über den CD-Spieler. Sie haben einen Streaming-Dienst abonniert? Kein Problem: Spotify, Amazon Music oder Deezer können Sie über ihren kubus w4 direkt hören. **Bluetooth-Speaker:** Über USB oder drahtlos über Bluetooth verbinden Sie Ihr Smartphone oder Tablet mit der Anlage. Induktiv-Ladefeld: wenn Ihr Smartphone induktives Aufladen unterstützt, können Sie es einfach auf die Anlage legen und es wird kabellos aufgeladen!

**Außerdem:** Uhrzeit, Weckfunktion, Farbdisplay 2,8" zeigt Cover, Senderlogos, Titelfunktion. Fernbedienung oder Steuerung über kostenlose App.

### tonArt kubus w4 Soundsystem.

390 x 226 x 136 mm. 3.8 kg. Fernbedienung (2 x 1,5V AA nicht enthalten). Netzteil.

Best.Nr. 805 215 Version dunkel Holz Walnuss.

Best.Nr. 805 216 Version weiß Hochglanz. **statt € 449,-**

**Sparpreis jeweils nur € 399,-**

**LAGER-  
RÄUMUNG:  
€ 150,-  
SPAREN**



## Raumluft – einmal frisch gewaschen!

Der neue Beurer LR 500 Luftreiniger bietet Ihnen ein intelligentes 3-Stufen-Filtersystem und eine komfortable App-Steuerung über WLAN! Warnungen vor Aerosolen und Corona begegnen uns täglich, Allergien nehmen stark zu. Atmen Sie jetzt befreit auf und reinigen Sie die Luft in Innenräumen komplett – egal ob im Schlafzimmer, Büro oder Wartezimmer. Der Vorfilter fängt Hausstaub und Tierhaare ab, der Aktivkohlefilter schädliche Gase und Gerüche, der HEPA 13 Filter filtert Bakterien, Viren, Milben, Sporen, Feinstaub und Pollen und sorgt in allen Räumen bis 100m<sup>2</sup> für eine Filterleistung von 99,95%. Ideal für Allergiker! Das zuschaltbare UV-Licht bietet zusätzliche Desinfektion! Der ultramoderne Design-Luftreiniger erkennt mit seinem PM2.5 Sensor sogar Partikelgrößen von bis zu 2,5 µm.

**Außerdem:** Steuerung per „beurer FreshHome“ App auch von unterwegs. Intelligenter Automatikmodus oder individuelle Einstellung mit 4 Stufen. Das Magic LED-Display zeigt Ihnen die Temperatur, Luftfeuchte und Luftqualität. Timer und Nachtmodus (flüsterleiser Betrieb, gedimmtes Display) versorgen Sie auch im Schlaf mit frischer Luft!

### Beurer LR 500 Design Luftreiniger.

Maße: 42 x 28 x 66 cm. 5,4 kg.

Verbrauch nur ca. 65 Watt. Kostenlose APP.

Best.Nr. 805 052

**statt UVP € 449,-  
Sparpreis nur € 299,-  
(wenn weg, dann weg)**

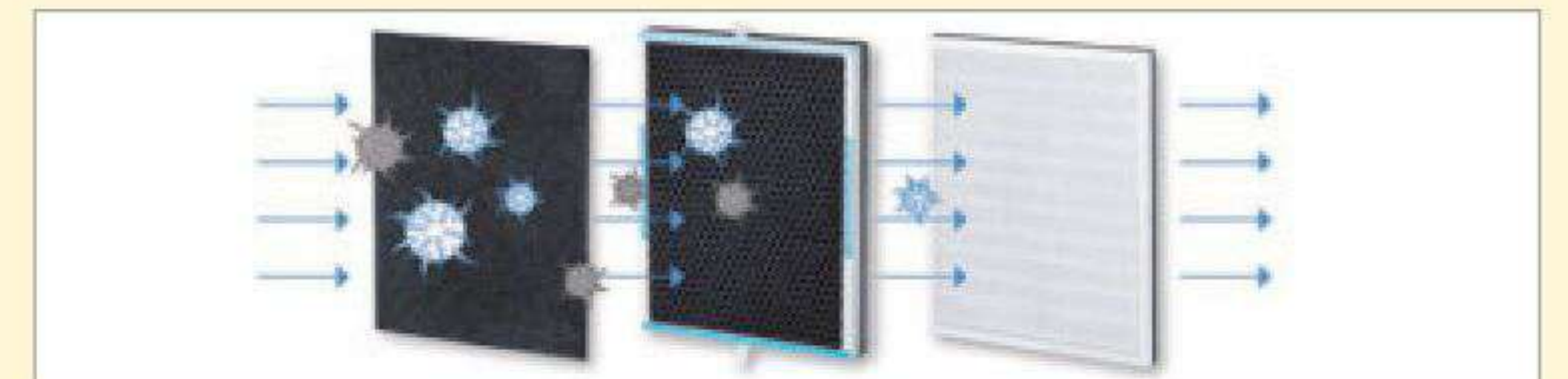


bild der wissenschaft Shop · Postfach 10 03 53 · D-70747 Leinfelden · Telefon +49 (0)711/71924-580 · www.wissenschaft-shop.de

**Schneller geht's per Telefon +49 (0)711/719 24-580 oder Fax +49 (0)711/719 24-444**

**X Ja,** ich bestelle folgende Artikel beim bild der wissenschaft shop

Name, Vorname\*

Straße, Hausnummer\*

PLZ, Ort\*

Telefon (Für Rückfragen)  Fax

e-mail (Für kostenlosen Newsletter, Verwendung jederzeit widerrufbar)

WWSX 32-013

Best.Nr.	St.	<b>TIPP</b>	Preis in €
805 297		<b>Von Gottesteilchen zur Weltformel.</b>	<b>14,95</b>

**Bitte Bestell-Menge angeben**

Standardversand innerhalb Deutschlands für Bestellungen ab 100,- € versandkostenfrei, ansonsten zuzüglich 5,50€. Österreich und Schweiz 8,45€. Lieferung gegen Rechnung. Alle Preise inkl. gesetzlicher deutscher Mehrwertsteuer.

Sie haben das Recht, binnen 20 Tagen ohne Angabe von Gründen diesen Vertrag zu widerrufen. Die Widerrufsfrist beträgt 20 Tage ab dem Tag, an dem Sie die letzte Ware in Besitz genommen haben. Um Ihr Widerrufsrecht auszuüben, müssen Sie uns: Bild der Wissenschaft Shop – Medienservice Konradin GmbH, c/o VAH Jäger GmbH, Straße der Einheit 142–148, 14612 Falkensee, Germany, Telefax 03322 12869-98, E-Mail: [widerruf@wissenschaft-shop.de](mailto:widerruf@wissenschaft-shop.de) mittels einer eindeutigen Erklärung (z.B. Brief, Telefax oder E-Mail) über Ihren Entschluss, diesen Vertrag zu widerrufen, informieren.

**Sie können den Widerruf der Bestellung auch durch die Rücksendung der Waren erklären.** Wir tragen die Kosten der Rücksendung der Waren. Weitere Informationen und Einzelheiten zu Ihrem Widerrufsrecht, insbesondere zur Fristberechnung und zu den Widerrufsfolgen, sowie ein Widerrufsformular finden Sie auf unseren Internetseiten unter: [www.wissenschaft-shop.de/widerrufsrecht](http://www.wissenschaft-shop.de/widerrufsrecht).

**Datenschutzhinweis:** Die als Pflichtfelder (\*) gekennzeichneten Daten benötigen wir für die Durchführung Ihrer Bestellung und werden zu diesem Zweck von uns verarbeitet sowie an weisungsgebundene Dienstleister weitergegeben. Unter [www.wissenschaft-shop.de/datenschutz/](http://www.wissenschaft-shop.de/datenschutz/) informieren wir Sie detailliert über die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten, vor allem über Ihre Widerspruchs-, Auskunfts- und sonstigen Rechte.



# Energie aus dem Sternenfeuer

Seit Jahrzehnten gilt die Kernfusion mit magnetisch eingeschlossenen Plasmen als mögliche Energiequelle der Zukunft – vor allem da der dazu nötige Rohstoff Wasserstoff unbegrenzt verfügbar ist und die Belastung der Umwelt gering wäre. Auch wenn die Realität davon noch ein gutes Stück entfernt ist, geben mehrere spektakuläre Ergebnisse in den letzten Monaten der Hoffnung neuen Aufschwung.

von REINHARD BREUER

**N**ordwestlich der französischen Millionenstadt Marseille, am Fuß der Hügel des Luberon-Nationalparks und durchflossen vom Flüsschen Durance, liegt das für die Provence typische 900-Einwohner-Dorf Saint-Paul-lé-Durance. Im Schatten von Platanen laden vor dem Rathaus einige Tische der benachbarten Bar zum Essen ein. Unweit davon, im Restaurant „Zum singenden Ochsen“, empfehlen Gäste das gute Fleisch oder den Salat Nougaro mit Gänseleber. Kann es sein, dass gerade dort die Baiss für die Energieversorgung der Zukunft gelegt wird?

Vielleicht. Etwas außerhalb des Ortes, aber noch auf dem Gemeindegrund, liegt Cadarache – eines der größten Forschungszentren Europas. In 450 Gebäuden arbeiten dort rund 5000 Mitarbeiter

an Forschungsreaktoren, Instituten für Materialprüfung oder der Behandlung radioaktiver Abfälle. Ein Grundstück sticht dabei heraus: der 42 Hektar große Baugrund für ITER. Die Abkürzung steht für „International Thermonuclear Experimental Reactor“ – und bedeutet zugleich auf Lateinisch „der Weg“.

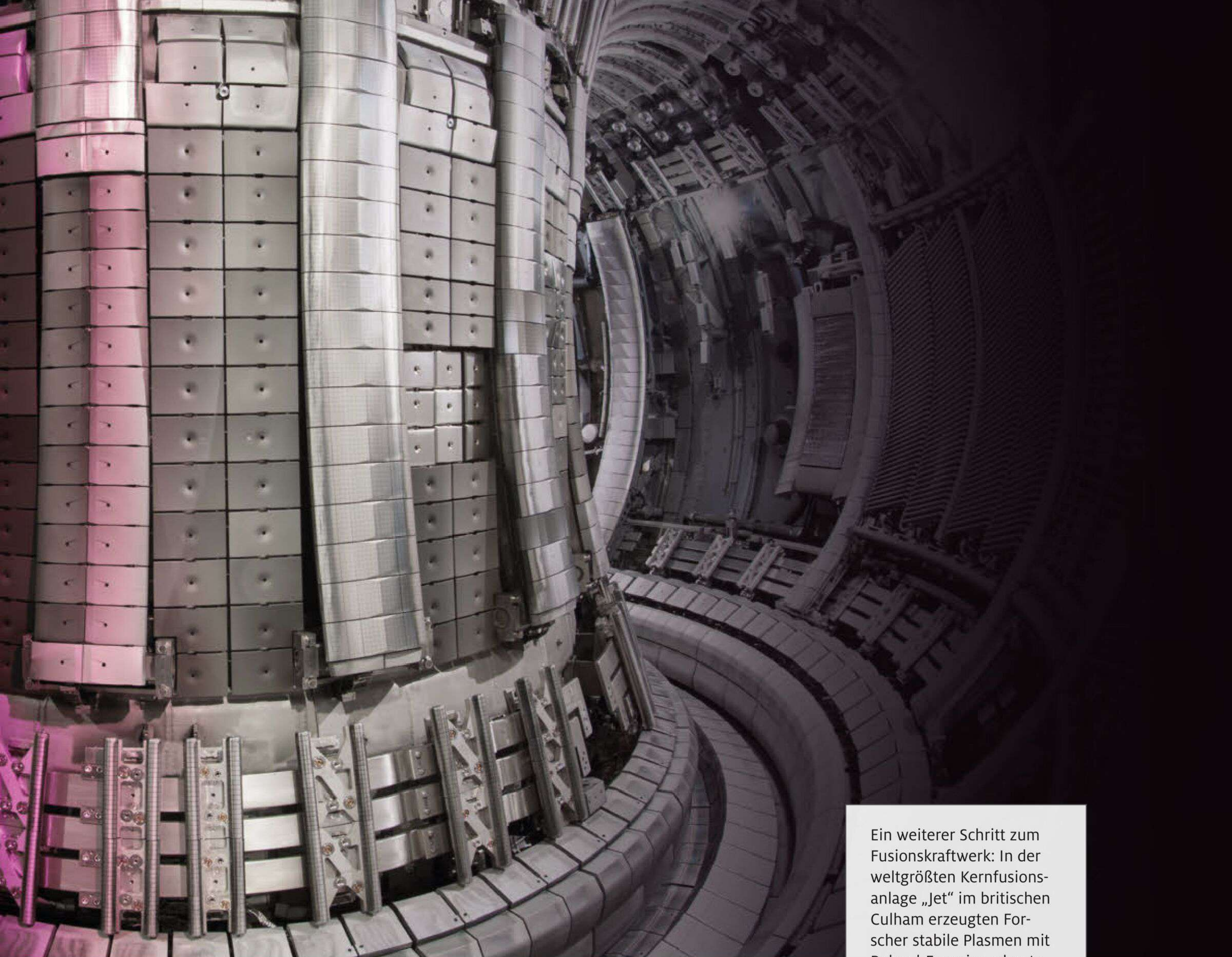
## Tokamak gegen Stellarator

Auf dem gerodeten, rund 60 Fußballfelder großen Feld errichten Arbeiter seit 2014 das teuerste und komplexeste Ingenieursprojekt, das die Menschheit je gebaut hat. ITER ist ein Gemeinschaftsprojekt von China, der EU, India, Japan, Korea, Russland sowie den USA. Sein Ziel ist es, Energie aus Kernfusionsreaktionen zu erzeugen. Dazu wird die Anlage funktionieren wie die meisten ihrer klei-

neren Vorgänger: nach dem sogenannten Tokamak-Prinzip. Zusammen mit dem Stellarator-Prinzip sind das die beiden Wege, die Physiker und Ingenieure hauptsächlich verfolgen, um einen Fusionsreaktor zu realisieren. Die Tokamak-Technik scheint dabei zwar weit vorne zu liegen, doch zuletzt haben Stellaratoren aufgeholt. Wie das Rennen ausgehen – und ob es überhaupt erfolgreich enden – wird, ist damit weiter offen.

Seit Jahren straucheln die Pläne für Kosten und Inbetriebnahme von ITER. Zuletzt mussten 2016 die Ziele für die Fertigstellung radikal umgeworfen werden. Nach aktuellem Planungsstand würde ITER, verteilt auf die sieben Projektmitglieder, 21 Milliarden US-Dollar kosten und 2025 fertiggestellt sein. Zuerst soll die Anlage mit leichtem Wasser-





Ein weiterer Schritt zum Fusionskraftwerk: In der weltgrößten Kernfusionsanlage „Jet“ im britischen Culham erzeugten Forscher stabile Plasmen mit Rekord-Energieausbeute.

stoff betrieben werden, ab 2035 mit den beiden schweren Wasserstoff-Isotopen Deuterium und Tritium. ITER soll, wenn alles nach Plan verläuft, bis 2040 den Nachweis erbringen, ob das Tokamak-Bauprinzip für ein Kernfusionskraftwerk geeignet ist oder nicht. Dann könnte, falls es mit der Finanzierung klappt, mit dem Bau eines Demonstrationsreaktors („Demo“) begonnen werden. Irgendwann in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts würde der Bau des ersten einsatzreifen Fusionskraftwerks folgen. „Gegen das Tempo von ITER fließen selbst Gletscher rasant“, kommentierte die Süddeutsche Zeitung diese Zeitplanung süffisant.

Solche langen Zeiträume sind Wasser auf die Mühlen von Kritikern, die schon immer den Fusionsphysikern ihre „ewigen Versprechungen“ vorhielten. Seit den

1950er-Jahren, also seit die beiden sowjetischen Wissenschaftler Andrej Sacharow und Igor Tamm die Idee in die Welt setzten, verhiessen sie eine baldige Energiegewinnung aus der kontrollierten Verschmelzung von Atomkernen – in jeweils rund 20 bis 30 Jahren. Das sei die „Fusionskonstante“, lästerte Sylvia Kotting-Uhl 2016 im Bundestag. Für die atompolitische Sprecherin der Grünen ist die Fusionsforschung ein „Milliardengrab“.

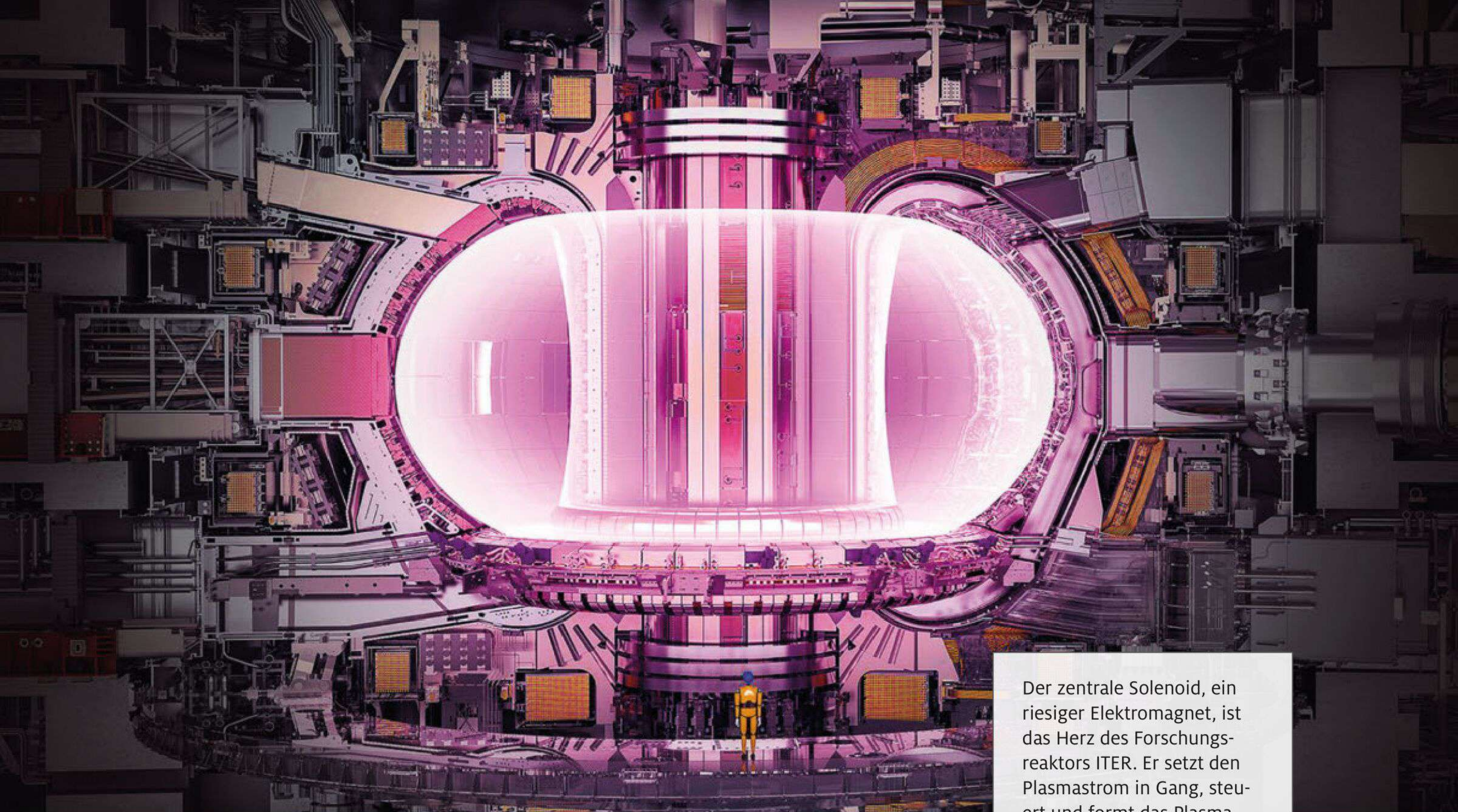
#### **Für den Klimaschutz zu spät**

Auch zum Klimawandel könne sie nichts beitragen. Denn der würde nicht erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts entschieden, sondern bereits in den nächsten Jahren. „Selbst wenn die Fusionsenergie 2055 zur Verfügung stehen würde, käme sie auf jeden Fall zu spät“, mein-

te die Politikerin. Es sei daher „Zeit, aus der Fusionsforschung auszusteigen“.

Das ist starker Tobak, aber ist die Kritik berechtigt? Liegt die Zukunft ausschließlich bei den alternativen Energien? Bernard Bigot, seit 2015 ITER-Generaldirektor, sieht sowohl Vor- als auch Nachteile: „Die Energiedichten von Wind- und Solarenergie sind nicht besonders hoch. Das bleibt ein Problem trotz gewaltiger Fortschritte in der Energiespeicherung.“ Auch stünden alternative Energiequellen nicht immer zur Verfügung. Doch jedes Land braucht eine stabile Stromversorgung. In 50 Jahren, so prognostizieren es Demographen, werden weltweit 50 Prozent der Menschen in Megastädten mit mehr als zehn Millionen Einwohnern leben. „Da bedarf es neben den erneuerbaren Energien ei-





Der zentrale Solenoid, ein riesiger Elektromagnet, ist das Herz des Forschungsreaktors ITER. Er setzt den Plasmastrom in Gang, steuert und formt das Plasma.

ner Grundlastversorgung, die kontinuierlich und vorhersagbar funktioniert“, meint Bigot. „Diese Aufgabe könnten einmal Fusionsreaktoren übernehmen.“

ITER erscheint derzeit als einzige Hoffnung, ein brennendes Plasma im größeren Maßstab zu erzeugen, um zu klären, ob sich mit dieser Technologie Kraftwerke bauen lassen. Etwa 2035 sollen in der Anlage fünf Millimeter große gefrorene Kügelchen aus Deuterium und Tritium in das Plasma eingebracht werden. In 840 Kubikmetern Plasma sollen daraus rund 500 Megawatt an Fusionsleistung gewonnen werden.

Offen ist, sagt Bigot, ob das schon aussagekräftig genug sein wird. „Bisher ist eben nicht gesichert, ob die Technologie auch einfach und effizient genug sein wird, um sie zu industrialisieren.“ Sollte die Menschheit also das eine tun, die erneuerbaren Energie vorantreiben, und das andere dennoch nicht lassen, also sich um Grundlastkraftwerke für die Stromerzeugung kümmern? Jedenfalls erscheint eine Gegnerschaft zur Kernfusion abwegig, denn das Energieproblem der Zukunft ist einfach zu groß. In jedem Fall lohnt sich ein Blick auf das physikalisch-technische Innenleben des größten Fusionsexperiments, des ITER.

### Eine Kathedrale der Forschung

Die Anlage ist eine Kathedrale für den Traum von der Kernfusion. Umgesetzt in Zahlen wirkt sie fast furchteinflößend. Das Reaktorgebäude wird einmal 320.000 Tonnen wiegen und gut gefedert auf meterdicken Bodenplatten und schwingungsdämpfenden, zwei Meter hohen Säulen stehen – zum Schutz vor Erdbeben. Der ringförmige ITER-Reaktor misst etwa 29 Meter in der Höhe, 29 Meter im Durchmesser und wiegt 23.000 Tonnen – mehr als doppelt so viel wie der Eiffelturm. Es enthält 2800 Tonnen supraleitender Magnete und 200 Kilometer supraleitender Kabel – die größte kryotechnische Anlage der Welt. Durch sie sollen einmal stündlich 12 Tonnen flüssiges Helium gepumpt werden.

Die ringförmige Vakuumkammer ist selbst gut 11 Meter hoch und 19 Meter breit. Der Koloss wiegt 8000 Tonnen. Er wird das Plasma – ein halbes Gramm schwer, also von äußerst geringer Dichte – vor Verunreinigungen von außen schützen und umgekehrt die Umgebung vor Kontamination mit Tritium. Jede der 18, D-förmigen Haupt-Magnetfeldspulen aus einer Niob-Zinn-Legierung wiegt 310 Tonnen, ist 17 Meter hoch und 9 Meter breit. Gekühlt werden die Supraleiter mit

flüssigem Helium auf 4,5 Kelvin – und damit bis dicht an absoluten Nullpunkt der Temperatur.

Doch noch wichtiger als das Eigengewicht sind die magnetischen Kräfte, die die Spulen bei Feldern von 12 Tesla aushalten müssen. Im Betrieb werden sie mit radialen Kräften belastet, die dem vierfachen Gewicht des Eiffelturms entsprechen. Millionen Komponenten werden bis 2025 von den sieben Teilnehmerländern herangeführt und von rund 2000 Mitarbeitern vor Ort eingebaut. Fünf der großen Spulen lassen sich nicht transportieren. Sie werden daher direkt vor Ort in einem 250 Meter großen Nachbargebäude gewickelt und gebaut.

Im Betrieb wird die Anlage einmal 110 Megawatt Leistung verzehren, etwa so viel wie der Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider LHC am CERN in Genf. Rund 80 Prozent davon verschlingt allein die Kühlanlage. Während der 30 Sekunden dauernden Plasmapulse steigt der Leistungsbedarf bis auf 620 Megawatt. Doch all die Technik ist eigentlich nur materielles Beiwerk, um die Physik der Kernfusion in diesen Dimensionen in Gang zu setzen.

Damit das Fusionsfeuer selbsterhaltend brennen kann, muss das Plasma auf



etwa 150 Millionen Grad Celsius aufgeheizt werden. Dabei entstehen Helium-Atomkerne sowie ein Neutron, das mit 80 Prozent der Reaktionsenergie aus dem Plasma fliegt. Als elektrisch neutrales Kernteilchen durchdringt es die Wände des Reaktionskessel, ohne dabei merklich gebremst zu werden. In einem späteren Reaktor würde es schließlich in einer äußeren Hülle gestoppt, dem „Blanket“. Das heizt sich dadurch auf und kann über Wärmetauscher Dampf erzeugen. Unbestreitbar ist, dass die Kernfusion physikalisch funktioniert – seit Jahrmilliarden im Inneren von Sternen. Das gelingt, weil die Schwerkraft der Himmelskörper die Reaktionspartner zusammenhält. Auf der Erde muss man die die erhitzten Brennstoffe stattdessen in Käfige aus Magnetfeldern einsperren und soweit wie möglich von jeder Materie fernhalten.

Wenn bei ITER alles so klappt wie es sich die Physiker vorstellen, dann soll das Plasma etwa ab 2035 mit dem „echten“ Brennstoff befeuert werden – also den schweren Wasserstoff-Isotopen Deuterium und Tritium. Das wird die eingesetzte Leistung von 50 Megawatt auf rund das Zehnfache verstärken, also auf 500 Megawatt. Der Test auf eine Reaktor-tauglichkeit des Brennvorgangs wäre damit erbracht, so sagen die Fusionsphysiker, wenn sich dieser energieliefernde Zustand für mindestens sieben Minuten stabil aufrechterhalten lässt.

### Ärgerliche Geburtsfehler

Hinter diesem Maß stecken einige der Geburtsfehler, die unweigerlich mit der Tokamak-Technologie verknüpft sind. Noch immer plagen Tokamak-Anlagen heftige Stromabbrüche, die alle tragenden Strukturen stark belasten. Außerdem kann der Betrieb darin immer nur in Pulsen ablaufen. Das liegt am Funktionsprinzip: Tokamak-Fusionsmaschinen sind elektrische Transformatoren. Die Spulen, die das ringförmige Vakuumgefäß umgeben, erzeugen das Hauptmagnetfeld. Eine davon, die Transformator-spule, induziert einen Strom, der im Plasma fließt. Dessen zusätzliches Magnetfeld sorgt für die Verdrillung der Felder, die die Teilchen zwischen Innen- und Außenseite des Plasmarings zirkulieren lassen. Diese geniale und an sich einfache Idee von Sacharow und Tamm erzwingt einen gepulsten Betrieb von Tokamak-Reaktoren. Denn ein Transformator kann keinen Dauerstrom induzieren – der sogenannte Transformatorhub ist stets begrenzt.

Die Anlage muss dann regelmäßig neu durchstarten. Aber die Physiker versuchen, durch bestimmte Zusatzheizungen die Pulse zeitlich so lange wie möglich zu strecken – und sie letztlich bis auf mehrere Stunden zu dehnen. So könnte daraus einmal ein quasi-kontinuierlicher Betrieb werden. Inwieweit das ge-

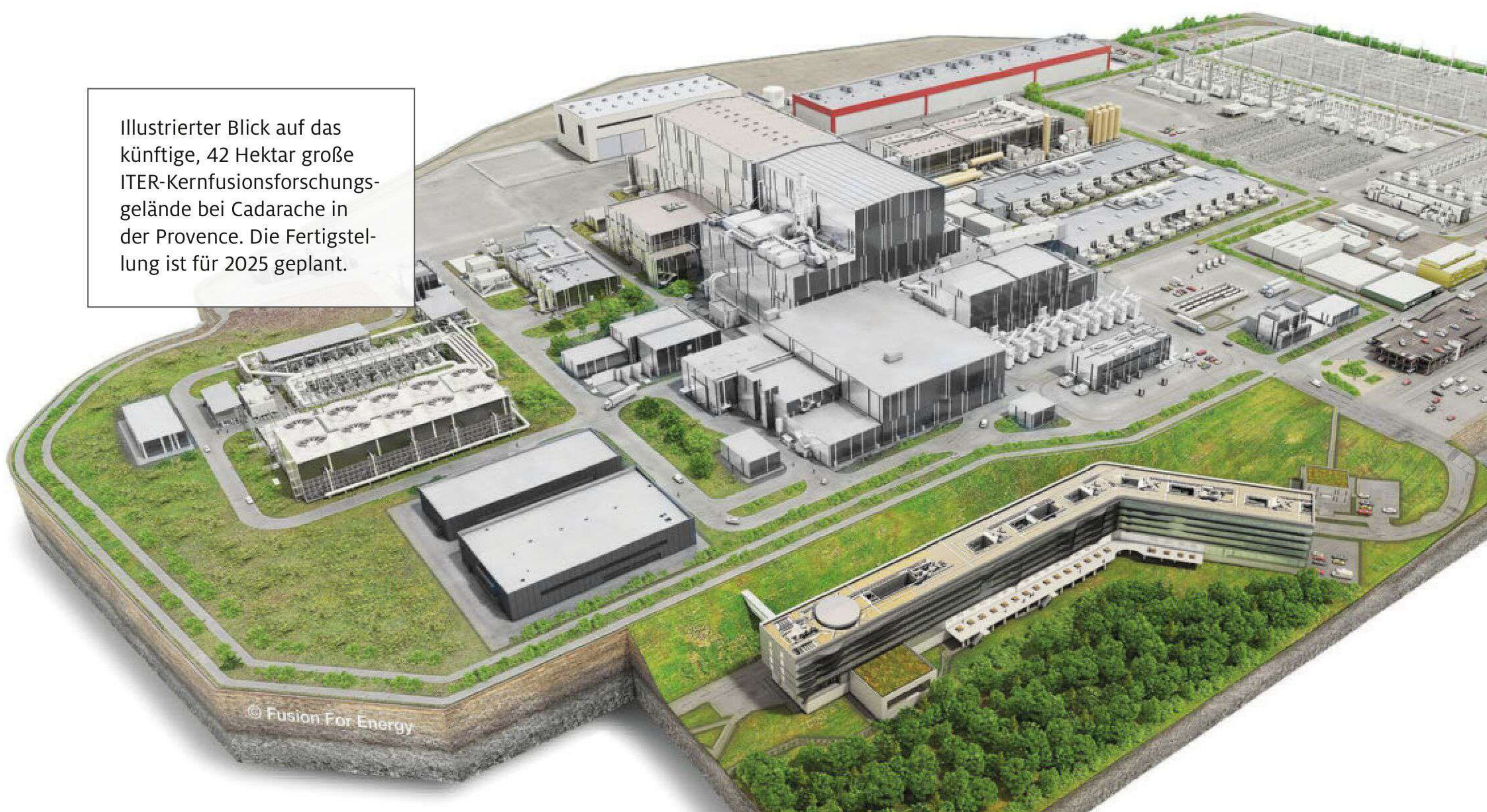
lingt, ist eine der kritischen Herausforderungen, die bei ITER für die Zukunftsfähigkeit des Konzepts zu meistern sind.

Bisher geplant sind bei dem Forschungsreaktor anfangs Pulse von 30 Sekunden Dauer. Später sollen längere Brenndauern von bis zu einer Stunde realisiert werden, dafür aber mit einer auf ein Fünftel reduzierten Leistungsverstärkung. Für kommerzielle Fusionskraftwerke würde eine Leistungsverstärkung von mehr als 30 benötigt. Auch dieser Zustand soll, zumindest für kurze Pulszeiten und bei abgesenkter Heizleistung, an ITER erprobt werden.

### Fortschritt beim Einschlussparameter

Solche Ziele zu erreichen, wäre kaum vorstellbar, wären nicht in weltweit rund 200 Tokamak-Anlagen in den letzten Jahrzehnten bereits entscheidende Erkenntnisse gewonnen worden. Physiker messen die Güte ihrer Anlagen mit einer Kenngröße, dem Einschlussparameter – einem Produkt aus Teilchendichte, Temperatur und Einschlusszeit. Wie der britische Physiker John Lawson schon 1955 errechnet hat, muss diese Messgröße eine bestimmte Schwelle überschreiten, damit sich das in einem Plasma ablaufende Fusionsfeuer selbst trägt. Unter Experten ist die Bedingung als „Lawson-Kriterium“ bekannt. „Verglichen mit den

Illustrierter Blick auf das künftige, 42 Hektar große ITER-Kernfusionsforschungsgelände bei Cadarache in der Provence. Die Fertigstellung ist für 2025 geplant.





ersten russischen Tokamaks der 1950er-Jahre“, erinnerten Fusionsforscher 2016 im Fachblatt Nature Physics, „ist dieser Wert bis heute um mehr als das Zehntausendfache gesteigert worden.“

Zu den wichtigeren Experimenten der Kernfusionsforschung zählen die ITER-Vorläufer in Europa: ASDEX und ASDEX Upgrade, beide am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching bei München, der Joint European Torus (JET) im britischen Culham unweit von Oxford sowie der Tokamak Fusion Test Reaktor (TFTR) in Princeton, südwestlich von New York in den USA. „Wir sehen das wie eine Stufenleiter – ASDEX, ASDEX Upgrade, JET und ITER,“ sagt Sibylle Günter, Wissenschaftliche Direktorin des IPP: „eine Kette von Fusionsexperimenten, die stark aufeinander aufbauen.“

### Neuen Betriebszustand entdeckt

Als 1981 in Garching das Experiment ASDEX („Axialsymmetrisches Divertor-Experiment“) in Betrieb ging, wurden darin zum ersten Mal sogenannte Divertoren getestet: Platten, die am Rande des Plasmarings mithilfe spezieller Magnetfelder Verunreinigungen vom Plasma trennen – in einem künftigen Reaktor auch die „Fusionsasche“ Helium-4. Die Divertor-Platten sind es auch, die unmittelbar den starken Wärmebelastungen aus dem

Plasma ausgesetzt sind. Durch ihren Einsatz entdeckten die Garching Physiker ein neuen Betriebszustand, die sogenannte H-Mode. Dabei steht H für „High Confinement“ – einen Modus, bei dem das Plasma besser gegen die Umgebung isoliert wird. „In diesem Zustand verdoppelt das Plasma seinen Wärmeeinschluss“, erläutert Sibylle Günter. „Das war der wichtigste Beitrag von ASDEX, der auch JET und ITER beeinflusst hat.“ Ohne diesen Betriebszustand müsste ITER sogar doppelt so groß sein.

Bislang ist JET in Großbritannien das größte Tokamak-Experiment der Welt. 1983 zündete in seiner Reaktionskammer erstmals ein Plasma. 1997 erzeugte JET für eine Sekunde 16 Megawatt Fusionsenergie, während das Plasma von außen mit 24 Megawatt beheizt wurde. Auch einen Langzeitrekord erzielten die JET-Physiker: eine Fusionsleistung von 4 Megawatt über fünf Sekunden – eine Zeitspanne, die nur durch die Technik beschränkt war. Zuvor hatte 1994 nur ein Experiment an der TFTR-Anlage in Princeton ein Deuterium-Tritium-Plasma gezündet und kurzzeitig eine Fusionsleistung von 10 Megawatt erreicht.

Das Plasma am JET wird bei Temperaturen von 325 Millionen Grad Celsius durch ein Magnetfeld von vier Tesla Stärke zusammengehalten. Das waren zwei-

fellos Rekordwerte, die aber nur durch intensive Beheizung von außen möglich wurden – nicht durch ein selbsterhaltendes Fusionsbrennen. Denn die nukleare Verschmelzung trug zur Selbstheizung lediglich 3,2 Megawatt bei.

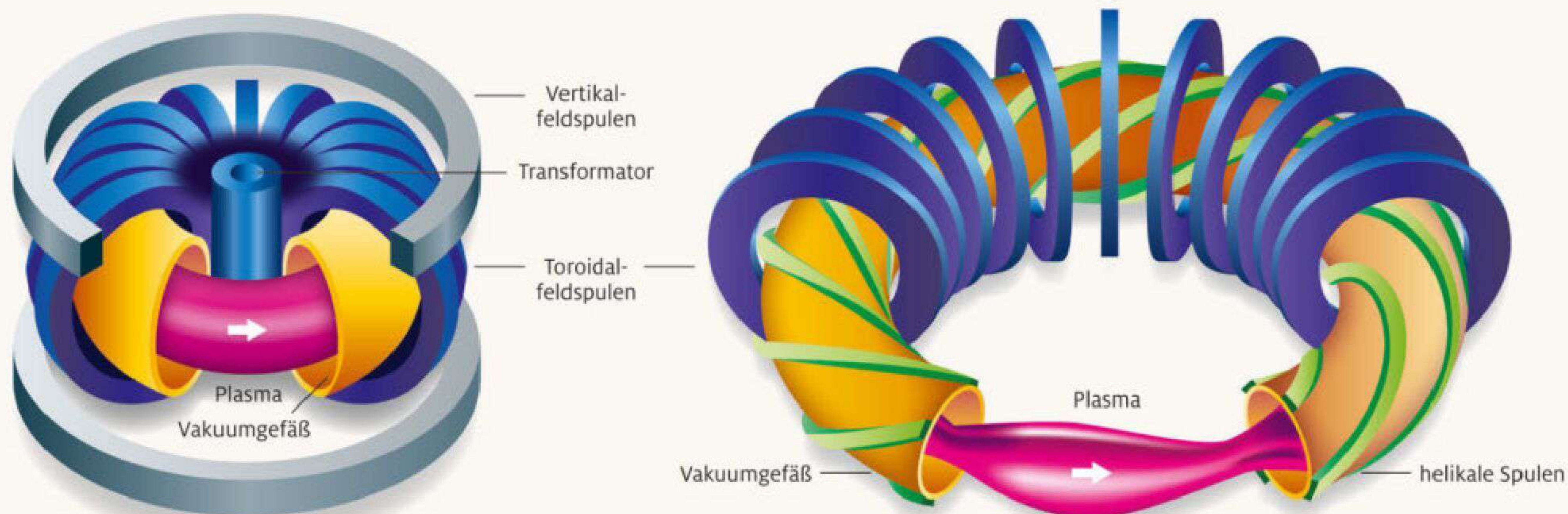
### Erfolgsmeldung aus Culham

Das änderte sich im Februar 2022. Da berichteten JET-Forscher, dass sie ein Plasma fünf Sekunden lang stabil halten und



## Zwei Wege zur Kernfusion: Tokamak und Stellarator

Um eine Kernfusion durch starke Magnetfelder zu erreichen, setzen unterscheiden: die Tokamak-Technologie (links) und die Stellarator-Technologie (rechts) mit einem auffällig verdrehten Magnetfeld.







Links: Wartungsarbeiten im Inneren der Plasmakammer von Asdex Upgrade, einer Fusionsforschungsanlage am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München. Die Wissenschaftlerin Athina Kappatou kalibriert Geräte, die während des Betriebs die Eigenschaften des heißen Teilchen-Gemischs messen. Oben: per CCD-Kamera festgehaltene Plasma-Entladung in dem Reaktor.

dabei eine Rekordmenge an Fusionsenergie ernten konnten. Der Leiter des Culham Centre for Fusion Energy, Ian Chapman, war erfreut: „Dieser Meilenstein bringt uns einen großen Schritt an die Lösung eines der größten wissenschaftlichen und technischen Probleme.“ Und die Fusionsexpertin Josefine Proll von der Eindhoven University of Technology in den Niederlanden ist überzeugt, dass „JET endlich das erreicht hat, was vorhergesagt war.“ Das ITER auf demselben physikalischen Modell basiere wie JET, liege die Vermutung nahe, dass auch der Forschungsreaktor in der Provence wie geplant funktionieren wird.

Beim Experiment vom 21. Dezember 2021 lieferte der Tokamak am JET fünf Sekunden lang eine Energie von 59 Megajoule – mehr als das Doppelte der 21,7 Megajoule, die 1997 für einen Sekundenbruchteil während eines vier Sekunden-Pulses generiert worden war. Auch im aktuellen Experiment erreichte JET nicht das „Plasmabrennen“, sondern erzeugte nur 33 Prozent der zugeführten Energie. Doch das Reaktionsgefäß der Anlage umfasst nur ein Zehntel des Reaktionsvolumens von ITER. Wenn man das Resultat am JET auf ITER-Verhältnisse hochrechnet, erklärt Proll, würde man ein Zehnfaches der hineingesteckten Energie wieder herausbekommen. Ob das auch so eintritt, wird sich erst nach 2035 zeigen.

Ein weitere Forschungseinrichtung zur Kernfusion befindet sich am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge (USA). Dort entwickelt Dennis Whyte, Direktor des MIT Plasma and Science Fusion Center, eine Tokamak-Anlage namens „Sparc“, auf Deutsch „Funke“. Das Projekt wurde 2018 gestartet mit dem Ziel, bis 2025 einen Fusions-testreaktor in Betrieb zu nehmen. Im Unterschied zu Giganten wie JET und vor allem ITER soll das privat finanzierte Vorhaben höhere Leistungen in einem kleineren Gerät erreichen. Die Testanlage ist nur halb so groß wie das eigentliche Ziel der Forscher: der größere ARC-Reaktor. Das Akronym enthält die Botschaft der US-Forscher: affordable, robust, compact (günstig, robust, kompakt). Sparcs Ringgefäß hat einen großen Radius von 1,85 und einen kleinen von 0,57 Meter. Zum Vergleich: Diese Maße bei ITER sind 6,2 und 2,0 Meter. Sparc ist auf eine maximal 10 Sekunden dauernde Entladung ausgelegt, bei ITER sind es 30 Minuten.

#### Neuartige Spulen im Einsatz

Der Clou der Testanlage am MIT liegt in seinen neuartigen Magnetspulen aus Hochtemperatur-Supraleitern. Die flachen, bandartigen und in je 16 Schichten auf eine Länge von rund 270 Kilometern aufgewickelten Materialien sind erst seit wenigen Jahren kommerziell verfügbar.

Sie können – auf kleinerem Raum – Magnetfelder in einer Stärke erzeugen, die mit Niedertemperatur-Supraleitern nicht erreichbar ist. Mit Letzteren wird etwa der ITER-Tokamak ausgestattet sein. Dort ermöglichen die Spulen eine Magnetfeldstärke von bis zu 12 Tesla. Die normalerweise Kuperspulen von JET in Culham bringen es bloß auf 3,5 Tesla.

Wie die MIT-Forscher im September 2021 berichteten, hat eine ihrer High-Tech-Magnetspule den ersten Test erfolgreich bestanden. Stufenweise erhöhten die Forscher die Stromstärke darin, bis der maximal mögliche Wert von 20 Tesla erreicht war – die 400.000-fache Stärke des Erdmagnetfelds. „Das ist die höchste, je von einem hochtemperatursupraleitenden Fusionsmagneten erreichte Magnetfeldstärke“, betont das Sparc-Team. Bei Sparc wird ein Tokamak-Reaktor von 18 solchen Spulen umschlossen sein, jede davon rund neun Tonnen schwer. Nach den Berechnungen der Forscher am MIT lässt sich mit der vergleichsweise kompakten Anlage eine Fusionsleistung erzielen wie sie sonst nur in einem 40 mal so großen Gerät möglich wäre.

Noch ist damit zwar erst eine einzige der neuartigen Magnetfeldspulen erfolgreich getestet worden. Doch im nächsten Schritt soll damit ein kompletter Tokamak konstruiert werden. Das Ziel: Ab 2025 soll Sparc ein nukleares Brennen





Links: Blick in das Plasma-gefäß von Wendelstein 7-X, einem Stellarator in Greifswald. Rechts: ein Teil des gebogenen Gefäßes während seiner Fertigung.

von zehn Sekunden Dauer erreichen und trotz seiner kompakten Maße bis zu 140 Megawatt Leistung liefern. Das nährt die Hoffnung, dass diese Entwicklung deutlich rascher ans Ziel führen könnte als alles, was derzeit mit ITER und Nachfolgern geplant ist.

### Wendelstein an der Ostseeküste

Quasi der kleine Bruder aller Tokamaks steht in der Ostsee-Hafenstadt Greifswald, an einem Teilinstitut des Max-Planck-Instituts für Plasmaforschung. „Wendelstein 7-X“ ist ein sogenannter Stellarator und die größte Anlage dieser Art, die je gebaut wurde – für insgesamt über eine Milliarde Euro. Umgeben von vielen Kabeln und Zusatzgeräten enthält sie einen Ring von 16 Meter Durchmesser, den 50 supraleitende Magnetspulen umschlingen. Jede Spule bringt sechs Tonnen Gewicht auf die Waage. Das Bizarre: Die Spulen des Wendelstein 7-X sehen aus, als hätte sie eine gigantische Kraft gepackt und halb zerquetscht.

Der Grund dafür liegt in der Physik. Ein Stellarator sperrt das Plasma durch äußere Magnetfelder ein, die nur von stromdurchflossenen Spulen außerhalb der Reaktionskammer erzeugt werden – daher die merkwürdige dreidimensionale Spulenform. Bei einem Tokamak wird das benötigte Verdrehen der magnetischen Feldlinien durch einen elektrischen Strom bewerkstelligt, der in dem

Plasma selbst fließt. Den dazu erforderlichen Transformator kann man sich bei einem Stellarator sparen. Der Vorteil: Stellarator-Anlagen lassen sich grundsätzlich kontinuierlich betreiben.

Damit entfallen nicht nur die Widrigkeiten eines gepulsten Betriebs, auch Stromabbrüche, wie sie bei Tokamak-Anlagen üblich sind, werden bei einem Stellarator vermieden. So planen die Forscher, mit dem Wendelstein 7-X in der vollen Ausbaustufe einmal Plasmen bis zu 30 Minuten lang stabil zu halten. Das 725 Tonnen schwere Gerät in Greifswald könnte eine Wende in der Stellarator-Entwicklung einläuten. Im Dezember 2015 zündete der Wendelstein 7-X sein erstes Plasma. Das dreidimensionale Magnetfeld in der Anlage war zuvor mithilfe von Supercomputern optimiert worden, um die Wärmeverluste beim Betrieb zu reduzieren.

Allerdings: Beim Einschussparameter nach Lawson hinken Stellaratoren noch hinter den Tokamaks her. Der „Wendelstein“ ist dafür gebaut, da aufzuschließen. Bisher gelang es bei dem Experiment, die Ionen bis auf 20 Millionen Grad Celsius aufzuheizen. Der Einbau einer Heizung für Ionen soll diesen Wert auf bis zu 100 Millionen erhöhen. Nach Abschluss der ersten Experimentierphase 2016 wurden Hitzeschilder eingebaut: 8500 Kohlenstoff-Kacheln platzierten die Ingenieure um den Gefäßring, später

sollen sogar solche mit Wasserkühlung zum Einsatz kommen.

2021 wurden Einbauten abgeschlossen, um dann in eine Art Dauerbetrieb gehen zu können – zumindest für 30 Minuten. Dazu wurden in den letzten zwei Jahren die Systeme erweitert und zuletzt 600 Wasser-Kühlkreise installiert, berichtet der wissenschaftliche Leiter Thomas Klinger. Nun werde damit begonnen, die Luft aus der gesamten Maschine zu pumpen und die Kühlkreise mit Wasser zu füllen. Nach Testläufen an den Magneten sollen dann die Hauptelemente heruntergekühlt werden, sagt Klinger. Dann sei alles startklar. Nach Plan wird das im September 2022 sein.

Sollte der dann avisierte Testlauf von insgesamt 30 Minuten Dauer gelingen, ist ein Betrieb aus technischer Sicht auch permanent möglich, meint Klinger. Es wäre ein weiterer Schritt in Richtung einer künftigen Kraftwerkstauglichkeit von Fusionsreaktoren.

### Im Qualifying für den nächsten Schritt

Wird damit das Stellarator-Prinzip bereits zur Konkurrenz zum Tokamak? Wird ein Stellarator jemals reaktortauglich sein? „Das sind die Fragen, die wir untersuchen wollen“, meint Sibylle Günter. Der wissenschaftliche Leiter des Wendelstein 7-X, Thomas Klinger, legt die Strategie dar. „Wenn wir beim Einschuss Werte erreichen, die zeigen, dass





unser Experiment vergleichbar ist zu einem Tokamak mit gleichem Plasmavolumen, dann qualifizieren sich Stellaratoren für einen nächsten Schritt – wahrscheinlich einem Experimentalreaktor mit Deuterium-Tritium.“

Wie stünde dann so ein Stellarator-Nachfolger im Verhältnis zum Tokamak ITER? Die Physiker würden von den Dimensionen her ein ITER-Format konzipieren, ebenfalls mit einem Plasmavolu-

men von rund 500 Kubikmetern. Allerdings: „Das hängt natürlich auch von den ITER-Ergebnissen ab“, meint Klinger. Und was wäre mit den so merkwürdig deformierten Magnetspulen? „Unsere Reaktorstudien auf Basis des Wendelstein 7-X-Designs haben Spulen mit etwa 15 Meter Durchmesser ergeben“, sagt der wissenschaftliche Leiter. „Das entspricht den großen ITER-Feldspulen, deren Machbarkeit ja bewiesen wurde.“ Die 3D-Formung wäre dabei laut Klinger „keine wesentliche technische Hürde.“

### Ein Blick in die Zukunft

Der Weg nach ITER scheint vorgezeichnet: Falls ITER in seiner „heißen“ Phase mit Deuterium-Tritium-Betrieb erfolgreich ist, wird wohl über ein nachfolgendes Demonstrationskraftwerk nachgedacht. „Die Frage ist, ob es eines oder mehrere davon geben wird“, meint IPP-Direktorin Sibylle Günter. „Denn nach ITER stehen Technologie und Ergebnisse allen Beteiligten zur Verfügung. Zum Beispiel ist China sehr stark an einer eigenen Weiterentwicklung interessiert.“

Bereits jetzt besitzt China einen supraleitenden Tokamak, den „Experimental Advanced Superconducting Tokamak“ (EAST). Er leitet über zum geplanten „Chinese Fusion Engineering Test Reak-

tor“, der noch größer ausfallen soll als die ITER-Anlage. „China will nach dem Ende der Industrienaufträge für ITER um 2030 das Know-how sogleich weiter nutzen“, ist Günter überzeugt. Da gehe es gar nicht sofort um Energiegewinnung, sondern um die Nutzung der neuen Technologien. „China ist sehr ehrgeizig und entwickelt alternative Energien ebenso wie Fusionstechnik“, sagt Sibylle Günter. „Denn Chinas Millionenstädte werden einmal sehr viel Energie brauchen.“

Sollten die Großexperimente Erfolg haben, könnten die oft kritisierten Versprechungen der Fusionsforscher zum Zug kommen. Sicher, sauber und unerschöpflich sollte ja eine künftige Stromversorgung auf Fusionsbasis sein – und kostenverträglich. Doch bis dahin werden sicher noch Jahrzehnte vergehen. Die größten Herausforderungen für die kontrollierte Kernfusion und ihre Nutzung in kommerziellen Stromkraftwerken liegen in technischen und physikalischen Aspekten. ITER-Chef Bernard Bigot ist sich der dessen bewusst: „Das ITER-Projekt könnte unsere letzte Chance in diesem Jahrhundert sein, um zu zeigen, dass Fusion funktionieren kann.“ Vielleicht kommt es aber ganz anders: wenn kompakte Reaktoren vom Typ Sparc und ARC schneller zum Ziel gelangen. ■

## Wozu nutzt die Forschung über Kernfusion?

**Umwelt.** Kernfusion als Energiequelle würde kein Kohlendioxid emittieren. Aus einem Gramm Wasserstoff ließe sich mit Kernverschmelzungen ähnlich viel Energie gewinnen wie aus elf Tonnen Steinkohle. Die Asche der Kernverschmelzung sind kleine Mengen an Helium, einem ungiftigen Edelgas. Die energiereichen Neutronen eines Fusionsreaktors aktivieren zwar die Strukturmaterialien – in sogenannten Transmutationen erzeugen sie in den Metallen radioaktive Isotope. Doch dieser Prozess ließe sich gestalten. „Materialien mit niedriger Aktivierung würden garantieren, dass nur kurzlebige Radionuklide erzeugt würden“, kommentierte das Fachblatt Nature Physics 2016. Analysen hätten gezeigt, dass Wände und Strukturen schon nach 100 bis 200 Jahren recycelbar wären. Langlebiger radioaktiver Abfall entstünde dabei nicht.

**Sicherheit.** Heiße Plasmen sind scheue Wesen. Die Kunst ist eher, das Fusionsfeuer aus Deuterium und Tritium überhaupt am Laufen zu halten. Fusionsreaktionen lassen sich innerhalb von Millisekunden beenden. Schon bei kleinsten Störungen würde das Plasma innerhalb weniger Sekunden auskühlen. Die Reaktorkammer enthält immer nur Brennstoff für wenige Sekunden. Ein Durchschmelzen eines Reaktors wie beispielsweise beim Unglück 2011 im japanischen Fukushima wäre ausgeschlossen.

**Rohstoffe.** Besonders attraktiv an der Kernfusion erscheinen die üppig vorhandenen, nicht-radioaktiven Brennstoffe – Deuterium und Lithium-6. Fusionsreaktionen erbrüten das Tritium über die Reaktion eines Neutrons mit Lithium-6 zu Helium-4 und Tritium. In natürlichen Lithium-Vorräten ist das dafür relevante Lithium-6 zu 7,5

Prozent enthalten. Ein Fusionsreaktor mit einem Gigawatt Leistung würde jährlich 120 Kilogramm Deuterium und 200 Kilogramm Lithium-6 verbrauchen.

Jeder Liter Meereswasser enthält 0,02 Gramm Deuterium – genug für das 50 Milliarden-Fache des weltweiten Jahresbedarfs an elektrischem Strom von 2,4 Terawatt-Jahren. Die weltweiten Reserven von Lithium werden auf 13,5 Millionen Tonnen geschätzt, ausreichend für rund 1000 Jahre Weltstromerzeugung. Und zur Not gibt es noch die Ozeane: In deren Meerwasser verbergen sich pro Liter 0,2 Milligramm Lithium. Das klingt eindrucksvoll, setzt aber voraus, dass es gelingt, eine energieeffiziente Methode zur Lithium-Extraktion zu entwickeln. Rohstoff-Monopolisten im Stil von „Lithium-Scheichs“ könnte es damit jedenfalls nicht geben.



---

# Explosion in der Erbse

---

Atomkerne des Wasserstoffs per Laserlicht und Trägheitskraft zu verschmelzen, ist eine alternative Variante der Kernfusion – und ein Hoffnungsträger für eine saubere Energieversorgung der Zukunft. Ein aktuelles Experiment in den USA beflügelt diese Hoffnungen.

von REINHARD BREUER



Der Brennstoff für die Kernfusion – ultrakalter Wasserstoff – befindet sich in einer Kugel mit rund zwei Millimeter Durchmesser.



In der Physik der heißen Materie ist Trägheit ein Segen. Denn wird ein Objekt mit viel Energie bombardiert, kommt es zu einer kleinen Verzögerung. Dann dauert es einen Sekundenbruchteil, bis das Objekt explodiert – wegen der Trägheit der Masse. Das nutzen die Forscher aus, um die Geheimnisse von Materie bei extremen Energien zu ergründen. Den Schlüssel, um diesen Effekt für eine Energiequelle zu erschließen, soll das Wasserstoff liefern.

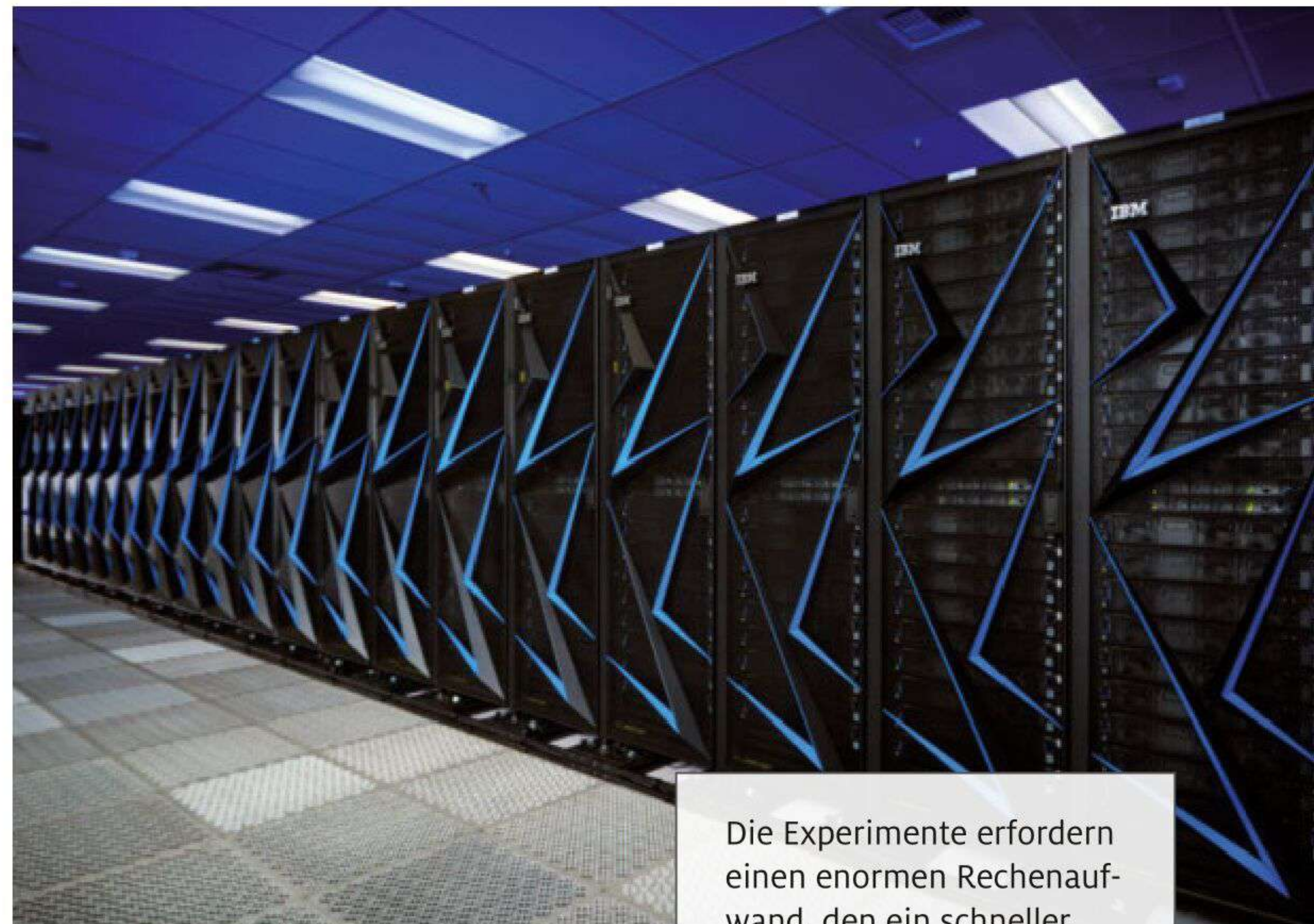
Die Entwicklungen dahinter könnten die Welt verändern: neue Verfahren für Medizin und nukleare Sicherheit, Technik für Teilchenbeschleuniger, Experimente für Astrophysik im Labor – und nicht zuletzt eine vielversprechende Energiequelle der Zukunft. Alle diese „explosiven“ Anwendungen basieren auf dem Wesen der Massenträgheit, die sich jeder Änderung der Geschwindigkeit widersetzt.

Doch wie lässt aus dieser fundamentalen Eigenschaft ein Reaktor bauen, der Strom liefert? Dieses Ziel haben sich Forscher gesetzt. Mit Hochleistungslasern als „Treibern“ wollen sie die Trägheit nutzen, um Atomkerne zu verschmelzen. Sie schießen mit Licht auf winzige Kügelchen, die mit Deuterium und Tritium gefüllt sind, den beiden schweren Wasserstoff-Isotopen. Mit diesem Brennstoffgemisch funktionieren auch Wasserstoff-Bomben. Doch hier wird es genutzt, um elektrische Energie zu erzeugen. Dazu verschmelzen Wasserstoff-Kerne – gegen ihre elektrische Abstoßung – miteinander, wenn sie stark zusammengepresst werden: Das Gemisch „zündet“.

### Wie ein besserer Dampfkochtopf

Was macht die sogenannte Trägheits- oder Laserfusion so interessant? „Sie ist eine Alternative zur Magnetfusion“, sagt Markus Roth, Wissenschaftler am Institut für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt. Auf die Magnetfusion setzen große Forschungsexperimente wie der Versuchsreaktor ITER, der in Südfrankreich gebaut wird (siehe Beitrag S. 86, „Energie aus dem Sternenfeuer“). „Der Reiz besteht darin, dass sich Treiber und Reaktor voneinander trennen lassen“, erklärt Roth. Laser und Elektronik wurden in benachbarten Gebäuden untergebracht. „Der Reaktor, in dem die Fusion zünden soll, ist nur noch ein besserer Dampfkochtopf, in den die Laserstrahlen eindringen.“

Jahrzehntelang sei die Magnetfusion viel üppiger finanziert worden, stellt Kernphysiker Roth fest. Deshalb sei sie heute physikalisch und technisch weiter vorangeschritten. „Die Laserfusion ist die kleine Schwester der Magnetfusion“, meint der Forscher. Allerdings braucht sie – anders als diese – weder ein Hochvakuum noch supraleitende Spulen, die nur bei extrem tiefen Temperaturen funktionieren. Und es ist auch kein 150 Millionen Grad Celsius heißes Plasma nötig, wie bei der Magnetfusion.



Die Experimente erfordern einen enormen Rechenaufwand, den ein schneller Supercomputer bewältigt.

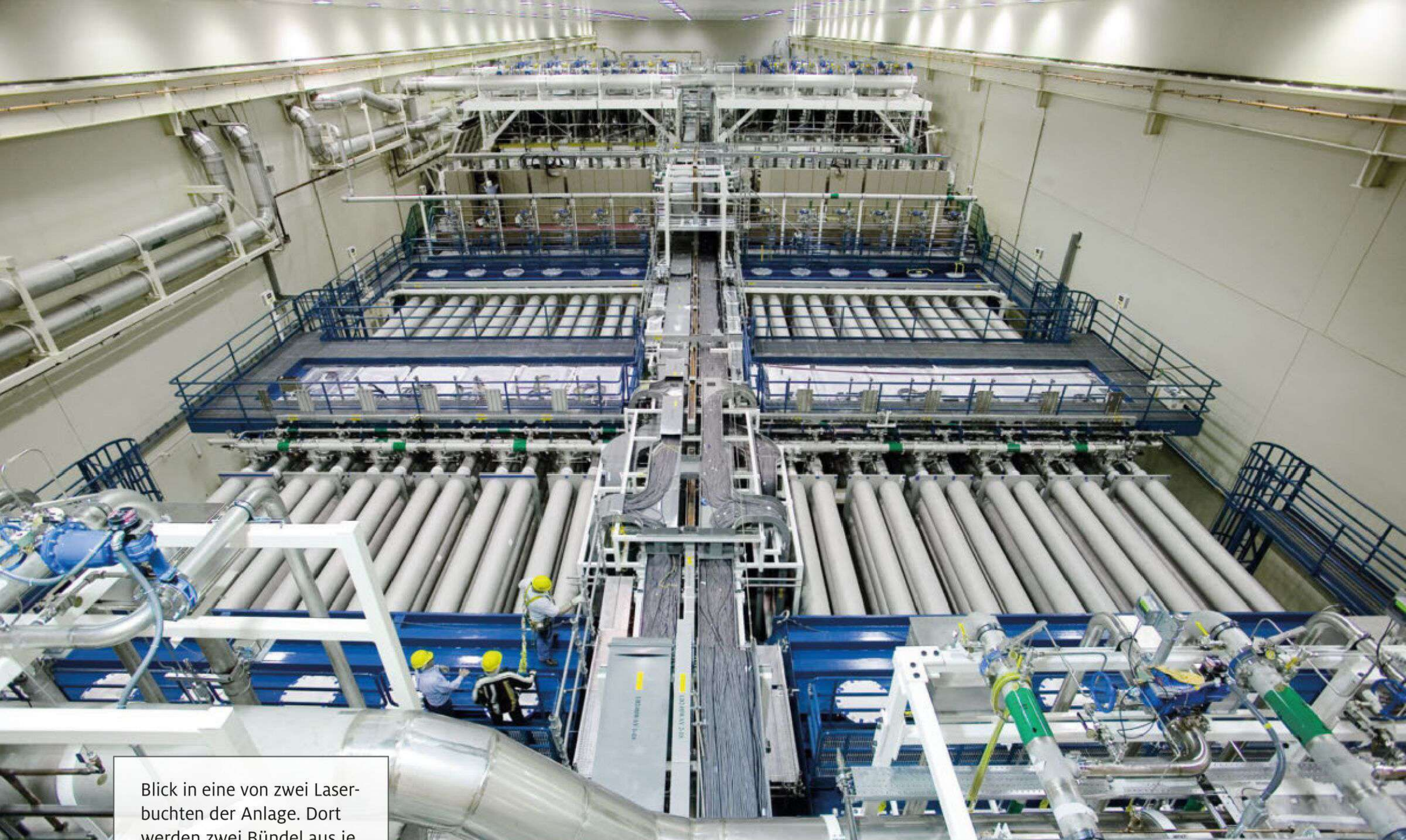
Die Kathedrale der Laserfusion steht in Kalifornien. Im Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 70 Kilometer östlich von San Francisco, arbeiten in einer Art quadratischer Kleinstadt mit einem kleinen See in der Mitte fast 6000 Menschen – unter anderem im „Stockpile-Stewardship“-Programm. Darin testen und warten Forscher die alternativen US-amerikanischen Kernwaffen – ohne sie dazu anzutasten. Denn das ist seit 1996 untersagt.

Einige der schnellsten Supercomputer der Welt helfen bei den virtuellen Tests. Auch Edward Teller, Miterfinder der Wasserstoff-Bombe, forschte einst am LLNL und dachte sich die „Strategic Defence Initiative“ (SDI) aus. Sie ging als „Krieg der Sterne“ in die Geschichte des Kalten Kriegs ein. Seitlich auf dem Gelände der Anlage ragt eine mächtige Halle empor, mehr als zwei Fußballfelder groß und zehn Stockwerke hoch. Sie beherbergt die größte Laseranlage der Welt: die „National Ignition Facility“ (NIF), ein System der Superlative.

### Zwei Millionen Joule aus 192 Lasern

192 Neodym-Glaslaser können in der Anlage bis zu zwei Megajoule (Millionen Joule) Energie in einen kleinen Hohlzylinder feuern, in dem eine Kapsel von der Größe einer Erbse hängt. Diese Energie entspricht zwar nur etwa einer halben Kilowattstunde. Aber die Kunst liegt darin, sie in einem kurzen Puls von einer milliardstel Sekunde Dauer auf ein winziges Objekt zu schießen. Für diesen Bruchteil einer Sekunde entsteht so eine Leistung von einer halben Billionen Watt (0,5 Petawatt oder 500 Terawatt). Zum Vergleich: Der mittlere Stromverbrauch der Menschheit erfordert eine Leistung von bloß 2,7 Terawatt – allerdings rund um die Uhr.





Blick in eine von zwei Laserbuchten der Anlage. Dort werden zwei Bündel aus je 48 Laserstrahlen erzeugt.

Dafür wurde die NIF erbaut. Im Zentrum der Kapsel soll sie extreme Temperaturen erzeugen – bis zu 100 Millionen Grad Celsius – sowie ein Milliardenfaches des Drucks, der in der Umgebungsluft herrscht. Die Bedingungen sind so bizarr, dass sie nur im Inneren von Planeten und Sternen zu finden sind – oder im Zentrum einer Kernwaffenexplosion.

#### **Eine Idee aus den Fünfigern**

Die Idee, Wasserstoff-Explosionen in kleinem Maßstab für zivile Zwecke zu nutzen, reicht bis 1956 zurück. Da regte der deutschstämmige US-Physiker Friedwardt Winterberg an, eine thermonukleare Mikroexplosion mit konzentrischen Schockwellen zu zünden. Die sollten durch Sprengstoffe ausgelöst werden – den Laser gab es damals noch nicht. Der US-Erfinder Philo Farnsworth hatte eine ähnliche Idee. Auch Edward Teller suchte nach Möglichkeiten, die Technik der Wasserstoff-Bombe friedlich zu nutzen: Er wollte die Bombe in einer mit Wasser gefüllten unterirdischen Höhle zünden. Der dabei entstehende Dampf sollte ein Kraftwerk antreiben. Das wurde 1961 ausprobiert, doch als radioaktives Gas an die Oberfläche drang, brach man den Versuch ab.

1972 fragte sich der LLNL-Forscher John Nuckolls, wie klein eine Bombe auf der Basis von Kernfusion sein könne, um überhaupt noch genügend Energie zu erzeugen. Nach seinen Berechnungen würde schon eine geringe Energie ausreichen, um eine

Brennstoffkapsel zu zünden. Die winzige Explosion sollte in einem zwei Zentimeter kleinen Hohlraumzylinder, dem „Zelt“, stattfinden, in dessen Mitte die Kapsel an dünnen Fäden aufgehängt war.

Diesem Konzept blieben die NIF-Forscher treu. Wegen des zwischengeschalteten hohlen Zylinders wurde es als indirekter Antrieb bekannt – im Gegensatz zum direkten Antrieb, der ohne Zylinder auskommt und bei dem die Brennstoff-Kügelchen unverhüllt mit Laserpulsen beschossen werden.

#### **Zündung im Tiefkühlmix**

Ziel der Forscher am NIF war es, Deuterium und Tritium so zu komprimieren und aufzuheizen, dass das tiefgefrorene Gemisch „zündet“ und danach selbsttätig abbrennt. „Wir wissen: Das passiert nur, wenn im Zentrum der Druck genügend lange gehalten wird“, erklärt LLNL-Physiker Omar Hurricane. Die Zündschwelle wird durch das sogenannte Lawson-Kriterium beschrieben. Es gibt vor, welchen Wert das Produkt aus Druck und Einschlusszeit erreichen muss. Der Druck ergibt sich dabei als das Produkt aus Teilchendichte und Temperatur.

Im Geschäft mit der Trägheitsfusion ist Omar Hurricane eine schillernde Figur: Der mehrfach ausgezeichnete Wissenschaftler beschäftigt sich vor allem mit Waffentechnik, etwa in einem Programm zur Kernwaffenüberwachung. Und auf der zivilen Seite der Entwicklung steuert er pfiffige Einfälle bei.



Auf Basis von Computersimulationen erhoffen sich Hurricane und sein Team folgenden Ablauf: Die 192 Laserstrahlen treffen mit Energiepulsen von 500 Terawatt Leistung durch zwei Öffnungen – je 96 von oben und von unten – auf die Innenseite des ein Zentimeter großen Hohlzylinders. In wenigen milliardenstel Sekunden heizen sie die Innenwand so stark auf, dass Röntgenstrahlung den kleinen Hohlraum füllt und die äußere Hülle des Pellets verdampft.

Die Folge: Der Rest der Kapsel implodiert unter der Druckwelle, die mit rund 350 Kilometern pro Sekunde durch sie hindurchschießt – einige Nanosekunden lang, bis die Materie im Zentrum ruckartig wieder zum Stillstand kommt. Der rabiante Kollaps treibt den Brennstoff dort auf die hundertfache Dichte von festem Blei und erhitzt ihn auf 100 Millionen Grad Celsius. Zum Vergleich: Im Zentrum der Sonne herrschen 15 Millionen Grad Celsius bei der zehnfachen Dichte von Blei. Dieser „Hotspot“ misst nur 60 Mikrometer und hält 150 Pikosekunden (trillionstel Sekunden) lang still. Dann explodiert er.

### Das Prinzip des Dieselmotors

Wenn in diesem winzigen Sekundenbruchteil die Fusion einsetzt, verschmelzen die Wasserstoff-Atome zu Helium-Kernen, den „Alphateilchen“. Zudem entstehen freie Neutronen, die nach außen davonschießen. Die Alphateilchen dagegen bleiben im Reaktionszentrum gefangen. Dort kollidieren sie direkt mit dem umgebenden hochverdichteten Brennstoff und heizen ihn weiter auf. „Das ist ein Selbstzünder wie bei einem Dieselmotor“, sagt der Darmstädter Physiker Roth. „Sobald das Brennstoffgemisch zündet, frisst sich in einer Kettenreaktion eine Brennwellen durch den Treibstoff.“ Diese Zündung sei der „Heilige Gral“ der Trägheitsfusion.

Allerdings: Der ehrgeizige Plan ging bislang nicht auf – aus mehreren Gründen. Immer wieder zerrissenen Instabilitäten die implodierende Kapsel, lange bevor der Brennstoff die nötige Dichte erreicht hatte. Zum Ärgernis wurde auch das Zelt, das die Pellets in der Kapsel in der Schwebe hält. „Die künstlichen Spinnfäden sind nur wenige Hundert Nanometer dünn“, sagt Markus Roth. „Dort, wo die Fäden am Pellet kleben, entstehen beim Ablösen leicht Instabilitäten – und zwar so gewaltige, dass sie beim Kollaps des Pellets die Symmetrie zerstören.“ Nun wollen die Forscher auf das Netz verzichten und die Kapseln nur noch an den Einfüllstutzen befestigen.

Einen Durchbruch meldete die NIF im August 2021. Der geballte Beschuss mit ihren 192 Lasern hatte ein Deuterium-Tritium-Kügelchen zu unerwartet hohem Energieausstoß gebracht. Von der „künstlichen Sonne im Laserlabor“ sowie einem „Meilenstein der Kernfusion“ mit Rekordleistung sprachen danach die Medien. Was war geschehen?

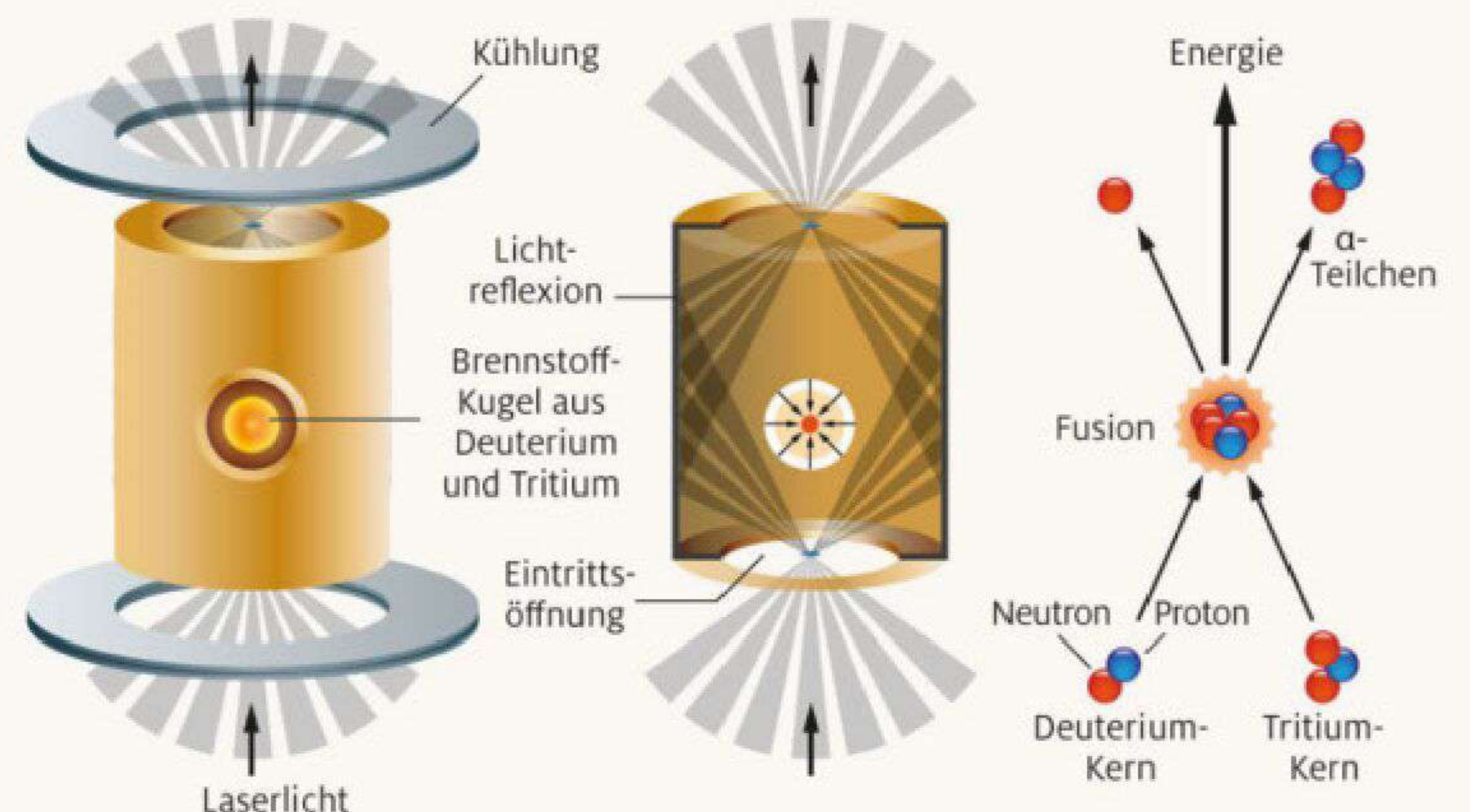
Die LLNL-Forscher hatten einige raffinierte Modifikationen vorgenommen, die Kapseln vergrößert, die Einkopplung der Laserenergie in die Pellets verbessert sowie die Symmetrie der Impllosionen besser gesteuert. Damit gelang es ihnen in vier „Schüssen“, die Fusionsreaktionen im Vergleich zu früheren Experimenten um ein Mehrfaches zu steigern.

Sie lieferten eine unerwartet hohe Energie von 1,35 Megajoule. Das entsprach rund 70 Prozent der 1,9 Megajoule an Laserenergie, die bei dem Experiment auf das gefrorene Kügelchen geschossen worden waren. Das war achtmal so viel wie in früheren Schüssen. Die Fachleute waren sich einig, dass die NIF damit tatsächlich einen brennenden Plasmazustand erzeugt hatte, bei dem das ionisierte Gas überwiegend sich selbst weiterheizte. Die produzierte Fusionsenergie übertraf damit – während des drei Nanosekunden langen Versuchs zumindest für die Dauer von 90 Pikosekunden (billionstel Sekunden), die Energieverluste an Strahlung und Wärmeleitung. Womöglich war damit „ein kleiner Stern geboren“.

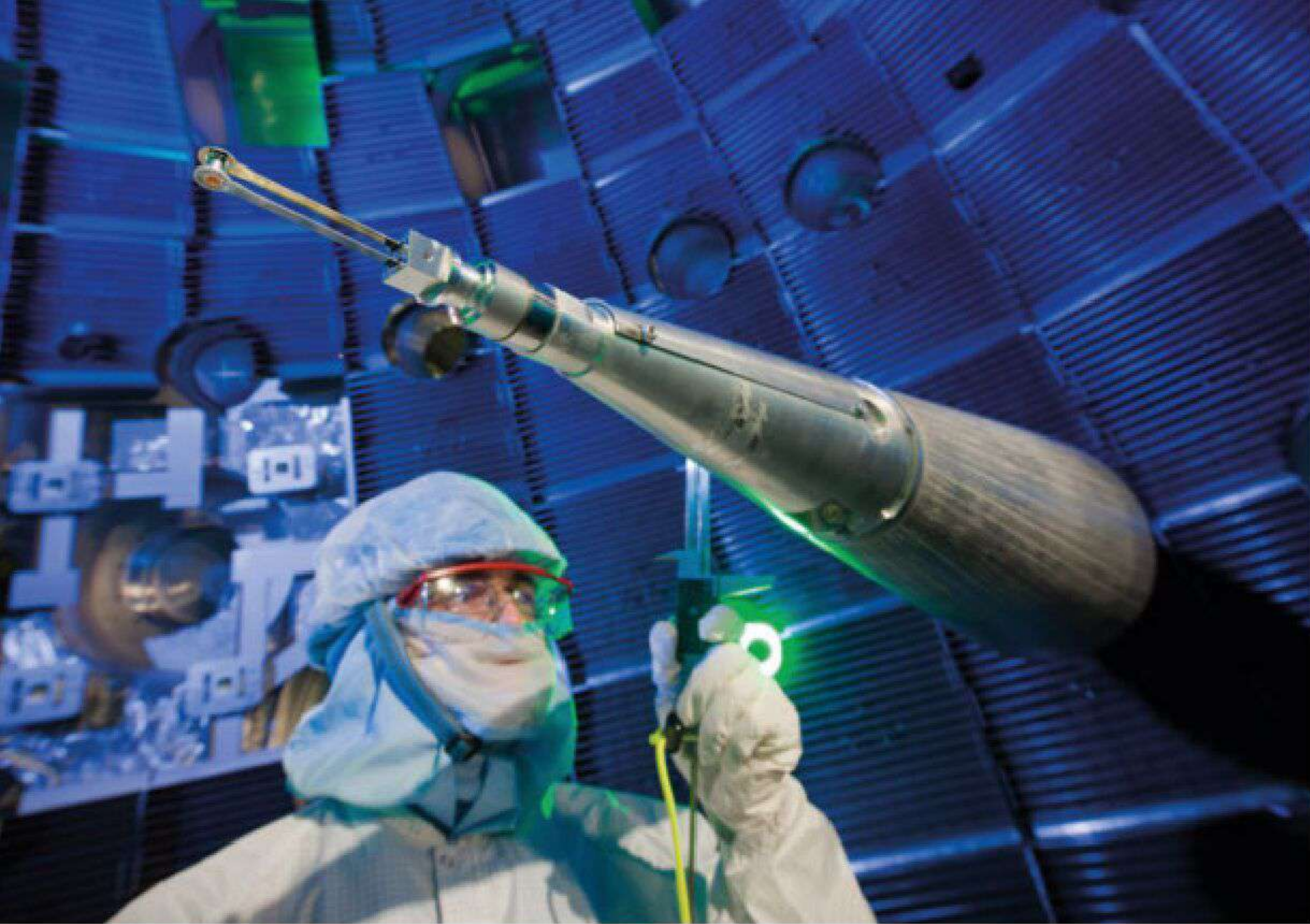
Allerdings: Ob das wirklich schon der erhoffte Durchbruch war, geriet seitdem in Zweifel. Weitere Versuche vom Herbst 2021 lieferten, wie NIF-Direktor Mark Hermann berichtete, nur 0,7 Megajoule an Fusionsenergie – also bloß 52 Prozent des Rekordschusses vom August. Woran das liegt, ist noch rätselhaft, gestand Mark Hermann. Bei solchen hochgradig nichtlinearen Prozessen könnten schon winzige Modifikationen von Kapseln und Lasern den Energieausstoß massiv beeinträchtigen. Für die Forscher, die sich mit dieser Variante der Kernfusion beschäftigen, liegt also auch noch reichlich Arbeit. ➤

### So funktioniert die Laserfusion

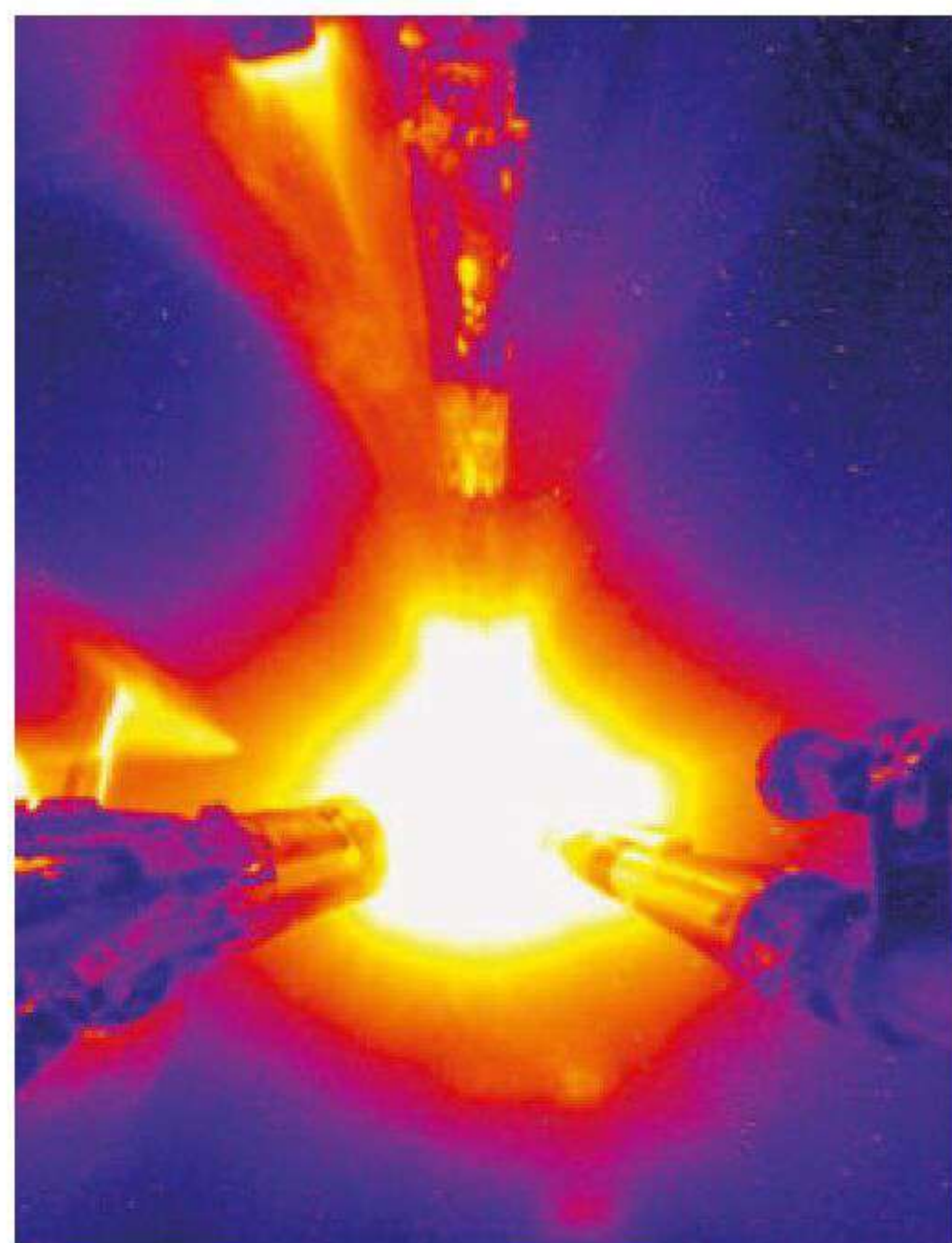
Die Brennstoff-Kugel wird in einem Zylinder durch UV-Laserlicht erhitzt. Es entsteht Röntgenlicht, die Kugel implodiert – und die Fusion zündet.







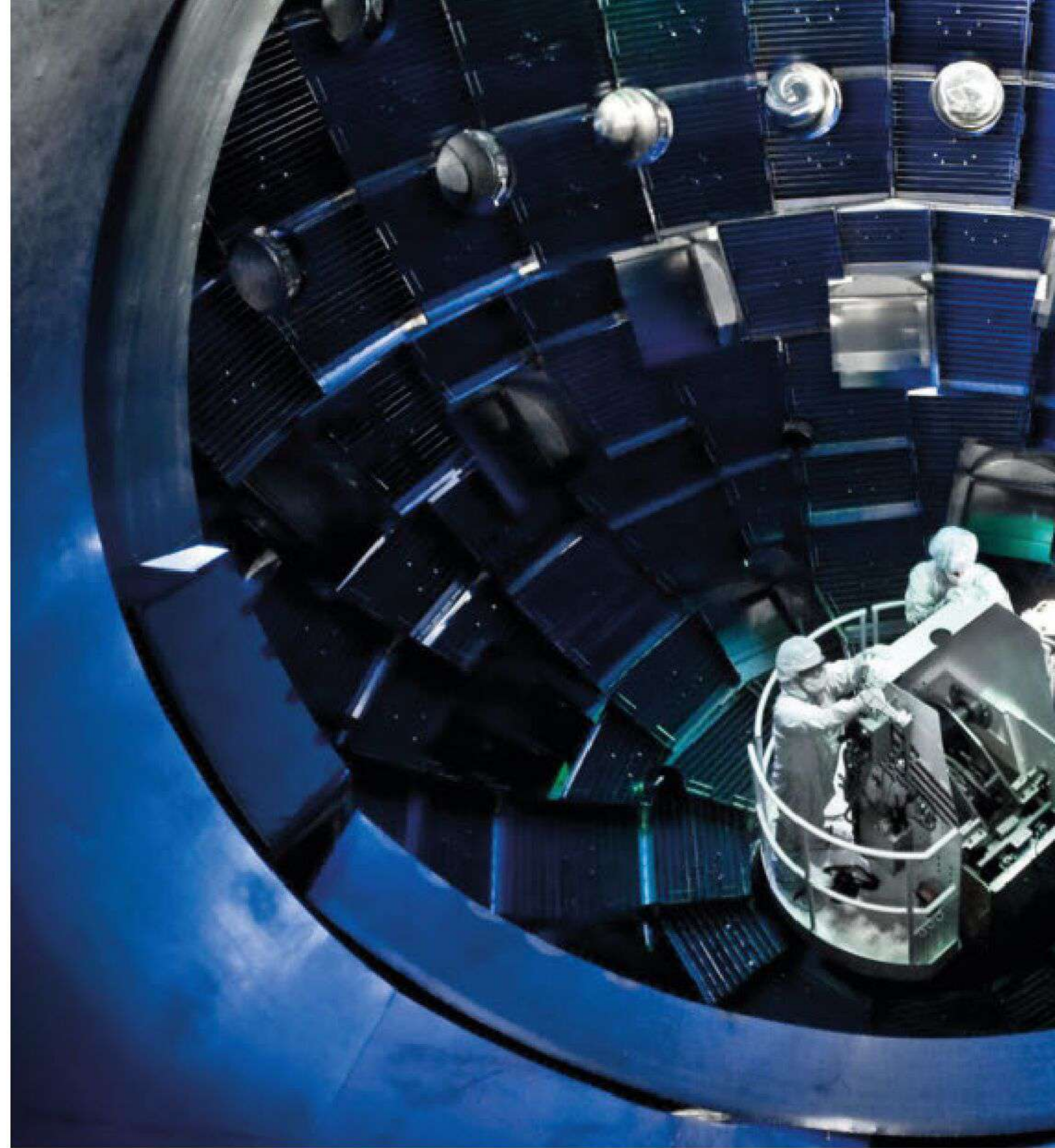
Vor dem Beginn eines Fusionsexperiments muss die Target-Kapsel behutsam positioniert werden (oben). Die Kapsel befindet sich im Inneren einer riesigen Halle mit spezieller Wandverkleidung (ganz rechts), die regelmäßig und aufwendig gewartet werden muss. Das kleine Bild rechts unten zeigt die eingefärbte Aufnahme der Implosion einer Target-Kugel aus den beiden Wasserstoff-Isotopen Deuterium und Tritium bei einem Versuch am 7. Februar 2016.



Am Geld ist der Erfolg bislang nicht gescheitert: Bis zur Fertigstellung 2009 hatten sich die Kosten auf 3,5 Milliarden Dollar summiert. Die Rechnung beglich das Militär, das großes Interesse an einer erfolgreichen Zündung hat. Denn zum einen entstehen bei der Kernfusion energiereiche Neutronen, mit denen sich dichte Materialien durchleuchten lassen. Zum anderen könnten die Militärforscher in der Anlage im kleinen Maßstab testen, wie gut ihre Computerprogramme sind, mit denen sie die Bewegung und Strömung der Pellets simulieren.

Eine Herausforderung sind die vergoldeten Hohlzylinder: „Man kann darin die gleichen Röntgenblitze erzeugen und die gleichen Dichten erreichen wie bei einer Kernexplosion“, sagt Markus Roth. „Sobald die Röntgenstrahlen entstanden sind, ist kaum noch ein Unterschied zwischen beiden Prozessen.“ Drei Jahre lang feuerten die Forscher am NIF auf die Pellets. Nach dem ursprünglichen Plan sollte es bis 2012 zur Zündung kommen. Doch da war gerade ein Zehntel der Zündbedingung von Lawson erreicht.

Inzwischen sind die Forscher zwar bei 50 Prozent des Lawson-Kriteriums angelangt. Doch das Ziel, einen Fusionsreaktor zu bauen, verfolgen sie nicht mehr. Trotzdem laufen die Experimente weiter. 2017 gab es einen neuen Zündversuch. Dabei trugen die



Alpha-Teilchen erstmals maßgeblich zur Aufheizung des komprimierten Brennstoffs bei – ein Meilenstein auf dem Weg zur Trägheitsfusion.

Auch bei drei weiteren Experimenten im Herbst 2021 haben, wie der NIF-Direktor erklärt, die Alpha-Teilchen das umgebende Plasma der Wasserstoff-Kügelchen zusätzlich aufgeheizt. Als Ziel für die nächste Zeit haben sich die Forscher vorgenommen, mehr des Brennstoffs nuklear zu verbrennen. Auch der Rekordschuss vom August 2021 habe nur 1,6 Prozent des tiefgefrorenen Brennstoffs verbrannt. Das sei noch zu wenig, meint Bedros Afeyan, Experte für Laserplasmen am LLNL und in Los Alamos. Noch unverstanden sei, warum der Brennvorgang so früh aufhöre, betont er: „Erst wenn die Hälfte des Deuterium-Tritium-Gemischs fusioniere, wäre das wirklich ein Erfolg.“

#### Die Implosion bereitet Kopfzerrbrechen

Woran die Physiker bei der Jagd nach der Fusionszündung bislang gescheitert sind, ist die komplizierte Physik der Implosion. Auch der Aufbau der Kapseln und das Feintuning des Laserpulses fordern die Forscher heraus. „Wir hatten unsere Computermodelle zu weit extrapoliert“, sagt Omar Hurricane. „Das gleicht einer Wettervorhersage über sechs Monate, wo doch höchstens eine Woche realistisch ist.“

Das Ende der Hoffnung auf die Trägheitsfusion bedeutet das nicht. Vielmehr wurde den Forschern klar, wie viel spannende und anwendungsträchtige Physik es in ihrem Umfeld zu entdecken gibt. Das Interesse an Hochleistungslasern scheint sogar zu wachsen. Japan, China und Russland bauen an neu-





en Kurzpuls-Lasern mit Rekordleistungen. Zudem entsteht in Frankreich nahe Bordeaux „Laser Mégajoule“: eine Anlage, die bis auf eine Pulsleistung von zwei Petawatt ausgebaut werden soll – viermal so viel wie beim NIF. Und im Rahmen eines EU-Projekts werden in Tschechien, Rumänien und Ungarn drei Anlagen der „Extreme Light Infrastructure“ (ELI) gebaut. Ein vierter Standort für einen Laser mit 200 Petawatt Leistung soll hinzukommen. Das wäre dann der intensivste Laser weltweit.

Wo steht die Trägheitsfusion zurzeit? Und wie wollen die Laserphysiker die Zündung doch noch schaffen? Bisher folgten die Forscher am NIF dem Prinzip des Dieselmotors: Die Kapsel wird beim Laserbeschuss komprimiert, und ab einem bestimmten Druck zündet der Brennstoff von selbst. Doch die Zündung wurde so nicht erreicht. Eine neue Idee baut auf einen anderen Ansatz: „Zum Zeitpunkt der maximalen Verdichtung muss zusätzlich ein Zündfunke gesetzt werden“, erklärt Markus Roth. „Ein zweiter kurzer Laserpuls, der eingeschossen wird und im Zentrum die Zündung auslösen soll.“ Das entspricht der Technik beim Ottomotor. Experten nennen es „schnelle Zündung“.

Doch das bringt ein neues Problem. Denn der zweite Laserpuls stoppt bei einer bestimmten Dichte des ausströmenden Plasmas. Der Zündimpuls soll aber erst „dahinter“ in Richtung Zentrum die Temperatur erhöhen. Die Lösung mutet fantastisch an: Man fräst in das Kügelchen einen winzigen hohlen Kegel aus Gold (einen „Goldkonus“), dessen Spitze bis fast ins Zentrum der Kapsel reicht. Ob sich dadurch eine Zündung realisieren lässt, ist noch offen

– ebenso wie die Frage, ob der Goldkonus für einen Reaktorbetrieb tauglich wäre.

Wie ein Laserfusionskraftwerk aussehen könnte, davon haben die Physiker detaillierte Vorstellungen. Zentraler Punkt: In der Anlage müssten fast ununterbrochen und mit hoher Schussrate Brennstoffkapseln gezündet werden. Mit dem derzeit am NIF verwendeten Neodym-Glaslaser gelingt aber nur ein Schuss pro Tag. Nötig sind geschätzte zehn Schüsse – pro Sekunde! Ein solcher Reaktor sollte also 860.000 Laserpulse am Tag abfeuern können.

### Fast eine Million Hohlzylinder pro Tag

Täglich bräuchte man dazu außer den Kapseln auch 860.000 Hohlzylinder, die alle bei den Mikroexplosionen verdampfen. Kernphysiker Roth ist skeptisch: „Das Verfahren erscheint mir nicht praktikabel. Wenn Trägheitsfusion zur Energiegewinnung beitragen soll, muss sie einfach sein.“ Das spräche für einen direkten Antrieb: das Prinzip, mit allen Lasern – ohne Zwischenschalten eines Hohlraumzylinders – auf die Brennstoffkapseln zu feuern. Die dabei gefürchteten Instabilitäten würden sich per Laser vielleicht unter Kontrolle halten lassen. Ein weiterer Vorteil: Beim direkten Antrieb bleiben die 90 Prozent der Energie erhalten, die sonst im Hohlzylinder beim Verwandeln von Laserlicht in Röntgenstrahlung verloren gehen.

Und wie lassen sich pro Sekunde zehn Kapseln mit tiefgefrorenem Wasserstoff in eine mehrere Meter große Reaktorkammer schießen? Die Antwort der Physiker: Aus einem Vorratsbehälter werden die Pellets über eine „Kanone“ in die Kammer gefeuert – mit einer Überschallgeschwindigkeit von rund 2,5 Kilometern pro Sekunde.

Das ist dreimal so schnell wie eine Gewehrkugel. Im regulären Reaktorbetrieb würde das so aussehen: Im Reaktionsgefäß hat bei der dichten Schussfolge 100 Millisekunden zuvor die vorausgehende Kernexplosion stattgefunden – und die Kammer ist noch gefüllt mit heißem Restgas. Dort hinein fliegt bereits die nächste gefrorene Brennstoffkapsel. Sie muss in der Mitte der Kammer landen und darf an der Vorderseite nicht heißer sein als auf der Rückseite. Doch das Restgas in der Reaktorkammer enthält noch Wasserstoff. Dazu mischen sich Ausdünstungen der Reaktorwand, über die geschmolzene Salze laufen. Die Wand wird zehnmal pro Sekunde von Röntgenblitzen und Neutronen aufgeheizt. Die thermische Beanspruchung gleicht der beim Wiedereintritt einer Raumkapsel in die Erdatmosphäre.

Der Laser muss durch das widrige Gasmisch hindurchfeuern und das zwei Millimeter kleine Kügelchen, das mit Überschalltempo durch den Mittelpunkt der Kammer rast, exakt im richtigen Augenblick treffen. Und das zehn Mal in jeder Sekunde. ■



---

# Die Wiege des Wasserstoffs

---

KAPITEL 04









# Am Anfang war der Wasserstoff

Kein anderes chemisches Element ist im Universum auch nur annähernd so reichlich vorhanden wie der Wasserstoff. Was ist der Grund dafür? Und wie beeinflusste das allgegenwärtige Gas die Entwicklung des Lebens?

von REINHARD BREUER

**E**s mag nicht so aussehen, aber wir bewegen uns ständig durch ein Meer von Wasserstoff. Mit Planeten wie der Erde im Beipack, treibt unser Heimatstern seit Milliarden Jahren am Rande einer durchschnittlichen Galaxie durch ein Universum, das vorwiegend mit diesem Gas gefüllt ist. Beimischt ist dem galaktischen und intergalaktischen Wasserstoff-Gas eine Portion Helium. Von anderen chemischen Elementen hingegen gibt es im Vergleich dazu nur Spuren.

Astronomen schätzen, dass der Kosmos in Anteilen der Masse, neben 25 Prozent Helium, zu rund 73 Prozent mit Wasserstoff gefüllt ist. Alle übrigen Atomsorten machen zwar nur zwei Prozent aus, sind aber für unsere Lebensgrundlagen und das Leben selbst von existenzieller Bedeutung. Doch woher stammt all der Wasserstoff, der auf der Erde vorwiegend im Wasser gebunden ist?

Atome besitzen eine feste Zahl an subatomaren Bestandteile: Protonen (elektrisch positiv geladen), Neutronen (elektrisch neutral) und Elektronen (negativ geladen). Mit nur einem Proton im Verbund mit einem Elektron firmiert der Wasserstoff als

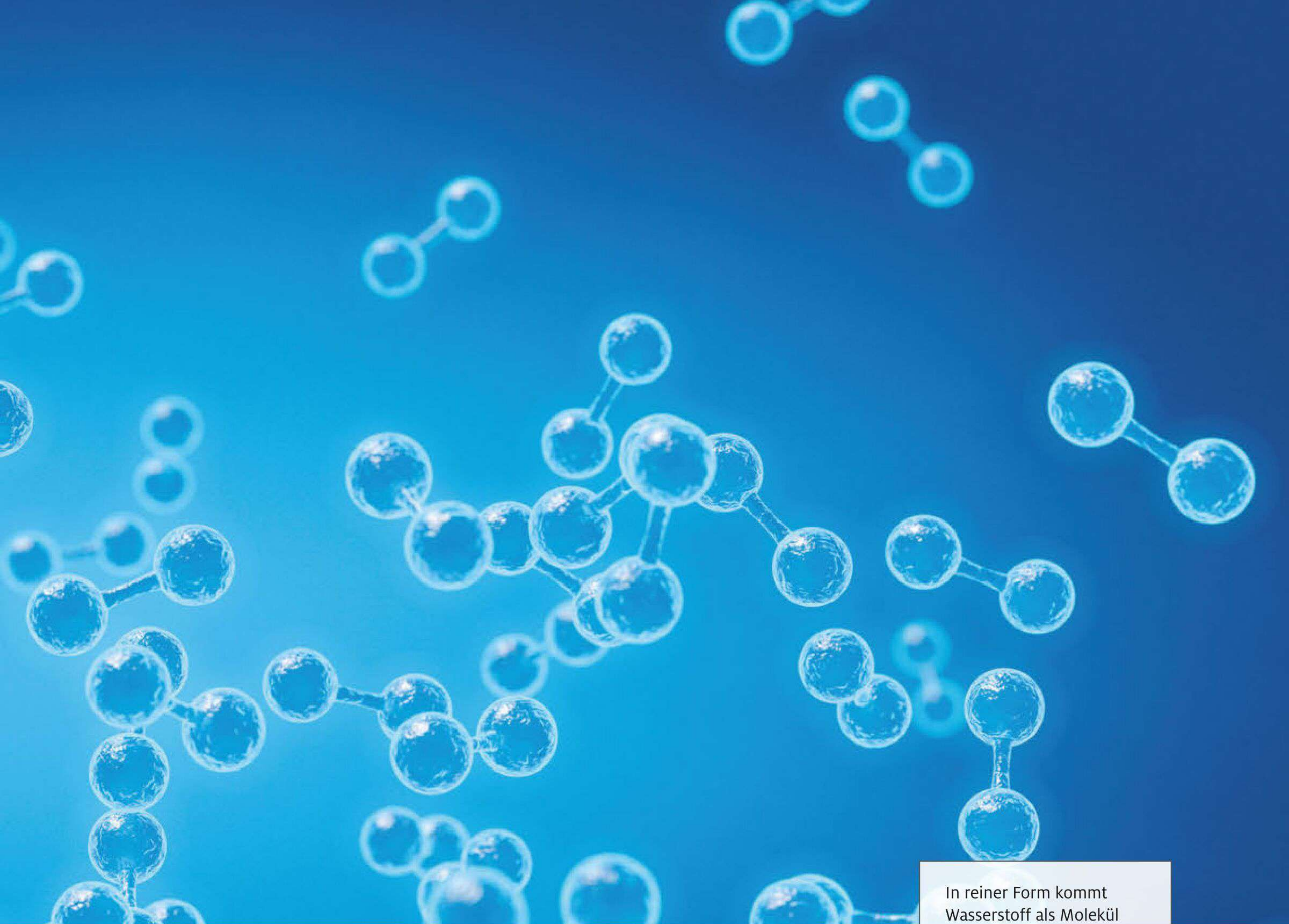
einfachstes chemisches Element der Natur. Beim Helium bündeln sich im Atomkern zwei Protonen, die von zwei Elektronen umrundet werden.

## Das kosmische Ur-Inferno

Die Suche nach der Herkunft dieser leichtesten Atome führt zwangsläufig zu einigen höchst dramatischen Ereignissen – hauptsächlich in der kosmischen Frühzeit, bis zurück zum Urknall. Dort, oder besser: damals, in der allerfernsten Vergangenheit, soll nach dem heute akzeptierten Weltbild das Universum entstanden sein – mit Raum, Zeit, sämtlichen Naturgesetzen sowie einem kosmischen Inferno anfangs unvorstellbar heißer Materie. Wie die Kosmologen meinen, katapultierte sich der Kosmos vor exakt 13,7 Milliarden Jahren in seine Existenz. Zum Vergleich: Die Erde entstand vor rund 4,5 Milliarden Jahren. Seit dem Urknall expandiert das Weltall, alle Materie kühlte sich rasch ab und ermöglichte später das Auftreten verschiedener materieller Strukturen – etwa Galaxien, Sterne und Planeten.

Dieser Beginn von Allem bleibt bis heute umwoben von Geheimnissen und Rätseln. Der belgische





In reiner Form kommt Wasserstoff als Molekül aus zwei Atomen vor ( $H_2$ ).

Astronom Georges Lemaître sprach erstmals 1931 von der „Geburt des Raumes“, 1949 prägte der Brite Fred Hoyle kritisch den Begriff „Big Bang“ – die englische Bezeichnung für den Urknall. Physikalisch beschreibt das die Geburt des Universums aus einem unendlichen heißen, unendlich dichten und unendlich kleinen Zustand, der sogenannten Urknall-singularität. In den letzten Jahrzehnten begaben sich Kosmologen auf eine kriminalistische Reise, um die Rätsel und Widersprüche dieses Szenarios zu entschlüsseln – und bis heute sind sie damit nicht am Ziel. Der Wasserstoff bildet darin zwar nur eine materielle Spur, ist aber untrennbar mit dem Gesamtschicksal des Universums verknüpft.

#### **Atemberaubende Entwicklung**

Innerhalb der ersten kosmischen Sekunde war das Universum noch zu heiß und dicht, um bereits elektrisch neutrale Atome zuzulassen. Doch zwischen der ersten billionstel Sekunde und dem Ende der ersten Mikro-, also tausendstel Sekunde entstand schon eine Fülle von Elementarteilchen – darunter Neutrinos, Quarks und Elektronen. Wenig später,

bis zum Ende der ersten Sekunde, formierten sich schließlich die Nukleonen – die Bausteine der Atomkerne –, darunter Protonen und Neutronen. Es herrschte die Ära der sogenannten Urknall-Nukleosynthese. Einige dieser Urpartikel fusionierten dann weiter zu Helium-Atomkernen, doch nach rund 20 Minuten endete auch diese kosmische Entwicklungsphase.

Erst nach weiteren 380.000 Jahren bildeten sich erste Atome von Wasserstoff und Helium. Das war möglich, weil sich zu diesem Zeitpunkt das kosmische Urgas hinreichend verdünnt und auf nur mehr 4000 Grad Celsius abgekühlt war. Elektronen, die sich von Protonen einfangen ließen, konnten ab jetzt gebunden bleiben – eine bedeutende Periode der Entwicklung des Universums. Der hauptsächlich von Wasserstoff erfüllte Kosmos war entstanden. Das war auch der Zeitpunkt, zu dem die kosmische Hintergrundstrahlung entstand: Die atomar gebundenen Elektronen erreichten rasch einen Zustand mit der quantenphysikalisch niedrigsten möglichen Energie und stießen dabei überschüssige Energie in Form von Photonen aus, die sich nun un-





gebremst und ungehindert ausbreiten konnten – das Universum wurde transparent. Es war erfüllt mit energiearmer Strahlung, die bis heute das Universum erfüllt. Dieses ist inzwischen bis auf minus 270 Grad Celsius abgekühlt, 2,7 Grad über dem absoluten Nullpunkt der Temperatur.

### Nukleonen, Quarks und Kraftteilchen

Allerdings: Dieser Werdegang des Wasserstoffs erklärt noch nicht den Ursprung seiner Bestandteile, der Elektronen sowie der Protonen und Neutronen. Letztere sind aus noch kleineren Partikeln zusammengesetzt, den sogenannten Quarks. Die wiederum werden zusammengeschweißt von den Kraftteilchen der starken Wechselwirkung, Gluonen genannt. Innerhalb der Nukleonen sind Quarks so stark aneinandergebunden, dass es normalerweise unmöglich ist, sie aus ihrem Verbund zu befreien.

Beim Urknall war das anders. Wie in jeder guten Küche mussten die Zutaten für das Universum zunächst in einer bestimmten Phase des Urknalls produziert werden. Das geschah bereits in der ersten

millionstel Sekunde bei einer unvorstellbaren Hitze von Tausenden Milliarden Grad. Die physikalischen Zustände dieser frühesten Phase zu erkunden, ist naturgemäß schwer bis unmöglich. Außer durch Messungen an der kosmischen Hintergrundstrahlung gibt es kaum Möglichkeiten, den Feuerball am Anfang von Raum und Zeit direkt unter die Lupe zu nehmen.

Das betrifft nicht nur das Rätsel, was der, mathematisch gesprochen, „singuläre“ Anfang von Raum und Zeit eigentlich war. Denn physikalisch sind Singularitäten mit ihren Unendlichkeiten nicht Teil unseres – in allen Zustandsgrößen stets endlichen – physikalischen Kosmos. Theoretiker versuchen zwar bereits seit Langem, diese harte Nuss zu knacken, indem sie beispielsweise die Singularität aus ihren Formeln verbannen und den Urknall als eine Art heißen, aber endlichen Zwischenknall modellieren. Doch dabei ringen sie bis heute um ein schlussiges Gesamtkonzept.

Auch nach dem bizarren Beginn blieb der kosmische Urzustand aus Strahlung und Energie noch eine Weile undurchdringlich. Von einer ersten Phase, wo alle vier Naturkräfte – Gravitation, Elektromagnetismus, starke und schwache Kernkraft – in unisono agierten, erreichte die Ursuppe über Zwischenphasen die sogenannte Hadronen-Epoche. In diesem Moment, noch im Verlauf der ersten Sekunde, war die Temperatur auf „kühlere“ zehn Milliarden Grad abgesackt. Die Situation des Weltalls zu diesem Zeitpunkt: Die Fundamentarteilchen bildeten ein sogenanntes Plasma frei beweglicher, unabhängiger Quarks, gemischt mit den sogenannten Gluonen als Vermittler der starken Kernkraft – das sogenannte Quark-Gluonen-Plasma.

Die Quarks konnten nun zu Protonen und Neutronen verschmelzen. In Verbindung mit den Elektronen existierten damit die wichtigsten Zutaten für den Wasserstoff. In den ersten 3 bis 20 Minuten fabrizierte der Urknall schließlich die ersten Atomkerne: neben Protonen – also leichtem Wasserstoff – und dem Wasserstoff-Isotop Deuterium auch Helium sowie Spuren von Lithium. Der Urknall hatte das Ende seiner Atomkern-Produktion erreicht.

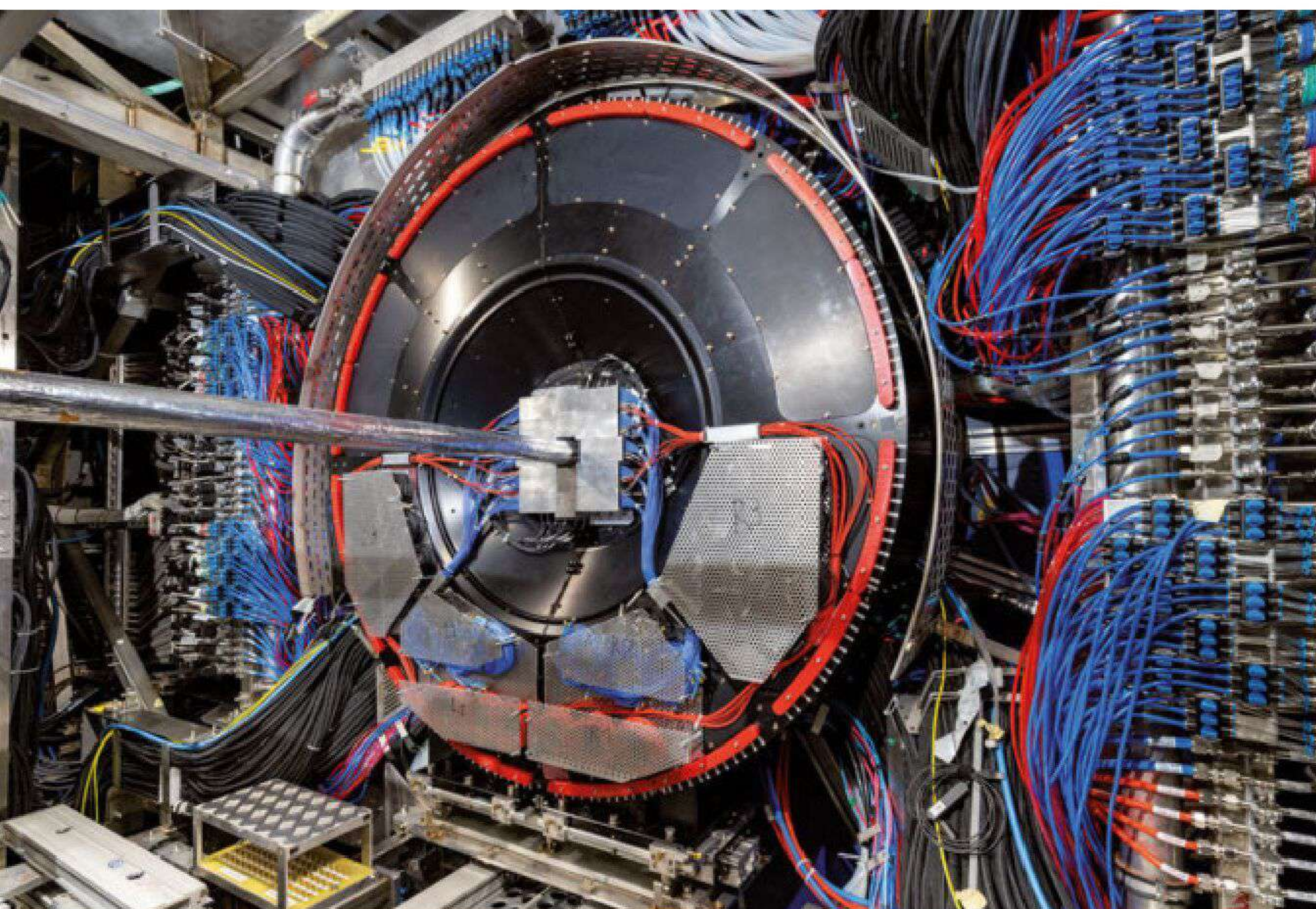
### Der Trick mit dem Crash

Dass Physiker solche Zustände aus dem Urknall auf der Erde erzeugen können, grenzt fast ein Wunder. Der Trick: Die Forscher lassen schwere Atomkerne, etwa von Gold oder Blei, mit 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen. Das geschieht beispielsweise am Large Hadron Collider (LHC) des Forschungszentrums CERN bei Genf – mit zum Teil verblüffenden Resultaten.

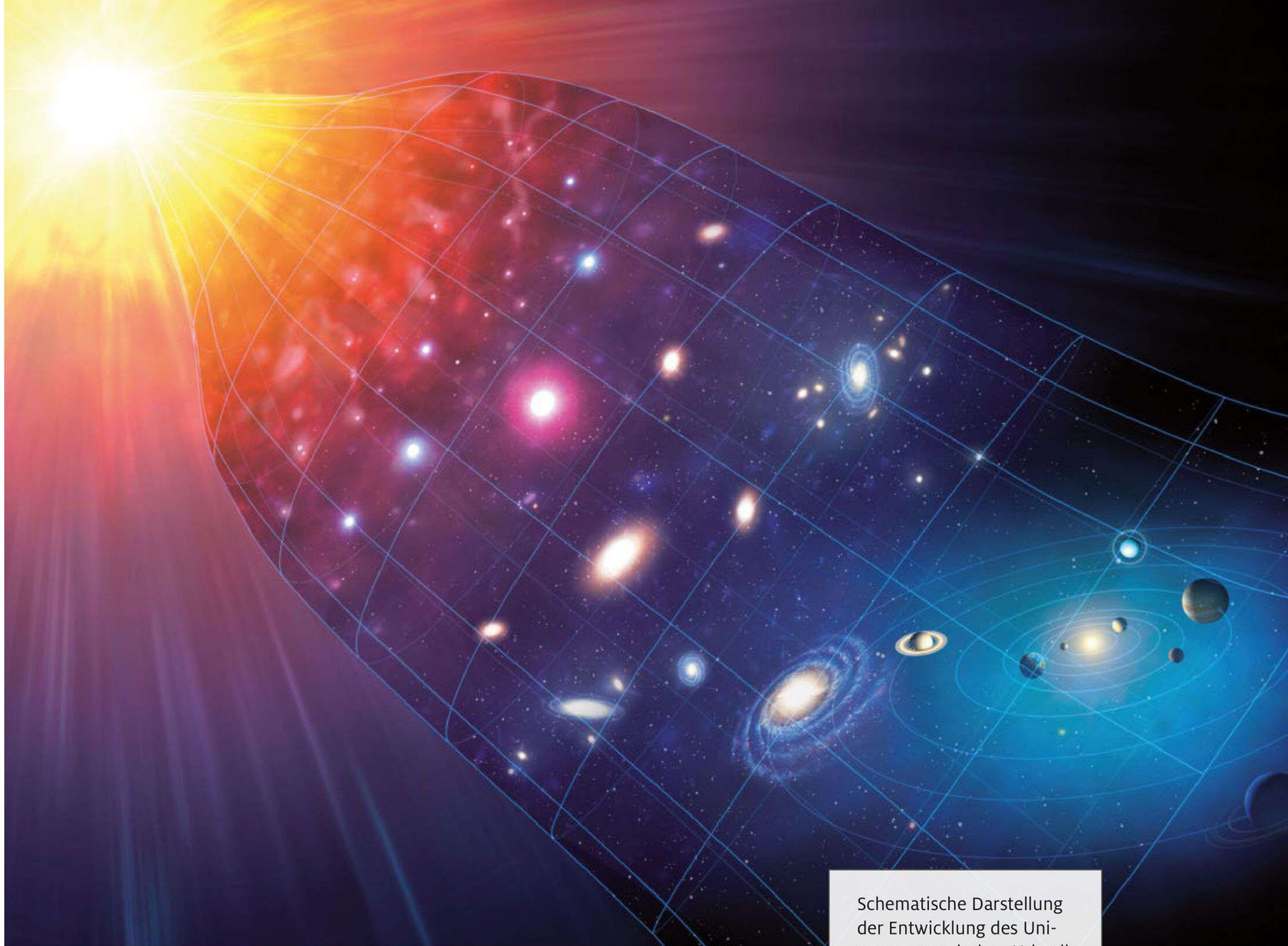
Tief unter der Erde am LHC steht der Detektor ALICE („A Large Ion Collider Experiment“) – eine



Kein anderes Atom ist einfacher aufgebaut als das des Wasserstoffs: Um den Atomkern kreist – im vereinfachten, klassischen Bild – ein einzelnes Elektron (links). Der Kern besteht beim normalen Wasserstoff aus einem Proton. Um die Eigenschaften der Materie zu erforschen, nutzen Wissenschaftler am CERN bei Genf komplizierte experimentelle Anlagen (unten).







Schematische Darstellung der Entwicklung des Universums nach dem Urknall.

rund 10.000 Tonnen schwere Forschungsanlage, 26 Meter lang, 16 Meter im Durchmesser, an der rund tausend Forscher arbeiten. Mit kollidierenden Blei-Ionen erzeugen sie eine Art „Mini-Urknall“. Dabei herrschen ähnliche Bedingungen wie während der ersten Mikrosekunden des Kosmos. Am LHC geschieht das 500-mal das pro Sekunde – seit Januar 2022, nach einem zwei Jahre dauernden Umbau, sogar bis zu 50.000-mal. Den Physikern geht es bei den Experimenten vor allem um den Übergang zwischen Quark-Gluon-Plasma und normaler Materie – darunter die Protonen und Neutronen, aus denen letztlich die ganze Welt besteht.

„Ähnlich wie im Urknall geschieht das bei rund 1000 Milliarden Grad Celsius“, sagt Johanna Stachel. Die Teilchenphysikerin von der Universität Heidelberg arbeitet seit etlichen Jahren am ALICE-Detektor des LHC in Genf. Doch das Quark-Gluonen-Plasma, das bei der Kollision zweier Blei-Atome entsteht, überdauert lediglich eine kürzere Zeit und enthält weniger Energie als während der Hadronen-Ära im Urknall.

Gleichwohl stößt jeder dieser mikroskopischen Feuerbälle fast 30.000 Teilchen aus – darunter neben einem ganzen Salat von weiteren Hadronen

auch Protonen sowie vereinzelt sogar Atomkerne des überschweren Wasserstoffs Tritium oder Helium. Damit gelingt es zumindest teilweise, auch den Ursprung des Wasserstoffs im Kosmos durch Labor-experimente nachzuvollziehen.

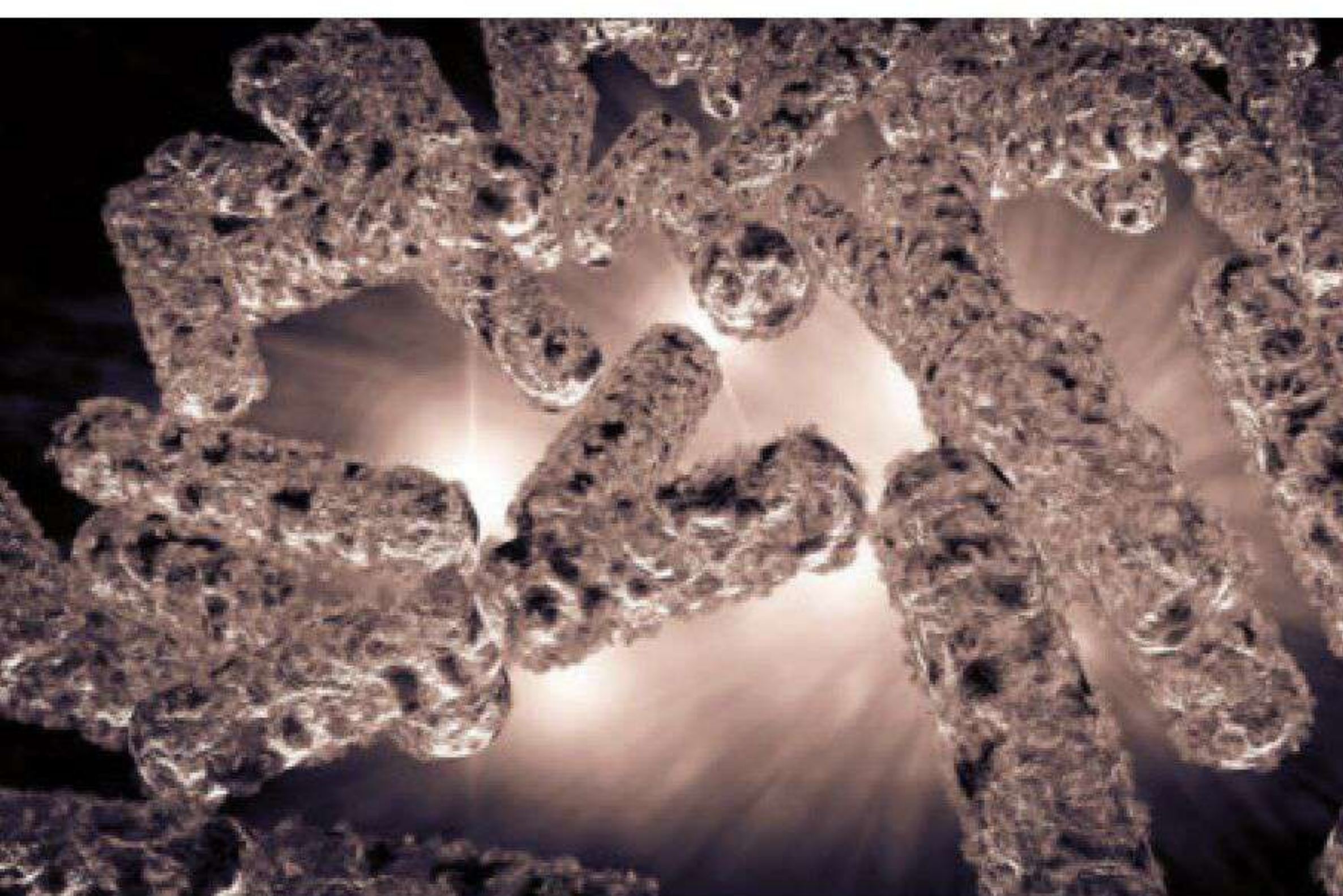
#### **Der Akt der Sternentstehung**

Doch diese Phase bildete nur den ersten Akt der Wasserstoff-Historie. In einem zweiten Akt, rund 400 Millionen Jahre später, bildeten sich die ersten Sterne in Wolken aus Wasserstoff, die unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabierten und dabei immer dichter und heißer wurden. Etwas später, vor rund 4,6 Milliarden Jahren, formierten sich nach demselben Mechanismus auch die Sonne und ihre planetaren Trabanten, darunter die Erde. Die Energie aus dem Gravitationskollaps versorgt noch heute alles irdische Leben.

Der dritte Akt des kosmischen Wasserstoff-Dramas brachte schließlich den Durchbruch. Als die Temperatur auf der Oberfläche unter 100 Grad Celsius sank, kondensierte auf der Erdoberfläche eine besondere chemische Verbindung: Dihydrogenoxid. In dieser auch als „Wasser“ bekannten Flüssigkeit konnte nun auch Leben entstehen.







Funde an heißen Unterwasservulkanen, sogenannten Black Smokers (oben), belegen: Es gibt Lebewesen, die ohne Sauerstoff auskommen und in einer Umgebung aus Wasserstoff existieren können. Das haben US-amerikanische Forscher auch in Laborexperimenten an Kulturen des Bakteriums *Escherichia coli* (links) sowie an Hefen belegt.

Die Astronomen schätzen, dass der Wasserstoff heute rund 90 Prozent aller Atome im Universum stellt. Und das betrifft uns auch ganz persönlich: Etwa zwei Drittel des menschlichen Körpers bestehen aus Wasserstoff. Die Uratmosphäre unseres Planeten enthielt kaum Sauerstoff, dafür reichlich Wasserstoff. Doch um ihn als chemischen Treibstoff zu nutzen, mussten erst spezielle Organismen entstehen. In der Frühzeit der biologischen Evolution entwickelten sich Bakterien mit einer Art von Enzymen, sogenannten Hydrogenasen, die aus Wasserstoff, aber auch aus Wasser, Energie gewinnen konnten. Obwohl die Erde heute von einer sauerstoffreichen Atmosphäre umhüllt ist – die Voraussetzung für das Leben an seiner Oberfläche –, existieren etwa in der Tiefsee immer noch Organismen, die weiterhin von Wasserstoff leben.

Zum Beispiel an hydrothermalen Quellen oder „Schwarzen Rauchern“ am Meeresgrund: Dort herrscht ein munteres Treiben. In vulkanischen Schloten erreicht erhitztes Magma die obere Erdkruste und gerät in Kontakt mit Seewasser. An diesen bis zu 400 Grad Celsius heißen Quellen spuckt die Erde Mineralien und Nährstoffe in den stockdunklen Ozean, aber auch den für die meisten Tiere

tödlichen Schwefelwasserstoff. Kohlenmonoxid strömt aus, dazu Methan und nicht zuletzt Wasserstoff. Dennoch gedeihen in dieser, eigentlich lebensfeindlichen Zone Tiere: Würmer, Muscheln und Krabben. Sie trotzen der tödlichen Gefahr durch einen Kniff: Die Unterwasser-Lebewesen haben sich im Laufe ihrer Evolution Bakterien einverleibt, die den Schwefelwasserstoff oder das Methan chemisch umsetzen und damit unschädlich machen.

### Ein allem Leben gemeinsamer Vorfahre

Woher stammen diese Bakterien? Die Antwort darauf ist ein Teil der Erklärung dafür, wie das Leben auf der Erde entstand. Demnach stammen vermutlich alle Lebewesen von einem gemeinsamen Vorfahren ab, der vor mindestens 3,5 Milliarden lebte. Jessica Wimmer arbeitet am Institut für Biologische Evolution der Universität Düsseldorf. Die Biologin und ihr Team erforschen den hypothetischen Ahnen allen irdischen Lebens, den Fachleute als LUCA bezeichnen. Das Kürzel steht für den englischen Begriff „Last Universal Common Ancestor“. Dieser älteste Vorfahr glich noch mehr einer primitiven Zelle, ausgestattet nur mit einem rudimentären Stoffwechsel. Wie schaffte er es, erste Stoffwechselreaktionen aufzubauen – die Basis für alle späteren Organismen? Lief das alles „autokatalytisch“, also wie von selbst ab, oder wurden die Prozesse durch Energie von außen angetrieben?

Jessica Wimmer und ihr Team berichteten im Dezember 2021 in der Fachzeitschrift „Frontiers in Microbiology“, dass die Urzelle ihre Energie hauptsächlich aus Wasserstoff bezogen hat – und dazu keine externe Energiezufuhr benötigte. Wie das gelingen konnte, haben die Düsseldorfer Forscher durch Laborversuche und Computersimulationen herausgefunden.

### Das Wirken der Urzellen

Grundlage dafür war die Situation auf der Erde vor 4,3 Milliarden Jahren, als sich erstmals flüssiges Wasser bildete, und in der Zeit vor 3,8 Milliarden Jahren. Damals tauchten auf der Erde die ersten Spuren von Leben auf. Aus zunächst einfachen, spontan ablaufenden geochemischen Reaktionen entwickelte sich in Mikroben rasch ein Reaktionsnetzwerk, das durch Enzyme katalysiert, also befeuert, wurde. Dieser Metabolismus war bereits in der Lage, Aminosäuren, Nukleotide – die Bausteine des zellulären Erbguts – sowie Vitamine zu produzieren, die für Synthese und Wachstum von Proteinen gebraucht wurden.

Um dem archaischen Metabolismus auf die Spur zu kommen, identifizierten die Düsseldorfer Biologen rund 400 chemische Einzelreaktionen, in denen entsprechende Prozesse ablaufen. Diese chemi-





Auf fremden Planeten sind auch Lebensformen denkbar, die sich deutlich von irdischen unterscheiden.

schen Reaktionen sind universal – und deshalb auch ein zentraler Teil des biosynthetischen Metabolismus in dem letzten gemeinsamen Vorfahren der heutigen Lebewesen, erklärt Wimmer. „Das zeigt, dass sich diese Basisreaktionen nicht sehr verändert haben, seit es lebende Organismen gibt.“

Für die 400 von dem Team betrachteten Einzelreaktionen hat sich herausgestellt, dass fast alle autokatalytisch – also spontan – ablaufen und Energie liefern. Die notwendigen Voraussetzungen dafür: Die Temperaturen müssen zwischen 80 bis 100 Grad Celsius liegen, das umgebende Wasser muss chemisch neutral oder höchstens leicht alkalisch sein und die Basisstoffe des Lebens müssen vorhanden sein – nämlich Wasserstoff, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Phosphate und Ammoniak. „Dieser Prozess trieb und treibt alle Ökosysteme an“, sagt Jessica Wimmer: „von ihren Ursprüngen bis heute.“

Diese Erkenntnis führt zurück auf den Meeresgrund. Auch bei den „Schwarzen Rauchern“ der heißen Tiefseequellen finden Bakterien ein vergleichbares Ambiente vor. Kein Wunder, dass die Wissenschaftler es für möglich halten, dass da Leben auf der Erde an solchen Orten seinen Ursprung nahm.

#### **Leben auf fernen Wasserstoff-Welten?**

Auf einem Exoplaneten, weit außerhalb des Sonnensystems, könnte das anders aussehen. Wie ein Team von Astronomen um Sara Seager am Massachusetts Institute of Technology (MIT) im US-amerikanischen Cambridge 2020 berichtete, sind unter den vielen bekannten Planeten unserer Galaxie auch solche mit Atmosphären denkbar, die zwar viel Wasserstoff enthalten, aber dennoch hochentwickeltes Leben beherbergen. So ist für einige irdische

Mikroben wie jenen an Tiefseevulkanen das Leben in Wasserstoff statt Luft kein Problem: Sie gedeihen sogar in einer reinen Wasserstoff-Atmosphäre. Deshalb sind auch in möglicherweise existierenden fernen Wasserstoff-Welten ähnliche Lebensformen vorstellbar, wie es sie auf der Erde gibt.

Die Forscher am MIT untersuchten, wie sich Laborkulturen des Bakteriums *Escherichia coli* und von Hefen bei einer vollständig aus Wasserstoff bestehenden Atmosphäre entwickeln. Der Sauerstoffmangel ist dabei kein entscheidender Faktor: Wie viele andere Mikroben auch können *E. coli*-Bakterien und Hefen beim Fehlen von Sauerstoff auf alternative Stoffwechselwege umschalten, um Energie zu gewinnen.

#### **Aufschlussreiche Experimente**

Die Versuche der US-amerikanischen Wissenschaftler zeigten: Die *E. coli*- sowie die Hefekulturen wuchsen problemlos in einem Nährmedium unter einer reinen Wasserstoff-Atmosphäre – nur etwas langsamer als in Luft: *E. coli* vermehrte sich etwa halb so schnell, das Entwicklungstempo der Hefe verringerte sich sogar auf weniger als ein Hundertstel. Die Wissenschaftler führen diesen Effekt aber nur auf den weniger effektiven Stoffwechsel der Mikroorganismen unter anaeroben, also sauerstofffreien, Bedingungen zurück.

„Wir haben erstmals klar bestätigt, dass irdische Organismen auch in wasserstoffreichen Atmosphären überleben können“, resümiert Sara Seager. Die MIT-Forscherin kann sich daher gut vorstellen, dass auch auf Exoplaneten mit wasserstoffhaltigen Atmosphären komplexes Leben gedeihen kann – wenn auch etwas anders gestrickt als auf der Erde. ■



## Impressum

ISSN 0006-2375 | 59. Jahrgang

**GRÜNDUNGSHERAUSGEBER:** Prof. Dr. Heinz Haber †

**HERAUSGEBERIN:** Katja Kohlhammer

**VERLAG:** Konradin Medien GmbH, Ernst-Mey-Straße 8,  
70771 Leinfelden-Echterdingen, Germany

**GESCHÄFTSFÜHRER:** Peter Dilger

**VERLAGSLEITER:** Kosta Poulos

**CHEFREDAKTEURIN:** Andrea Stegemann  
Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen, Germany

### REDAKTION

**Textchefin:** Dr. Uta Altmann

#### Textredaktion:

Dr. Uta Altmann (Geowissenschaften, Rezensionen, Rubriken)  
Salome Berblinger (Biologie, Medizin)  
Ralf Butscher (Technik, Neue Medien)  
Rüdiger Vaas (Astronomie, Physik, Cogito)  
Finn Brockerhoff (Volontär)

#### Bildredaktion/Bildmanagement:

Susanne Söhling-Lohnert, Sandra Kühnle

**Layout:** Ricardo Rio Ribeiro Martins (Art Direction)

**Assistenz:** Sandra Kühnle: Phone +49 711 7594-392

Ulrike Matzke: Phone +49 711 7594-5855

Jennifer Weissbacher: Phone +49 711 7594-345

Fax +49 711 7594-5835, E-Mail [wissenschaft@konradin.de](mailto:wissenschaft@konradin.de)

**bdw-Leserreisen:** Dr. Karin Hollricher, Peter Laufmann

#### FREIE MITARBEIT/ KOOPERATION

Grafikbüro Karl Marx (Visuelle Gestaltung/Infografik)

MMCD GmbH: Nadja Podbregar (Magazin)

Verlagsbüro Wais & Partner GbR: Julia Rietsch (Bildbeschaffung)

Zeitungsspiegel Reportagen: Barbara Bylek (Bildbeschaffung)

#### ANZEIGEN- UND MEDIABERATUNG

Verantwortlich für den Anzeigenteil:

Andrée-Elisa Deh: Phone +49 711 7594-366

E-Mail [andree-elisa.deh@konradin.de](mailto:andree-elisa.deh@konradin.de)

#### AUFTRAGSMANAGEMENT

Melanie Strauß: Phone +49 711 7594-403, Fax -1403

E-Mail [melanie.strauss@konradin.de](mailto:melanie.strauss@konradin.de)

#### ABOSERVICE

**Abonnementbetreuung, Probehefte, Einzelverkauf,**

**Adressänderungen:** Leserservice bild der wissenschaft,

Postfach 810580, 70522 Stuttgart, Phone +49 711 7252-201

Fax +49 711 7252-399, E-Mail [bdw@zenit-presse.de](mailto:bdw@zenit-presse.de)

**VERTRIEB:** Heike Wiedenig: Phone +49 711 7594-482

**PRESSEVERTRIEB HANDEL:** IPS Pressevertrieb GmbH

E-Mail [hschmitz@ips-d.de](mailto:hschmitz@ips-d.de), Fax +49 2225 8801-499

#### BEZUGSPREISE

Jahresabonnement (12 Hefte + 2 Sonderausgaben):

Inland € 118,60, Ausland € 130,70, Schweiz CHF 166,20.

Jahresabonnement für Schüler und Studenten gegen Nachweis

(12 Hefte + 2 Sonderausgaben): Inland € 98,00, Ausland € 110,60,

Schweiz CHF 136,80. Jahresabonnement (12 Hefte): Inland € 95,40,

Ausland € 106,80, Schweiz CHF 142,50. Jahresabonnement

für Schüler und Studenten gegen Nachweis (12 Hefte):

Inland € 76,20, Ausland € 87,60, Schweiz CHF 117,30.

Alle Preise inkl. Versandkosten und MwSt.

Einzelhandelspreis: Inland € 8,20, Österreich € 8,20,

übrige Euro-Länder € 8,90, Schweiz CHF 14,50.

Kündigungen von Abonnements sind dem Leserservice bdw,

Postfach 810580, 70522 Stuttgart schriftlich mitzuteilen.

Bei Nichterscheinen aus technischen Gründen oder höherer  
Gewalt entsteht kein Anspruch auf Ersatz.

**Druck:** Konradin Druck, Kohlhammerstraße 1-15,

70771 Leinfelden-Echterdingen, Printed in Germany

© 2022 by Konradin Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen



Erhältlich im Zeitschriften- und  
Bahnhofsbuchhandel und beim Presse-  
fachhändler mit diesem Zeichen



## Die Autorinnen und Autoren



### KATJA MARIA ENGEL

ist promovierte Materialwissenschaftlerin. Sie hat etliche Jahre als Ingenieurin für technische Gase in der Gasindustrie gearbeitet. In diesem bdw-Spezial-Ausgabe berichtet sie über ein großes Projekt auf Helgoland. Dabei geht es darum, mit Strom aus Offshore-Windparks vor Ort in der Nordsee Wasserstoff zu erzeugen.



### REINHARD BREUER

ist habilitierter Astrophysiker. Der erfahrene Wissenschaftsjournalist war unter anderem an der Universität München und am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik tätig. Für bild der wissenschaft schreibt er regelmäßig über Themen aus Physik, Astronomie, Technologie sowie Energie- und Materialforschung.



### HARTMUT NETZ

lebt als Technik- und Wissenschaftsjournalist in München. Er ist seit vielen Jahren ein bewährter Autor von bild der wissenschaft. Seine thematische Palette reicht von aktuellen Herausforderungen in der Energieversorgung über innovative Baukonzepte bis hin zu neuen Formen der Mobilität – beispielsweise auf Grundlage von Wasserstoff.



### RALF BUTSCHER

ist Redakteur für Technologie bei bild der wissenschaft. Der diplomierte Physiker erinnert sich noch an das Wasserstoff-Projekt HYSOLAR, von dem sich ein markantes Forschungsgebäude nahe dem Uni-Campus in Stuttgart-Vaihingen befand. Er findet es bemerkenswert, wie die heutigen Fragen in der Forschung denen vor rund 30 Jahren ähneln.

### Bildnachweise:

Titelbild: malp/stock.adobe.com; S. 3: Wolfram Scheible; S. 4: AquaVentus Förderverein e. V./Jakob Marten; picture alliance/Xinhua News Agency; LLNL; S. 5: Wolfram Scheible für bdw; DLR; S. 6/7: Alexander Limbach/stock.adobe.com; S. 8/9: AA+W/stock.adobe.com; S. 10: bdw-Grafik/Karl Marx; S. 11: Wolfram Scheible; S. 12/13: bdw-Grafik Karl Marx; Quelle: DESY; S. 14: DLR; S. 15-23: Wolfram Scheible für bdw; S. 24/25: malp/stock.adobe.com; S.26/27: action press/Christoph Hardt/Future Image; S. 28: H-TEC Systems | bdw-Grafik Karl Marx; Quelle: EMPA; S. 29: Ezume Images/stock.adobe.com; S. 30: nito/stock.adobe.com; S. 31: iStock.com/popovaphoto; S. 32/33: Alexander Limbach/stock.adobe.com; S. 36/37: AquaVentus Förderverein e. V./Jakob Martens; S. 38: picture alliance/dpa/Sina Schuldt; S. 39: Scheer/BIS Wirtschaftsförderung Bremerhaven; S. 40: Gabriele Rohde/stock.adobe.com; S. 41: AA+W/stock.adobe.com; S.42: Tractebel Overdick; S. 43: Svetlana Yudina/stock.adobe.com; Alfred-Wegener-Institut/Esther Horvath; S.44: picture alliance/Xinhua News Agency; S.45: bht2000/stock.adobe.com; S.46: Map obtained from „Global Solar Atlas 2.0“; Solargis s.r.o./World Bank Group; utilizing Solargis data provided by Sector Management Assistance Program (ESMAP) – <https://globalsolaratlas.info>; S. 47: S. Engels/stock.adobe.com | Southern Corridor Development Initiative; S. 48: HySTRA; S. 49: Dominik Butzmann/BMWK; S. 50: privat; S. 51: DLR (3); S. 53: 1xpert/stock.adobe.com; S. 54/55: AA+W/stock.adobe.com; S. 56: Hyundai; S. 58: bdw-Grafik Karl Marx; Quelle: Volkswagen; S. 59 Bernd Weißbrod/picture alliance/dpa; S. 60: Fokussiert/stock.adobe.com; S. 61: Messer Schweiz; S. 62: Alstom; S. 63: Alstom/Michael Wittwer; S. 64: DLR; S. 66: DLR; S. 67: picture alliance/dpa/Airbus; S. 68-70: Deutscher Zukunftspreis/Ansgar Pudenz; S. 76- 77: UKAEA; S. 78: Illustrationen: US ITER; S. 79: Fusion for Energy 2019; S. 80: bdw-Grafiken/Karl Marx; S. 81: Volker Steger; IPP; S. 82: IPP, Jan Michael Hosan; S. 83: IPP, Wolfgang Filser; S. 84- 85: LLNL; S. 86: LLNL; S. 87: bdw-Grafik/Karl Marx; S. 88: LLNL; Daon Jedlovec; S. 89: LLNL; S. 90/91: sakkmasterke/stock.adobe.com; S. 92/93: Thomas/stock.adobe.com; S. 94: Science Photo Library/Tony Melov | 2021 CERN, for the benefit of the ALICE Collaboration; S. 95: Science Photo Library/Garlick, Mark; S. 96: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen; Ezume Images/stock.adobe.com; S.97: Igor/stock.adobe.com



Kurzberichte und Hintergrundinformationen über aktuelle Forschungen aus der Wissenschaft

Übersichtsbeiträge namhafter Fachwissenschaftler und Wissenschaftspublizisten

Tipps und Hinweise mit Serviceangeboten öffentlicher sowie privater Institutionen

Forumbeiträge über die Entwicklung der Naturwissenschaften und ihre Einordnung in der Gesellschaft

Intelligente Unterhaltung und Urlaub vom Bildschirm

## Naturwissenschaftliche Rundschau Jahres-Abo

# Aktuelles aus der Welt der Wissenschaften

### Ihre Vorteile im Jahres-Abonnement:

- Preisersparnis gegenüber dem Einzelkauf
- Bequem nach Hause geliefert
- Inklusive NR-CD-ROM mit allen Jahrgängen seit 2004
- Jederzeit kündbar mit Geldzurück-Garantie nach Ablauf des ersten Bezugsjahres

**Jetzt bestellen und attraktive Prämie sichern!**



#### Form und Funktion ermöglichte den Siegeszug theropoder Dinosaurier

Digitale Präparation von Fossilien durch Computertomographie und Photogrammetrie gibt neue Einblicke

#### Blinde Passagiere in der Darmflora

Die Rolle von Fernreisen bei der Ausbreitung multiresistenter Darmkeime

#### Der Siegeszug der Natürlichkeit: Natur als Maßstab? Natur als Wert? Natur als Norm? – Teil II: Was ist Natürlichkeit?

Rundschau

Astronomen entdecken seltene Sternhochzeit • Mikrobiom kann Diabetes-Medikament inaktivieren • Perspektiven des elektrischen Fliegens • Symbiose zwischen Seegräsern und Stick-

stoff-Fixierern • Kann Gravitation ein Quantensystem beeinflussen? • Mikrobiom fördert Gewichtszunahme nach Raucherentwöhnung • Zinndioxid-Quantenpunkte für Perowskit-Solarzellen • Intelligente Verpackungen für Lebensmittel • Neue Gesteinsproben vom Mond durch chinesische Sonde • Konvergente Entwicklung von Blutnetztar • Hinweise auf frühere Ankunft des modernen Menschen in Europa • Sondersende zum Angriff auf die Ukraine: Die Wissenschaft bezieht Stellung zum Krieg in der Ukraine

**3**

März 2022

75. Jahrgang

€ 25,00

E 9981

#### Buchbesprechungen

#### Personalia

Stichwort: Performanz

Retrospektive: Uexkülls Wirkkreis

## Naturwissenschaftliche Rundschau

Organ der  
Gesellschaft Deutscher  
Naturforscher und Ärzte

**NR**

**885**



Naturwissenschaftliche Rundschau  
Leserservice  
Postfach 810580  
70522 Stuttgart

Phone +49 711 7252 176  
nr@zenit-presse.de  
oder unter  
[www.direktabo.de](http://www.direktabo.de)





Ein Drehbuch mit  
glücklichem Ende?

Happy  
End!

Ob Krimis, Komödien oder Science-Fiction – zu einem guten Drehbuch gehört ein glückliches Ende. Sehen Sie das auch so?

Damit die Alzheimer-Krankheit nicht zum Dieb unserer Erinnerungen wird, übernehmen Sie Regie und spenden Sie heute für eine filmreife Zukunft ohne Alzheimer.

Für ein noch schnelleres Happy End nutzen Sie das Spendenformular unter folgendem Link: [www.alzheimer-forschung.de/spenden](http://www.alzheimer-forschung.de/spenden)



**Alzheimer Forschung**  
Initiative e.V.

Kreuzstraße 34, 40210 Düsseldorf  
0800 - 200 400 1 (gebührenfrei)