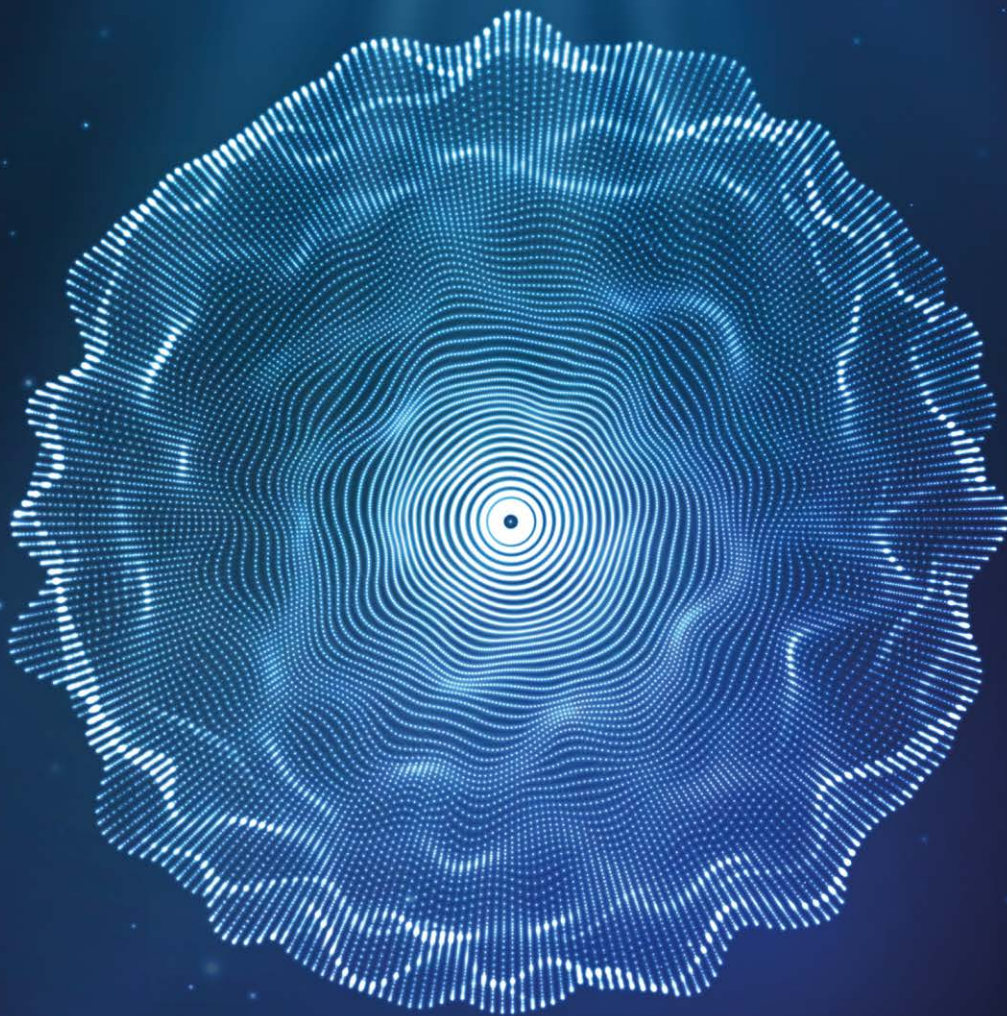


**KOMPETENZ FÜR DAS WASSERSTOFF-ZEITALTER**



# INHALT

**1500 bis 1800 kg CO<sub>2</sub> pro Tonne Stahl** emittieren heutige Hüttenwerke. Würde das Eisenerz statt mit Koks mit Wasserstoff reduziert, ließen sich diese Emissionen einsparen. Die Hochtemperaturelektrolyse, die dabei den Wasserstoff liefert, erreicht einen Wirkungsgrad von **85 Prozent**.

*VDI-Nachrichten, 3. Mai 2019, S. 24 f.*

Brennstoffzellbetriebene Busse absolvierten in einem Langzeit-Test **23 000 Stunden Betriebsdauer** und liefen auch danach tadellos weiter.

*Frost & Sullivan »Fuel Cell Electric Vehicles: Genesis of a New Era or a Myth-Busting in New Energy Vehicle Technology?« 7.9.2018*

**2050** könnte die chemische Industrie wichtige Grundstoffe (Methanol, Olefine und Aromaten) zu 30 Prozent aus CO<sub>2</sub> und grünem Wasserstoff herstellen. Dazu wären rund **50 Millionen Tonnen Wasserstoff** erforderlich und die Atmosphäre würde um 360 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> entlastet.

*Hydrogen scaling up – A sustainable pathway for the global energy transition (Hydrogen Council, November 2017)*

Wird der Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft zügig in Angriff genommen, ist für deutsche Hersteller von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen eine jährliche Wertschöpfung von **10 Mrd €** im Jahr **2030** und **32 Mrd €** im Jahr **2050** möglich.

*Eigene Abschätzung nach Analyse aktueller Studien*

<b>VORWORT</b>	4
<b>KLIMANEUTRALE INDUSTRIELLE PROZESSE</b>	6
<b>BALANCE IM ENERGIESYSTEM</b>	10
<b>VERKEHR OHNE FOSSILE TREIBSTOFFE</b>	12
<b>SICHERHEIT UND VERLÄSSLICHKEIT: STANDARDS, PRÜFUNG, LEBENSZYKLUS</b>	14
<b>VOM MATERIAL ZUM SYSTEM: DIE TECHNISCHE BASIS</b>	16
<b>HOHE ZAHLEN, GROSSE GRÖSSEN: PRODUKTION DER SYSTEME</b>	20
<b>AUSBLICK</b>	24
<b>ADRESSEN</b>	26
<b>IMPRESSUM</b>	28



## Wasserstoff – Chance für Klima und Wirtschaft

Soll es Deutschland gelingen, das Zwei-Grad-Ziel des Pariser Abkommens noch einzuhalten, dann bedarf es großer Anstrengungen für eine weitreichende Defossilisierung. Anders gesagt: Überall, wo wir fossile Energieträger oder Ressourcen verbrauchen, müssen wir auf CO<sub>2</sub>-neutrale Quellen umstellen. Zudem brauchen wir für den Erfolg der Energiewende nicht nur einen Ausbau von Wind-, Sonnen- und Hydroenergie, sondern auch Energiespeichersysteme, die trotz volatiler Quellen eine kontinuierliche Stromversorgung garantieren können. Wasserstoff wird als Energieträger einen entscheidenden Beitrag leisten. Und nicht nur dort: Auch als chemischer Rohstoff hat Wasserstoff extrem viel zu bieten. H<sub>2</sub> ist ein unentbehrlicher Faktor im intelligenten Energiemanagement und in der Industrie. Zögern wir aber zu lange, riskieren wir nicht nur das Verfehlen der Klimaziele, sondern auch eine Deindustrialisierung in Deutschland.

## Wirtschaftskraft und Strukturwandel durch Innovation

Die Energiewende umfasst die Sektoren Strom, Wärme, Mobilität, Industrie und Agrar. Was den Strom angeht, so sind wir auf dem richtigen Weg – auch durch die Beschlüsse der Kommission »Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung«. Diese Kommission, an der ich als Vertreter der Fraunhofer-Gesellschaft teilnehmen durfte, empfiehlt den vollständigen Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2038. Was die Defossilisierung der anderen Sektoren angeht, so ist Wasserstoff der Schlüssel: Er kann in der Wärmeversorgung als Energieträger fungieren und in der Industrie viele Prozesse von fossilen Quellen unabhängig machen. So nutzt Deutschland in Chemie und Petrochemie aktuell rund zwei Millionen Tonnen H<sub>2</sub> jährlich aus fossilen Quellen. Diesen durch »grünen« Wasserstoff zu ersetzen, könnte über zwei Prozent des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes einsparen. Ähnliches gilt für die Herstellung von Ammoniak für Düngemittel. Und in der Mobilität kann Wasserstoff als komplementärer Ansatz zur Batterietechnologie bei großen Distanzen und schweren Lasten dienen – etwa bei Lkw, Zügen, Flugzeugen und Schiffen.

Dazu müssen wir unter anderem die Elektrolyse deutlich ausbauen: Hatten wir 2015 eine installierte Leistung von 21 Megawatt, so ist 2050 das 3000-fache davon nötig. Bereits 2030 ist eine jährliche Zubaurate von ein bis fünf Gigawatt erforderlich. Solch riesige Schritte sind neben den politischen Rahmenbedingungen nur mit erheblichen technologischen Innovationen zu schaffen – Innovationen, für die keine andere Forschungsgesellschaft in Deutschland so sehr steht wie Fraunhofer. Mit allen Kompetenzen der entsprechenden Institute wird Fraunhofer seinen Teil zur nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (Januar 2020) beitragen und deren Umsetzung aktiv unterstützen. Deutschland hat das Potenzial, in der Wasserstoffwirtschaft ganz oben mitzuspielen: Anlagentechnik zählt ebenso zu den Stärken der deutschen Industrie wie Technologien im Mobilitäts- und Energiesektor. Bereits heute kommen führende Unternehmen für H<sub>2</sub>-Technologien aus Deutschland. Die Realisierung einer umfassenden

Wasserstoffwirtschaft kann unsere Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit langfristig stärken und industrielle Wertschöpfung im Land halten.

## Systemzuverlässigkeit und Produktionstechnologien

Bisher werden sowohl die Elektrolyseure, die mithilfe von Strom H<sub>2</sub> erzeugen, als auch die Brennstoffzellen, die diesen Prozess umkehren und aus H<sub>2</sub> Strom erzeugen, weitestgehend manuell hergestellt. Doch für die künftig erforderlichen Stückzahlen und Leistungen gilt es, die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen und entsprechende Produktionstechnologien zu entwickeln. Das heißt: die Herstellung solcher Anlagen zu automatisieren und in den industriellen Maßstab zu überführen. Fraunhofer ist aufgrund der Anwendungsnähe prädestiniert dafür, Betriebe und Unternehmen wie auch die Gesellschaft bei diesem Schritt zu unterstützen. Digitalisierung ist hierbei ein wichtiger Hebel: Jeder Komponente – etwa den Brennstoffzellen – müssen wir ein digitales Abbild, den digitalen Zwilling, zur Seite stellen.

Fraunhofer hat in den letzten Jahren die Kompetenz erarbeitet, Wasserstofftechnologien kurzfristig in den Markt zu begleiten. Über die »Reallabore für die Energiewende« möchte das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie solche Schritte in den Markt fördern. Zwanzig solcher Vorhaben sind gestartet, von denen etwa die Hälfte H<sub>2</sub>-Technologien adressiert. Fraunhofer ist an mehreren Reallaboren beteiligt. Ein Ziel: 100-MW-Hydrolyseure und ihre Systemintegration. Die Technologie soll vom Demonstrator zum verkaufsfertigen Produkt weiterentwickelt werden. Wir können direkt in die systemische Forschung und in die Produktionsfragen einsteigen – und zwar in allen Bereichen: Fraunhofer-Kompetenzen umfassen Material und Systeme sowie deren Produktion, die Anwendung in der Energiewirtschaft, in Industrie und Mobilität wie auch die Querschnittsthemen Sicherheit und Lebensdauer. Beispiele finden Sie in dieser Broschüre.

Beim Wasserstoff kann Deutschland als Land der Ingenieure und Anlagenbauer jetzt noch eine führende Rolle übernehmen, da der Markthochlauf weltweit gerade erst beginnt. Die Fraunhofer-Institute werden mit ihren Kompetenzen den Technologien hierfür den Weg in die Praxis bahnen und Deutschlands Wettbewerbschancen erhöhen.

**Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn**

Vorstandsmitglied der Fraunhofer-Gesellschaft für den Bereich Technologiemarketing und Geschäftsmodelle und Sprecher des Fraunhofer-Wasserstoff-Netzwerks

# KLIMANEUTRALE INDUSTRIELLE PROZESSE



## UNSERE INSTITUTE:

### Fraunhofer IFF:

Prozess-Simulation

### Fraunhofer IKTS:

Fischer-Tropsch-Synthese

### Fraunhofer IMM:

Reformer

### Fraunhofer IMWS:

Wasserstoff-Versuchsplatt-  
form (MW-Klasse)

Anbindung an Chemiapark

### Fraunhofer IKTS,

### Fraunhofer IMM und

### Fraunhofer UMSICHT:

Power-to-Chem

Möchte Deutschland die gesetzten Klimaziele erreichen, sind Wasserstoff-technologien unausweichlich. Das gilt nicht nur, aber vor allem im Bereich der Industrie. Daher gibt es seitens der Unternehmen zahlreiche Anstrengungen, etablierte Produktionsprozesse auf Wasserstoff umzustellen und langfristig auf eine Wasserstoffwirtschaft hinzuwirken. Vielversprechend ist der Einsatz von Wasserstoff vor allem in Herstellungsverfahren, bei denen viel Kohlenstoffdioxid entsteht. Dort bietet Wasserstoff verschiedene Ansätze zur Defossilisierung der Produktionskette. Aufgabenstellung ist dabei, die Umstellung wirtschaftlich und nachhaltig zu gestalten.

## CO<sub>2</sub>-arm produzieren: Wasserstoff macht's möglich

Mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) arbeiten beispielsweise das Fraunhofer UMSICHT, die thyssenkrupp AG, die Max-Planck-Gesellschaft und sechs weitere Konzerne aus Anlagenbau und Chemieindustrie an einer solchen Defossilisierungsstrategie: Im Projekt Carbon2Chem® nutzen sie kohlenstoffhaltige Gase, die bei der Stahlproduktion in Hochöfen und Kokereien anfallen, und wandeln sie – unter Zugabe von grünem Wasserstoff – in Basischemikalien wie Methanol und Harnstoff um. Aus diesen Chemikalien wiederum können Kraftstoffe, Düngemittel oder Kunststoffe hergestellt werden. So werden fossile Rohstoffe in der Chemieindustrie substituiert und die Emission erheblicher Mengen fossilen Kohlenstoffs vermieden. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer UMSICHT arbeiten unter anderem an Simulationsmodellen, um die sich ergebenden integrierten Produktionssysteme abzubilden. Das Projekt adressiert hierbei u.a. Fragen zum Gesamtsystem, z.B. wie wird sich die Chemikalienherstellung im Hüttenwerk auf das Gesamtproduktionssystem auswirken? Zudem entwickeln sie Adsorptions- und Plasmatechniken, um das Hüttengas zu reinigen, und prüfen die Funktionstüchtigkeit der Katalysatoren für die chemischen Synthesen auf Anwendbarkeit. Die Grundlagen sind bereits geschaffen: Im Technikumsmaßstab läuft das Verfahren. Ab 2025 könnte es bereits in den Produktionsanlagen eingesetzt werden und den Carbon-Footprint mithilfe von Wasserstoff reduzieren. Auch an einer zügigen Übertragung auf andere Branchen, z.B. die Zementindustrie, wird gearbeitet.

Das langfristige Ziel der Stahlkonzerne: Sie müssen CO<sub>2</sub>-neutralen Stahl herstellen. Möglich machen soll dies das Verfahren zur direkten CO<sub>2</sub>-Vermeidung (engl.: Carbon Direct Avoidance CDA): Über die Direktreduktion von Eisenerz kann die Entstehung von CO<sub>2</sub> fast vollständig vermieden werden. Daran arbeiten Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IKTS mit der Salzgitter AG im BMBF-geförderten Projekt MACOR. Bislang wird Kohle verwendet, um die Eisenerze zu reduzieren. Statt Kohle wird bei dem neuen Verfahren Wasserstoff als Reduktions-

mittel genutzt – auf diese Weise kann der CO<sub>2</sub>-Ausstoß je nach Ausbaustufe um bis zu 95 Prozent reduziert werden. Möglich wird dies, indem der benötigte Wasserstoff in einem Elektrolyseverfahren unter Nutzung erneuerbarer Energien hergestellt und das Eisen im Elektrolichtbogenofen unter Einsatz von regenerativ erzeugter elektrischer Energie zu Stahl verarbeitet wird. Besonders vielversprechend sind hierbei Hochtemperaturelektrolyseverfahren. Demonstratoren für diese Technologie im Maßstab von 100 Kilowatt sind bereits im Einsatz. Nun soll die Überführung bis in den Gigawatt-Maßstab folgen. Auch hier werden die Forscher des Fraunhofer IKTS im Rahmen der Begleitforschung ein wesentlicher Partner sein und dabei die Prozesssimulation federführend durchführen.

Auch abseits der Stahlindustrie fallen in Industriebetrieben Abgase und Abwässer an. Im Projekt Colyssy zeigt das Fraunhofer IKTS gemeinsam mit einem Kalkwerk der Johann Bergmann GmbH & Co. KG einen Weg auf, wie sich diese gewinnbringend nutzen lassen: mit einem integrierten Verfahren, über das industrielle Abgasströme und Wasser zur Herstellung chemischer Wertstoffe genutzt werden können. Möglich machen es eine Hochtemperatur-Co-Elektrolyse, eine CO<sub>2</sub>-Abtrennung mittels hierfür entwickelter keramischer Membranen und ein neu entwickeltes skalierbares Reaktorkonzept für die Fischer-Tropsch-Synthese. Heraus kommen synthetische Wachse, die als Schmierstoffe oder als Ausgangsstoffe für die Kosmetik dienen können. 2021 soll die Anlage einsatzbereit sein. Auch mit der Prozessentwicklung befassen sich die Forscher. So simulieren und optimieren sie den Gesamtprozess. Die Kopplung der Prozessschritte am Kalkwerk bietet dabei auch die Möglichkeit, Nebenproduktströme der Fischer-Tropsch-Synthese im Brennprozess einzusetzen, und eröffnet damit zusätzliche Flexibilisierungsoptionen.

Stark mineralisierte, sulfatreiche Bergbauabwässer dagegen lassen sich mit dem RODOSAN-Verfahren aufbereiten, das vom Fraunhofer IKTS entwickelt wurde. Und zwar auf dreierlei Wegen gleichzeitig: Zum einen wird aus dem Abwasser Wasserstoff und damit ein Energieträger gewonnen. Zum zweiten wird das enthaltene Eisen reduziert und damit zurückgewonnen. Und drittens werden die Schadstoffe – insbesondere Schwefel – aufkonzentriert und für den Düngemittelleinsatz zurückgewonnen. 45 bis 70 Prozent des enthaltenen Sulfats lassen sich über das Verfahren abtrennen. Eine Pilotanlage mit einer Leistung von sechs Kubikmetern pro Stunde steht für technische Untersuchungen und für die Verfahrensoptimierung bereits zur Verfügung.

## P2X: Aus grüner Energie wird Wasserstoff und Co.

Eine dringende Frage, die sich im Zuge des Energiewandels stellt: Wie lässt sich regenerativer Strom da speichern, wo er entsteht, sofern er nicht im Netz weitergeleitet werden kann? Sprich: Wie lässt sich der zeitliche Verbrauch mit der örtlichen Entstehung synchronisieren? Hier greifen P2X-Technologien: Dabei wird der regenerativ erzeugte Strom für die Wasserstoff-

**1** Im Oberhausener Carbon2Chem-Labor arbeitet Fraunhofer an der Produktion von Basischemikalien aus Industrieabgasen und H<sub>2</sub>; Fraunhofer UMSICHT

**2** Thyssenkrupp ist dabei Industriepartner; hier eine Elektrolyse-Anlage, die von thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers gebaut wurde.

© thyssenkrupp AG



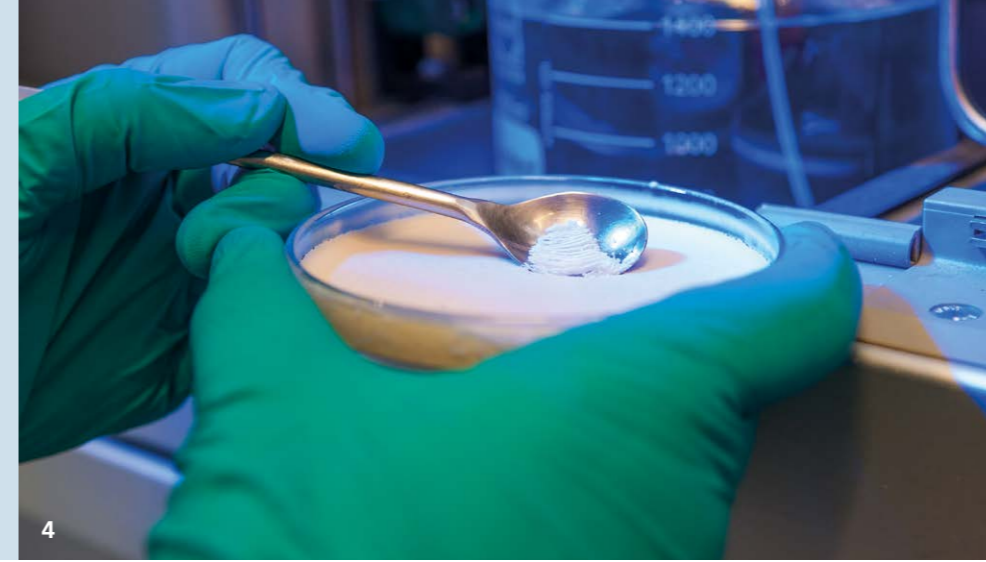
**3** *Hochofen in Salzgitter. Stahlherstellung könnte mit Wasserstoff nahezu CO<sub>2</sub>-neutral werden.*

elektrolyse genutzt, der dabei entstehende Wasserstoff gespeichert und wiederum in Chemikalien, Kraftstoffe oder Gas umgewandelt. Man spricht dabei von Power-to-Gas, Power-to-Fuel und Power-to-Chemicals. Ein Beispiel aus dem Bereich Power-to-Gas ist das Projekt ICOCAD des Fraunhofer IMM: Über eine innovative Reaktortechnologie wird CO<sub>2</sub>, das von Biogasanlagen und integrierten Bioraffinerien abgetrennt wird, unter Zugabe von Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse in Methan umgewandelt. Die Forscherinnen und Forscher entwickeln Anlagenkonzepte, führen Tests im Pilotmaßstab durch und bauen einen Reaktor in eine bereits vorhandene Anlagenumgebung ein. Zudem entwickeln die Wissenschaftler langlebige, vergiftungs- und koksresistente Katalysatoren für diesen Prozess. Der modulare Aufbau des Reaktors ermöglicht es, diesen leicht an die individuelle Größe und den Bedarf der Kohlendioxid- und Wasserstoffquellen anzupassen.

In der Plattform eSource®, welche aus dem Fraunhofer-Leitprojekt »Strom als Rohstoff« hervorgegangen ist, haben sich zehn Fraunhofer-Institute zusammengeschlossen. Gemeinsam entwickeln und optimieren sie Verfahren, mit denen grüner Strom genutzt werden kann, um wichtige Basischemikalien zu synthetisieren. Einer der entwickelten Demonstratoren adressiert die elektrochemische Herstellung von Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) aus Sauerstoff und Wasserstoff. Wasserstoffperoxid wird als Oxidationsmittel in der Chemieindustrie benötigt. Diese direkte Synthese aus molekularem Sauerstoff und Wasserstoff wäre eine kostengünstige, sichere und saubere Alternative zur derzeitigen Herstellung, die mit hohen sicherheitstechnischen Anforderungen einhergeht. Wie es um die Energieeffizienz in der Verfahrenstechnik steht und wie sich verschiedene Effizienzwerte miteinander vergleichen lassen, untersucht das Fraunhofer IFF mit Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Projekt greoKEMS.

#### Stellschraube Elektrolyseur-Leistung

Egal, um welche P2X-Technologie oder andere Wasserstofftechnologie es sich auch handeln mag: Die Basis bildet Wasserstoff, der über Elektrolyseure aus grünem Strom erzeugt wird. Das Fraunhofer IMWS baut daher im Chemiepark Leuna eine Test- und Versuchsinfrastruktur für Elektrolyseure im Megawatt-Bereich auf, genauer gesagt bis fünf Megawatt. Vier Projektplätze für jeweils zwei bis drei 40-Fuß-Container stehen Projektpartnern hier ab 2020 zur Verfügung. Dort lässt sich die Prozesskette bis hin zu nachgelagerten Prozessen wie der Methanolsynthese abbilden. Die Forscher bilanzieren die Projekte, überwachen die Anlagen, fahren verschiedene Testzyklen und evaluieren die Ergebnisse. Der erzeugte Wasserstoff kann in die 150 Kilometer lange Pipeline geleitet werden, die verschiedene Chemieparke miteinander verbindet.



**4** *Hochwertiges Wachs, synthetisiert über eine Fischer-Tropsch-Synthese – ohne fossile Rohstoffe; Fraunhofer IKTS*

Das Ziel, die Leistung der Elektrolyseure zu vergrößern, haben sich auch die Partner des Projekts »GreenHydroChem Mitteldeutsches Chemiedreieck« gesetzt, das zu den Gewinnern im Ideenwettbewerb »Reallabore der Energiewende« zählt. In drei Teilprojekten arbeitet das Team – bestehend aus Siemens AG, Linde AG und Fraunhofer IMWS – an der intelligenten Verknüpfung von Großelektrolyse (Herstellung), Wasserstoffpipeline (Transport), Wasserstoffkaverne (Speicherung) und entsprechenden Großabnehmern für grünen Wasserstoff. Dazu soll die bereits bestehende Infrastruktur genutzt und erweitert werden. So steht ein Scale-up der Elektrolyseure an:

Siemens skaliert den Elektrolyseur von 5 Megawatt auf 50 Megawatt hoch. Die Fraunhofer-Forscherinnen und -Forscher unterstützen sie mit der nötigen Begleitforschung und erstellen einen Leitfaden für die Elektrolyse. So werten sie unter anderem die Produktionsgase während des Betriebs wissenschaftlich aus. »Green-Hydro-Chem Mitteldeutschland« wird bis 2024 in Leuna umgesetzt. Mit insgesamt über 100 Megawatt ist es das weltweit größte Elektrolyse-Anlage-Projekt zur Erzeugung von grünem Wasserstoff.

#### Wasserstoff aus biogenen Quellen

Auch biogene Reststoffe und Abfälle können als Quelle für grünen Wasserstoff dienen. Das Fraunhofer UMSICHT hat solch ein Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff aus biomassebasierten Einsatzstoffen entwickelt: Das TCR®-Verfahren basiert auf der thermo-chemischen Konversion und erzeugt ein äußerst wasserstoffreiches Synthesegas. Auch der entstehende Feststoff, ein stabiles Karbonisat, kann über Vergasung zur Wasserstoffherzeugung eingesetzt werden. Die TCR-Technologie wird derzeit im EU-Projekt ToSynFuel im Maßstab von zwölf Tonnen Reststoff-Durchsatz pro Tag demonstriert.

» Wasserstoff ist nicht nur ein attraktiver Energieträger, sondern auch ein chemisches Reduktionsmittel. Unter der Voraussetzung, dass die zur Gewinnung des Wasserstoffs notwendige Energie ohne Emissionen von Treibhausgasen zur Verfügung steht, kann er zu dem Schlüsselmolekül werden, um die Klimaziele zu erreichen.«  
*Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner, Institutsleiter Fraunhofer UMSICHT*



# BALANCE IM ENERGIESYSTEM

## UNSERE INSTITUTE:

**Fraunhofer IAO:**  
Akzeptanzforschung

**Fraunhofer IEE:**  
Markt- und Systemanalysen  
Sektorkopplung

**Fraunhofer IMWS:**  
Speicherkonzepte

**Fraunhofer IPA:**  
Infrastrukturplanung

**Fraunhofer ISE:**  
Geschäftsmodelle  
Markt- und Nachhaltigkeits-  
bewertung

**Fraunhofer ISI:**  
Bedarfsprognosen  
Energiewirtschaftliche  
Politikberatung

**Fraunhofer IWES:**  
Wasserstoffproduktion und  
Anwendung im maritimen  
Bereich

Im Zug der Energiewende werden Kohle- und Atomkraftwerke in Deutschland vom Netz gehen – regenerative Quellen wie Wind und Sonne sollen die entstehende Lücke füllen. Die Herausforderung: Die Energiemenge aus Sonne und Wind schwankt stark, während bisherige Grundlastkraftwerke wie Kohlekraftwerke nachfrageorientiert betrieben werden. Zudem wird die Energie in Windparks oft fern des Verbrauchers erzeugt. Es ist daher ein Weg vonnöten, regenerative Energie elektrisch in die Nachfragezentren zu transportieren oder zu speichern und flexibel wieder in den Energiekreislauf einzuspeisen. Wasserstofftechnologien machen Letzteres möglich: Mit dem regenerativ erzeugten Strom wird eine Elektrolyse betrieben, in der Wasser elektrochemisch in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten und somit speicher- und transportierbar wird. Durch Rückverstromung lässt sich aus dem Wasserstoff wieder Strom erzeugen. Über solchen »grünen« Wasserstoff lassen sich Versorgungssicherheit und Netzresilienz weiter ausbauen.

## Wie lässt sich Wasserstoff speichern und nutzen?

Der Wasserstoff lässt sich direkt nutzen – etwa über die Rückverstromung in Brennstoffzellen oder als Grundstoff in der Chemieindustrie. In diesem Zusammenhang stellt sich zunächst einmal die Frage der Wasserstoffbereitstellung: Für die traditionelle Speicherung sind tiefe Temperaturen (-253 °C) oder hohe Drücke von mehreren hundert Bar nötig. In der BMBF-Initiative HYPOS – kurz für Hydrogen Power and Solutions East Germany – widmet sich ein Konsortium von 110 Mitgliedern aus Industrie und Wissenschaft Fragen der Speicherung und des Transports von Wasserstoff. So untersucht das Fraunhofer IMWS die Möglichkeit, Wasserstoff in einer Salzkaverne zu speichern; für den Transport wurde eine Pipeline aus Metallen und Kunststoffen aufgebaut.

Eine Alternative zur direkten Nutzung des Wasserstoffs bilden Power-to-X-Umwandlungsprozesse: Dabei wird Wasserstoff in verschiedene Grundstoffe weiterverarbeitet. Ein Beispiel ist Power-to-Liquid, wobei der mit regenerativer Energie erzeugte Wasserstoff mit nicht-fossilem CO<sub>2</sub> zu Energieträgern wie Methanol umgesetzt wird. Im BMBF-geförderten Konsortium Carbon2Chem®, welches das Fraunhofer UMSICHT koordiniert, beschäftigen sich ein Team des Instituts sowie Kolleginnen und Kollegen aus dem Fraunhofer ISE mit Verfahren zur Methanolsynthese aus Abgasen der Stahlindustrie: Wie lassen sich Strom- und Industriesektor durch flüssige Energieträger koppeln? Und wie wirkt es sich auf das deutsche Energiesystem aus, wenn fossile Energieträger durch erneuerbare Kraftstoffe und Chemikalien ersetzt werden, der Energiesektor also zunehmend defossilisiert wird?



## Orientierungshilfe auf dem Weg zu einer Wasserstoffwirtschaft

Wie kann der Transformationsprozess zu einem weitgehend treibhausgasneutralen Energiesystem in Deutschland konkret aussehen? Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie BMWi modellieren die Experten des Fraunhofer ISI Szenarien für ein kostenoptimiertes und sicheres Energiesystem und liefern damit eine wichtige Orientierungshilfe für die Diskussion um die Weiterentwicklung der Energiewende. Mit dem Nachfragemodell FORECAST untersuchten sie für die Netzbetreiber zudem die Nachfrageseite des europäischen Energiesystems.

Auch Entwickler, Unternehmen und Investoren brauchen genauere Angaben zur Wirtschaftlichkeit, bevor sie in eine Wasserstofftechnologie investieren. Energiesystem-Modellierungen aus dem Fraunhofer ISE können belastbare Angaben machen – von Wasserstoffentstehungskosten, Wirkungsgrad und Wasserstoffausbeute bis hin zu Machbarkeitsstudien sowie Ertragsgutachten.

Ob innovative Energietechnologien erfolgreich sind, hängt unter anderem von der gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Unterstützung ab. Die gesellschaftliche Akzeptanz von Wasserstofftechnologien untersucht das Fraunhofer ISI im EU-Projekt HYACINTH. Das Projekt H<sub>2</sub>-Chancendialog am Center for Responsible Research and Innovation des Fraunhofer IAO zielt darauf ab, das Innovationspotenzial gesellschaftlicher Perspektiven zu identifizieren, um neue Wasserstofflösungen kollaborativ und unter Einbezug unterschiedlicher Stakeholder zu entwickeln.

**1** Wasserstoff hilft, Schwankungen der regenerativen Stromerzeugung abzufedern.

**2** Können Erdgasrohre H<sub>2</sub>-haltige Gase transportieren?

**Fraunhofer IAO und Fraunhofer IFF:**  
Transportkonzepte

**Fraunhofer IBP und Fraunhofer IPA:**  
Nachhaltigkeitsbewertung

**Fraunhofer Cluster of Excellence:**  
Integrated Energy Systems  
CINES



Wir unterstützen die Bundesregierung mit wissenschaftlichen Analysen für den Transformationsprozess zu einem weitgehend treibhausgasneutralen Energiesystem in Deutschland. Die Arbeiten bieten damit eine wichtige Orientierungshilfe für die Diskussion um die Weiterentwicklung der Energiewende einschließlich der Umsetzung der Sektorenkopplung und des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft.«  
Prof. Dr. Mario Ragwitz, Institutsleiter (kommissarisch) Fraunhofer IEG (s. S. 25)



# VERKEHR OHNE FOSSILE TREIBSTOFFE

## UNSERE INSTITUTE:

### Fraunhofer IAO:

LOHC-Tankstelle

### Fraunhofer ISE:

Mobilitätskonzepte

### Fraunhofer IMM:

On-Board-Energieversorgung

### Fraunhofer IPA:

Betankungssysteme

### Fraunhofer ICT,

### Fraunhofer IFAM und

### Fraunhofer IWU:

Antriebssysteme  
(Getriebeauslegung,  
Prüfstände etc.)

### Fraunhofer IMM,

### Fraunhofer IMWS,

### Fraunhofer ISE und

Fraunhofer UMSICHT:  
Synthetische Treibstoffe

Die Mobilität soll langfristig ohne fossile Kraftstoffe auskommen. Ein bereits stark verfolgter Ansatz dazu ist die Elektromobilität. Wasserstoffantriebe können diese Technologie sinnvoll ergänzen. Dabei wird der Wasserstoff entweder direkt in Verbrennungsmotoren eingesetzt oder über eine Brennstoffzelle rückverstromt. Wasserstoffautos bieten gegenüber den Elektrofahrzeugen einige Vorteile: Ihre Reichweite ist mit 400 bis 750 Kilometern größer als jene derzeitiger Elektroautos, und der Tankvorgang nimmt nur drei bis fünf Minuten in Anspruch. Aktuell umfasst das Wasserstofftankstellennetz in Deutschland bereits über 75 Tankstellen, 28 weitere sind im Entstehen.

## Mobilitätsstrategie und entsprechende Infrastruktur sind gefragt

Wie Wasserstoff zur Defossilisierung beitragen kann, hat das Fraunhofer ISI für das Umweltbundesamt in der »Roadmap Gas« untersucht. Das Ergebnis: Wasserstoff spielt vor allem dort eine zentrale Rolle, wo sich elektrische Energie schlecht direkt nutzen lässt. Das gilt neben der Stahlindustrie und der chemischen Industrie vor allem im Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr. Ein ähnliches Ergebnis lieferte eine Studie, die das Fraunhofer ISE im Auftrag von H<sub>2</sub>Mobility durchgeführt hat, in der die CO<sub>2</sub>-Emissionen von batteriebetriebenen, Diesel- und Wasserstofffahrzeugen verglichen wurden. Fazit: Bei geringen Reichweiten und reinen Stadtfahrten punkten die Batteriefahrzeuge. Übersteigen die Reichweiten dagegen 250 bis 300 Kilometer, sind Wasserstoff-Fahrzeuge überlegen.

Sollen sich Wasserstofffahrzeuge langfristig durchsetzen, braucht es dafür die entsprechende Infrastruktur. Auch hier bringen Fraunhofer-Experten ihre Kompetenz ein. So hat beispielsweise das Fraunhofer IPA gemeinsam mit der Daimler AG, BMW AG und Aral AG bereits in den 90er-Jahren einen Tankroboter u.a. für die Wasserstoffbetankung entwickelt, der das Fahrzeug automatisch betankt. Das Fraunhofer ISE befasst sich mit der Frage, wie sich Wasserstoff transportieren lässt – ohne hohen Druck oder tiefe Temperaturen. Zusammen mit Partnern werden am Fraunhofer ISE Verfahren entwickelt, wie Wasserstoff z.B. in sogenannten Liquid Organic Hydrogen Carriern (LOHC) in flüssiger Form einfacher transportiert und sicher gelagert werden kann.

## Wasserstoff als direkter und indirekter Kraftstoff

Wird Wasserstoff direkt als Kraftstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen eingesetzt, stehen Effizienz, Sicherheit und Zuverlässigkeit ganz oben auf der Agenda. Im Projekt Eco-CC (gefördert vom Land Sachsen) entwickeln Fraunhofer IWU und Partner ein wirtschaftliches und zuverlässiges



Mess- und Regelungskonzept – so können die optimalen Betriebsparameter schnell und genau erreicht werden. Die Forscherinnen und Forscher optimieren das Lastmanagement auf die Brennstoffzelle und verbessern die Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Lebensdauer der Systeme.

Eine Alternative zu Brennstoffzellen-Fahrzeugen liegt darin, aus dem gasförmigen Wasserstoff über Methanol als Plattformchemikalie synthetische, flüssige Kraftstoffe herzustellen. Sie verbrennen schadstoffarm und weisen in der Well-to-Wheel-Bilanz bis zu 90 Prozent weniger Treibhausgasemissionen als fossile Kraftstoffe auf. Solche Oxymethylenether (OME) lassen sich ähnlich wie Ethanol beim Benzin direkt als Blendkomponente im Dieselmotorkraftstoff verwenden. Sinnvoll ist ein solches Power-to-Liquid-Verfahren vor allem dort, wo sich Wasserstoff nicht für das Antriebssystem verwenden lässt, etwa im Schiffs- und Flugverkehr. Das Fraunhofer ISE bildet damit die gesamte Wertschöpfungskette der OME-Herstellung ab, für die nötige Prozesstechnik werden Anlagen bis zum Pilotmaßstab aufgebaut, die in Zusammenarbeit mit der Industrie z.B. im BMBF-geförderten NAMOSYN-Projekt hochskaliert werden.

Wasserstoff kann auch als umweltfreundlicher Schiffsantrieb mit geschlossenem CO<sub>2</sub>-Kreislauf genutzt werden. Das Fraunhofer IKTS ist Partner im EU-Projekt HyMethShip, das auf innovative Weise einen Membranreaktor, ein CO<sub>2</sub>-Abscheidungssystem, ein Speichersystem für CO<sub>2</sub> und Methanol sowie einen mit Wasserstoff betriebenen Verbrennungsmotor vereint.

## Über den Wolken: Sicherer Wasserstoff in der Luftfahrt

Wasserstoff lässt sich in der Luftfahrt keineswegs nur als Ausgangsstoff für synthetisches Kerosin nutzen. Auch eine direkte Anwendung kommt infrage, wie beispielsweise das Forschungsprojekt DIANA zeigt. Gemeinsam mit der Diehl Aerospace GmbH und der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt DLR entwickelt das Fraunhofer IMM mit Förderung durch das BMBF einen mobilen Energieerzeuger für Passagierflugzeuge – und zwar in Form eines Trolleys. In diesem steckt eine Brennstoffzelle, die mithilfe des aus Propylenglykol vor Ort gewonnenen Wasserstoffs Strom für die Bordküche erzeugt.



Wir haben die Treibhausgas-Bilanz verschiedener Antriebstypen verglichen. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass bei verschiedenen Einsatzgebieten und Fahrzeugtypen Wasserstoffbrennstoffzellen die günstigste Option darstellen. Daher sehen wir Brennstoffzellenfahrzeuge als einen Schlüsselbeitrag zur Mobilität der Zukunft, welche andere klimaschonende Antriebsformen komplementieren werden.«  
Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Institutsleiter Fraunhofer ISE



1 Solare Wasserstofftankstelle; Fraunhofer ISE

2 Synthetische Treibstoffe sind eine Option für die nachhaltige Luftfahrt



# SICHERHEIT UND VERLÄSSLICHKEIT: STANDARDS, PRÜFUNG, LEBENSZYKLUS

## UNSERE INSTITUTE:

### Fraunhofer IMWS:

Mikrostrukturdiagnostik  
Zertifizierung

### Fraunhofer IWM:

Werkstoffsimulation  
Versagensanalysen

### Fraunhofer ICT und

### Fraunhofer EMI:

Gefahrentests  
Sicherheitskonzepte

### Fraunhofer IMS und

### Fraunhofer IPM:

Sensoren zur Überwachung

### Fraunhofer IBP,

### Fraunhofer IPA,

### Fraunhofer ISE und

### Fraunhofer IST:

Life Cycle Analysis

### Fraunhofer EMI,

### Fraunhofer IMWS,

### Fraunhofer ISE,

### Fraunhofer IZFP und

### Fraunhofer LBF:

Schadensdiagnostik  
Lebensdauererests

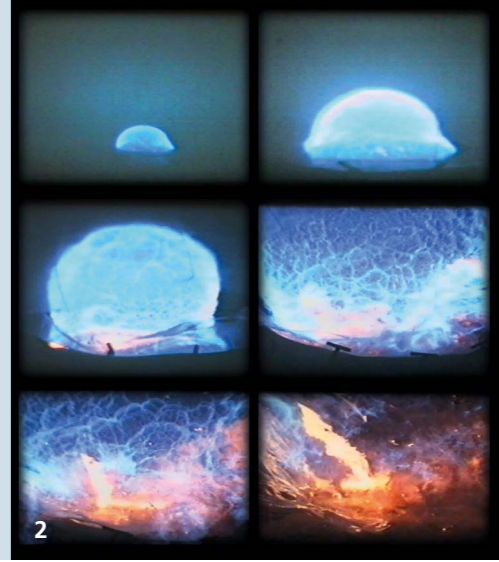
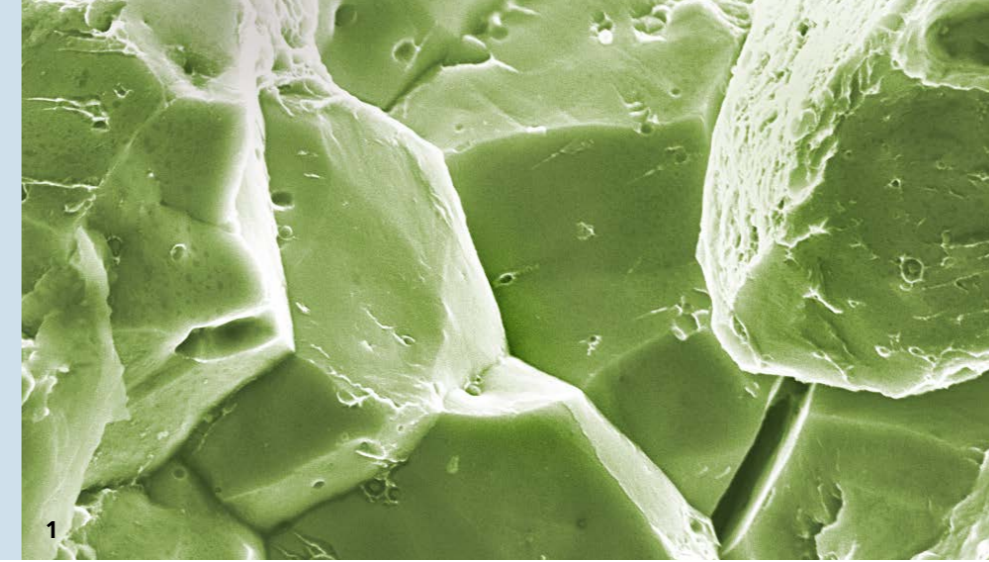
Wasserstoff ist ein vielversprechender Energieträger, bei dessen Einsatz die Sicherheit höchste Priorität hat. Entsprechende Prüfverfahren für Werkstoffe und Bauteile von Brennstoff- und Elektrolysezellen sind folglich unerlässlich. Eng verknüpft mit der Sicherheit ist die Frage der Lebensdauer. An den Fraunhofer-Instituten gibt es zahlreiche Projekte, die diese Aspekte adressieren, samt entsprechenden Prüfständen.

## Wasserstoff? Aber sicher!

Wasserstoff dient unter anderem als Energieträger für den Antrieb von Brennstoffzellen-Autos. Für die nötige Sicherheit sorgt das Fraunhofer ICT: Die Forscherinnen und Forscher untersuchen den Wasserstoff im jeweiligen System und betrachten verschiedene Möglichkeiten – bis hin zum Worst-Case-Szenario. Sie berechnen mögliche Fehler und leiten Wasserstoff anhand der theoretischen Ergebnisse gezielt in Hohlräume – wobei im hauseigenen Testgelände, das für bis zu drei Kilogramm TNT-Äquivalent ausgelegt ist, auch mal ganze Autos explodieren. Das Fraunhofer ICT bearbeitet zudem Fragen rund um den Sicherheitsabstand im Tankstellenbereich und der Druckabsicherung von Tankstellenbehältern.

Der Sicherheit bei der Energieversorgung im Wohnquartier widmet sich das Fraunhofer ICT im Projekt »Energiepuffer«: In diesem Vorhaben nutzt eine simulierte Passivhaussiedlung regenerativ hergestellten Wasserstoff als stationäres Speichersystem, um mithilfe eines intelligenten, prädiktiven Regelkonzepts energieautark zu werden. Dafür wird Energie aus Photovoltaikanlagen in Form von Wasserstoff gespeichert und im Winter via Brennstoffzellen rückverstromt, Abwärme genutzt und per Nahwärmenetz bedarfsgerecht umverteilt. Die Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer ICT haben die Wasserstoffanlage dimensioniert und entworfen, bauen die Systemsteuerung auf und unterziehen das System Stresstests, indem sie Fehlerfälle simulieren.

Auch bei Speicherung und Transport von Wasserstoff ist Sicherheit oberstes Gebot. Wasserstoff kann in Materialien eindringen und sie schädigen oder sogar zu Bauteilversagen führen. Das Fraunhofer IWM verfolgt im hauseigenen Wasserstofflabor die Diffusion von Wasserstoff und die Versprödung der Werkstoffe von der makroskopischen Skala bis hin zu Kristallstrukturen und Quanteneffekten und erstellt daraus Lebensdauererhersagen und Risikoeinschätzungen. Wichtig ist das unter anderem bei Tanks oder Ferngasleitungen, die künftig bis zu 20 Prozent Wasserstoff transportieren sollen. In einem weiteren großen Projekt untersuchen zahlreiche Partner die Möglichkeiten, die Salzkavernen als Wasserstoffspeicher bieten. Das Fraunhofer IWM ist dabei für alle metallischen Komponenten und die damit verbundenen Sicherheitsaspekte zuständig.



Materialtests an Systemen bis zum Megawatt-Bereich führt das Fraunhofer IMWS durch. Die Messungen am Teststand werden mit mikrostrukturellen und analytischen Methoden kombiniert, um Ermüdungen und Schäden bis zur einzelnen Komponente, etwa einer Bipolarplatte, Elektrode oder Membran zurückzuverfolgen sowie Ableitungen für die Konstruktion und Produktion der Systeme zu generieren. Mit dem verstärkten Einsatz von Wasserstofftechnologien bringen eine ganze Reihe weiterer Fraunhofer-Institute ihr Know-how zu Sicherheit und Lebensdauer ein, etwa das Fraunhofer LBF bei Systemzuverlässigkeit, das Fraunhofer EMI seine Expertise bei Crash-Tests und explosiven Gasen, Fraunhofer IPM und IMS bei Sensoren oder das Fraunhofer IZFP seine sensorbasierte Prüftechnik für den gesamten Produktlebenszyklus.

## Ein möglichst langes Leben ...

Sicherheit ist das eine. Daneben sollen Systeme möglichst lange in Betrieb bleiben. Der Stabilität von Katalysatoren widmet sich unter anderem das Fraunhofer ICT und untersucht etwa die Haltbarkeit der eingesetzten Trägermaterialien. Insbesondere stehen die Korrosion und die Temperaturabhängigkeit der Degradationsprozesse sowie der Einfluss von Verunreinigungen im Fokus.

Ein zunehmend wichtiges Thema ist Life Cycle Analysis – also die Erfassung von Energie- und Stoffflüssen über den ganzen Lebenszyklus von Produkten, um Unternehmen und öffentliche Entscheidungsträger zu beraten. Das Fraunhofer ISE hat beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Emissionen von batteriebetriebenen Diesel- und Wasserstofffahrzeugen verglichen und dabei erstmalig auch die Vorkette berücksichtigt. Das Fraunhofer IPA wiederum bewertet Materialkreisläufe für einzelne wasserstoffbezogene Produkte: Welche Rohstoffe könnten am Markt künftig nicht ausreichend verfügbar sein? Wissen die Hersteller dies frühzeitig, können sie sich rechtzeitig um Lösungen bemühen.

1 Bruchfläche bei Wasserstoffversprödung; **Fraunhofer IWM**

2 Analysen zur technischen Sicherheit: Hochgeschwindigkeitsvisualisierung; **Fraunhofer ICT**



Aufgrund der Ergebnisse, die wir liefern, konnten bereits zahlreiche Hersteller eine Zulassung für ihre Autos für ganz spezielle Einsätze bekommen. Unsere langjährigen Kooperationen sind dabei von Vertrauen geprägt.«  
*Wilhelm Eckl, stellvertretender Institutsleiter Fraunhofer ICT*





# VOM MATERIAL ZUM SYSTEM: DIE TECHNISCHE BASIS

## UNSERE INSTITUTE:

### Fraunhofer IKTS:

Komponenten- und Systementwicklung und -integration (MW-Klasse)  
SOEC/SOFC  
Wasserstoffaufbereitung

### Fraunhofer ISE:

Komponenten- und Systementwicklung und -integration (kompakte und mobile Systeme)  
PEM-Elektrolyse und PEM-FC

### Fraunhofer IAP, Fraunhofer ICT, Fraunhofer IFAM, Fraunhofer ISE und Fraunhofer IST:

Materialentwicklung

### Fraunhofer ICT, Fraunhofer IMM und Fraunhofer UMSICHT:

Katalysatorentwicklung

### Fraunhofer IGB, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer IMM und Fraunhofer IMWS:

Reforming

Wasserstoff wird als Energieträger und chemischer Rohstoff einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, die Klimaziele zu erreichen. Dies kann jedoch nur gelingen, wenn die Systeme zu Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von H<sub>2</sub> optimiert, also energieeffizienter, robuster, sicherer und wirtschaftlicher werden. Fraunhofer leistet mit seinen Kompetenzen einen entscheidenden Beitrag dazu.

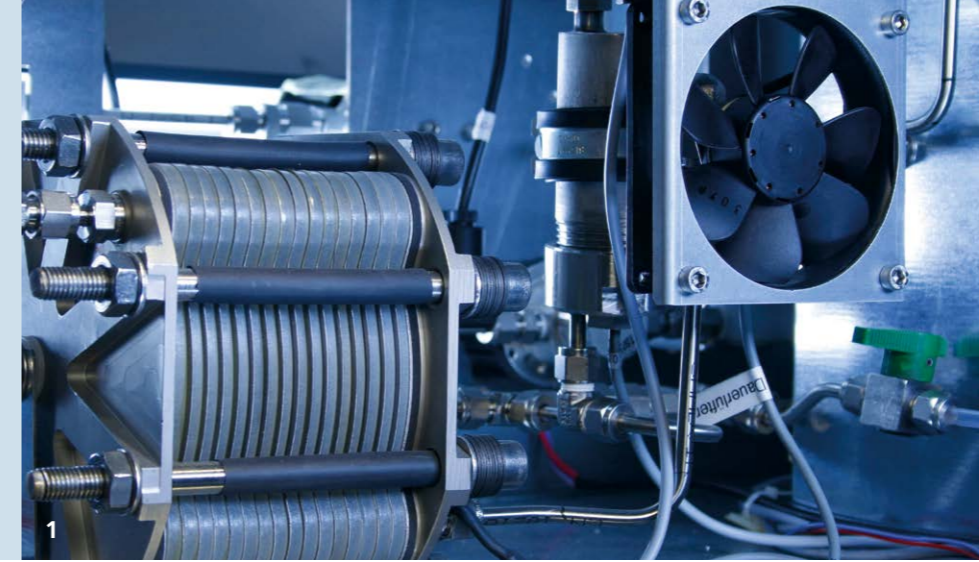
## Elektrolyseure: Vom Strom zum Wasserstoff

Zur Erzeugung von Wasserstoff wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom in H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> zerlegt. Jede Art der Elektrolyse bringt spezifische Vorteile mit sich, sodass die Wahl der geeigneten Technologie je nach Einsatzszenario unterschiedlich ausfallen kann. Fraunhofer-Forscherinnen und -Forscher verfügen bei allen Elektrolysearten über große Kompetenz und können viel dazu beitragen, die Elektrolyse weiter voranzubringen. Während die wässrige alkalische Elektrolyse (AEL) und zu weiten Teilen auch die saure Membran-Elektrolyse – PEM-Elektrolyse genannt – technisch recht ausgereift sind, sind bei der alkalischen Membran-Elektrolyse und der Hochtemperatur-Elektrolyse noch technologische Fragen zu klären.

Die robusten Elektrolyseure für AEL kamen bisher in Kraftwerken und Chemieanlagen mit stationärer Belastung zum Einsatz, in denen die Last stets gleich blieb. Nun steht jedoch ein Paradigmenwechsel an: Durch die regenerativen Energien entstehen starke Lastschwankungen, die neue Konzepte erfordern. Fragen rund um diese Dynamik untersucht das Fraunhofer IFAM im Technikumsmaßstab: in einer Anlage mit einer Leistung von 30 Kilowatt. Partnern bietet das Institut Dienstleistungen für die Analyse des Realverhaltens von AEL-Elektrolyseuren an.

Jünger als die AEL ist die PEM-Elektrolyse. Während erstere einen Technologiereifegrad von acht bis neun hat, liegt jener der PEM-Elektrolyse bei sieben bis acht. Auch sie bietet diverse Vorteile: So können die verwendeten Stromdichten sehr hoch sein, die Bauweise sehr kompakt – und das Verfahren ist dynamisch betreibbar. Aufgrund des sauren Mediums müssen die Materialien jedoch sehr robust sein. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer ISE entwickeln neue Membranmaterialien, verlängern die Haltbarkeit der Zellen durch eine Anti-Korrosions-Beschichtung, führen Lebensdauertests durch und wollen das Verfahren in größeren Maßstab überführen. All diese Maßnahmen können dazu beitragen, die Kosten zu senken. In fünf bis zehn Jahren dürften so die PEM-Elektrolyseure in einem vergleichbaren Preisrahmen liegen wie die alkalischen.

Kompaktere Elektrolyseure und kostengünstige Katalysatormaterialien lassen sich auch über alkalische Elektrolysezellen realisieren. Die Grundprozesse sind im Wesentlichen geklärt,



im Vordergrund stehen Fragen der Anwendung. Im Projekt REVAL optimieren Fraunhofer IFAM und Fraunhofer IMWS mit Industriepartnern die Langzeitstabilität der Elektroden. Das Vorhaben unter dem Dach der BMBF-geförderten Initiative Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany (HYPOS) hat zum Ziel, einen langzeitstabilen und effizienten Prototyp zu entwickeln und für die Produktion vorzubereiten.

Hochtemperatur-Elektrolyse findet bei über 800 °C statt. Wo Abwärme zur Verfügung steht, kann sie ihre Stärken entfalten: Um ihre Reaktionen zu katalysieren, sind keine Edelmetalle nötig; überdies lassen sich die gleichen Systeme sowohl im Elektrolyse- als auch im Brennstoffzellenmodus nutzen. Schließlich ermöglicht sie die Co-Elektrolyse, bei der Wasser in H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> sowie CO<sub>2</sub> in Sauerstoff und Kohlenmonoxid (CO) aufgespalten werden. Das CO bildet zusammen mit H<sub>2</sub> das »Synthesegas«, Grundlage zur Herstellung zahlreicher Chemieprodukte. Das Fraunhofer IKTS widmet sich der Langzeitstabilität der Elektrolyseure ebenso wie dem Wirkungsgrad und den Kosten. Die Teams optimieren Materialien, fertigen die Zellen und bauen sie zu Stacks zusammen, unterziehen diese Materialtests oder integrieren sie in Systeme. So steht auch eine erste Anlage zur Kopplung von Hochtemperatur-Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese mit einem Kilowatt Leistung am Fraunhofer IKTS. In Colyssy, einem Projekt der HYPOS-Initiative, skalieren die Forscher diese für den Industrie-Einsatz auf zehn Kilowatt hoch (siehe Kapitel »Klimaneutrale industrielle Prozesse«, Seite 7).

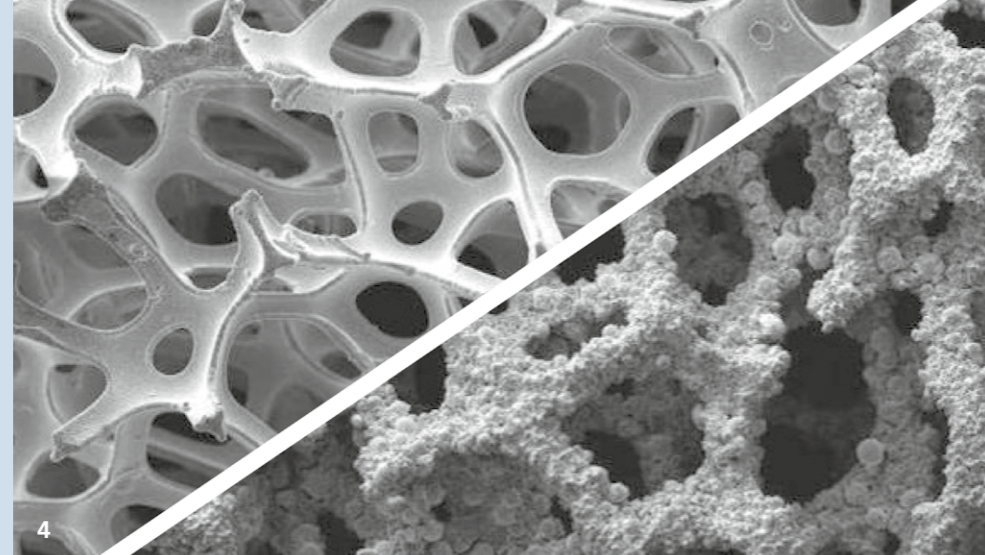
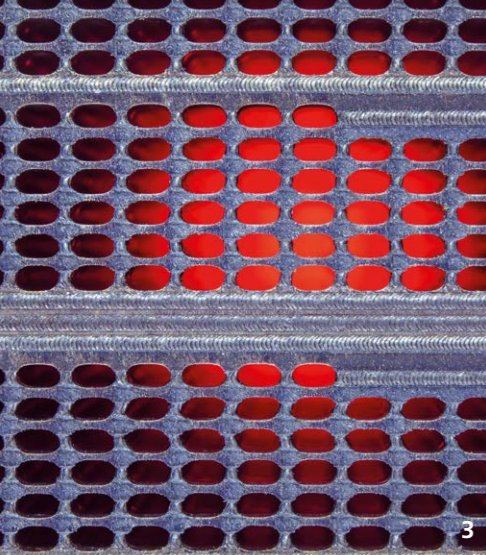
## Brennstoffzellen: Rückverstromung von Wasserstoff

Die im Wasserstoff gebundene Energie können Brennstoffzellen in kontrollierten Prozessen zurück in elektrische Energie verwandeln. Für stationäre Anwendungen setzt man unter anderem auf SOFC-Brennstoffzellen, kurz für »Solid Oxide Fuel Cells«. Sie eignen sich vor allem für die Kraft-Wärme-(Kälte-)Kopplung und können statt mit reinem H<sub>2</sub> auch mit Kohlenwasserstoffen betrieben werden. Das Fraunhofer IKTS hat ein SOFC-System entwickelt, mit dem sich Strom und Wärme hocheffizient herstellen lassen – etwa für die netzferne Versorgung. Das Fraunhofer IKTS arbeitete z.B. an planaren Zellen und Stacks und entwickelte die Technologie etwa mit der Dresdner Firma Sunfire bis zur Marktreife.

In Fahrzeugen haben sich PEM-Brennstoffzellen durchgesetzt, denn sie erzielen eine hohe Leistungsdichte und sehr hohe Dynamiken. Hier dienen die Beschichtungen einer Membran als Elektroden. Man spricht dabei auch von einer »Membran-Elektrodeninheit«, kurz MEA. Im Projekt HyFab arbeitet das Fraunhofer ISE mit Förderung des Landes Baden-Württemberg daran, die funktionalen Zusammenhänge in der Katalysatorschicht aufzuklären sowie Prozess-technologien für die Massenproduktion von MEAs zu optimieren.

1 Prototyp eines PEM-Druckelektrolyseurs; Fraunhofer ISE

2 Stack-Designs werden auf Praxistauglichkeit hin entwickelt und getestet; Fraunhofer IKTS



**3** Bereitstellung von Wasserstoff aus organischen Verbindungen basiert auf ausgeklügelten Reforming-Systemen; Fraunhofer IMM

**4** Metallschaum-Substrat für Elektroden, mit und ohne Katalysatorschicht; Fraunhofer IFAM

Ein reibungsloser Betrieb der Brennstoffzelle erfordert, dass der Stack dicht bleibt. Daran arbeitet das Fraunhofer IWU mit der TU Chemnitz und Industriepartnern: Smarte Dichtungen erkennen, wenn sich die Vorspannung des Stacks während des Betriebs ändert. Mithilfe von Formgedächtnislegierungen wird dann die optimale Vorspannkraft wiederhergestellt.

#### Systeme zum Reforming

Derzeit entsteht Wasserstoff meist nicht aus Wasserelektrolyse, sondern durch Reformierung, basierend auf organischen Verbindungen – im einfachsten Fall Methan oder Methanol. Auch diese Art der H<sub>2</sub>-Herstellung kann in einer nachhaltigen Industrie eine Funktion erfüllen, wenn etwa die organischen Verbindungen aus Biomasse stammen und wenn das entstehende CO<sub>2</sub> dem globalen Kreislauf entzogen wird. Mehrere Fraunhofer-Institute arbeiten an der Optimierung der zugrunde liegenden Reformersysteme: Das Fraunhofer IMM entwickelt Komplettlösungen für Brennstoffaufbereitung und -synthese vom Labor- über den Pilotmaßstab bis zur Serienreife. Das Fraunhofer IKTS widmet sich dem Brenner, vielmehr seinem Herzstück, der Schaumkeramik. Für eine lange Lebensdauer muss diese äußerst hochtemperatur- und thermoschockbeständig sein. Offenporige Schaumkeramiken aus Siliciumcarbid sind hierfür besonders geeignet. Die Forscherinnen und Forscher legen diese zellulären Keramiken gezielt auf die Brenner- oder Reformierart auf und entwickeln sie weiter. Spezielle Schaumkeramiken des IKTS verfügen über eine besonders hohe Festigkeit im Temperaturbereich bis 1300 °C.

#### Schlüsselement Katalysatoren

Leistungsfähige und preiswerte Katalysatoren sind für effiziente Elektrolyseure oder Brennstoffzellen unerlässlich. Hier haben mehrere Fraunhofer-Institute große Expertise aufgebaut mit dem Ziel, sowohl den Einsatz von Edelmetallen zu reduzieren als auch die Effizienz zu steigern. Im Elektrolyseur gelten dabei für die Wasserstoff- völlig andere Anforderungen als für die Sauerstoff-Elektrode. So haben etwa Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer ICT im BMBF-Projekt HyCO<sub>n</sub> geträgerte Katalysatoren auf Iridiumoxidbasis für die Produktion von Sauerstoff entwickelt. Sie untersuchen auch die Steigerung der Aktivität durch Mischoxidbildung oder die Fehlstellenbildung durch Dotierung mit Halogeniden. Auf Basis solcher Vorarbeiten arbeitet das Fraunhofer ICT schließlich an bifunktionellen Sauerstoffkatalysatoren für unitäre reversible Brennstoffzellen auf PEM-Basis. Auch für unterschiedliche Typen von elektrochemischen Zellen im Nieder- und Mitteltemperaturbereich (bis etwa 200 °C) entwickelt das Fraunhofer ICT Elektrokatalysatoren. So arbeiten die Forscherinnen und Forscher etwa an der Verbesserung von Elektroden für die Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle. Im Auftrag des Bundesministeriums der Verteidigung entwickelt das Fraunhofer ICT für diesen Brennstoffzelltyp Materialien und

Systeme, die mit logistischen Treibstoffen arbeiten können. Neue Katalysatoren für die Wasser- und CO<sub>2</sub>-Elektrolyse entwickeln auch die Kolleginnen und Kollegen vom Fraunhofer UMSICHT.

#### Speicherverfahren

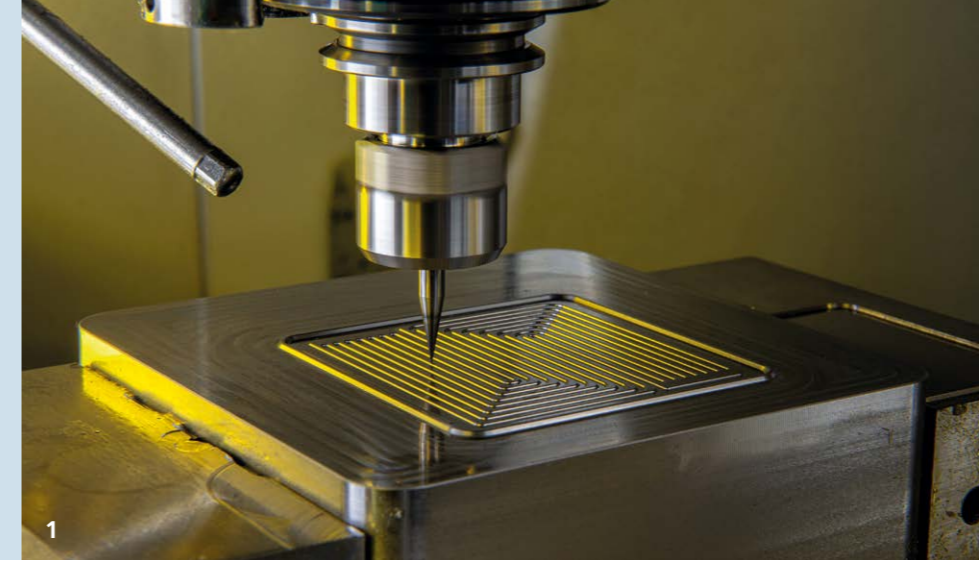
Unterschiedliche Anwendungen von Wasserstoff erfordern auch unterschiedliche Konzepte für Speicherung und Transport des begehrten Gases. Für Transporte unter 100 Kilometern entwickelt das Fraunhofer IFF einen portablen, modularen H<sub>2</sub>-Speicher, der weniger als 750 Kilogramm wiegt und sich auf »grüne« Kleintransporter laden lässt. Speichern lässt sich Wasserstoff auch in LOHC-Speichern, kurz für »Liquid Organic Hydrogen Carrier«. Dabei wird H<sub>2</sub> chemisch an ein Trägeröl gebunden – aufwendige Druckspeicher oder Kühlanlagen sind überflüssig. Europas ersten LOHC-Speicher neuester Generation haben Forscher am Fraunhofer IAO aufgebaut: Er hat eine Speicherkapazität von 2000 Kilowattstunden. Das Fraunhofer IFAM in Dresden entwickelt als Alternative eine einfach handhabbare »PowerPaste«, in der sich Wasserstoff bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck chemisch speichern lässt. Wird er benötigt, lässt er sich über die Zugabe von Wasser bedarfsgerecht freisetzen.

**5** Hochdruckbehälter aus CFK-Laminat und Polymer, entwickelt im Rahmen von HYPOS; Hexagon

» Die elektrolysegestützte Direktreduktion von Eisenerzen mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff kann in Zukunft der zentrale Prozessschritt einer umweltfreundlichen Stahlproduktion sein. CO<sub>2</sub>-Emissionen können damit um bis zu 95 Prozent gemindert werden. Insbesondere die auf keramischen Technologien basierende Hochtemperatur-Elektrolyse bietet ein hohes Anwendungspotenzial – neben Strom kann Abwärme als Energiequelle genutzt werden, was insgesamt zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führt.«  
Prof. Dr. Alexander Michaelis, Institutsleiter Fraunhofer IKTS



# HOHE ZAHLEN, GROSSE GRÖSSEN: PRODUKTION DER SYSTEME



## UNSERE INSTITUTE:

### Fraunhofer IFAM:

Fertigungsprozesse

### Fraunhofer ILT:

Schicht-, Schweiß-, Füge-,  
3D-Druckverfahren

### Fraunhofer IMWS:

Testplattformen MW-Klasse

### Fraunhofer IPA, Fraunhofer IPT und Fraunhofer IST:

Prozessdigitalisierung

### Fraunhofer IPA, Fraunhofer IPT und Fraunhofer IWU

Stack-Montage  
Bipolarplattenherstellung  
Anlagenentwicklung  
Automatisierte Produktions-  
technologien

### Fraunhofer IWU:

Smarte Dichtungen

Die erneuerbaren Energien sollen ab 2020 deutlich ausgebaut werden. Damit beginnt auch der Hochlauf der Wasserstofftechnologien: Geht man für das Jahr 2022 von einer installierten Elektrolyseleistung von etwa einem Gigawatt aus, wird diese bis zum Jahr 2050 um den Faktor 200 ansteigen. Daraus resultieren bis 2050 durchschnittliche Zubauraten von etwa vier bis acht Gigawatt pro Jahr – das ergab die Studie »Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland« von Fraunhofer ISE und IPA.

Um diese Zubauraten erfüllen zu können, muss sich die Herstellung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen ändern: Bisher werden einzelne Komponenten gebaut und dann per Hand zusammengesetzt, die Fertigung hat also vorwiegend Manufaktur-Charakter. Von einer automatischen Fertigung ist man größtenteils noch weit entfernt – und damit auch von einer hohen Stückzahl, besserer Reproduzierbarkeit und der notwendigen Kostenreduktion. Die Automatisierung der Elektrolyseur- und Brennstoffzellen-Produktion ist daher ein großes Thema für die gesamte Branche, zu dem die Fraunhofer-Gesellschaft mit ihren breiten Kompetenzen viel beitragen kann. Zum anderen geht es darum, Elektrolyseure und Brennstoffzellen auch in großen Dimensionen und mit hoher Leistung zu realisieren.

## Von der Manufaktur zur automatischen Produktion: Elektrolyseure und Brennstoffzellen

Eine automatische Produktion von Brennstoffzellen auf den Weg zu bringen, haben sich Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IPT zum Ziel gesetzt. Sie haben daher eine Produktionslinie aufgebaut: eine Forschungsinfrastruktur, auf der die komplette Fertigung auf einem industriellen Level durchgespielt werden kann. Die Produktion wird dort so nachgebildet, dass – für jedes einzelne Produktionsstück – keinerlei Skalierungsrisiken bestehen. In der Produktionslinie entwickeln die Forscher unter anderem eine hochdynamische Intralogistik für einen großen Automatisierer in Deutschland.

Ein Stack mit 400 Bipolarplatten – wie er etwa für den Automobilbereich benötigt wird – besteht aus 801 Hälften. Für 10 000 Stacks kommen daher schnell Millionen von Bipolarplatten zusammen. Wie lassen sich diese am besten zusammenfügen? Ist es sinnvoll, auf Warmumformung umzustellen oder Laserprozesse einzubinden? Eine Möglichkeit bietet das kontinuierliche Fügen. Dabei werden die Bleche erst spät vereinzelt, was höhere Durchsätze erlaubt. Fraunhofer IPT und ILT wollen sich dieser Technologie gemeinsam widmen. In einem weiteren Projekt verbinden die beiden Institute die Systementwicklung mit einem produktionsangepassten Design, dabei leiten sie Gestaltungsrichtlinien für die Produktion von Brennstoffzellen ab.

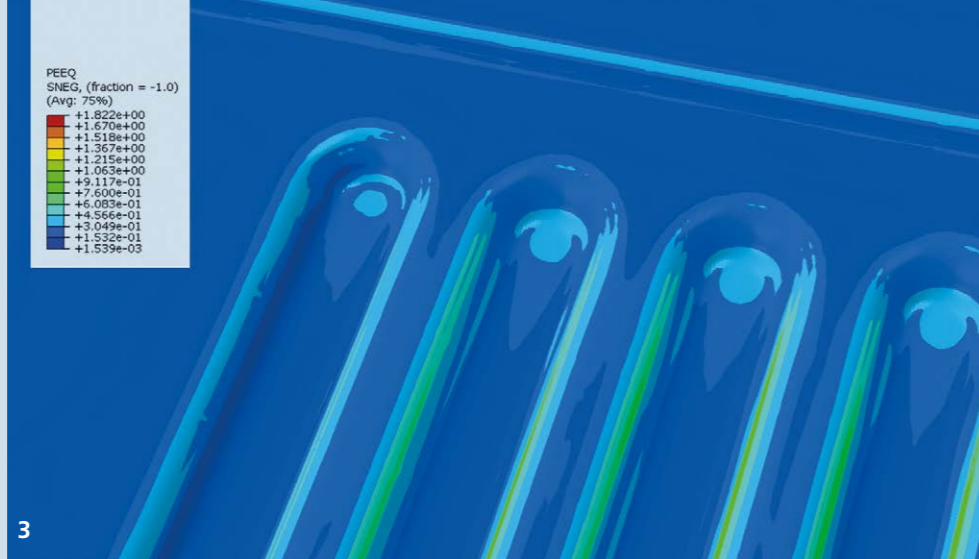
Das große Optimierungspotenzial im Bereich der Fertigung und Montage von Brennstoffzellen-Stacks wird anhand des EU-geförderten Projektes Fit-4-AMandA deutlich. In nur zwei Jahren gelang es dem internationalen Projektteam unter Beteiligung des Fraunhofer IWU, eine Anlage zur automatisierten PEM-Stack-Montagelinie für die Firma Proton Motor Fuel Cell GmbH zu entwickeln. Diese erhöht die Fertigungskapazität je nach Stack-Größe von 300 auf aktuell bis zu 5000 Stacks pro Jahr. Gleichzeitig können damit die Montagezeit bis zu 95 Prozent und die Montagekosten bis zu 90 Prozent verringert werden.

## Die Basis: Automatisierte Fertigung von Einzelkomponenten

Soll der gesamte Prozess der Elektrolyseur- und Brennstoffzellen-Fertigung automatisiert werden, gilt es nicht nur, den Gesamtprozess zu optimieren, sondern auch an einzelnen Stellschrauben zu drehen – also die Fertigung von Einzelkomponenten hochzuskalieren. Ein Beispiel sind die Elektroden, die für Elektrolyseure und Brennstoffzellen benötigt werden. Hier hat das Fraunhofer IFAM ein schnelles Durchsatzverfahren für die Beschichtung der Elektroden entwickelt: Sie bringen den Katalysator über einen Sprüh- oder Druckauftrag auf ein metallisches leitfähiges Substrat auf und schließen eine Wärmebehandlung an, um die Stabilität zu gewährleisten. Die Technologie hat einen Reifegrad von sieben, ist also im Erprobungsstadium. In zwei bis vier Jahren dürfte sie in industriellen Prozessen eingesetzt werden können. Das Fraunhofer IPT wiederum hat eine Rolle-zu-Rolle-Entwicklungsumgebung aufgebaut, mit der sich Fertigungsprozesse für die Membran-Elektroden-Einheit schnell vom Labormaßstab in die kontinuierliche Produktion überführen lassen. Die Entwicklungsumgebung eignet sich sowohl für Membran-Elektrodeneinheiten für Brennstoffzellen als auch für solche für Elektrolyseure.

Das Fraunhofer IWU widmet sich unter anderem der Aufgabe, die Fertigung der metallischen Bipolarplatten in einen automatisierten und robusten Prozess zu überführen. Deren Bleche sind extrem dünn, daher können schnell Fehler oder Risse auftreten. Die Forscherinnen und Forscher vergleichen, entwickeln und verbessern daher Möglichkeiten, Bipolarplatten durch neue Umformprozesse ressourceneffizient und in Serie herzustellen. Zum Beispiel untersuchen sie für einen Industriekunden die Vorteile des Hohlprägens. In einem weiteren Vorhaben verbessern sie das kontinuierliche Walzprägen: Weil dabei nicht einzelne Bleche bearbeitet werden, sondern ein ganzes Band, sind hohe Stückzahlen möglich. Sind dagegen sehr genaue und filigrane Konturen gewünscht und sollen die Stückzahlen eher niedrig sein – wie bei einem flexiblen Design –, bietet sich das Innenhochdruck-Umformen an. Dabei wird ein Blechhalbezeug in eine Werkzeugform gedrückt, indem ein Wirkmedium mit hohem Druck in einen Hohlraum an der Rückseite des Blechs gepumpt wird. Schließlich widmet sich das Team des Fraunhofer IWU dem wirkmedienbasierten Hochgeschwindigkeitsumformen. Hier schlägt ein Werkzeug mit hoher Geschwindigkeit auf das Wirkmedium und erzeugt darin eine Druckwelle, die das Blech in die gewünschte Form presst.

1 Herstellung von Umformwerkzeugen für Bipolarplatten; Fraunhofer IPT



**3 Experimentelle und simulative Untersuchung der Faltenbildung bei der Umformung von Bipolarplatten; Fraunhofer IWU**

Durch die hohe Geschwindigkeit lassen sich in zahlreichen Werkstoffen besondere Geometrien realisieren. Sind die Bipolarplatten gefertigt, müssen sie gefügt werden. Diesen Produktionsschritt bringen die Fraunhofer-Experten nah an den Umformprozess. Fügt man die Platten etwa durch Laserschweißen zusammen, lässt sich der Prozess direkt mit in das kontinuierliche Walzprägen integrieren; dadurch kann man hohe Stückzahlen realisieren.

Flexible Polymer-Bipolarplatten entwickelt das Fraunhofer UMSICHT. Sie können miteinander und mit anderen Fügepartnern stoffschlüssig verbunden werden, sind sehr flexibel und ermöglichen somit völlig neue Konstruktionsmöglichkeiten für PEM-Brennstoffzellen. Auf ihrer Basis soll der Stack-Aufbau einfacher, sicherer und günstiger werden. Mit einem Industriepartner arbeitet das Institut daran, das Herstellungsverfahren der Bipolarplatten von der Laboranlage in eine großtechnische Rolle-zu-Rolle-Fertigung zu überführen.

Schließlich ist auch die Produktion von Wasserstofftanks eine Herausforderung. H<sub>2</sub>-Tanks für mobile Anwendungen bestehen derzeit meist aus duroplastehaltigen Werkstoffen. Diese lassen sich jedoch nicht recyceln – sie können nur geschreddert werden. Daher setzt das Fraunhofer IPT auf Thermoplasten: Der Liner, ein wasserstoffdichter Tank, wird mit Kohlenfasern umwickelt, die in eine thermoplastische Matrix eingebettet sind und die miteinander verschweißt werden. Auf umgekehrtem Wege lassen sich diese Materialien auch wieder recyceln: Man schweißt die Platten einfach wieder ab. Die Forscherinnen und Forscher arbeiten derzeit an den entsprechenden Produktionsverfahren.

**Produktionstechnische Begleitung**

Für übergeordnete Aspekte der Massenherstellung all dieser Systeme und Komponenten bieten produktionstechnische Fraunhofer-Institute ihren Kunden ihr Know-how an, etwa in prozessintegrierter Qualitätssicherung, Produktionssicherheit oder im Bauteilhandling. So ist bei der Prozessautomatisierung eine Qualitätskontrolle unerlässlich. Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IWU entwickeln daher ein geeignetes Mess- und Regelungskonzept für Brennstoffzellen-Systeme. In einem ersten Schritt verknüpfen sie die Prozessparameter in einem Simulationsmodell und identifizieren die Anforderungen an die Sensoren.

Digitalisierung ist ein großes Thema, wenn es um die Automatisierung von Produktions- und Herstellungsprozessen geht. Doch die Wasserstofftechnologien stehen nicht nur in puncto Automatisierung, sondern auch in der Digitalisierung noch ganz am Anfang. Teams des Fraunhofer IPA untersuchen daher, welche Technologien aus stärker digitalisierten Industriezweigen sich auf die Wasserstofftechnologien übertragen lassen.

**Größer, höher, leistungsfähiger**

Bei den Brennstoffzellen geht es um Massenproduktion; bei stationären Technologien für die Wasserstoffwirtschaft kommt zu den großen Stückzahlen der Komponenten eine weitere Herausforderung hinzu: das reibungslose Zusammenspiel in neuen Größendimensionen. Ein Testfeld hierfür zu betreiben, hat sich Fraunhofer in Sachsen zur Aufgabe gemacht: Mit Unterstützung des Freistaats und in Zusammenarbeit mit der Siemens AG soll ein »Hydrogen Laboratory Görlitz« als gemeinsame Forschungsplattform entstehen. Hier werden innovative Lösungen für H<sub>2</sub>- und Speichertechnologien entlang der H<sub>2</sub>-Wertschöpfungskette »Power to Hydrogen to Power« erprobt, mit dem Ziel, ein nationales Prüf- und Zertifizierungszentrum für H<sub>2</sub>- und Speichertechnologien im Schulterschluss mit der Elektrolyseplattform in Leuna zu etablieren. Der Fokus liegt dabei auf dem Testen und Validieren der großtechnischen Anlagen zur Elektrolyse, zur Speicherung des Wasserstoffs und seinem Transport und schließlich zur Rückverstromung in Brennstoffzellen-Systemen oder Gasturbinen. Fraunhofer IWU und IMWS koordinieren den interdisziplinären Ansatz, der Produktinnovation, Material- und Systemdiagnostik sowie die Entwicklung von Zertifizierungsstandards umfasst. Für den Wasserstoff, der im Rahmen des Testfelds produziert wird, wollen die Institute zusammen mit regionalen Partnern Nutzungskonzepte entwickeln.

**4 Rolle-zu-Rolle-Fertigung von Membranen; Fraunhofer IPT**



Für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologien müssen die Produktionskosten spürbar reduziert werden, dafür ist eine automatisierte Produktion der Schlüssel. Dies erfordert wirtschaftliche und robuste Einzelprozesse sowie intelligente Verketzungstechnologien. Mit unserem Kompetenzprofil auf dem Gebiet der Produktionstechnologien und Fertigungsanlagen können wir als Fraunhofer IWU die deutsche Industrie hierbei maßgeblich unterstützen und befähigen, sich international wettbewerbsfähig zu positionieren.«

Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel, Institutsleiter Fraunhofer IWU



Die Diskussion um den Klimawandel hat das Thema Nachhaltigkeit nochmals stärker ins Zentrum der Diskussion gerückt. Auf viele Fragen liefert Wasserstoff eine wichtige Antwort. Er dürfte daher zum Schlüsselmolekül der Energie- und Rohstoffwende werden.

Der Bedarf für Wasserstofftechnologien liegt auf der Hand: Da ist zunächst die Energieversorgung, wo es immer stärker darum geht, Energie flexibel zwischenspeichern, wenn sie in großen Mengen erzeugt werden kann, und ins System zurückzuspeisen, wenn Sonne und Wind sich rarmachen. Wenn die Klimaziele erreicht werden sollen, muss die regenerative Energieerzeugung konsequent ausgebaut werden. Aber erst die Kopplung mit Wasserstofftechnologien macht diesen Ausbau überhaupt sinnvoll. Zehn-Megawatt-Elektrolyseure können Angebot und Nachfrage sehr schnell ausgleichen und werden künftig eine wichtige Regelgröße im Netz sein. Für eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 95 Prozent reicht der Umstieg auf regenerative Energiequellen nicht aus. Industrielle Prozesse sollen »defossiliert« und die Rohstoffbasis soll auf erneuerbare Ressourcen umgestellt werden. Damit werden in rascher Folge weitere Wasserstofflösungen ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich interessant. So soll beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Stahlkonzernen bereits ab 2021 durch den Einsatz von Wasserstoff reduziert werden, bis 2050 soll es gar möglich sein, CO<sub>2</sub>-neutralen Stahl herzustellen. Wenn CO<sub>2</sub> aus hochkonzentrierten Gasströmen entfernt und mithilfe von Wasserstoff in Basischemikalien wie Methanol umgewandelt wird, verbessert dies die Klimabilanz industrieller Prozesse und bedeutet gleichzeitig den Einstieg in eine Produktion, die unabhängig von fossilen Ressourcen ist. Langfristig kann sogar das CO<sub>2</sub> aus der Luft mit Wasserstoff umgewandelt und als Rohstoff genutzt werden, was die globalen Kohlenstoffkreisläufe schließen würde. Auch in Verkehr und Transport wird Wasserstoff zur Klimaneutralität beitragen, gerade dann, wenn direkt-elektrifizierte Lösungen keine Option darstellen.

Wie schätzen Experten die künftige Entwicklung von Wasserstofftechnologien ein? Solchen Fragen widmet sich das 2017 gegründete Hydrogen Council, an dem sich weltweit 53 Unternehmen beteiligen – darunter Linde, Daimler, Audi, Bosch und BMW. Dieses geht davon aus, dass bis 2050 18 Prozent des globalen Energiebedarfs durch Wasserstoff gedeckt werden können, was einer jährlichen Vermeidung von sechs Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Ausstoß gleichkommt. Eine Fraunhofer-Studie kommt zu dem Ergebnis, dass Deutschland 2050 bis zu 800 Terawattstunden Wasserstoff benötigen könnte, wenn die Potenziale ausgeschöpft werden und etwa auch der Schiffs- und Flugverkehr auf Wasserstoff und daraus erzeugten synthetischen Treibstoffen basiert (Studie vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2019). Eine Elektrolysekapazität von 80 Gigawatt erscheint in Deutschland möglich, aber selbst dies wird nur einen Teil der Nachfrage decken können.

Somit ist klar, dass die Wasserstoffwirtschaft von Anfang an eine internationale Dimension hat: Viele Regionen in der Welt bereiten sich auf den Handel mit nachhaltig erzeugten Energieträgern und Basischemikalien vor, was für Deutschland neue Energiepartnerschaften jenseits der bisherigen fossilen Energieimporte ermöglicht. So beginnt beispielsweise Saudi-Arabien damit, große Photovoltaik-Parks für den Export von Wasserstoff zu planen und zu bauen. Auch Norwegen, Australien, Chile, die Vereinigten Arabischen Emirate oder Marokko setzen verstärkt auf Wasserstoff. Japan nimmt international eine Vorreiterrolle beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ein: Seit 2017 hat das Land eine Wasserstoffstrategie, für die jährlich rund 300 Mio € zur Verfügung stehen. Für deutsche Unternehmen bedeutet dies, dass für Wasserstofftechnologien attraktive Märkte weltweit entstehen.

Wichtig ist, heute die Weichen zu stellen. Denn wenn auch der Bedarf an Wasserstoff in den kommenden Jahren erst allmählich ansteigt, müssen jetzt die Technologien optimiert, die Standards gesetzt und die Infrastrukturen aufgebaut werden. Bis Ende der 20er-Jahre muss Deutschland in der Wasserelektrolyse bereits Zuwachsraten von etwa einem Gigawatt pro Jahr erreichen. Nur so kann die Klimawende gelingen und Deutschland gleichzeitig seine wirtschaftliche Leistungsfähigkeit sichern und seine Chancen als Technologie-Exporteur wahren. Die Fraunhofer-Institute stehen bei solchen Herausforderungen sowohl der Industrie als auch der Politik als kompetenter Partner zur Seite: Sie entwickeln nicht nur die notwendigen Technologien, sondern erstellen auch Studien zur Marktentwicklung und zur Nachhaltigkeit. Zahlreiche Länder stehen in den Startlöchern, um die Wasserstoffwirtschaft anzukurbeln. Daher ist es auch in Deutschland an der Zeit, die entsprechenden Technologien zur Marktreife zu bringen.

Seit 2020 schließt die neue Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG die Portfoliolücke bei der sektorübergreifenden Betrachtung von Energieinfrastrukturen. Die Einrichtung integriert das Geothermiezentrum Bochum, ist an den drei Hauptstandorten Cottbus, Bochum und Jülich beheimatet und in Zittau gibt es eine Außenstelle.

Zahlreiche Schritte auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten und emissionsarmen Kohlenstoff-, Kreislauf- und Wasserstoffwirtschaft sind bereits gemacht. Künftig wird ein neues verfahrenstechnisch orientiertes Fraunhofer-Institut für Wasserstoff- und Kohlenstoff-Prozesstechnik in Mitteldeutschland den Transformationsprozess der Industrie zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft begleiten.

# FRAUNHOFER-WASSERSTOFF-NETZWERK

## Die Institute des Netzwerks

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut EMI  
Freiburg, *Dr. Alexander Stolz*

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und  
Organisation IAO  
Stuttgart, *Dr.-Ing. Florian Herrmann*

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Stuttgart, *Dr.-Ing. Robert Ilg*

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Pfinztal, *Dipl.-Phys. Wilhelm Eckl*

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und  
Energiesystemtechnik IEE  
Kassel, *Jochen Bard*

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM  
Institutsteil Dresden, *Dr. rer. nat. Lars Röntzsch*

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und  
-automatisierung IFF  
Magdeburg, *Dr.-Ing. Torsten Birth*

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien  
und Systeme IKTS  
Dresden, *Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Matthias Jahn*

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT  
Aachen, *Dr.-Ing. Arnold Gillner*

Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und  
Mikrosysteme IMM  
Mainz, *Prof. Dr.-Ing. Gunther Kolb*

Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen  
und Systeme IMS  
Duisburg, *Holger Kappert*

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen  
und Systemen IMWS  
Halle, *Dominik Härle*

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und  
Automatisierung IPA  
Stuttgart, *Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer*

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM  
Freiburg, *Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein*

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT  
Aachen, *Dr.-Ing. Christoph Baum*

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Freiburg, *Prof. Dr. Christopher Hebling*

Fraunhofer-Institut für System- und  
Innovationsforschung ISI  
Karlsruhe, *Prof. Dr. Mario Ragwitz*

Fraunhofer-Institut für Schicht- und  
Oberflächentechnik IST  
Braunschweig, *Dr.-Ing. Marko Eichler*

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES  
Bremerhaven, *Nora Denecke*

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM  
Freiburg, *Prof. Dr. Christian Elsässer*

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und  
Umformtechnik IWU  
Chemnitz, *Dr.-Ing. Ulrike Beyer*

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und  
Ergonomietechnik UMSICHT  
Oberhausen, *Prof. Dr.-Ing. Christian Doetsch*

## Weitere Fraunhofer-Institute mit ergänzenden Kompetenzen

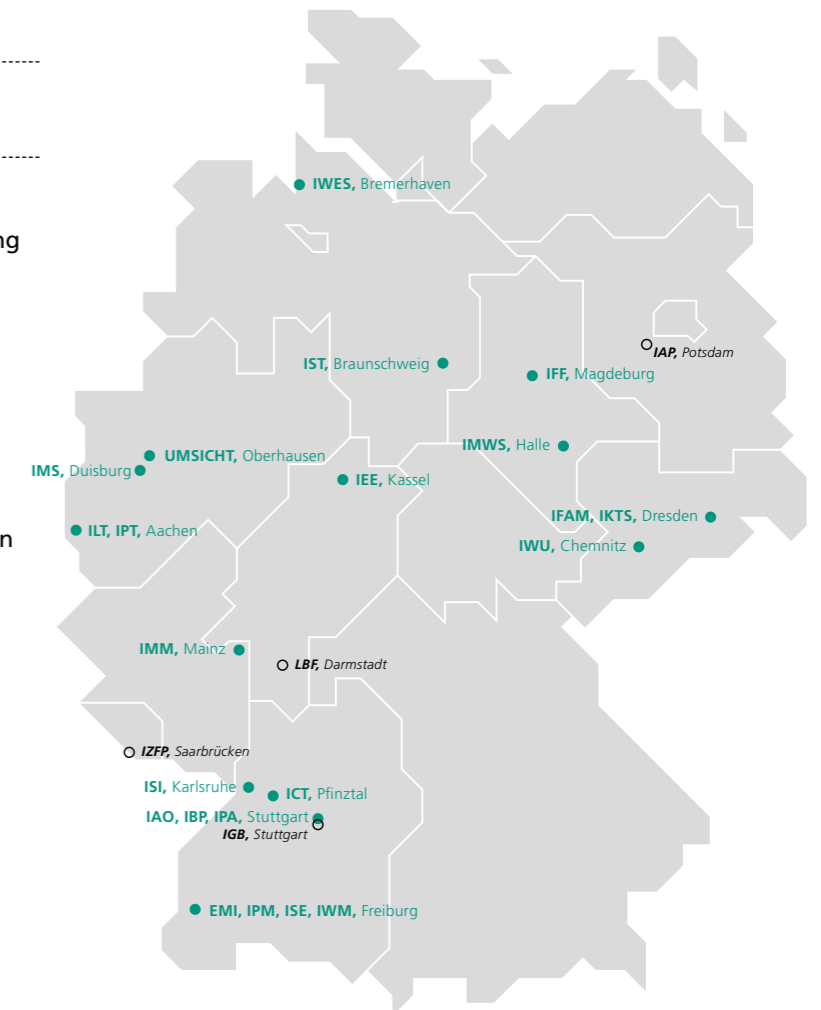
Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung  
IAP  
Potsdam

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und  
Bioverfahrenstechnik IGB  
Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren  
IZFP  
Saarbrücken

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit  
und Systemzuverlässigkeit LBF  
Darmstadt

Mehr Informationen unter:  
[www.wasserstoff.fraunhofer.de](http://www.wasserstoff.fraunhofer.de)



---

## Impressum

---

### **Konzeption und Redaktion:**

Dr.-Ing. Sylvia Schattauer (V.i.S.d.P.), Fraunhofer-Gesellschaft,  
Forschungskoordination  
Dr. Bernhard Aßmus, Fraunhofer-Gesellschaft, Think Tank

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.  
Hansastraße 27c, 80686 München  
www.fraunhofer.de

### **Text:**

Dr. Janine van Ackeren

### **Gestaltung:**

Ariane Lange, Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

### **Bildquellen:**

Seite 5: Fraunhofer/Bernd Huber  
Seite 7: Fraunhofer UMSICHT; thyssenkrupp AG/Rainer Kaysers  
Seite 8: Hochofen Salzgitter AG/Carsten Brand  
Seite 9: Fraunhofer IKTS; Fraunhofer UMSICHT/picturePeople  
Seite 11: Fraunhofer ISI/Stefan Effner  
Seite 13: Fraunhofer ISE  
Seite 15: Fraunhofer IWM; Fraunhofer ICT  
Seite 17: Fraunhofer ISE; Fraunhofer IKTS  
Seite 18: Fraunhofer IMM/Tobias Hang; Fraunhofer IFAM  
Seite 19: Fraunhofer IMWS; Fraunhofer IKTS/Jürgen Lösel  
Seite 21: Fraunhofer IPT  
Seite 22: Fraunhofer IWU  
Seite 23: Fraunhofer IPT/Guido Flüchter; Fraunhofer IWU/Matthias Heyde  
Alle übrigen Bilder: iStock

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.