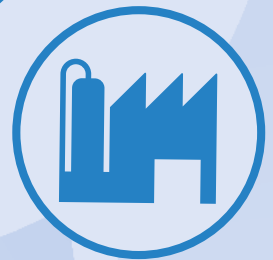


INDUSTRIELÖSUNGEN

# WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN



1	Überblick
2	Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff
4	Wasserstofferzeugung
6	Elektrolyse
8	Wasserstoffnutzung
12	Wasserstoffspeicherung und Transport
14	Vorlaufforschung
16	Kompetenzen
17	Kooperationsmodelle

**TITELBILD** *Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Energien produziert wird, ist ein Schlüsselement für die Energiewende.*

**1** *In Industrie und Verkehr soll Wasserstoff einen wesentlichen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung leisten.*

*Quelle: petrmalinak/Shutterstock*

# H2



## WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN

Wasserstoff wird in einem künftigen Energie- und Wirtschaftssystem eine bedeutende Rolle spielen: als Energieträger und als Rohstoff. Nur mit Wasserstoff kann es gelingen, industrielle Produktion, Wärmeerzeugung und Mobilität klimaneutral darzustellen, bei gleichzeitiger Reduzierung geostrategischer Abhängigkeiten.

Allein für Deutschland wird für 2050 ein Wasserstoffbedarf von 400 TWh pro Jahr erwartet. Dies entspricht fast der gesamten derzeitigen Stromproduktion. Es ist deshalb überaus wichtig, dass alle Wasserstofftechnologien stabil, robust, skalierbar und vor allem kostengünstig sind. Genau hier leistet das Fraunhofer IKTS seinen Beitrag.

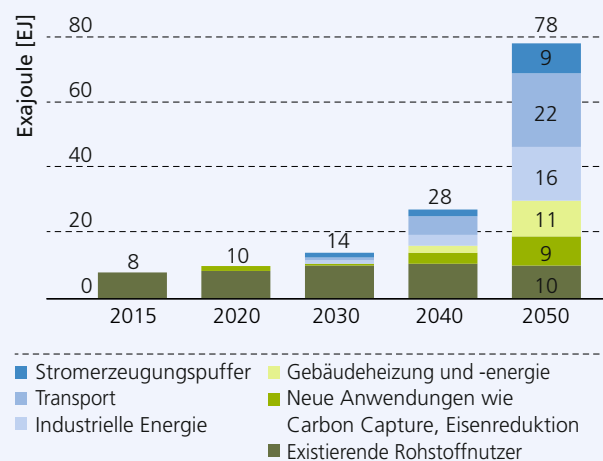
Wasserstoff ist nur dann klimaschonend, also grün, wenn er aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Die wichtigste Technologie dazu ist die Elektrolyse, die sich hervorragend zur Kopplung mit Windkraft und Photovoltaik eignet. Das IKTS hat jahrzehntelange Erfahrung in der Entwicklung und dem Bau elektrochemischer Reaktoren zur Herstellung und Nutzung von Wasserstoff. Daher ist die industrielle Elektrolyse eines der wichtigsten Betätigungsfelder.

Die einfache Speicherung und der Transport von Wasserstoff in Rohrleitungen machen seinen Einsatz attraktiv für die schwere Mobilität und die industrielle Anwendung. Das IKTS unterstützt hier mit solider werkstoffwissenschaftlicher Expertise sowie Mess- und Prüftechnik für die Überwachung von Tanks und Pipelines.

Die vielfältigsten Beiträge leistet das IKTS zur Wasserstoffnutzung: sei es die Umwandlung von Wasserstoff in chemische Energieträger oder Grundchemikalien, die Rückverstromung

in Brennstoffzellen oder die direkte energetische Nutzung in thermischen Prozessen oder der Stahlindustrie. Das IKTS entwickelt und demonstriert diese Technologien mit umfangreicher Systemkompetenz sowie Prototypen- und Testkapazität. Das Fraunhofer IKTS mit seiner umfassenden Kompetenz und seinen zahlreichen spezialisierten Standorten und technischen Einrichtungen ist ein europaweit führender Partner über die gesamte Nutzungskette heutiger und künftiger Wasserstofftechnologien.

Wasserstoffbedarf bis 2050



Die jährliche Nachfrage nach Wasserstoff könnte sich verzehnfachen (Quelle: Hydrogen Council, Hydrogen Scaling up).

# WERTSCHÖPFUNGSKETTE FÜR GRÜNEN WASSERSTOFF



ERZEUGUNG

SPEICHERUNG  
UND TRANSPORT

Ökostrom



Nutzung von  
erneuerbaren Energien

Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Energien produziert wird, ist das Schlüsselement für die Energiewende.

Wasserstoff ist ideal für die Sektorkopplung und trägt damit zur Defossilisierung der Energieversorgung bei.

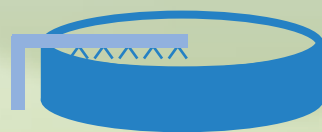
Wasser gewinnt als Ausgangsstoff für die Herstellung von Wasserstoff an Bedeutung.

Mit Brennstoffzellen- und Elektrolysetechnologien kann in strukturschwachen Regionen lokale Wertschöpfung geschaffen werden.



Elektrolyse

Elektrolyse,  
Co-Elektrolyse,  
Photokatalyse



Wassermanagement und  
Wasseraufbereitung  
(z. B. in Industrie und Bergbau)



Wasser

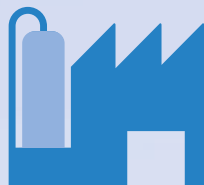
## NUTZUNG



### Mobilität

Wasserstoff ist der geeignete Kraftstoff für Gütertransport und Verkehr und damit eine ideale Ergänzung zur E-Mobilität.

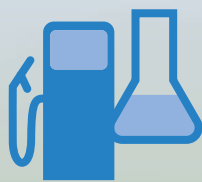
Bahnverkehr • Schwerlastverkehr •  
Schifffahrt • Luftfahrt • Landwirtschaft •  
Öffentlicher Nahverkehr



### CO<sub>2</sub>-arme Produktion

In CO<sub>2</sub>-intensiven Industriezweigen können mit Hilfe von Wasserstofftechnologien CO<sub>2</sub>-Emissionen nahezu vollständig vermieden werden.

Stahlindustrie • Kalk- und Zement-  
industrie • Chemische Industrie



### Werthaltige Produkte

Unter Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Industrieprozessen lassen sich zusammen mit grünem Wasserstoff werthaltige Produkte herstellen.

Synthetische Kraftstoffe • Höhere Alkohole  
und organische Wertstoffe • Wachse



### Strom und Wärme

Wasserstoff wird wie Erdgas ein wichtiger Energieträger sein. Mittels Brennstoffzellentechnologie lässt er sich zur effizienten Gewinnung von Strom und Wärme nutzen.

Brennstoffzellen-KWK-Anlagen • Prime-  
Power-Anwendungen • Prozesssensorik

Grüner  
Wasserstoff

H<sub>2</sub>

Monitoring und  
Sicherheitsüber-  
wachung

» WASSERSTOFF BEKOMMT [...] EINE ZENTRALE ROLLE BEI DER WEITERENTWICKLUNG UND VOLLENDUNG DER ENERGIEWENDE. «

Nationale Wasserstoffstrategie  
der Bundesregierung

## WASSERSTOFFERZEUGUNG

### Verfahren zur Wasserstoffherzeugung

Der größte Anteil an Wasserstoff wird heute über die Dampfreformierung von Erdgas erzeugt und als grauer Wasserstoff bezeichnet. Er weist derzeit die geringsten Kosten auf. Allerdings werden bei der Herstellung große Mengen an CO<sub>2</sub> freigesetzt. Wird dieses CO<sub>2</sub> bei der Reformierung abgetrennt und in der Erde gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS), ist von blauem Wasserstoff die Rede. Die Herausforderung besteht in der langfristig sicheren Lagerung des CO<sub>2</sub>. Der sogenannte türkise Wasserstoff wird ebenfalls aus Erdgas erzeugt, wobei Methan durch die Zufuhr von thermischer oder elektrischer Energie in seine Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff gespalten wird. Bei dem Verfahren selbst wird zwar kein CO<sub>2</sub> freigesetzt, jedoch sind wie bei allen erdgasbasierten Herstellprozessen die Vorkettenemissionen zu berücksichtigen. Hierzu zählen auch diffuse Methanemissionen der Erdgasförderung, die im Vergleich zu CO<sub>2</sub> einen noch größeren spezifischen Treibhausgaseffekt verursachen. Zudem ist die langfristige Bindung des festen Kohlenstoffs bzw. seine klimaunschädliche Lagerung noch ungeklärt. Bei allen diesen Verfahren besteht auch die Möglichkeit, Biogas anstelle von Erdgas zu verwenden. Dabei ist vor allem der Einsatz biogener Reststoffe im Hinblick auf die Nachhaltigkeit vorteilhaft. Die Herstellkosten lägen jedoch aufgrund der kleineren Anlagengrößen deutlich höher. Weiterhin müssten auch die Prozesskette und die damit verbundenen Emissionen in Abhängigkeit der verwendeten Einsatzstoffe wie Abfall- oder Reststoffe betrachtet werden.

Weitestgehend emissionsfrei ist die Herstellung von Wasserstoff über die Wasser-Elektrolyse, sofern dafür Strom aus erneuerbaren Energien verwendet wird. In diesem Fall handelt es sich um grünen Wasserstoff. Hierfür arbeitet das Fraunhofer IKTS an unterschiedlichen Elektrolyseverfahren (siehe Elektrolyse). Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Hochtemperatur-Elektrolyse.

Eine weitere Möglichkeit zur Wasserstoffherzeugung bieten biotechnologische Verfahren oder Konzepte zur Gewinnung von solarem Wasserstoff mittels Photokatalyse. Die photokatalytische Wasserspaltung besitzt klare Kostenvorteile durch eine geringe Systemkomplexität und den Einsatz großtechnisch erprobter Technologien aus der PV-Industrie. Ein wesentlicher Nachteil liegt aber im derzeit geringeren Gesamtwirkungsgrad. Das Fraunhofer IKTS arbeitet daher an neuen Materialien, weiterentwickelten Beschichtungsverfahren und an integrierten Gesamtsystemen, um die Effizienz zukünftig zu erhöhen.

### Wasserstoffmarkt

Derzeit wird ein Großteil des Wasserstoffs in Raffinerien sowie in der Ammoniaksynthese für die Massenproduktion von Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen benötigt.

#### Vergleich der verschiedenen Herstellverfahren im Hinblick auf aktuelle Defizite und Herstellkosten

<b>GRAU</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Dampfreformierung von Erdgas</li><li>– Mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden</li><li>– Ca. 1,65 €/kg</li></ul>
<b>BLAU</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Dampfreformierung von Erdgas gekoppelt mit CCS</li><li>– Gefahr der CO<sub>2</sub>-Freisetzung</li><li>– Ca. 3 €/kg</li></ul>
<b>TÜRKIS</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Methanpyrolyse (im Lichtbogen)</li><li>– Energiezufuhr über elektrische und thermische Energie</li><li>– Ca. 2,50 bis 3,10 €/kg</li></ul>
<b>GRÜN</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Wasser-Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien</li><li>– Derzeit kostenintensiv, da von Strompreis (Stromsteuer, EEG-Umlage und Netzentgelte) bestimmt</li><li>– Ca. 4,50 €/kg; zukünftig: 2,50 €/kg</li></ul>



Des Weiteren werden große Mengen an grauem Wasserstoff für die Methanolsynthese oder die Fischer-Tropsch-Synthese eingesetzt. Die Herstellung findet über Dampfreformierung in sehr großen Anlagen statt. Dabei wird nahezu die Gesamtmenge des erzeugten Wasserstoffs direkt vor Ort genutzt und nicht auf dem Markt gehandelt. Ein bereits etablierter Pfad zur Herstellung von Wasserstoff unter Einsatz elektrischer Energie ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse, bei der Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt und zum Teil auf den Markt gebracht wird. Der Anteil an der gesamten Wasserstoffproduktion liegt allerdings lediglich bei zwei Prozent.

## **DAS FRAUNHOFER IKTS ENTWICKELT TECHNOLOGIEN FÜR DIE HERSTELLUNG VON GRÜNEM WASSERSTOFF.**

Für den nachhaltigen Aufbau eines Markts für grünen Wasserstoff müssen die Herstellungskosten sinken. Dies kann gelingen, wenn die Effizienz und Langzeitstabilität der angewendeten Elektrolyseprozesse weiter gesteigert sowie geeignete Rahmenbedingungen gesetzt werden. Darüber hinaus ist es erforderlich, eine bedarfsgerechte Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen.

Ergänzend kann eine dezentrale Wasserstofferzeugung einen geeigneten Ansatz bieten. In Abhängigkeit von der erforderlichen Menge an Wasserstoff kann die Produktion direkt vor Ort günstiger sein – beispielsweise für den Betrieb einer Wasserstofftankstelle für Busse und LKW. Auch in der Kalk- und Zementindustrie oder in Biogasanlagen zur Herstellung werthaltiger Produkte ermöglicht die dezentrale Produktion einen schnelleren Einsatz und eine geringere Abhängigkeit von Verteilerstrukturen.

### **Wasser als Ressource für die Wasserstofferzeugung**

In Hinblick auf die Marktfähigkeit von grünem Wasserstoff muss in ausreichendem Maße reines Wasser für die Herstellung verfügbar sein. Insbesondere in dezentralen Anwendungen gewinnen daher kostengünstige Verfahren zur Wasseraufbereitung an Bedeutung. Dies betrifft je nach Standort des Elektrolyseurs zum einen die Entsalzung von Meerwasser und zum anderen die Aufbereitung von industriellen Prozesswässern.

Das Fraunhofer IKTS kombiniert hierfür die klassische keramische Membrantechnik mit elektrochemisch, sonochemisch und photokatalytisch basierten Prozessen und bindet diese in modulare Anlagenkonzepte ein. Damit lassen sich Lösungen für die dezentrale Wasseraufbereitung schaffen und die lokale Wertschöpfung erhöhen. Insbesondere für die Behandlung von Bergbauwässern hat das IKTS langjährige Entwicklungsarbeit betrieben und unikale elektrochemische Verfahren sowie technische Ausrüstungen in einem sehr hohen Reifegrad entwickelt. Diese ermöglichen es, Bergbauwässer aufzubereiten und gleichzeitig Wasserstoff als verwertbares Nebenprodukt abzutrennen (siehe Membran-Elektrolyse). Für den Strukturwandel in den Kohle-Regionen könnte dies ein vielversprechender Ansatz sein.

- 1 Offshore-Windkraftanlagen gekoppelt mit Elektrolyseuren könnten große Mengen Wasserstoff erzeugen.*
- 2 Solaranlagen als Stromlieferant für die Wasser-Elektrolyse zur Erzeugung von grünem Wasserstoff.*
- 3 Wasser gewinnt als Ausgangsstoff für die Wasserstofferzeugung an Bedeutung.*



## ELEKTROLYSE

### Hochtemperatur-Elektrolyse mit SOE-Stacks

Die Hochtemperatur-Elektrolyse bietet zahlreiche Vorteile. Im Vergleich zu etablierten alkalischen oder PEM-Elektrolyseuren benötigt sie keine Edelmetallkomponenten. Wird die Hochtemperatur-Elektrolyse in Prozesse implementiert, in denen zusätzlich große Mengen an Abwärme verfügbar sind – wie in der Stahlindustrie – kann der Wirkungsgrad gegenüber anderen Technologien deutlich erhöht werden. Zudem ermöglicht die Hochtemperatur-Elektrolyse die direkte Herstellung von Synthesegas.

## DAS FRAUNHOFER IKTS IST EIN FÜHRENDER ENTWICKLER IN DER ELEKTROLYSE – DEM VERFAHREN MIT DEM HÖCHSTEN POTENZIAL FÜR GRÜNEN WASSERSTOFF.

Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse mit Festoxidzellen (Solid Oxide Electrolysis, SOE) finden die Umwandlungsprozesse bei Temperaturen von über 750 °C statt. Als Schlüsselkomponente dienen SOE-Stacks, die im Elektrolyse- und Brennstoffzellenmodus arbeiten können. Durch Anlegen einer Spannung über einen sauerstoffionenleitenden Elektrolyten wird Wasserdampf in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Darüber hinaus besteht im Co-Elektrolyse-Betrieb die Möglichkeit, nicht vermeidbares, klimaschädliches CO<sub>2</sub> zur Herstellung klimaneutraler Produkte zu nutzen. Dafür werden Wasser und CO<sub>2</sub> in Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenmonoxid aufgespalten. Am Ende entsteht aus der elektrischen Energie ein Synthesegas, welches gespeichert, aber vor allem auch in höherwertige Produkte umgewandelt werden kann (siehe Wasserstoffnutzung).

Das Fraunhofer IKTS arbeitet seit über 25 Jahren im Bereich der SOE und besitzt umfangreiches Know-how entlang der gesamten Wertschöpfungskette: vom Material bis zum System inklusive Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Aus den Entwicklungen am Institut sind in den vergangenen Jahren erfolgreich agierende Unternehmen entstanden. Am IKTS werden Stacks und Module für die Integration in Elektrolyseanlagen im Pilotmaßstab hergestellt und hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität und Leistung (z. B. Erhöhung der Stromdichte auf bis zu 0,75 A/cm<sup>2</sup>) optimiert. Im Fokus liegen nun die Entwicklung und Erprobung einer industrietauglichen automatisierbaren Stackherstellung sowie Modularisierungskonzepte für Stacks höherer Leistungsklassen.

### Hochtemperatur-Elektrolyse mit protonenleitenden Elektrolysezellen

Neben sauerstoffleitenden Elektrolyten, wie sie in SOE-Stacks zum Einsatz kommen, entwickelt das Fraunhofer IKTS auch protonenleitende Materialien für Elektrolyseure, die bei Temperaturen von 550 bis 600 °C eingesetzt werden. Sie ermöglichen es, Wasserstoff ohne weitere Aufbereitungsprozesse in hochreiner wasserfreier Form bereitzustellen. Wird dieser Prozess mit exothermen Syntheseprozessen kombiniert, kann die Reaktionsabwärme direkt für die Energieversorgung der Elektrolyse verwendet werden. Dies steigert den Wirkungsgrad der chemischen Wandlungsprozesse deutlich.

Wesentliche Parameter bei der Nutzung von Protonenleitern sind die Protonenleitfähigkeit, die chemische Stabilität und der Polarisationswiderstand zwischen Elektrode und Elektrolyt. Das Fraunhofer IKTS entwickelt hierfür Elektrolyt- und Elektrodenmaterialien und überführt diese analog zur SOE-Technologie in planare Stacks.



» DIE HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSE IST EINE SCHLÜSSELTECHNOLOGIE FÜR DIE EFFIZIENTE WASSERSTOFF- UND SYNTHESGASERZEUGUNG.«

Dr. Matthias Jahn, Abteilungsleiter,  
Chemische Verfahrenstechnik,  
Fraunhofer IKTS



### Alkalische Großelektrolyse

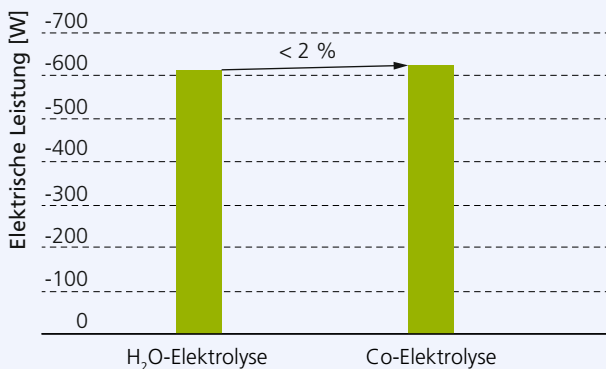
Die alkalische Elektrolyse (AEL) ist ein industriell etabliertes Verfahren zur Wasserstoff- und Sauerstoffherstellung. Sie nutzt einen OH<sup>-</sup>-leitenden Flüssigelektrolyten und wird bei einer Temperatur von etwa 80 °C betrieben. Aufgrund der fortgeschrittenen Technologiereife und geringen spezifischen Investitionskosten im Vergleich zu anderen Elektrolysetechnologien ist sie derzeit das weltweit am meisten genutzte Verfahren. Dennoch ist die Marktdurchdringung der alkalischen Elektrolyseure allgemein noch nicht sehr groß und automatisierte Produktionsverfahren derzeit nicht etabliert. Am IKTS werden daher Stack- und Systemkomponenten hinsichtlich der Leistungsdichte (derzeit Stromdichten von < 0,5 A/cm<sup>2</sup>) sowie ökologischer und konstruktiver Aspekte (Reduzierung von Edelmetallkatalysatoren, Steigerung der aktiven Elektrodenfläche) optimiert. Durch langjährige Erfahrungen im SOE- und MCFC-Stackbau können hier wesentliche Schritte zur Verbesserung ökologischer und wirtschaftlicher Parameter erzielt werden.

### Membran-Elektrolyse

Mittels Niedertemperatur-Membran-Elektrolyse kann aus Industrie- und Bergbauwässern Wasserstoff effizient gewonnen werden. Das Fraunhofer IKTS hat hierfür das sogenannte RODOSAN<sup>®</sup>-Verfahren entwickelt. Dabei wird bei der elektrochemischen Aufbereitung von schwefelsauren oder sulfatreichen Wässern neben Sulfat und Eisen auch Wasserstoff als verwertbares Reaktionsprodukt abgetrennt. Dieser Prozess geschieht in Membran-Elektrolysezellen, deren Elektrodenräume durch eine Anionenaustausch-Membran voneinander getrennt sind. Unter Stromfluss werden an der Kathode Wasserstoffionen entladen und Wasserstoff als Gas abgeführt.

Die Erkenntnisse, die aus der Nutzung der Anionenaustausch-Membranen in diesem Prozess resultieren, nutzt das Fraunhofer IKTS für die Weiterentwicklung moderner alkalischer Membran-Elektrolyseure (AEMEL).

Energieeinsatz bei Wasser- und Co-Elektrolyse in einem SOE-Stack



Die Hochtemperatur-Elektrolyse ermöglicht bei ähnlich großem Energieeinsatz die direkte Herstellung von Synthesegas. Die eingesetzten Elektrolysestacks des Fraunhofer IKTS haben ihre Langzeitstabilität bereits im Labormaßstab demonstriert, wobei die leistungsbezogene Degradationsrate bei < 0,5 %/1000 h liegt.

- 1 Langzeitstabile SOE-Stacks für den Betrieb im Elektrolyse- und Brennstoffzellenmodus.
- 2 Prüfzentrum für den Test von SOE-Stacks im Co-Elektrolyse-Betrieb.



## WASSERSTOFFNUTZUNG

### Wasserstoff für Klimaschutz

Der Einsatz von Wasserstofftechnologien zielt darauf ab, Emissionen von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> und anderen klimaschädlichen Gasen wie Methan zu senken. Der Blick liegt dabei vor allem auf Anwendungen, bei denen derzeit fossile Energieträger genutzt werden, um elektrische Energie (z. B. Kohle und Erdgas im Kraftwerk) bzw. Antriebsenergie (z. B. Diesel oder Benzin in Fahrzeugen) bereitzustellen.

Ein wesentlicher Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen – in Deutschland etwa 21 % – geht jedoch auf komplexe industrielle Prozesse zurück. Durch den Einsatz von grünem Wasserstoff können Prozesse in der Industrie, die bisher in hohem Maße zur Emission von Treibhausgasen führen, klimaneutral gestaltet werden. Daraus ergeben sich zwei mögliche Strategien: die Nutzung von CO<sub>2</sub> unter Einsatz von Wasserstoff zur Erzeugung chemischer Wertstoffe (Carbon Capture and Utilization, CCU) und die vollständige Vermeidung der Emissionen durch die Substitution kohlenstoffhaltiger Komponenten in der Prozesskette (Carbon Direct Avoidance, CDA).

### Wasserstoff als Prozessgas

#### CO<sub>2</sub>-freie Produktionsprozesse

Die Herstellung von Ammoniak sowie die Stahlproduktion sind im Hinblick auf das Reduzierungspotenzial besonders relevante Produktionsverfahren, bei denen wasserstoffbasierte Konzepte zur direkten CO<sub>2</sub>-Vermeidung effektiv eingesetzt werden können. Bei der Stahlherstellung wird im etablierten Hochofenprozess Koks verwendet, um Eisenerz in Roheisen umzusetzen. Um das dabei frei werdende CO<sub>2</sub> zu vermeiden, muss dieser Reduktionsprozess von einem kohlebasierten zu einem wasserstoff- bzw. synthese gasbasierten Verfahren umgestellt werden. Sogenannte Direktreduktionsverfahren sind bereits technisch für den Betrieb mit Erdgas etabliert, lassen sich jedoch auch mit Wasserstoff betreiben. Durch den Einsatz von großskaligen

Elektrolyseuren können die Emissionen in der Stahlerzeugung signifikant reduziert werden.

Insbesondere die Hochtemperatur-Elektrolyse ist in diesem Zusammenhang ein vielversprechender Technologieansatz, da die vorhandene Abwärme genutzt und Synthesegas direkt erzeugt werden kann. Das Fraunhofer IKTS entwickelt Verfahrenskonzepte auf Basis eigener Hochtemperatur-Elektrolysezellen und Stacks. Diese sind modular ausgelegt und können erneuerbare Energien flexibel einbinden. Dadurch wird es möglich, Regelleistung durch das Stahlwerk bereitzustellen und das erneuerbare Energiesystem zu stützen.

## DAS FRAUNHOFER IKTS KONZENTRIERT SICH AUF DIE CHEMISCHE UND STOFFLICHE NUTZUNG VON WASSERSTOFF IN DER INDUSTRIE.

Ammoniak, ein Grundstoff für Düngemittel, ist für die Ernährung der Weltbevölkerung inzwischen elementar geworden. Für die Synthese von Ammoniak wird neben Stickstoff auch Wasserstoff benötigt. Dieser wird aktuell aus Erdgas reformiert, wobei große Mengen CO<sub>2</sub> freigesetzt werden. Einen alternativen Ansatz bietet die Elektrolyse. Da während des Reformierungsprozesses auch der notwendige Stickstoff

- 1 *Anlage für die Kopplung von Co-Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung werthaltiger Produkte.*
- 2 *Langkettige Alkohole aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff.*



2

» AUS UNVERMEIDBAREN CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN KÖNN-  
TEN JÄHRLICH 10 BIS 15 MILLIONEN TONNEN  
CHEMISCHE PRODUKTE HERGESTELLT WERDEN. «

Hydrogen Council

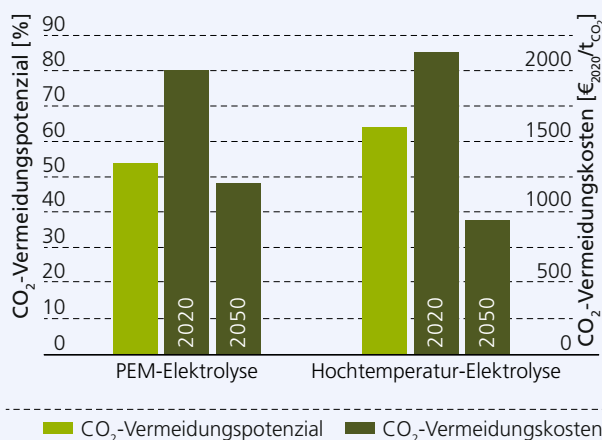
erzeugt wird, muss dieser in neuen Produktionsrouten auf anderem Weg verfügbar gemacht werden, beispielsweise über Luftzerlegung. Dafür werden neue, effiziente und insbesondere auch wirtschaftliche Verfahrenskonzepte benötigt. Am Fraunhofer IKTS durchgeführte techno-ökonomische Analysen zeigen, dass auch in diesem Fall die Hochtemperatur-Elektrolyse vorteilhaft eingesetzt werden kann.

Für eine CO<sub>2</sub>-arme Stahlerzeugung oder Ammoniaksynthese ist die Umstellung eines großen Teils der etablierten Prozesskette notwendig. Dies ist mit hohen Investitionskosten verbunden, erlaubt jedoch eine signifikante Minderung der Emissionswerte. Da die Hochtemperatur-Elektrolyse aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades deutliche Vorteile hinsichtlich der Betriebskosten aufweist, zielen aktuelle Arbeiten am Fraunhofer IKTS auf die Skalierung der Technologie für die großtechnische Anwendung ab. Der über die Elektrolyse produzierte grüne Wasserstoff kann neben der Ammoniaksynthese auch kurzfristig in bestehenden Raffinerien als Ersatz für grauen Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas eingesetzt werden.

### CO<sub>2</sub>-Nutzung für werthaltige Produkte

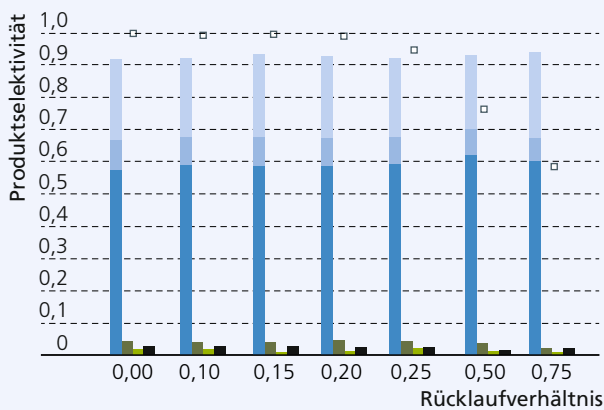
Neben der Wasserstoffnutzung zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen besteht die Möglichkeit, unvermeidbare CO<sub>2</sub>-Emissionen als Kohlenstoffquelle zu nutzen. Damit lassen sich werthaltige Produkte wie Kraftstoffe für den Flug- und Schwerlastverkehr oder höhere Alkohole und Wachse als Ausgangsstoff für die Kosmetik- und chemische Industrie gewinnen. Solche hochwertigen Produkte können aufgrund des höheren Erlöses die Wirtschaftlichkeit neuer Produktionsrouten beispielsweise in der Kalk- und Zementindustrie zusätzlich steigern. Bei der großskaligen Umsetzung ist es dennoch erforderlich, einen entsprechenden Anreiz für den Bau und Betrieb von Elektrolyse-basierten Anlagen zu schaffen.

Techno-ökonomische Betrachtung zur CO<sub>2</sub>-Nutzung für werthaltige Produkte am Beispiel eines Kalkwerks



Im Vergleich zur PEM-Elektrolyse können mit der Hochtemperatur-Elektrolyse ein höheres CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotenzial sowie geringere CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten erreicht werden.

Power-to-Liquid-Prozess im Labormaßstab



□ Elektrolyseleistung P<sub>el, norm</sub>; Alkane: C<sub>1</sub>, C<sub>2-4</sub>, C<sub>≥5</sub>;  
■ 1-Alkene; ■ 1-Alkohole; ■ Andere Produkte

Betriebsbedingungen:  
V<sub>Syngas</sub> = const.; θ<sub>FTR</sub> = 205 °C; p<sub>FTR</sub> = 20 bar<sub>a</sub>; H<sub>2</sub>/CO = 2,2

Mit der Kopplung von Hochtemperatur-Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese lässt sich ein hochwertiges Produktspektrum mit einem hohen Anteil langkettiger Kohlenwasserstoffe gewinnen.



Für die Herstellung von werthaltigen Produkten aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff ist die Fischer-Tropsch-Synthese eine besonders geeignete Technologie. Mit diesem Verfahren lässt sich eine große Anzahl an unterschiedlichen kohlenstoffhaltigen Produkten erzeugen. Um einen möglichst hohen energetischen Wirkungsgrad und Kohlenstoffnutzungsgrad zu erzielen, ist eine enge Kopplung mit der Elektrolyse bzw. Co-Elektrolyse erforderlich. Über das Co-Elektrolyse-Verfahren lässt sich zudem Synthesegas direkt bereitstellen. So kann eine hoch-effiziente Erzeugung der chemischen Wertprodukte erreicht werden.

**» BIS 1600 KG CO<sub>2</sub> PRO TONNE STAHL LIESSEN SICH MIT EINER WASSERSTOFFBASIERTE DIREKTREDUKTION EINSPAREN. «**

Deutsche Energie-Agentur GmbH

Am Fraunhofer IKTS stehen neben theoretischen Betrachtungen zur Prozesskette auch umfangreiche Entwicklungen zu keramischen Katalysatorträgern und Reaktoren für die Fischer-Tropsch-Synthese im Fokus. In einer eigens konzipierten und betriebenen Anlage konnte bereits die gesamte Prozesskette zur Herstellung hochwertiger Produkte aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O realisiert werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden aktuell in Pilot- und Demonstrationsanlagen an industriellen Standorten erprobt.

### **Wasserstoff als Energieträger**

#### **Strom und Wärme**

Neben dem Einsatz von grünem Wasserstoff zur Herstellung wichtiger Grund- und Wertprodukte ist die Anwendung als chemischer Speicher eine weitere Option. Dies macht das Gas zu einem wesentlichen Baustein erneuerbarer Energiesysteme und erlaubt verschiedene Pfade für dessen direkte Nutzung.

Eine Möglichkeit ist die Wasserstoffspeicherung in dafür geeigneten Kavernen und die bedarfsgerechte Rückverstromung über Gasturbinen oder hocheffiziente Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Dadurch kann Regelleistung für das Stromnetz angeboten und dieses auch bei hohen Anteilen erneuerbarer Energie stabilisiert werden. Hierfür hat das Fraunhofer IKTS über keramische Brennstoffzellen und -stacks hinaus bereits Systemkonzepte erstellt und erfolgreich in Anwendung gebracht, beispielsweise für die Hausenergieversorgung oder die Verstromung von Biogas.

Zudem kann Wasserstoff zukünftig als erneuerbare Alternative zu fossilen Brennstoffen in industriellen Feuerungsanlagen in der Stahl-, Kalk- oder Zementindustrie zum Einsatz kommen, um die notwendigen hohen Temperaturen bereitzustellen. Damit lässt sich auch in diesem Bereich eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen.

#### **Mobilität**

Gerade im Mobilitätssektor besteht ein großer Handlungsbedarf, da trotz zahlreicher Bestrebungen in den letzten Jahrzehnten keine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Bereich erreicht werden konnte. Wasserstoffbetriebene Züge und Lkw bieten neben dem rein elektrischen Antrieb und im Zusammenspiel mit einem Ausbau des ÖPNV einen Lösungsansatz im Verkehrssektor.

Für die breite Akzeptanz von Wasserstofftechnologien in der Mobilität ist eine wirtschaftliche und vor allem zuverlässige Infrastruktur Voraussetzung. Die zentrale Komponente zur

- 1 *Monitoringsystem für Drucktanks wasserstoffbetriebener Fahrzeuge.*
- 2 *CO<sub>2</sub>-arme Stahlproduktion durch Prozessintegration der Hochtemperatur-Elektrolyse.*

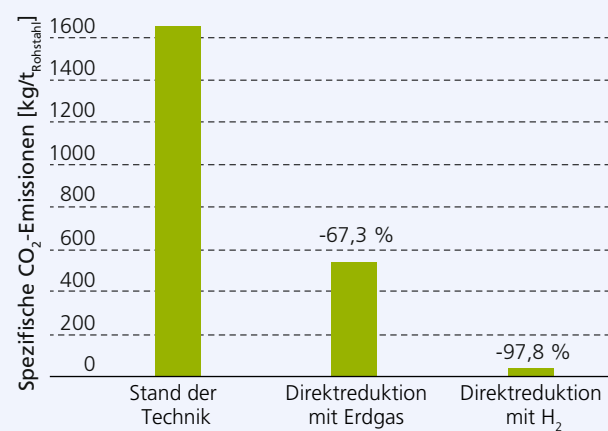


Speicherung des flüssigen Wasserstoffs ist der Drucktank, der immer häufiger als gewickeltes Bauteil aus kohlenstofffaser-verstärkten Kunststoffen (CFK) hergestellt wird.

Zur permanenten Überwachung von Wasserstoffdrucktanks verfügt das Fraunhofer IKTS über ein Monitoringsystem auf Basis von geführten Ultraschallwellen. Bei Strukturänderungen im Material oder einem Defekt zeigen sich signifikante Abweichungen der Messsignale gegenüber dem ursprünglichen fehlerfreien Zustand. Durch einen Abgleich der Signale mit einer Fehlerdatenbank können so Strukturänderungen oder Defekte lokalisiert und klassifiziert werden. In Zukunft wird es zudem möglich sein, Aussagen zur Restlebensdauer des Drucktanks zu treffen. Das Monitoringsystem kann auch zur Überwachung von industriellen Wasserstofftanks angewendet werden.

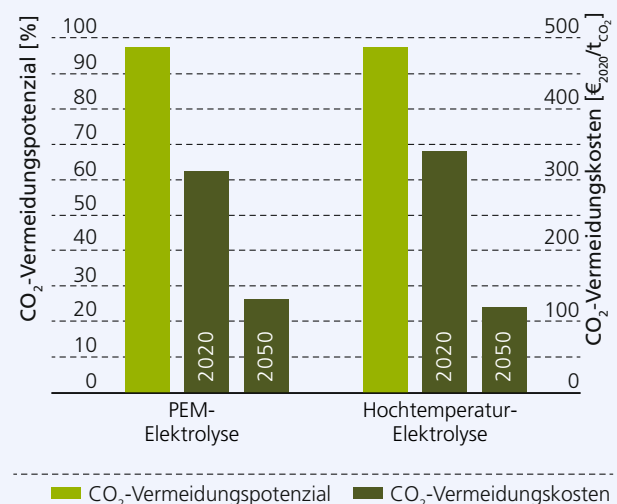
Neben wasserstoff- und batteriebetriebenen Fahrzeugen ist auch die Nutzung synthetischer Kraftstoffe auf Basis von Wasserstoff zu erwarten. Zusätzlich zum Schwerlastverkehr ist insbesondere der Flugverkehr zu nennen. Hier können die am Fraunhofer IKTS entwickelten Verfahren der CO<sub>2</sub>-Nutzung zur Herstellung synthetischen Kerosins genutzt werden.

### CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial in der Stahlindustrie



Durch ein wasserstoffbasiertes Direktreduktionsverfahren kann eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von mehr als 95 % erreicht werden.

### Techno-ökonomische Betrachtung zu CO<sub>2</sub>-freie Produktionsprozessen am Beispiel Stahlindustrie



Im Vergleich zur PEM-Elektrolyse können mit der Hochtemperatur-Elektrolyse zukünftig geringere CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten erreicht werden.



## WASSERSTOFFSPEICHERUNG UND TRANSPORT

### Korrosionsüberwachung von Wasserstoffpipelines

Große Mengen an Wasserstoff, die nicht vor Ort produziert werden können, müssen zukünftig über Pipelines zu ihren Verbrauchern transportiert werden. Bei Kontakt mit Wasserstoff kann es allerdings zur sogenannten Wasserstoffversprödung der Rohrleitungsmaterialien und damit schnellerem Risswachstum kommen. Um derartige Korrosionserscheinungen frühzeitig erkennen und entsprechende Maßnahmen einleiten zu können, bedarf es einer zuverlässigen Überwachung der Pipelines.

Eine Möglichkeit bieten dabei ultraschallbasierte Monitoringssysteme. Das Fraunhofer IKTS hat ein Sensormanschettenkonzept entwickelt, mit dem Fehlstellen kontinuierlich detektiert und die Restwandstärke bei flächenhaft auftretender Korrosion an horizontal, vertikal sowie über- und unterirdisch verlegten Rohrleitungen bestimmt werden können. Dafür wird die Sensormanschette dauerhaft an der Rohrleitung angebracht. Die Installation ist einfach und erfordert in der Regel keine Änderungen am Leitungssystem. Zudem kann das Überwachungssystem jederzeit durch Vernetzung erweitert werden.

### » FÜR EINEN ERFOLGREICHEN UMSTIEG AUF WASSERSTOFF BEDARF ES EINER ZUVERLÄSSIGEN UND DURCHGÄNGIGEN SPEICHER- UND TRANSPORTINFRASTRUKTUR. «

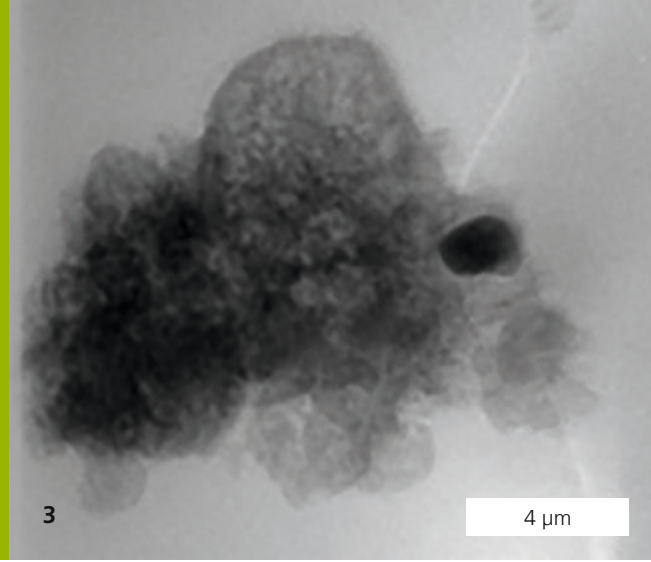
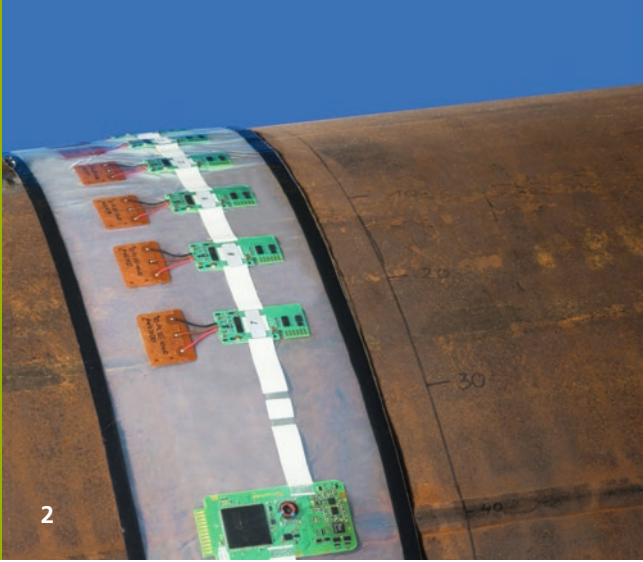
Dr. Lars Schubert, Gruppenleiter Systeme für Zustandsüberwachung, Fraunhofer IKTS

Die in die Manschette integrierten piezokeramischen Sensoren senden geführte Ultraschallwellen in die Rohre. Bei der Ausbreitung der Ultraschallwellen kommt es an Rohrleitungsschäden zu Streuungen und Reflexionen. Anhand dieser können durch die integrierte Signalverarbeitung Fehlstellen identifiziert

und lokalisiert werden. Unnötige Erdausgrabungsarbeiten, Beschichtungsentfernungen oder Gerüstinstallationen lassen sich so vermeiden. Da sich geführte Ultraschallwellen in Rohrleitungen mit geringer Dämpfung über weite Entfernungen ausbreiten, können längere Rohrabschnitte von einem Standort aus dauerhaft überwacht werden. Darüber hinaus ist es möglich, schwer zugängliche Rohrleitungen regelmäßig zu prüfen. Je nach Umweltbedingungen und Anforderungen können unterschiedliche Sensoren verschiedener Temperaturklassen oder Sonderanfertigungen für explosionsgeschützte Bereiche angeschlossen werden. Die Energieversorgung der piezokeramischen Sensoren und das Auslesen der Sensordaten erfolgen kabellos. Dadurch werden Steckverbindungen am Messsystem komplett vermieden, was zu einem zuverlässigen Betrieb des Systems beiträgt.

### Gassensorik zur Leckagedetektion

Aufgrund der hohen Entflammbarkeit von Wasserstoff in Luft, sollen zuverlässige Sensorsysteme sicherstellen, dass sich Wasserstoff und Methan verlässlich detektieren lassen. Dafür entwickelt das Fraunhofer IKTS keramische Druck-, Strömungs- und Temperatursensoren auf Basis der LTCC-Technologie. Keramische Werkstoffe bieten im Vergleich zu Stählen eine hohe Stabilität gegen Wasserstoffversprödung, eine besondere Sensitivität sowie einen zuverlässigen Betrieb in Wasserstoffumgebung. Zudem bietet die eingesetzte LTCC-Technologie sehr komplexe Strukturierungsmöglichkeiten und einen dreidimensionalen Aufbau der Sensoren. Dies garantiert eine hohe Flexibilität in Design und Geometrie der im Sensor integrierten Elemente wie Kammern, Membranen oder Kanäle. Somit lassen sich Gassensoren einfach miniaturisieren und an spezielle Einsatzszenarien anpassen.



## DAS FRAUNHOFER IKTS STELLT SICHERHEITS- UND MESSTECHNIK FÜR DIE WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR BEREIT.

### Wasserstoffabtrennung aus Wasserstoff-Erdgas-Gemischen

Einige Teile der bestehenden Erdgasinfrastruktur wie Erdgastankstellen vertragen lediglich Wasserstoffkonzentrationen von ein bis zwei Volumenprozent. Daher ist bei der Wasserstoffverteilung über das bestehende Erdgasnetz eine vorgeschaltete Abtrennung von Wasserstoff aus dem Erdgas nötig. Das Fraunhofer IKTS entwickelt hierfür Trennverfahren auf Basis von Kohlenstoffmembranen, die im Vergleich zur Druckwechseladsorption oder kryogenen Trennverfahren eine kostengünstige Variante darstellen und gegenüber harschen Umgebungsbedingungen und Erdgasbegleitstoffen wie Schwefelwasserstoff resistent sind. Kohlenstoffmembranen sind chemisch inert und zeigen eine deutlich bessere Permeabilität und Selektivität als Polymermembranen. In einem einstufigen Membranverfahren können aus Wasserstoff-Erdgas-Gemischen bis zu neunzig Prozent Wasserstoff abgetrennt werden. Eine weitere Reduzierung des Wasserstoffanteils im Erdgas auf weniger als zwei Prozent lässt sich mit einer vergrößerten Membranfläche oder einem zweistufigen Membranverfahren erzielen.

### Analytik von Tank-, Pipeline- und Speicher-materialien

Bei der Auswahl von Materialien für Wasserstoffanwendungen ist dessen Einfluss – unabhängig ob flüssig oder gasförmig – auf die Materialeigenschaften zu berücksichtigen. Zur Untersuchung der Wechselwirkungen verfügt das Fraunhofer IKTS

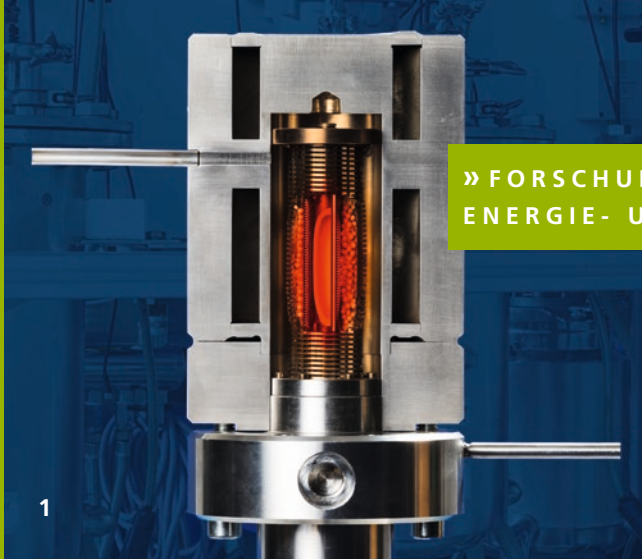
über modernste 3D-Nanoanalytikmethoden, um Größenskalen vom Sub-Nanometer- bis in den Zentimeterbereich abzudecken. So lassen sich beispielsweise 3D-Strukturen von hierarchischen Materialien für die elektrokatalytische Wasserstoffherzeugung in Nanometerauflösung darstellen und charakterisieren. Darüber hinaus ist es möglich, Informationen über die chemische Zusammensetzung, kristallografische Eigenschaften, Bindungszustände, mechanischen Eigenschaften und Grenzflächeneigenschaften zu ermitteln.

Prozesse wie die Wasserstofffreisetzung in Speichermaterialien oder Rissausbreitung in Rohrleitungen, bei denen die Materialien Veränderungen unterliegen, können in-situ und operando zeitabhängig initiiert und mikroskopisch abgebildet werden. So lassen sich potenzielle Versagensmechanismen direkt beobachten oder Wasserstoffspeicherungs- und Wiederfreigabevorgänge optimieren.

**1** *Keramische Drucksensoren für den Einsatz in Wasserstoffumgebung.*

**2** *Sensormanschette mit drahtloser Kommunikation und Energieübertragung für die dauerhafte Überwachung von Wasserstoffpipelines.*

**3** *In-situ nanoXCT-Abbildung der Wasserstofffreisetzung mittels Radiografie.*



» FORSCHUNG IST EIN STRATEGISCHES ELEMENT DER ENERGIE- UND INDUSTRIEPOLITIK. «

Nationale Wasserstoffstrategie der  
Bundesregierung

## VORLAUFFORSCHUNG

### Tandem-Solarmodule zur Wasserstoffgewinnung

Etablierte Konzepte zur Gewinnung von solarem Wasserstoff setzen auf eine Kombination von Photovoltaikanlagen und Elektrolyseuren zur Wasserspaltung. Allerdings ist diese Technologie sehr komplex, so dass die Investitions- und Wartungskosten hoch sind. Die direkte photokatalytische Wasserspaltung ohne Elektrolyseure besitzt dagegen klare wirtschaftliche Vorteile im Betrieb. Zudem ist sie aufgrund der geringen Systemkomplexität zuverlässiger und kaum wartungsanfällig. Kern der Neuentwicklung ist ein Tandem-Solarmodul, bei dem die Photoanode und -kathode auf die entgegengesetzten Seiten einer transparenten Trägerplatte aufgebracht sind. Bei der Bestrahlung mit Sonnenlicht wird auf der Kathodenseite Wasserstoff und auf der Anodenseite Sauerstoff freigesetzt. Zur Erhöhung des Wirkungsgrads entwickelt das Fraunhofer IKTS neue hochreine Halbleitermaterialien und schonende Beschichtungsverfahren. Dadurch kann das bisherige Problem der Defektdichte der Materialien deutlich reduziert und somit die Wasserstoffausbeute erhöht werden. Das Tandem-Modul ist beliebig skalierbar und somit attraktiv für die dezentrale Produktion von grünem Wasserstoff.

### Metal Organic Frameworks (MOF) für die Wasserstoffspeicherung

Neben Druck- und Flüssiggasspeichern kann Wasserstoff auch in porösen Metal Organic Frameworks (MOF) gespeichert werden. Diese metall-organischen Gerüstverbindungen sind bis zu 90 % porös und binden den Wasserstoff im Speichertank. So ist es möglich, größere Mengen an Wasserstoff zu speichern, ohne den Druck im Wasserstofftank zu erhöhen. Hierbei ist es wichtig, den Tank mit der größtmöglichen Menge an MOFs zu füllen, ohne dass diese beschädigt werden. Bei der Herstellung von MOFs geht es deshalb darum, einen Kompromiss zwischen ausreichender mechanischer Stabilität des Körpers und bestmöglichem Erhalt der ursprünglichen MOF-Eigenschaften

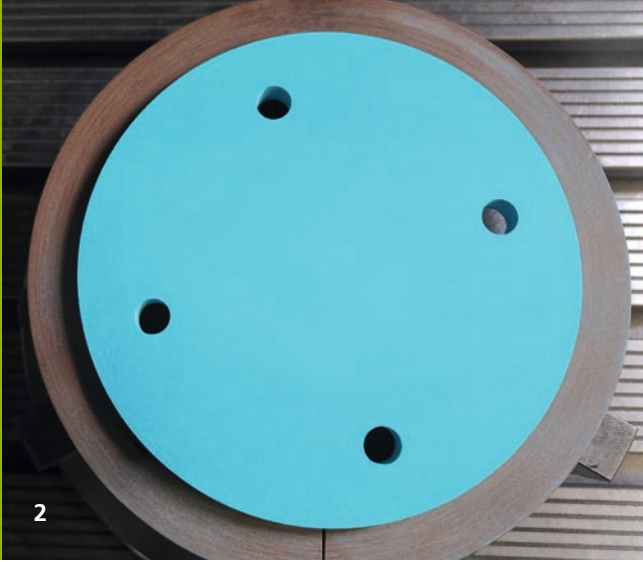
im Formkörper zu finden. Das Fraunhofer IKTS entwickelt hierfür unterschiedliche Formgebungsverfahren. MOFs können beispielsweise als Pellets und Granulate in Schüttungen oder als Monolithe wie großformatige Scheiben und Waben realisiert werden.

## DAS FRAUNHOFER IKTS BETREIBT VORLAUFFORSCHUNG IM HINBLICK AUF EINE SPÄTERE ANWENDUNG.

### Membranreaktoren zur Wasserstofferzeugung für Schiffsantriebe

Schiffe transportieren rund 90 Prozent des weltweiten Warenverkehrs. Allerdings zählen sie zu den größten CO<sub>2</sub>-Verursachern, da klimafreundliche Antriebe bisher fehlen. In diesem Zusammenhang forscht das Fraunhofer IKTS an Membranreaktoren, mit denen sich an Bord eines Schiffes aus regenerativ erzeugtem Methanol Wasserstoff herstellen und im Schiffsantrieb nahezu ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen verbrennen lässt. Im Membranreaktor finden dabei zwei Prozesse statt: Methanol und Wasser werden in CO<sub>2</sub> und Wasserstoff umgewandelt und anschließend über Membranpermeation abgetrennt. Das abgetrennte CO<sub>2</sub> kann später wieder zur Methanolherstellung an Land genutzt werden, so dass sich ein geschlossener CO<sub>2</sub>-Kreislauf für den Schiffsantrieb ergibt. Die im Membranreaktor eingesetzten keramisch geträgerten Kohlenstoffmembranen halten großen Reaktions- und Wasserstoffdrücken stand und ermöglichen einen hohen Reaktionsumsatz. Darüber hinaus sind die Membranen resistent gegenüber Reaktionsnebenprodukten.





### Mikrogasturbinen-Brennstoffzellen-System zur Rückverstromung von Wasserstoff

Wichtiger Baustein einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft ist die Rückverstromung von Wasserstoff und Methan. Dafür arbeitet das Fraunhofer IKTS an einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle, mit der sich Wohnquartiere effektiv versorgen lassen. In der Brennstoffzelle können sowohl Wasserstoff als auch Methan eingesetzt werden. Um den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle zu erhöhen, wird sie mit einer Mikrogasturbine intelligent zu einem Kreislaufsystem verbunden. Ein Vorteil dabei ist, dass die Gasturbine die notwendige Luft verdichtet und vorheizt, bevor sie in der Brennstoffzelle zur Energieerzeugung eingesetzt wird. Zudem lässt sich das in der Brennstoffzelle entstehende Abgas in der Gasturbine zur zusätzlichen Strombereitstellung nutzen.

### Wasserstoffversorgung für autarke Prozesssensorik

Zum autarken Betrieb von IIoT- und IoT-Anwendungen (Industrial Internet of Things und Internet of Things) können wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen vorteilhaft genutzt werden. Auf Basis der LTCC-Technologie entwickelt das Fraunhofer IKTS flexible Mikrobrennstoffzellensysteme in einem Leistungsbereich zwischen 150 mW und 5 W. Die Systeme lassen sich sowohl mit einer integrierten hydrolysebasierten Wasserstoffbereitstellung als auch integrierten Wasserstofftanks ausführen. In diesem Zusammenhang bietet die LTCC-Technologie die Möglichkeit, neben den Brennstoffzellenstacks auch die Ventile planar aufzubauen und somit ein kompaktes Gesamtsystem zu schaffen. Die keramischen Ventile erfüllen hierbei zwei Aufgaben. Zum einen steuern sie die Wasserstoffzufuhr in den Tank und zum anderen dosieren sie den Wasserstoff für den Brennstoffzellenstack – an den entsprechenden Energiebedarf angepasst. Aufgrund ihrer hohen Sensitivität ist eine sehr präzise Regelung der Wasserstoffzufuhr möglich.

### Entwicklung hochproduktiver Rolle-zu-Rolle-Fertigungsmethoden für Brennstoffzellenkomponenten

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs kombiniert mit Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-freiem Energieträger ist ein fester Bestandteil der Strategie international tätiger Fahrzeughersteller und Energieversorger. Allerdings sind die Herstellkosten für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen derzeit noch hoch. Das Fraunhofer IKTS entwickelt hochproduktive, massentaugliche Rolle-zu-Rolle-Verfahren, mit denen sich die benötigten Hauptkomponenten effizient fertigen lassen. Dies umfasst beispielsweise Membran-Elektrodeneinheiten (MEA).

- 1 *Membranreaktor auf Basis von Kohlenstoffmembranen zur effizienten Wasserstofferzeugung für Schiffe.*
- 2 *Großformatiger MOF-Formkörper zur Speicherung von Gasen.*
- 3 *Massentaugliche Rolle-zu-Rolle-Fertigung von Brennstoffzellenkomponenten.*



## KOMPETENZEN

### Herstellung von Schlüsselkomponenten

#### Elektrolysezellen und Stacks

- Charakterisierung von Elektrodenwerkstoffen
- Herstellung von Elektrolysezellen und -stacks
- Herstellung und Test von Short-Stacks für elektrochemische Wasserreinigung und begleitender Wasserstoffproduktion
- Automatisierung, Hochskalierung der Stackfertigung
- Langzeittest von SOE-Komponenten und -Stacks

#### Membranen und Membranreaktoren

- Entwicklung nanoporöser Membranen
- Upscaling der Membranpräparation bis in den industriellen Maßstab einschließlich Musterfertigung
- Entwicklung von Membranreaktoren zur Synthese von Methan, Methanol und anderen Produkten
- Einsatz von Membranen zur Wasserstoffdosierung, -abtrennung, -reinigung sowie im Umfeld der Speicherung
- Konzipierung und Ausstattung von Pilotanlagen

#### Katalysatorträger, Katalysatoren und Reaktoren

- Auswahl und Entwicklung von Katalysatoren und Katalysatorträgerstrukturen, z. B. eisenbasierter Fischer-Tropsch-Katalysatoren für die Synthese höherer Alkohole
- Charakterisierung von Katalysatoren, Reaktionsprodukten
- Entwicklung modularer Reaktorkonzepte
- Modellbildung und Simulation von Strömungsprozessen
- Durchführung von Reaktortests

### Entwicklung und Optimierung von Elektrolyseprozessen

- Modellierung des Betriebsverhaltens von Elektrolysestacks
- Thermomechanische Analyse von Belastungsmechanismen in Elektrolysestacks

- Simulation von Wärmetransport- und Strömungsvorgängen
- Entwicklung innovativer Prozesskonzepte, z. B. Kopplung von Co-Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese
- Modellbildung für Prozessstufen, Gesamtprozesse
- Umsetzung von Prozessen im Labor- oder Pilotmaßstab, z. B. elektrochemische Aufbereitung von Bergbau- und Grubenwässern für den Einsatz in Power-to-X-Prozessen
- Durchführung von Machbarkeitsstudien, z. B. Bewertung des Emissionsminderungspotenzials eines wasserstoffbasiereten Direktreduktionsprozesses zur Stahlerzeugung
- Test von Prototypanlagen, z. B. Herstellung von Wachsen aus Biogas oder CO<sub>2</sub>-Reduzierung in Kalkwerken

### Prozessbewertung

- Energetische Analyse von Prozesskonzepten
- Techno-ökonomische Bewertung von Power-to-X-Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff, Kohlenwasserstoffen und Ammoniak
- Nachhaltigkeitsbewertung

### Monitoring und Sicherheitsüberwachung

- Beratung und Entwicklung zustandsorientierter Instandhaltungskonzepte (Simulation, Messmethoden, Datenverarbeitung, Energieversorgung, Integration)
- Entwicklung und Bereitstellung von zuverlässiger Sensorik, Elektronik und angepassten Monitoringsystemen
- Durchführung von Feldtests, Zertifizierung

### Analytik

- Multiskalige Charakterisierung von komplexen hierarchischen Materialien mittels 3D-Nanoanalytikmethoden
- Abbildung von Prozessen (Wasserstofffreisetzung, Rissausbreitung etc.) mittels hochauflösender Analytikverfahren (REM, TEM, nanoXCT) in Kombination mit Operando- und In-situ-Experimentaldesigns



## KOOPERATIONSMODELLE

Innovation und Entwicklung sind Bausteine für eine erfolgsversprechende Unternehmenszukunft. Um Wettbewerbsvorteile zu generieren, bietet Fraunhofer maßgeschneiderte Kooperationsmöglichkeiten für die bestmögliche Form der Zusammenarbeit für Unternehmen. Damit können Entwicklungskompetenzen vom Kunden kurzfristig und bedarfsorientiert abgerufen und genutzt werden.

### Einzelaufträge

Der klassische Fall einer Kooperation ist der Einzelauftrag. Das Unternehmen sieht einen Forschungs- oder Entwicklungsbedarf. Das Fraunhofer IKTS entwickelt entsprechend der Anforderungen des Unternehmens eine termin- und qualitätsgerechte Lösung.

### Verbundprojekte

Manche Problemstellungen sind so komplex, dass mehrere Partner die Lösung entwickeln müssen. Dann steht das gesamte Umfeld der Fraunhofer-Institute zur Verfügung. Auch externe Partner können hinzugezogen werden.

### Strategische Partnerschaften und Innovationscluster

Aus Vorlaufforschung, die zunächst unabhängig von Aufträgen erfolgt, ergeben sich häufig lang andauernde Partnerschaften mit Unternehmen auf regionaler und internationaler Ebene.

### Ausgründungen

Fraunhofer-Mitarbeiter machen sich oft mit einer Neuentwicklung selbstständig, an der sich die Fraunhofer-Gesellschaft beteiligen kann. Im Einzelfall sind sogar strategische Beteiligungen und Joint Ventures möglich. Auch die Auftraggeber einer neuen Entwicklung können Teilhaber des Spin-off-Unternehmens werden.

### Lizenzierungsmodelle

Lizenzen räumen Dritten ein Nutzungsrecht an gewerblichen Schutzrechten unter definierten Bedingungen ein. Damit können Innovationen genutzt werden, wenn die eigene Weiterentwicklung zu hohe Kosten verursachen, die Kapazitäten zur Markteinführung nicht ausreichen oder die Innovation nicht in das bestehende Leistungsprogramm passen würde. Das Fraunhofer IKTS bietet flexible Lizenzmodelle an, die zum unternehmensweiten Einsatz, zur Optimierung des eigenen Angebots oder der Vermarktung an Endkunden genutzt werden können.

- 1 *Demonstrationsanlage zur Kopplung von Co-Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Grundprodukten für die chemische Industrie.*
- 2 *Teststand zur Erprobung von Kohlenstoffmembranen zur Wasserstoffdosierung und -abtrennung.*

# KURZPORTRÄT DES FRAUNHOFER IKTS

Das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS betreibt anwendungsorientierte Forschung für Hochleistungskeramik. Die drei Instituts-  
teile in Dresden und Hermsdorf (Thüringen) formen gemeinsam das größte  
Keramikforschungsinstitut Europas.

Als Forschungs- und Technologiedienstleister entwickelt das Fraunhofer IKTS  
moderne keramische Hochleistungswerkstoffe, industrierelevante Herstellungs-  
verfahren sowie prototypische Bauteile und Systeme in vollständigen Fertigungs-  
linien bis in den Pilotmaßstab. Darüber hinaus umfasst das Forschungsportfolio  
die Kompetenzen Werkstoffdiagnose und -prüfung. Die Prüfverfahren aus den  
Bereichen Akustik, Elektromagnetik, Optik und Mikroskopie tragen maßgeblich  
zur Qualitätssicherung von Produkten und Anlagen bei.

Das Fraunhofer IKTS arbeitet in neun marktorientierten Geschäftsfeldern, um  
keramische Technologien und Komponenten sowie zerstörungsfreie Prüfverfah-  
ren für neue Branchen, Produktideen und Märkte jenseits der klassischen Einsatz-  
gebiete zu demonstrieren und zu qualifizieren. Dazu gehören keramische Werk-  
stoffe und Verfahren, Maschinenbau und Fahrzeugtechnik, Elektronik und Mikro-  
systeme, Energie, Umwelt- und Verfahrenstechnik, Bio- und Medizintechnik, Zer-  
störungsfreie Prüfung und Überwachung, Wassertechnologie sowie die Material-  
und Prozessanalyse.



[www.ikts.fraunhofer.de](http://www.ikts.fraunhofer.de)

## KONTAKT

Industrielösungen  
**Wasserstofftechnologien**

Dr. Matthias Jahn  
**Fraunhofer-Institut für  
Keramische Technologien  
und Systeme IKTS**

Winterbergstr. 28  
01277 Dresden  
Telefon +49 351 2553-7535  
[matthias.jahn@  
ikts.fraunhofer.de](mailto:matthias.jahn@ikts.fraunhofer.de)