



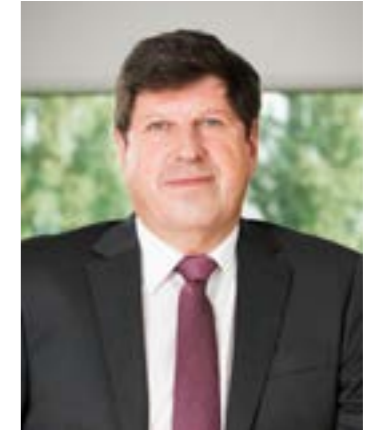
# WASSERSTOFF

Forschung für Fortschritt

## INHALTSVERZEICHNIS

Leitwort.....	3
Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft.....	4
Produktion von Wasserstoff.....	6
Speicherung und Transport.....	8
Überblick über die Forschungsaktivitäten am KIT.....	10
Nutzung von Wasserstoff.....	12
Groß geforscht – Infrastrukturen.....	14
Querschnittsthemen.....	16
Lehrveranstaltungen Wasserstoff am KIT.....	18
Institute mit Wasserstoffforschung am KIT.....	19

## LIEBE LESERINNEN UND LESER,



Wasserstoff ist das leichteste Element der Welt und mit einem Massenanteil von etwa 70 Prozent das häufigste chemische Element im Universum. Kann es dazu beitragen, die gewichtigen Aufgaben der Gegenwart und Zukunft zu lösen? Wir am KIT sagen Ja.

Der Umbau des Energiesystems und die Ziele des Klimaschutzes erfordern neue technologische Ansätze. Die Energiekrise hat verdeutlicht, dass ein Hochtechnologie-Land wie Deutschland dringlich auf eine saubere, sichere und bezahlbare Energieversorgung angewiesen ist. Als Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft zeigt das KIT, wie sich das enorme Potenzial des Wasserstoffs nutzen lässt, um die Sektoren Energie, Industrie und Mobilität zu koppeln und nachhaltig zu gestalten – Forschung für Fortschritt.

Als Energieträger lässt sich Wasserstoff speichern, flexibel einsetzen und leicht transportieren. Wird er mit erneuerbarer Energie hergestellt, ist er überdies klimaneutral. Dieser Grüne Wasserstoff kann als Schlüsselement nachhaltiger Energieversorgung fungieren. Zudem lässt er sich in der Chemieindustrie für die umweltverträgliche Synthese verschiedener Produkte nutzen.

Das KIT forscht auf einer breiten disziplinären Basis in Natur-, Ingenieur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften zum Thema Wasserstoff und deckt dabei ein breites Spektrum von der Herstellung über die Speicherung, Verteilung und Nutzung bis hin zu Fragen der Sicherheit, der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie der technischen und ökonomischen Integration in das Energiesystem ab.

Forschende des KIT sind an allen drei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Wasserstoff-Leitprojekten zur serienmäßigen Herstellung von Elektrolyseuren, zur Produktion von Wasserstoff auf hoher See und zum Wasserstofftransport beteiligt. Das KIT selbst verfügt über einzigartige Infrastrukturen, um wichtige Aspekte innovativer Wasserstofftechnologien zu untersuchen. So ermöglicht das Energy Lab, das Energiesystem der Zukunft zu testen und dabei auch die mit Wasserstoff zusammenhängenden Prozesse zu erproben. Auch sammelt das KIT seit mehreren Jahren Erfahrungen beim Einsatz von Wasserstoff im Alltag – mit einem H<sub>2</sub>-Shuttle für Beschäftigte und Studierende.

Die vorliegende Broschüre vermittelt Ihnen einen ersten Überblick über die breit aufgestellte Wasserstoffforschung am KIT und ermöglicht Ihnen einige tiefere Einblicke in beispielhafte Projekte. Wir hoffen, Ihnen damit die Vielfalt und die Bedeutung der mit Wasserstoff verbundenen Forschung für Fortschritt zu zeigen.

Eine interessante Lektüre wünscht Ihnen  
Ihr

Professor Dr. Thomas Hirth  
Vizepräsident Transfer und Internationales

# WASSERSTOFF IM ENERGIE-SYSTEM DER ZUKUNFT

Wasserstoff ist das auf der Welt am weitesten verbreitete Element. Bietet es auch unbegrenzte Möglichkeiten für die Energieversorgung von morgen? Tatsächlich ist Wasserstoff ein Tausendsassa – aber ein anspruchsvoller. Denn auf der Erde liegt er überwiegend nicht als Gas, sondern ge-

bunden vor. Die Bereitstellung von molekularem Wasserstoff ( $H_2$ ) verlangt enorm viel Energie. Stammt der dafür eingesetzte Strom aus erneuerbaren Quellen wie Sonne und Wind, ergibt sich sogenannter Grüner Wasserstoff. Er ist klimaneutral, weil bei seiner Herstellung und der Herstellung seiner Vorprodukte – also der eingesetzten elektrischen Energie – kein  $CO_2$  freigesetzt wurde. Wasserstoff selbst ist keine Energiequelle, sondern ein Energieträger. Er ist mit Strom vergleichbar, lässt sich aber anders als dieser gut speichern.

Über Elektrolyse und energetische Rückwandlung können Strom und Wasserstoff in eine nützliche Beziehung treten: Mit Strom lässt sich Wasserstoff herstellen; dieser lässt sich bei Bedarf wieder in Strom oder auch in Wärme umwandeln. Wasserstoff aus der Elektrolyse mit Grünem Strom ermöglicht Power-to-X-Technologien zur Speicherung von Stromüberschüssen in Zeiten, in denen die bereitgestellte Wind- oder Sonnenenergie den Bedarf übersteigt. Dadurch kann das künftige Energiesystem flexibler, robuster und unabhängiger von den fossilen Energieträgern Kohle, Öl und Gas werden. Mit Wasserstoff lassen sich nicht nur Brennstoffzellen, sondern auch Verbrennungsmotoren effizient und klimaneutral betreiben. Zudem lässt sich Grüner Wasserstoff als nachhaltiger Rohstoff in der Stahlindustrie und in der Chemieindustrie für die Synthese unterschiedlicher Stoffe einsetzen, wie Methanol oder Ammoniak, das zur Produktion von Stickstoffdünger erforderlich ist. So lässt sich die  $CO_2$ -Bilanz verschiedener Produkte deutlich optimieren. Darüber hinaus ermöglichen Wasserstofftechnologien, die Sektoren Energie, Industrie und Mobilität miteinander zu koppeln, was weitere Potenziale für eine klimafreundliche Zukunft eröffnet.

## WASSERSTOFFFORSCHUNG AM KIT

Schon die Vorgängereinrichtungen des KIT forschten an Wasserstofftechnologien. So betrieb in den 1970er- und 1980er-Jahren das damalige Kernforschungszentrum Karlsruhe unter anderem eine Versuchsanlage im Rahmen der Kernfusionsforschung und ein mit Brennstoffzellen angetriebenes Wasserstoffversuchsfahrzeug. Das Interesse am Einsatz von Wasserstoff für die Mobilität stieg vor allem durch die Ölpreiskrisen 1973 und 1979, schwand jedoch bald wieder, weil die Konzepte als zu kostspielig galten. In den vergangenen Jahren haben sich Wissenschaft und Wirtschaft angesichts der erforderlichen Transformation des Energiesystems hin zur Klimaneutralität wieder verstärkt dem Wasserstoff zugewandt. Die Forschung am KIT deckt heute viele Aspekte der Produktion, der

Verteilung und Speicherung und der Nutzung von Wasserstoff ab und widmet sich übergreifenden Themen wie der Sicherheit und der gesellschaftlichen Akzeptanz. Für Studierende des KIT gibt es anspruchsvolle Lehrveranstaltungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wasserstoff. Zudem bringen Forschende des KIT ihre Expertise in allen drei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Wasserstoff-Leitprojekten ein. Das Leitprojekt  $H_2$ Mare widmet sich der Wasserstofferzeugung auf See. Dank der kontinuierlich guten Windbedingungen auf See und der hohen Zahl an Volllaststunden bringen Offshore-Windparks einen besonders hohen Energieertrag. In  $H_2$ Mare erarbeiten Forschende die Grundlagen dafür, dass sich die Offshore-Windenergie ohne Netzanbindung direkt nutzen lässt, um beispielsweise über die Wasserelektrolyse Grünen Wasserstoff herzustellen. Ziel ist, die Kosten von Grünem Wasserstoff zu senken und die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Am KIT erforschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, wie sich aus dem auf einer Offshore-Plattform erzeugten

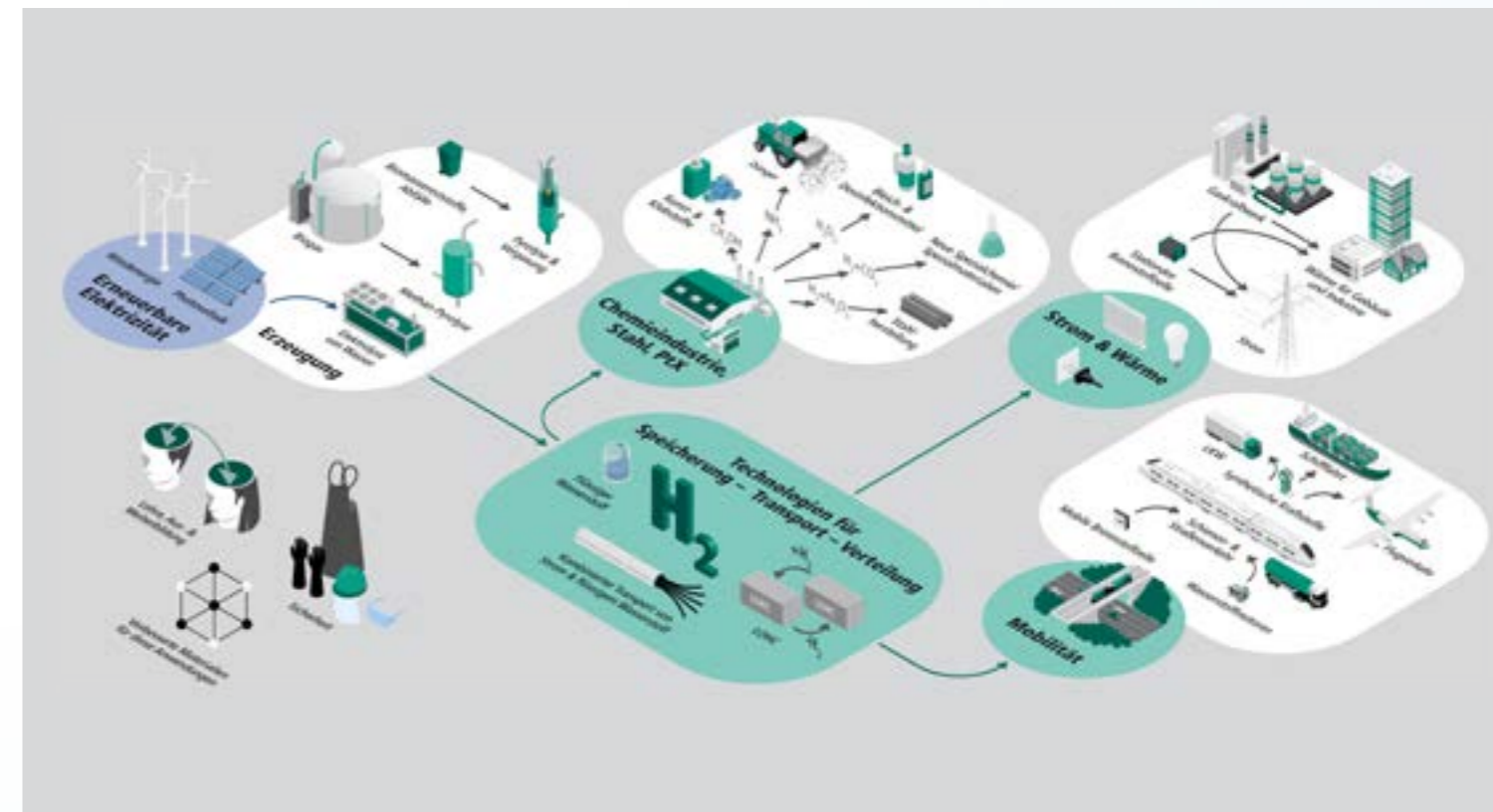
Grünen Wasserstoff vor Ort leicht transportierbare Produkte, wie verflüssigtes Methan, flüssige Kohlenwasserstoffe, Methanol oder Ammoniak, für die chemische Industrie oder für Kraftstoffe herstellen lassen.

Im Leitprojekt TransHyDE entstehen Transporttechnologien und Transportinfrastrukturen für Grünen Wasserstoff. Am KIT nutzen Forschende die hohe Energiedichte und die Kälte des flüssigen Wasserstoffs, indem sie Wasserstofftechnologien mit elektrotechnischen Anwendungen vereinen, beispielsweise beim Energietransport mit Hochtemperatur-Supraleitern oder in den Antriebssträngen von Fahrzeugen. Außerdem entwickeln sie Sicherheitsstrategien für Materialien und Handhabung über industrielle Anlagen hinaus. In den Anlagen des KIT können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die gesamte Kette von der Wasserstoff-Verflüssigung über die energietechnischen Anwendungen in der Elektrotechnik bis hin zu Brennstoffzellen erforschen und umsetzen.

Das Leitprojekt  $H_2$ Giga befasst sich mit der kostengünstigen Serienfertigung von Elektrolyseuren zur Erzeugung von Grünem Wasserstoff mit erneuerbaren Energien. Innerhalb der Technologieplattform ist das KIT an zwei Verbundprojekten beteiligt. Im Verbundvorhaben „HTEL-Stacks – Ready for Gigawatt“ entwickeln die Beteiligten Stacks, das heißt Zellstapel, für die Hochtemperatur-Elektrolyse sowie dazugehörige Produktionsprozesse und -anlagen. Die Elektrolyse bei hohen Temperaturen benötigt weniger kostenintensive elektrische Energie; der Mehrbedarf an thermischer Energie lässt sich durch die in der Zelle entstehende Verlustwärme abdecken. Das Verbundvorhaben „Stack Scale-up – Industrialisierung PEM Elektrolyse“ zielt auf neue Stack-Technologien und großserientaugliche Produktionsverfahren für die Niedertemperatur-Elektrolyse. Diese Elektrolyse über Polymerelektrolytmembran-Zellen (PEM-Zellen) zeichnet sich durch niedrige Betriebstemperaturen und eine hohe Leistungsdichte aus.



Molekularer Wasserstoff ( $H_2$ ) eröffnet als Energieträger enorme Potenziale für eine klimaneutrale Zukunft. Abbildung: iStock



Die Wasserstoffforschung am KIT deckt ein breites Spektrum von Technologien ab. Grafik: KIT

# PRODUKTION VON WASSERSTOFF



Eine drucklose Festoxidzell-Wasserdampfelektrolyse mit einer Leistung von 150 kW, die sich auch im Brennstoffzellenmodus betreiben lässt, im Energy Lab am Campus Nord des KIT. Foto: KIT

Zur Wasserstoffproduktion sind verschiedene Methoden verfügbar, die auf unterschiedlichen chemischen Reaktionen basieren. Die Wahl der Methode hängt von verschiedenen Kriterien ab, wie der Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien, der Energiequelle, der Skalierbarkeit und der Umweltverträglichkeit.

Zur industriellen Wasserstoffproduktion wird häufig die Dampfreformierung eingesetzt. Dabei wird Erdgas mit Wasserdampf bei hoher Temperatur und mithilfe eines Katalysators zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Diese Methode erfordert eine große Menge an Energie, und das dabei entstehende Kohlendioxid belastet das Klima, es sei denn, es wird abgeschieden und gespeichert.

Bei der Wasserelektrolyse wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Die Wasserelektrolyse stellt eine umweltfreundliche Methode zur Wasserstoffproduktion dar, wenn der benötigte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Bei der Pyrolyse wird ein kohlenstoffbasiertes Material, wie beispielsweise Biomasse oder Erdgas, bei

hohen Temperaturen und in Abwesenheit von Sauerstoff erhitzt. Durch diese thermische Zersetzung werden verschiedene Gase freigesetzt, darunter auch Wasserstoff.

Auch bestimmte Mikroorganismen, beispielsweise Bakterien, können Wasserstoff als Nebenprodukt ihres Stoffwechsels produzieren. Dieser Prozess wird als biologische Wasserstoffproduktion bezeichnet. Zur Nutzung dieser Methode gibt es verschiedene Ansätze, wie die Kultivierung von Algen in Bioreaktoren oder die Fermentation von Biomasse. Die solare Wasserstoffproduktion nutzt die Energie der Sonne, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Dies kann entweder direkt durch Photolyse oder indirekt durch den Einsatz von Solarzellen und elektrochemischen Methoden erfolgen.

Das KIT forscht intensiv an verschiedenen Methoden der Wasserstoffproduktion. Einige Ansätze sind auf diesen Seiten beispielhaft vorgestellt.

## LEISTUNGSFÄHIGE ELEKTROKATALYSATOREN UND ELEKTROLYSEZELLEN

Ein wichtiger Weg zur Gewinnung von Wasserstoff ist die Wasserelektrolyse: Mithilfe von elektrischer Energie wird Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt. Das Institut für Angewandte Materialien – Elektrochemische Technologien (IAM-ET) befasst sich seit mehreren Jahren aktiv mit der Analyse und Optimierung von Elektrokatalysatoren und Elektrolysezellen für die Wasserelektrolyse.

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer erforscht dazu die Prozesse an der Sauerstoffelektrode, an der die elektrische Energie eingesetzt wird, um Wasser in Sauerstoff und die für Wasserstoff benötigten Elektronen und Wasserstoffionen zu spalten. Das dahinterliegende Reaktionsnetzwerk ist komplex und für den Großteil der Energieverluste in Elektrolysezellen verantwortlich. Die Entwicklung und Optimierung leistungsfähiger Elektrokatalysatoren ermöglicht, die Reaktionen durch Herabsetzen der Akti-

vierungsenergie zu beschleunigen, sodass die Wasserelektrolyse energieeffizienter abläuft. Für die Analyse hat die Gruppe um Gruppenleiter Dr. Philipp Röse eine neuartige digitale Methode entwickelt, mit der sie Katalysatorexperimente evaluiert und diejenigen Oberflächenprozesse, die die Wasserspaltung behindern, identifiziert und quantifiziert. Dieser digitale Zwilling erlaubt dann die wissensbasierte Entwicklung leistungsfähigerer Elektrokatalysatoren für den Elektrolysebetrieb.

Die Arbeitsgruppe von Dr.-Ing. André Weber beschäftigt sich vor allem mit der Charakterisierung und Modellierung verschiedener Elektrolyseure. Dynamische Messverfahren und daraus abgeleitete Modelle liefern essenzielle Informationen über Hoch- und Niedertemperaturelektrolysezellen und tragen so zur Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit und Lebensdauer bei.



Charakterisierung einer PEM-Elektrolysezelle unter hohen Drücken. Foto: IAM-ET/KIT

## ELEKTROLYSE – WASSERSTOFF AUS WASSER

Im Energy Lab untersucht das Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) mit Industriepartnern verschiedene Elektrolyseverfahren, eingebettet in Power-to-X-Prozessketten. Dafür sind derzeit ein druckbetriebener Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Wasserelektrolyseur bis 50 bar mit einer Leistung von 100 kW sowie ein druckloser Wasserdampfelektrolyseur auf der Basis von Festoxidzellen (SOC) mit einer Leistung von 150 kW verfügbar. Als dritte Variante wird demnächst ein ebenfalls SOC-basierter druckloser Wasserdampf- und Kohlendioxid-Elektrolyseur installiert, der gleichzeitig Wasserdampf und Kohlendioxid elektrolytisch spalten und so direkt Synthesegas liefern kann. Das System zur Wasserstoff- und Synthesegaserzeugung im Energy Lab beinhaltet zudem einen Kompressor für die beiden drucklosen Elektrolyseure, mit dem sich Wasserstoff oder Synthesegas auf Drücke bis zu 50 bar verdichten lässt,

sowie einen 50 Kubikmeter fassenden 50 bar-Wasserstoff-Druckspeicher und eine Einheit zur Entfernung von Feuchtigkeit und Spurensauerstoff im Wasserstoff vor der Einleitung in den Druckspeicher, der bei der Verwendung der PEM benötigt wird. Als vierte Elektrolysetechnologie wird derzeit ein Anionen-Austausch-Membran (AEM)-Wasserelektrolyseur installiert; er umfasst acht Module mit einer Leistung von je 2,4 kW.

Die Untersuchungen zur Erzeugung von Wasserstoff und Synthesegas fokussieren auf die stoffliche Verknüpfung und Wärmeintegration verschiedener Technologien zur Elektrolyse als Prozessschritt mit den nachfolgenden Syntheseverfahren und ge-



Der Silyzer 100 von Siemens Energy, ein druckbetriebener PEM-Wasserelektrolyseur, im Energy Lab des KIT. Foto: IMVT/KIT

gebenenfalls auch mit vorgelagerten Verfahren zur Gewinnung von Kohlendioxid. Zu den Forschungszielen gehören die Charakterisierung des lastflexiblen Betriebs der Elektrolyseure in den verschiedenen Power-to-X-Prozessketten und die optimale Dimensionierung von Zwischenspeichern für Wasserstoff oder Synthesegas.

## PYROLYSE – WASSERSTOFF AUS ERDGAS

Im Karlsruhe Liquid Metal Laboratory (KALLA) am Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) setzen Forschende Flüssigmetalle für chemische Prozesse bei Temperaturen bis über 1000° C ein. Dazu gehört auch die CO<sub>2</sub>-freie Herstellung von Wasserstoff durch thermochemische Spaltung von Methan in flüssigem Zinn. Das Methan wird dabei in gasförmigen Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten. Der Wasserstoff lässt sich als sauberer Energieträger nutzen, der Kohlenstoff als wertvoller Grundstoff in der Industrie. KALLA hat die Pyrolyse von Methan in einem Flüssigmetall-Blasensäulenreaktor entwickelt: Das Methan wird am Reaktorboden durch eine Düse eingeleitet und in Form von Bläschen freigesetzt. Diese steigen aufgrund des Dichteunterschieds nach oben und bilden eine Art Mikro-



In einem Blasensäulenreaktor mit heißem Zinn wird Methan in gasförmigen Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten. Grafik: Leon Kühner/KIT

reaktorkammer für die Aufspaltung bei der Pyrolyse. Durch das heiße Zinn erreicht das Methan schnell die erforderliche Reaktionstemperatur, sodass es noch während des Aufsteigens der Bläschen gespalten wird. Die Bläschenoberfläche dient als Wand, an der sich der Kohlenstoff ablagert. Kommen die Bläschen am oberen Ende des Reaktors an, platzen sie und setzen ein Gemisch aus Wasserstoff, Kohlenstoff und Restmethan

frei. Das Restmethan wird dem Pyrolyseprozess erneut zugeführt.

In einem aktuell laufenden Projekt untersucht das ITES gemeinsam mit dem Industriepartner Wintershall Dea, wie sich das Verfahren künftig technisch effizient in industriellen Prozessen einsetzen lässt. Neben Pyrolyseexperimenten mit reinem Methan sowie mit Erdgas umfassen die Arbeiten auch Untersuchungen zu verschiedenen Reaktormaterialien. Um die thermische Pyrolyse komplett CO<sub>2</sub>-frei zu gestalten, prüfen die Forschenden im von der Helm-

holtz-Gemeinschaft geförderten Projekt „Solar Hydrogen – Highly Pure and Compressed“, Möglichkeiten, die erforderliche Reaktionswärme aus einer erneuerbaren Quelle zu gewinnen, und zwar aus Solarenergie. Sie bewerten Vorteile und Grenzen verschiedener solar beheizter Reaktoren und untersuchen den Einsatz der konzentrierenden Solarthermie (CSP) zur Wärmebereitstellung.

# SPEICHERUNG UND TRANSPORT

Die Verteilung von Wasserstoff kann über verschiedene Wege erfolgen, wie Pipelines, Tankstellen oder Tanklastwagen. Es gibt auch Bestrebungen, ein Wasserstoffpipelinesystem auszubauen, um Wasserstoff über längere Strecken zu transportieren. Auch das bestehende Erdgasnetz lässt sich grundsätzlich auf Wasserstoff umstellen.



Wasserstofftanks am KIT. Foto: KIT

Dies reduziert die Investitionen in neue Infrastrukturen. Dabei ist die schrittweise Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas möglich.

Wasserstoff lässt sich komprimieren und in Druckbehältern wie Gasflaschen oder Hochdrucktanks speichern. Dabei wird der Wasserstoff auf hohe Drücke verdichtet. Komprimierter Wasserstoff hat eine hohe Energiedichte, erfordert jedoch spezielle Tanks und eine sichere Handhabung. Durch Kühlung auf sehr niedrige Temperaturen lässt sich Wasserstoff in flüssiger Form speichern. Flüssiger Wasserstoff hat eine noch höhere Energiedichte als komprimierter Wasserstoff, benötigt aber spezielle Tanks mit hoher Isolierung und Kühlung, um die niedrigen Temperaturen zu halten.

Auch in chemisch gebundener Form lässt sich Wasserstoff speichern. Ein Beispiel

dafür ist die Speicherung von Wasserstoff in Form von Methanol oder Ammoniak. Diese Verbindungen können wieder in Wasserstoff umgewandelt werden, entweder durch thermische oder katalytische Prozesse.

Auch die Speicherung in Metallhydriden ist möglich. Diese Materialien können Wasserstoff chemisch binden. Der Wasserstoff wird in den Gitterzwischenräumen des Metalls gespeichert und bei Bedarf wieder freigesetzt. Metallhydride bieten eine sichere und kompakte Möglichkeit zur Wasserstoffspeicherung, erfordern jedoch spezielle Materialien und Temperaturen für die Speicherung und Freisetzung.

Die Wahl der geeigneten Methode hängt von verschiedenen Kriterien ab, wie der Wasserstoffmenge, der Infrastruktur und den Sicherheitsanforderungen.

# HYBRIDE PIPELINES FÜR FLÜSSIGWASSERSTOFF UND ELEKTRISCHE ENERGIE

Wasserstoff hat zwar eine hohe massenbezogene Energiedichte, die volumenbezogene ist bei gasförmigem Wasserstoff, auch unter Druck, allerdings gering. Für viele Anwendungen und bei einigen Transportoptionen ist deshalb Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) vorteilhaft. Beim Transport per Schiff kommt Wasserstoff bereits verflüssigt an,

sodass es sinnvoll ist, ihn als LH<sub>2</sub> weiter zu entsprechenden Industrie- und Mobilitätszentren zu transportieren. Das Institut für Technische Physik (ITEP) kombiniert LH<sub>2</sub>-Pipelines mit Hochtemperatur-Supraleitern zu besonders effizienten hybriden Pipelines. Bei Supraleitern handelt es sich um Materialien, die unterhalb der sogenannten Sprungtemperatur keinen elektrischen Widerstand mehr aufweisen. Bei der hybriden Pipeline wird die Kühlung unterhalb der Sprungtemperatur ohne zusätzlichen Aufwand durch den Flüssigwasserstoff bereitgestellt.

Im Verbundprojekt AppLHy! arbeitet das ITEP mit weiteren Instituten des KIT und externen Partnern an der Entwicklung und dem Aufbau einer Testumgebung für die hybriden Pipelines. Diese können künftig dazu bei-

tragen, nicht nur den zunehmenden Wasserstoffbedarf, sondern auch den mit der Elektrifizierung aller Sektoren stark steigenden Strombedarf zu decken und über den Transport der elektrischen Energie die Notwendigkeiten und Kosten von Redispatch im Stromnetz zu reduzieren. Der kombinierte Transport von Flüssigwasserstoff und elektrischer Energie ist besonders über lange Strecken, bei hohem Durchleitungsbedarf und in Regionen mit dichter Bebauung sowie bei Bedarf an beiden Energieformen sinnvoll.

Hochtemperatur-Supraleiterdrähte weisen einen Schichtaufbau auf; die Supraleiterschicht ist nur wenige tausendstel Millimeter dick und besteht aus mehreren Elementen. Daher enthalten die Drähte nur einen äußerst geringen Anteil an Seltenen Erden. Was die Pipelinetechnologie betrifft, verfügt das ITEP bereits über umfangreiches Wissen zum Umgang mit flüssigen Gasen. Komponenten wie Pumpen oder Wärmetauscher werden an die Erfordernisse von LH<sub>2</sub> angepasst.



Modell eines Kabels für hybride Pipelines. Foto: Mira Wehr, ITEP/KIT

# METHANISIERUNG – GRÜNER WASSERSTOFF ALS GRUNDLAGE

Grüner Wasserstoff, hergestellt mit Strom aus regenerativen Quellen, bildet die Grundlage für die Methanisierung, einen vielversprechenden Prozess, um volatile erneuerbare Energien in Form von chemischen Energieträgern zu speichern. Dabei werden Grüner Wasserstoff und Kohlendioxid aus der Luft oder ein Synthesegas aus der Biomassevergasung zu Methan umgewandelt. Das so erzeugte Methan lässt sich problemlos in das bestehende Erdgasnetz einspeisen und uneingeschränkt verteilen, speichern und nutzen. Zudem lässt sich das Methan auch als Kraftstoff einsetzen oder zu biogenem LNG (Liquefied Natural Gas) verflüssigen. Das Engler-Bunte-Institut (EBI) betreibt im Energy Lab große Containeranlagen für zwei selbst entwickelte Verfahren: die Dreiphasen-Methanisierung und die Waben-Methanisierung. Bei beiden Verfahren wird das Synthesegas an einem geeigneten Katalysator zu Methan und Wasser umgewandelt. Produktausbeute und Effizienz beider Verfahren sind sehr hoch, und es

entstehen keine störenden Nebenprodukte.

Bei der Dreiphasen-Methanisierung ist der Katalysator in einem flüssigen Wärmeträger suspendiert. Beide befinden sich in einem Blasensäulenreaktor, der von den Einsatzgasen in Form von aufsteigenden Blasen durchströmt wird. Die Dreiphasen-Methanisierung ist äußerst lastflexibel und kann daher ideal an eine schwankende Stromproduktion gekoppelt werden. Auch lässt sich die entstehende Abwärme effizient abführen und für andere Prozesse nutzen.

Die Waben-Methanisierung nutzt katalytisch beschichtete metallische Wabenkörper als Katalysator. Durch sie strömt ebenfalls Synthesegas und reagiert zu Methan. Die



Blick in die Containeranlage zur Dreiphasen-Methanisierung. Foto: Amadeus Bramsiepe/KIT

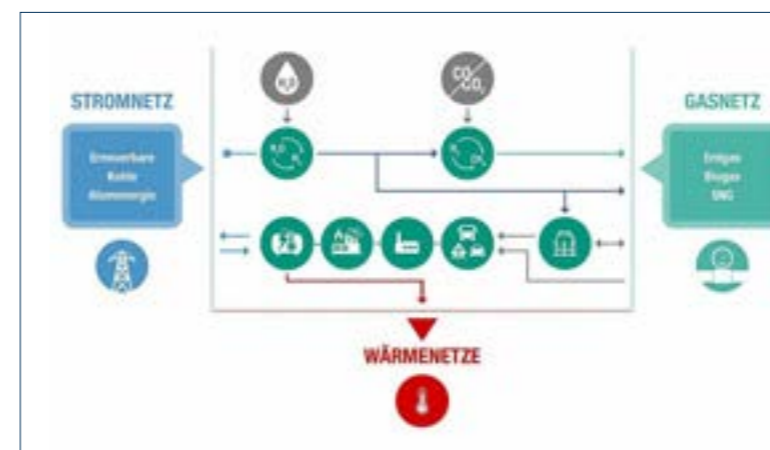
Waben-Methanisierung zeichnet sich besonders durch ihre große Robustheit und ihren einfachen modularen Aufbau aus, der eine einfache Hochskalierung auf die gewünschte Anlagengröße ermöglicht. Im EU-Projekt STORE&GO wurde dieses Konzept bereits 2019 im 1 MW-Maßstab verwirklicht. Seitdem wird es permanent weiterentwickelt.

# LEITUNGSGBUNDENER TRANSPORT VON WASSERSTOFF

Das Engler-Bunte-Institut (EBI) und die angeschlossene DVGW-Forschungsstelle (DVGW-EBI) beschäftigen sich ganzheitlich mit Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Wasserstoff. So befasst sich das Verbundprojekt GET H2 im Rahmen des BMBF-Wasserstoff-Leitprojekts TransHyDE mit zukünftigen H<sub>2</sub>-Transportleitungen. Die bestehende leistungsstarke Erdgasinfrastruktur

lässt sich künftig auch mit Wasserstoff betreiben. Dabei sind unter anderem die Wasserstoffverträglichkeit der Materialien und Komponenten, die Kapazität der Speicher und Leitungen sowie Sicherheitsaspekte zu beachten. Die Forschenden von EBI und DVGW-EBI erarbeiten unter anderem Regelwerke und Prüfvorschriften für die Zertifizierung von Materialien, Komponenten und Bauteilen. Bei verschiedenen Feldtests sammeln sie praktische Erfahrungen mit der Einführung von Wasserstoff. In kleineren Netzabschnitten werden entweder bis zu 30 Volumenprozent Wasserstoff beigemischt oder die Leitungen mit reinem Wasserstoff betrieben.

Systemische Bewertungen erfolgen mithilfe von Energiesystemmodellen, in denen sich zukünftige Entwicklungen auf der Basis der heutigen Infrastruktur abbilden lassen. Die Modelle sind als Co-Simulationen von spezifischen Wärme-, Strom- und Gasnetzmodellen sowie von Nutzern, Erzeugern und Speichern als integrale Energieplanung aufgebaut. Wichtig ist dabei die Gasnetzmodellierung, entweder durch die Abbildung realer Netze oder durch die Erstellung generischer Netze. Die Untersuchungen fokussieren auf notwendige Infrastrukturmaßnahmen sowie auf Betriebskonzepte, die Gasverteilnetzbetreiber bei strategischen Entscheidungen unterstützen. Dazu werden Szenarien zur Verbrauchsentwicklung in den verschiedenen Sektoren mit Simulationsmodellen sowie mathematischen Auswerterroutinen für reale Gasverteilnetze oder generische Verteilnetztopologien zusammengeführt und bewertet.



In Energiesystemmodellen wie diesem lassen sich zukünftige Entwicklungen auf der Basis der heutigen Infrastruktur abbilden. Grafik: DVGW-EBI

# ÜBERBLICK ÜBER DIE FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN AM KIT

THEMEN		INSTITUTE
H <sub>2</sub> -PRODUKTION	<b>Elektrochemische Produktion</b> Grundlagen Solid oxide electrolyzer cell (SOEC) Polymer electrolyte membrane electrolysis (PEMEL) Anion exchanger membrane electrolysis (AEMEL) Photoelectrochemical cell (PEC)	IPC IAM-ET, IMVT IAM-ET, IMVT, ITCP, ISTM IAM-ET, ITEP, ITES, ITAS IPS
	<b>Katalytische Produktion</b> Reformierung CH <sub>4</sub> (Reaktorentwicklung) Dehydrierung LOHC (Reaktorentwicklung)	IMVT IMVT
	<b>Thermochemische Produktion</b> Grundlagen Methan-Pyrolyse Vergasung Hydrothermale Vergasung	ITT ITES, EBI ceb, ITC ITC, EBI ceb IKFT
	<b>Biologische Produktion</b>	TEBI
	<b>Allgemeine Themen</b> Materialien Modellierung Energiesystem Modellierung Chemie	IAM-WK IIP ITC
H <sub>2</sub> -SPEICHERUNG UND H <sub>2</sub> -TRANSPORT	<b>Compressed hydrogen (CGH<sub>2</sub>)</b> Pipline	EBI-DVGW
	<b>Liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>)</b> Grundlagen Supraleitende Kabel mit LH <sub>2</sub> -Kühlung	ITES, ETI, IAM-WK, ITEP ITEP
	<b>Verdichtung</b> Innovative Technologien	ITES
	<b>Verflüssigung</b> Prozessführung Wärmetauscher Kryodruck Messtechnik	ITEP ITK ITES ITEP
	<b>Festkörperspeicher</b> Grundlagen Metallhydride Metal-organic frameworks (MOFs)	IAM-WK IAM-WK IFG
	<b>Chemische Speicher</b> Liquid organic hydrogen carriers (LOHC) Ammoniak Methanol/Dimethylether	IMVT IMVT IKFT, IMVT, ITCP
<b>Geologische Speicher</b>	AGW	

THEMEN		INSTITUTE
H <sub>2</sub> -NUTZUNG	<b>Brennstoffzellen</b> Elektrode Zelle Bipolarplatten Stack Antriebssysteme Charakterisierung Simulation und Modellierung	IAM-ET TFT IPEK IPEK, WBK IPEK IAM-ET IAM-ET
	<b>LH<sub>2</sub></b> Kühlung Energiesystemkomponenten Fahrzeuge und Flugzeug Simulation und Modellierung	ITEP ITEP ITEP ITEP
	<b>Verbrennung</b> Motoren Zündung	IFKM ITT
	<b>Stoffliche Nutzung</b> Kraftstoffsynthese Methanisierung Methanol- und Ammoniaksynthese Integrierte Prozesskette (PtX)	IKFT, ITCP, IMVT IMVT, EBI ceb IKFT, IMVT IKFT
	<b>Mobilität</b>	FAST
H <sub>2</sub> -QUERSCHNITTS- THEMEN	<b>Sicherheit</b> Modellierung und Simulation des unfallbedingten Verhaltens Bewertung von Gefährdungspotentialen Laminare und turbulente Zündprozesse	ITES ITES ITT
	<b>Systemische Betrachtungen</b> Modellierung Energiesystem und H <sub>2</sub> -Wertschöpfungskette Bewertung der H <sub>2</sub> - und Folgeprodukt-Produktion Nachhaltigkeitsbewertung (LCA/LCC/SLCA) Analyse Systemvertrauen, Wirtschaft und Gesellschaft H <sub>2</sub> aus Biomasse/Algen Szenarienbasierte Nutzung H <sub>2</sub> -basierter technischer Systeme Modellierung Supply Chain Management/Logistiksysteme Anbindung an das Stromnetz	IIP IIP ITAS ITAS ITAS IPEK IFL ETI
	<b>Gesellschaftliche Aspekte</b> Akzeptanzforschung	IIP, ITAS
	<b>Ökonomische Aspekte</b> Produktprofilmodellierung Auswirkung Exportländer Ökonomische Bewertung	IPEK ITAS IIP

# GRÜNER WASSERSTOFF IN DER CHEMISCHEN WERTSCHÖPFUNGSKETTE



Synthetischer Kraftstoff aus Wasserstoff und Kohlendioxid. Foto: IMVT/KIT

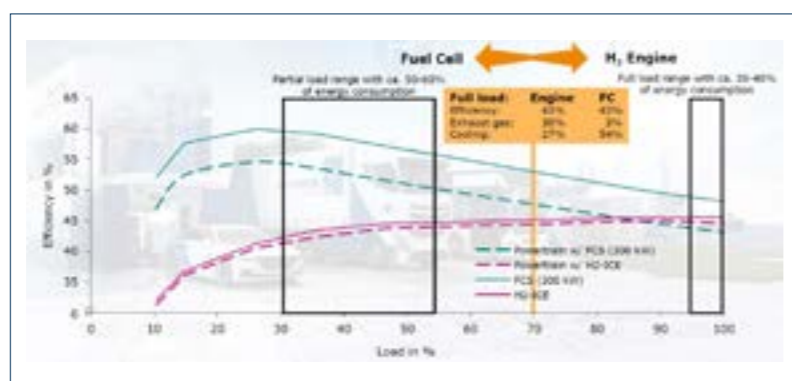
Das Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) entwickelt und erforscht modulare kompakte Technologien zur Umwandlung von ubiquitären Stoffen, wie Kohlendioxid, Wasser und Stickstoff, mithilfe von erneuerbarer elektrischer Energie oder Solarenergie in Ausgangsstoffe für chemische Synthesen, Treibstoffe für schwer elektrifizierbare Anwendungen im Transport sowie für die längerfristige Speicherung großer Energiemengen. Grüner Wasserstoff, hergestellt durch Elektrolyse oder photokatalytische Wasserspaltung, ist ein wichtiges Zwischenprodukt in solchen Prozessen. Das IMVT befasst sich mit der effizienten Umwandlung des Wasserstoffs in Produkte wie Methanol, höhere Alkohole, synthetische Kohlenwasserstoffe, Methan, Olefine oder Ammoniak.

Dafür bedarf es Power-to-X-Verfahren und Prozesseinheiten, die sich idealerweise auch lastflexibel betreiben lassen. Der lastflexible Betrieb solcher Anlagen ermöglicht, den Ertrag aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen zu maximieren. Das IMVT entwickelt, charakterisiert und erprobt dafür strukturierte Reaktoren und andere Prozesskomponenten vom Labormaßstab bis hin zu industriellen Prototypen. Darüber hinaus arbeitet es an vereinfachten Verfahren zur Aufarbeitung von synthetischen Kohlenwasserstoffen zu spezifikationsgerechten Kraftstoffen. Die Forschenden setzen mechanische Mikrofertigung und additive Fertigung ein, um skalierbare modulare Apparate mit herausragender Wärme- und Stofftransportleistung bzw. Photonenausbeute zu entwickeln, die dank des geringen reaktiven Inventars drastischere Prozessbedingungen ohne Sicherheitseinbußen erlauben und dynamischer betrieben werden können als kommerzielle verfügbare Apparate.

## DER WASSERSTOFFMOTOR

Wasserstoff wird schon lange als Energieträger für Brennstoffzellenanwendungen eingesetzt. Während die Brennstoffzelle bei niedriger Last einen sehr guten Wirkungsgrad aufweist, verhält sich der Wasserstoffmotor fast umgekehrt: Mit Zunahme der Last steigt tendenziell auch der Wirkungsgrad. Dies macht den Wasserstoffmotor unter anderem zu einem geeigneten Antrieb für Nutzfahrzeuge.

de Vermeidung von Wasserstoffkonzentrationen im Ansaugtrakt. Dies reduziert wiederum das Risiko von Rückfeuerungen,



Wirkungsgradvergleich zwischen Brennstoffzelle (blau) und Wasserstoffmotor (violett). Der Gesamtantriebsstrang-Wirkungsgrad ist gestrichelt dargestellt. Grafik: Dreisbach/AVL

stoffmotoren erhalten eine fast identische Abgasnachbehandlung, bestehend aus Oxidationskatalysator, Partikelfilter, SCR-Katalysator und einem Ammoniak-Schlupfkatalysator, die individuell angepasst werden. Ein Problem stellt die Wasserstoffdiffusionsneigung dar, die besonders die Alterung von gehärteten Stählen nachteilig beeinflusst. Zudem ist die Auswahl des Grundöls und der Öladditivierung zu optimieren und für den Wasserstoffbetrieb anzupassen.

Allerdings sind dazu noch Technologieherausforderungen zu bewältigen, wie die Direktinblasung des Wasserstoffs, die Zündung und optimierte Energiewandlung, die Abgasnachbehandlung, Materialthemen, Tribologie sowie Tanksystem und Tankstelleninfrastruktur. Die Direktinblasung des Wasserstoffs ermöglicht die weitestgehen-

die den Ansaugtrakt beschädigen können. Die Rohemissionen von Wasserstoffmotoren sind teilweise über eine Größenordnung geringer als die Rohemissionen von Dieselmotoren, die ihrerseits dank einer Abgasnachbehandlung bereits als quasi immissionsneutral gelten können. Wasser-

Alles in allem stehen den großen Chancen des Wasserstoffmotors technische und gesellschaftliche Herausforderungen gegenüber. Die technischen Probleme lassen sich lösen; die gesellschaftliche Akzeptanz wird mit entscheidend für den Erfolg dieser Technologie sein.

# NUTZUNG VON WASSERSTOFF



Syntheseanlage für E-Fuels am KIT. Foto: KIT

Wasserstoff kommt bei der Transformation des Energiesystems hin zur Klimaneutralität eine wichtige Bedeutung zu. So lässt sich überschüssiger Strom aus erneuerbaren Quellen wie Sonne und Wind nutzen, um Wasser über Elektrolyse in Wasserstoff umzuwandeln und diesen zu speichern. Bei Bedarf lässt sich der Wasserstoff wieder in Strom umwandeln, entweder durch Brennstoffzellen oder durch Verbrennung in konventionellen Gasturbinen.

stoff als sauberer Brennstoff für die Erzeugung von Wärme in industriellen Prozessen, aber auch in Gebäudeheizungen dienen. Der Wasserstoff lässt sich in Gasbrennern oder Blockheizkraftwerken verbrennen.

In Fahrzeugen kann Wasserstoff eingesetzt werden, um in einer Brennstoffzelle mit Sauerstoff aus der Luft zu reagieren, wodurch Strom erzeugt wird, der dann einen Elektromotor antreibt. Brennstoffzellen-Fahrzeu-

Umgekehrt kann Wasserstoff zur Stromerzeugung in Brennstoffzellenkraftwerken verwendet werden. Diese Kraftwerke nutzen die chemische Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff, um elektrische Energie zu erzeugen. Brennstoffzellenkraftwerke zeichnen sich dadurch aus, dass sie hohe Wirkungsgrade haben und dass bei der Stromerzeugung fast keine schädlichen Emissionen entstehen. Auch kann Wasser-

ge haben den Vorteil, dass sie emissionsfrei sind, da bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff lediglich Wasser als Abfallprodukt entsteht. Daneben lässt sich Wasserstoff aber auch in Verbrennungsmotoren einsetzen.

Eine alternative Option zur direkten Verwendung von Wasserstoff stellen E-Fuels dar. Dabei handelt es sich um Kohlenwasserstoffe, die aus Wasserstoff und Kohlendioxid synthetisiert werden, wobei der Wasserstoff aus einem Power-to-Gas-Prozess, das Kohlendioxid aus Carbon Capture and Utilization oder aus Direct Air Capture, das heißt aus der Luft stammt. Diese synthetischen Kraftstoffe lassen sich dann in Verbrennungsmotoren oder anderen vorhandenen Infrastrukturen für den Transport oder die Energieversorgung verwenden.

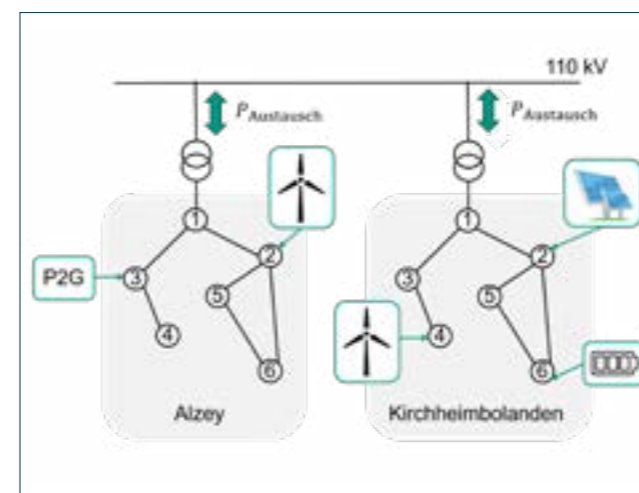
In der chemischen Industrie lässt sich Wasserstoff als Rohstoff für die Synthese unterschiedlicher Stoffe einsetzen. Dies verbessert die Umweltbilanz der Produkte und trägt zu einer nachhaltigen Wirtschaft bei.

## WASSERSTOFF IN SEKTORGEKOPPELTEN ENERGIEZELLEN

Die Stromnetze stehen vor neuen Herausforderungen: Immer mehr elektrische Energie wird auf Verteilnetzebene erzeugt und eingespeist. Diese Einspeisung, besonders aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen, ändert sich zeit- und wetterabhängig. Zu-

sätzlich belasten neue Verbraucher wie Wärmepumpen und Ladestationen für Elektroautos die Verteilnetze. Diesen Herausforderungen stellte sich das kürzlich abgeschlossene Verbundprojekt RegEnZell, an dem das KIT mit mehreren Einrichtungen maßgeblich beteiligt

Mithilfe von Last- und Wetterprognosen ermittelten die Forschenden, wann und wie sich Wasserstoff-Elektrolyseanlagen, Speicher und sonstige flexible Komponenten zur Speicherung von zeitweilig überschüssiger Energie aus Wind und Sonne optimal betreiben lassen. Anhand der Prognosen sowie hochdimensionaler Netzmodelle ermittelten sie anschließend in Echtzeit Betriebspläne der flexiblen Anlagen. Besonders das durch die Elektrolyse erzeugte Gas lässt sich einfach und kostengünstig in Tanks oder im Gasnetz speichern. Zudem lässt sich der überregionale Energieaustausch reduzieren, wenn benachbarte Energiezellen gezielt kooperieren. Das Projekt RegEnZell zeigt somit, dass bereits im aktuellen Energiesystem ein sektorgekoppelter Betrieb von Energiezellen Vorteile bringt. Dank der besonderen Bedeutung der Forschungsergebnisse für die Energiewende wurde RegEnZell als Highlight-Projekt für den Bundesbericht Energieforschung 2023 ausgewählt.



In den Städten Alzey und Kirchheimbolanden in Rheinland-Pfalz wurden sektorgekoppelte Energiezellen erfolgreich getestet. Grafik: Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme IRS//KIT

# GROSS GEFORSCHT – INFRASTRUKTUREN

Das KIT verfügt über moderne Forschungsinfrastrukturen, die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern einzigartige Möglichkeiten für Experimente und Simulationen bieten. Gerade zentrale und komplexe The-

men, wie die Integration von Wasserstoff in eine nachhaltige Energieversorgung für Deutschland und Europa, erfordern umfassende Prüfungen der entwickelten Technologien unter verschiedenen Aspekten

wie Energieeffizienz, Kosteneffizienz und Sicherheit. Beispielhaft seien einige Infrastrukturen vorgestellt, an denen Forschende heute erproben, was morgen Realität werden soll.

## KIT H<sub>2</sub>-SHUTTLE

Zwischen den Standorten Campus Süd, Campus Ost und Campus Nord verkehren für Beschäftigte und Studierende des KIT zwei Hybridbusse mit Brennstoffzellenantrieb. Am Campus Nord versorgt eine Tankstelle die Busse mit Wasserstoff. Das baden-württembergische Umweltministerium hat die Einrichtung des KIT H<sub>2</sub>-Shuttle maßgeblich unterstützt.

Bei den Fahrzeugen handelt es sich um Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid-Stadtbusse. Jeder Bus verfügt über zwei 60 kW PEM FC Stacks. Der bei 350 bar gespeicherte Wasserstoffvorrat bis zu 35 kg

ermöglicht eine Reichweite von mindestens 350 Kilometern, wobei die tatsächliche Reichweite deutlich höher liegt. Der Bus wird elektrisch über zwei Radnabenmotoren auf der Hinterachse angetrieben. Die Motoren werden primär über eine Lithium-Ionen-Batterie mit elektrischer Leistung versorgt. Bei Bedarf wird die Batterie von den Brennstoffzellen geladen. Mit der Batterie allein verfügt der Bus über ca. zehn Kilometer Reservereichweite. Die Wasserstofftankstelle ermöglicht eine 350-bar-Befüllung für Busse und einer 700-bar-Befüllung für Pkws, letztere ist jedoch ungekühlt. Pro Tag kann die Tankstelle ca. 90 kg Wasserstoff

abgeben, was den geforderten drei Busbetankungen und zehn Pkw-Betankungen entspricht. Die maximale Dauer einer Busbetankung beträgt weniger als 20 Minuten. Die Tankstelle besitzt eine Speicherkapazität von 300 kg Wasserstoff bei 45 bar und 120 kg Wasserstoff bei 450 bar.

Der KIT H<sub>2</sub>-Shuttle transportiert ca. 800 Passagiere am Tag. Bei 200 Arbeitstagen führt dies zu einem jährlichen Aufkommen von 160.000 Passagieren. So trägt der Shuttle dazu bei, Anwendungsmöglichkeiten und Alltagstauglichkeit der Wasserstofftechnologien zu demonstrieren.

## BIOLIQ®

In dem am KIT entwickelten bioliq®-Prozess wird Biomasse aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen in mehreren Stufen thermochemisch abgebaut. Dabei entstehen Wasserstoff und Kohlenmonoxid als kleinste chemische Bausteine, die sich dann mithilfe chemischer Katalysatoren zu sauberen Kraftstoffen und anderen chemischen Grundstoffen aufbauen lassen. In der Pilotanlage erproben Forschende die vollständige Prozesskette im Zusammen-

spiel und optimieren sie für die industrielle Großanwendung.

Die bioliq®-Pilotanlage dient unter anderem der Bestimmung von Massen- und Energiebilanzen, dem Erlernen der Betriebsweise sowie dem Nachweis der Praxistauglichkeit und der Einsatzstoffflexibilität. Als Operateure fungieren Ingenieure, Mechaniker und Elektriker,



Die Pilotanlage verbindet alle Stufen des bioliq®-Prozesses: Schnellpyrolyse, Hochdruck-Flugstromvergasung, Heißgasreinigung und Synthese. Foto: KIT

die die Anlage rund 1 000 Stunden im Jahr betreiben.

## HYKA

Im Wasserstoff-Versuchszentrum HYKA (Hydrogen Test Center) forscht das KIT an der Wasserstoffsicherheit. Zur Entwicklung von neuen Teststandards und zur Optimierung von Sicherheitstechnik führen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Wasserstoff-Sicherheitsversuche im Industriemaßstab durch. Außerdem untersuchen sie das grundlegende Verhalten von Wasserstoff – von der Verteilung bis zur Verbrennung.

Die Versuchsanlagen von HYKA gehören zu den größten in Europa. In der 160 Kubikmeter großen Prüfkammer können beispielsweise Kfz-Wasserstoffmotoren getestet werden – der Platz reicht sogar für einen kompletten wasserstoffbetriebenen Pkw. Darüber hinaus ermöglicht das leistungsstarke Belüftungssystem, Luftströmungen zu erzeugen, die mit denen eines Windkanals vergleichbar sind oder sogar eine komplexere Strömungsstruktur aufweisen.



Zwei Testbehälter des Wasserstoff-Testzentrums HYKA. Foto: KIT

## ENERGY LAB

Auf dem Campus Nord des KIT steht Europas größte Forschungsinfrastruktur für erneuerbare Energien und Sektorkopplung: Das Energy Lab ist ein Projekt des KIT in Kooperation mit den Helmholtz-Zentren Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Forschungszentrum Jülich (FZJ). In einem Anlagenverbund sind elektrische,

thermische und chemische Energieströme sowie neue Informations- und Kommunikationstechnologien miteinander verknüpft. Zu den Komponenten gehören ein Solarpark, verschiedene Power-to-X-Anlagen und Netzspeicher sowie die Forschungsanlage Power Hardware in the Loop (PHIL), eine virtuelle Echtzeit-Simulationsumgebung, mit

der sich neu entwickelte Technologien in unterschiedlichen Situationen prüfen lassen.

Am Energy Lab befassen sich Forschende vom KIT mit der Integration von Wasserstoffspeichern in ein zukünftiges klimaneutrales und resilientes Energiesystem. Mit Wasserstoff lassen sich große Energiemengen über

längere Zeit chemisch speichern. Der Wasserstoff lässt sich mit überschüssigem Strom aus den fluktuierenden Quellen Photovoltaik und Windkraft über Elektrolyse produzieren. Bei Bedarf wird die Energie dann mit Brennstoffzellen rückverstromt und ins Stromnetz eingespeist. Die Abwärme wird unterdessen einem Wärmenetz zugeführt. Das Energy

Lab verfügt über große Containeranlagen für verschiedene Methanisierungsverfahren. Gegenüber Wasserstoff besitzt Methan den Vorteil, dass es sich problemlos in das bestehende Erdgasnetz einspeisen lässt. Überdies befassen sich Forschende im Energy Lab mit Power-to-Liquid-Verfahren zur Erzeugung von E-Fuels.

Um E-Fuels aus erneuerbarem Strom, Wasser und CO<sub>2</sub> herzustellen, müssen mehrere Prozesse zu einer Prozesskette zusammengeschaltet werden. Im Energy Lab untersuchen Forschende dazu verschiedene Optionen und Kombinationen.





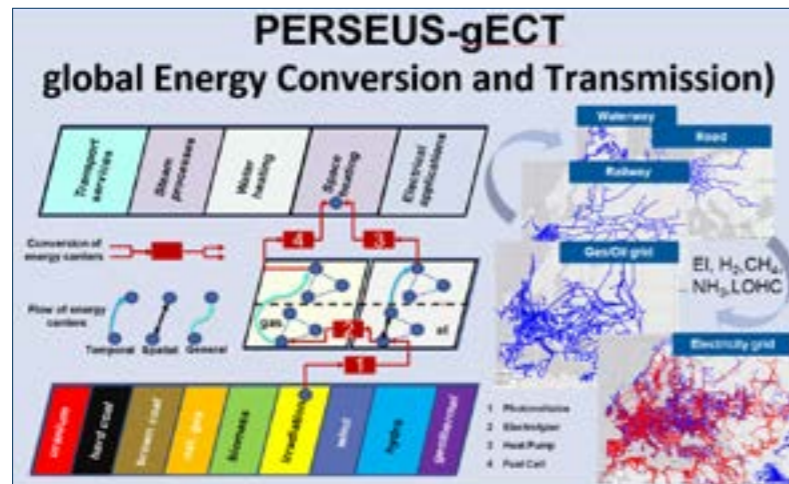
# INTEGRATION VON H<sub>2</sub> IN ENERGIESYSTEMMODELLE

Der Lehrstuhl für Energiewirtschaft am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) analysiert unter anderem Optionen zum Transport von erneuerbar bereitgestellten Energieträgern, wie Wasserstoff oder synthetische Gase, auf globaler Ebene. Ziel ist, optimale Versorgungsstrukturen zu ermitteln und dabei techno-ökonomische Randbedingungen zu berücksichtigen. Im Fokus steht die Frage, welche Umwandlungs- und Transportrouten sich am besten zur Deckung der Energienachfrage eignen.

Die Forschenden am Lehrstuhl für Energiewirtschaft integrieren H<sub>2</sub> und andere Energieträger als Investitionsoptionen in räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Energiesystemmodelle. Schwerpunkte liegen auf der geografi-

schen Abbildung der weltweiten Standorte für erneuerbare Energien, der Darstellung der nationalen und europäischen Energienachfrage sowie der Berücksichtigung von Transportrestriktionen sowohl innerhalb der Herkunfts- und Nachfrageländer als auch zwischen den Ländern. Ausgehend von einer globalen Potenzialanalyse für er-

neuerbare Energien, die bestehende sowie geplante Umwandlungs- und Transportinfrastrukturen für primäre und sekundäre Energieträger einbezieht, erfolgt eine gekoppelte endogene Einsatz- und Ausbauplanung des Energiesystems. Die Modelle fokussieren auf den Austausch über das elektrische Netz sowie auf die Auswahl von Optionen der Umwandlung in sekundäre Energieträger, wie Wasserstoff bzw. wasserstoffbasierte Energieträger, und deren Transport über bestehende sowie auszubauende Pipelines sowie Wasser-, Schienen- und Straßennetze. Darüber hinaus bilden die Modelle die Nachfrageentwicklung in den Herkunftsländern sowie in anderen Regionen der Welt ab, da sich nur so die Dynamik der Versorgung und deren Risiken bewerten lassen.



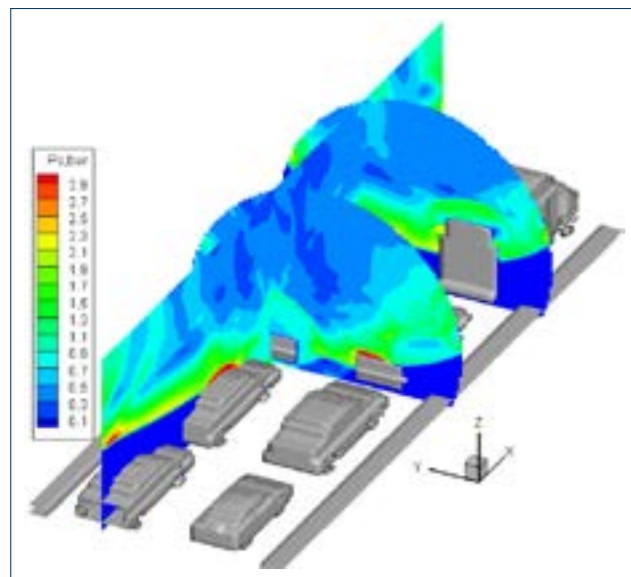
Das zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Energiesystemmodell PERSEUS-gECT ermöglicht, die Integration von Wasserstoff global abzubilden und zu analysieren. Grafik: IIP/KIT

# SICHERHEIT VON WASSERSTOFF

Wie sicher ist Wasserstoff? Mit dieser Frage befasst sich die Abteilung Wasserstoff am Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES). Wasserstoff an sich ist nicht sicherer oder unsicherer als ande-

re Energieträger. Wesentlich ist der sichere Umgang damit. Dies setzt eine genaue Kenntnis der Eigenschaften voraus. Unter Normalbedingungen ist Wasserstoff ein sehr leichtes Gas mit hohen Diffusions-eigenschaften. In einem sehr weiten Mischungsbereich in Luft ist er leicht zündfähig und brennt relativ schnell, dabei können große Druckwirkungen entstehen. All dies ist für eine sichere Auslegung und einen sicheren Betrieb von Wasserstoff-Infrastrukturen zu berücksichtigen. Die Nutzung in Fahrzeugen erfordert unkonventionell hohe Speicherdrücke (bis 700 bar im Pkw) oder sehr niedrige Temperaturen (-253 Grad Celsius für LH<sub>2</sub>-Speicherung).

Die Internationale Gesellschaft für Wasserstoffsicherheit HySafe, der das KIT als Gründungsmitglied angehört, hat mit der Industrie eine periodisch aktualisierte Prioritätenliste für die Forschung entwickelt. Zu den derzeit wichtigsten Themen gehören Sicherheit in Tunneln und umschlossenen Räumen, Verständnis des unfallbedingten Verhaltens von LH<sub>2</sub> sowie günstige und leichte Strukturmaterialien für Speicher und Leitungen. Im Projekt HyTunnel-CS wurde die Wirksamkeit von konventionellen Sicherheitseinrichtungen bei Unfällen in Tunneln analysiert. Mit der Software GASFLOW-MPI wurde die Druckwirkung einer spät gezündeten Wasserstoff-Luft-Wolke in einem Tunnel berechnet. In den Projekten PRESLHY und ELVHYS wird das Verhalten von Flüssigwasserstoff bei Unfällen untersucht. Im Projekt TransHyDE-AppLHy! geht es um die sicherheitstechnische Auslegung von LH<sub>2</sub>-Laboren, Zündphänomene mit starkem magnetischem Hintergrundfeld und schnelle Phasenübergänge mit kryogenem Wasserstoff.



Ergebnis einer Verteilungs- und Explosionssimulation mit der Software GASFLOW-MPI für ein Unfallszenario in einem Tunnel. Grafik: ITES/KIT

# QUERSCHNITTSTHEMEN

## STUDIUM UND AUSBILDUNG

Als einzige deutsche Exzellenzuniversität mit einem nationalen Großforschungszentrum bietet das KIT hervorragende Studienbedingungen. Nirgendwo sonst sind die Möglichkeiten, direkt in die Forschung einzusteigen, so vielfältig und vielversprechend. Zugleich verbindet das KIT seine lange universitäre Tradition mit interdisziplinärer Spitzenforschung. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind direkt in die Lehre eingebunden, und Studierende haben die Möglichkeit, sich schon früh im Studium an spannenden Forschungsprojekten zu beteiligen.

Natur- und Ingenieurwissenschaften im Zusammenhang mit gesellschaftlichen Aspekten und Spitzenforschung bilden eine breite Basis für die Ausbildung und Lehre im Rahmen der Wasserstofftechnologie. Lehrveranstaltungen zur Wasserstofftechnologie finden sich am KIT entlang der ge-

samten Verwertungskette, von Überblicksvorlesungen für alle Studiengänge bis hin zu anspruchsvollen Spezialvorlesungen und Seminaren zur Vertiefung. Ergebnisse aus experimenteller Forschung und Simulationen fließen in die Vorlesungen ein und umfassen verschiedene Herstellungsverfahren von Wasserstoff, die direkte Nutzung von Wasserstoff sowohl in Brennstoffzellen als auch als chemischer Stoff, beispielsweise zur Entwicklung synthetischer Kraftstoffe, verschiedene Speichersysteme und -formen sowie eine umfangreiche Sicherheitsforschung im Rahmen der angewandten Technologien, einschließlich Regulierung, Regelwerke und Normen.

Ein schneller Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen in den Markt ist ein Anliegen des KIT auch im Bereich der Wasserstofftechnologie. Deshalb fördert das KIT schon während des Studiums den Unternehme-



Das KIT verbindet eine lange universitäre Tradition mit interdisziplinärer Spitzenforschung. Foto: Patrick Langer/KIT

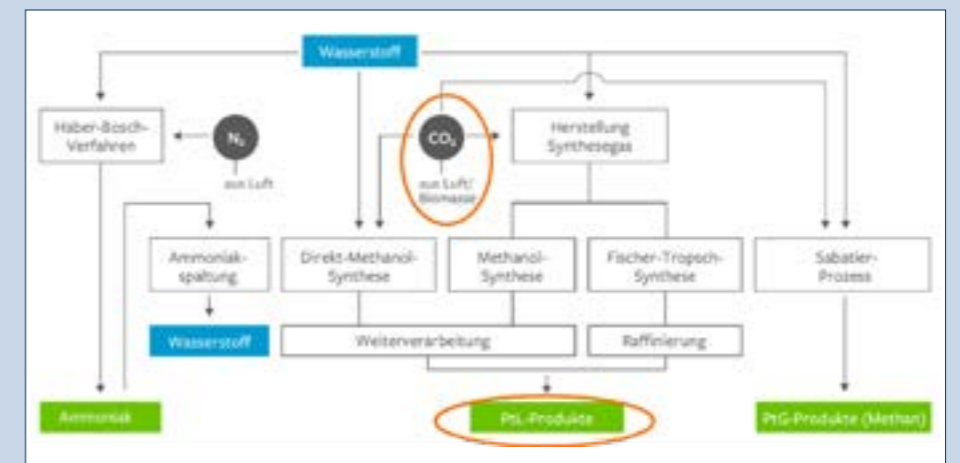
geist. Absolventinnen und Absolventen des KIT gehören zu den gefragtesten Nachwuchskräften.

# TECHNIKFOLGEN UND GESELLSCHAFTLICHE AKZEPTANZ

Mit Wasserstoff verbinden sich große Hoffnungen auf eine klimaneutrale Zukunft – aber wie steht es um die Technikfolgen und die gesellschaftliche Akzeptanz? Damit befasst sich das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS). Um den erwarteten Bedarf an Wasserstoff zu decken, wird Deutschland auf Importe angewiesen sein. Dabei gilt es, mit möglichst vielen Staaten Verträge abzuschließen, um das Risiko geopolitischer Abhängigkeit zu diversifizieren. Die Gesellschaft in Deutschland steht dem Thema Wasserstoff prinzipiell positiv und offen gegenüber, wie Befragungen zeigen. Akzeptanzprobleme oder Konflikte sind eher bezogen auf den systemischen Gesamtkontext, wie Importe oder Kosten, sowie auf spezifische Teilbereiche, wie die Erzeugung mit erneuerbaren Energien, zu erwarten. Gerade Grüner Wasserstoff ist daher im Zusammenhang mit dem verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien zu betrachten, vor allem dem Ausbau der Windkraft und den damit einhergehenden Diskussionen vor Ort.

Eine Empfehlung der Akzeptanzforschung an die Politik lautet, für die Entwicklung und Förderung von Wasserstofftechnologien Standards und Rahmenbedingungen festzusetzen, die sicherstellen, dass die erhofften positiven Umweltwirkungen wie Treibhausgasminderung und Nachhaltigkeit tatsächlich eintreten. Nachhaltigkeit bedeutet neben ökologischen Vorteilen auch die gerechte Verteilung von Kosten und Nutzen

im ökonomischen wie im sozialen Sinn. In die Akzeptanzbetrachtungen einzubeziehen sind nicht nur die erneuerbaren Energien in der Vorkette, sondern auch die möglichen Folgeprodukte von Wasserstoff. Dazu gehören strombasierte synthetische Kraftstoffe, die aktuell kontrovers diskutiert werden, was ihre mögliche Rolle innerhalb der Verkehrswende als Alternative zur Wasserstoffbrennstoffzelle oder zur Elektromobilität betrifft.



Mögliche Nutzungspfade für Wasserstoff. Grafik: ITAS/KIT

## Lehrveranstaltungen Wasserstoff am KIT

Veranstaltung	Umfang	Dozentin / Dozent	Institut
Wasserstoff und reFuels – motorische Energiewandlung	2 SWS	Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch	IFKM
CO <sub>2</sub> -neutrale Verbrennungsmotoren und deren Kraftstoffe I	4 SWS	Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch	IFKM
Hydrogen as Energy Carrier	2 SWS	Prof. Dr. rer. Nat Helmut Ehrenberg, Aline Léon	AOC
Wasserstofftechnologie	2 SWS	Prof. Dr. Thomas Jordan	ITES
Electrochemical Energy Technologies	2+1 SWS	Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer	IAM-ET
Batterien und Brennstoffzellen	2+1 SWS	Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer	IAM-ET
Praktikum Batterien und Brennstoffzellen	4 SWS	Dr.-Ing. André Weber	IAM-ET
Seminar Batterien	2 SWS	Dr.-Ing. André Weber	IAM-ET
Seminar Brennstoffzellen	2 SWS	Dr.-Ing. André Weber	IAM-ET
Seminar Elektrokatalyse	2 SWS	Dr. Philipp Röse	IAM-ET
Batterie- und Brennstoffzellensysteme	2 SWS	Dr.-Ing. André Weber	IAM-ET
Modellbildung elektrochemischer Systeme	2 SWS	Dr.-Ing. André Weber	IAM-ET
Electrocatalysis	2+1 SWS	Dr. Philipp Röse	IAM-ET
Laboratory Electrochemical Energy Technologies	3 SWS	Dr. Philipp Röse	IAM-ET
Power-to-X – Key Technology for the Energy Transition	2+1 SWS	Prof. Dr. Dr.-Ing. Roland Dittmeyer, Dr. Alexander Navarrete Munoz, Dr. Peter Holtappels	IMVT
Hydrogen in Materials: from Energy Storage to Hydrogen Embrittlement	2+1 SWS	Prof. Dr. Astrid Pundt Dr. rer. nat. Stefan Wagner	IAM-WK
Wasserstoff in Materialien: von der Energiespeicherung zur Materialversprödung	2+1 SWS	Prof. Dr. rer. nat. Astrid Pundt, Dr. rer. nat. Stefan Wagner	IAM-WK
Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien	2 SWS	Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis	EBI-VBT
Grundlagen der Verbrennungstechnik	2+1 SWS	Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis	EBI-VBT
Energietechnik	2 SWS	Prof. Dr.-Ing. Horst Büchner	EBI-VBT
Grundlagen der Brennstofftechnik	3 SWS	Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb	EBI-CEB
Katalytische Verfahren der Gastechnik	2 SWS	Dr.-Ing. Siegfried Bajohr	EBI-CEB
Raffinerietechnik – flüssige Energieträger	3 SWS	Prof. Dr. Reinhard Rauch	EBI-CEB
Liquid Transportation Fuels	3 SWS	Prof. Dr. Reinhard Rauch	EBI-CEB
Superconducting Magnet Technology	2 SWS	Prof. Dr. Tabea Arndt	ITEP
Superconducting Power Systems	2+1 SWS	Prof. Dr.-Ing. Mathias Noe	ITEP
Cryogenic Engineering	2+1 SWS	Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann	TTK-KKT
Kältetechnik B	2+1 SWS	Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann	TTK-KKT
Physical Foundations of Cryogenics	2+1 SWS	Prof. Dr.-Ing. Steffen Grohmann	TTK-KKT
Auslegung von Brennstoffzellensystemen	2 SWS	Dr.-Ing. Jan Haußmann	IPEK

## Lehrveranstaltungen Wasserstoff am KIT

Veranstaltung	Umfang	Dozentin / Dozent	Institut
Leistungselektronik für die Photovoltaik und Windenergie	2 SWS	Prof. Dr.-Ing. Bruno Burger	ETI
Produktionstechnik für die Elektromobilität	2 SWS	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer	wbk
Chemical Hydrogen Storage	2 SWS	TT-Prof. Dr. Moritz Wolf, Prof. Jörg Sauer	IKFT
Renewable Energy – Resources, Technologies and Economics	2 SWS	PD Dr. Patrick Jochem	IIP
Smart Energy Infrastructure		Dr. Armin Ardone, Prof. Dr. Dr. Andrej Pustisek	IIP
Auslegung von Mikroreaktoren	4 SWS	Prof. Dr.-Ing. Peter Pfeifer	IMVT

## Institute mit Wasserstoffforschung am KIT

AGW	Institut für Angewandte Geowissenschaften
EBI-ceb	Engler-Bunte-Institut Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie
EBI-DVGW	Engler-Bunte-Institut – Forschungsstelle des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V.
ETI	Elektrotechnisches Institut
FAST	Institut für Fahrzeugsystemtechnik
IAM-ET	Institut für Angewandte Materialien – Elektrochemische Technologien
IAM-WK	Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde
IFG	Institut für Funktionelle Grenzflächen
IFKM	Institut für Kolbenmaschinen
IFL	Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
IIP	Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
IKFT	Institut für Katalysatorforschung und -technologie
IMVT	Institut für Mikroverfahrenstechnik
IPC	Institut für Physikalische Chemie
IPEK	Institut für Produktentwicklung
IPS	Institute for Photon Science and Synchrotron Radiation
ISTM	Institut für Strömungsmechanik
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
ITC	Institut für Technische Chemie
ITCP	Institut für Technische Chemie und Polymerchemie
ITEP	Institut für Technische Physik
ITES	Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit
ITT	Institut für Technische Thermodynamik
TEBI	Technische Biologie
TFT	Institute for Thin Film Technology
TVT	Institut für Thermische Verfahrenstechnik
WBK	Institut für Produktionstechnik



© Modus Media

Qr-Code

#### **Kontakt**

KIT-Zentrum Energie

Telefon: +49 721 608-25541

E-Mail: [office@energy.kit.edu](mailto:office@energy.kit.edu)

[www.energie.kit.edu](http://www.energie.kit.edu)

Ansprechperson für Wirtschaftskontakte:

Dr. Aude Péliссon-Schecker

Innovationsmanagerin Energie

Telefon: +49 721 608-25335

E-Mail: [pelisson-schecker@kit.edu](mailto:pelisson-schecker@kit.edu)

#### **Herausgegeben von**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr. Oliver Kraft

In Vertretung des Präsidenten des KIT

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)

Karlsruhe © KIT 2023