



// Wasserstoff: Zu Ende gedacht!
Hydrogen: The time is right!

H2

// Wasserstoff: Zu Ende gedacht!

// Hydrogen: The time is right!

KLIMANEUTRALES EUROPA BIS 2050

A CLIMATE-NEUTRAL EUROPE BY 2050

Auf dem Weltwirtschaftsforum im Januar 2020 in Davos war der aktuelle „Global Risk Report 2020“ Grundlage der Diskussionen. Erstmals wurden die Klimakrise (Climate Action Failure) und ihre Folgen für die Weltwirtschaft für die nächsten zehn Jahre auf höchste Priorität gesetzt. Seitens der Europäischen Union wurde dies als Chance genutzt, den Europäischen Green Deal vorzustellen und zu skizzieren, wie Europa als erster Kontinent bis spätestens 2050 klimaneutral werden soll. Eine Hauptrolle spielt hierbei erstmals Wasserstoff (H₂).

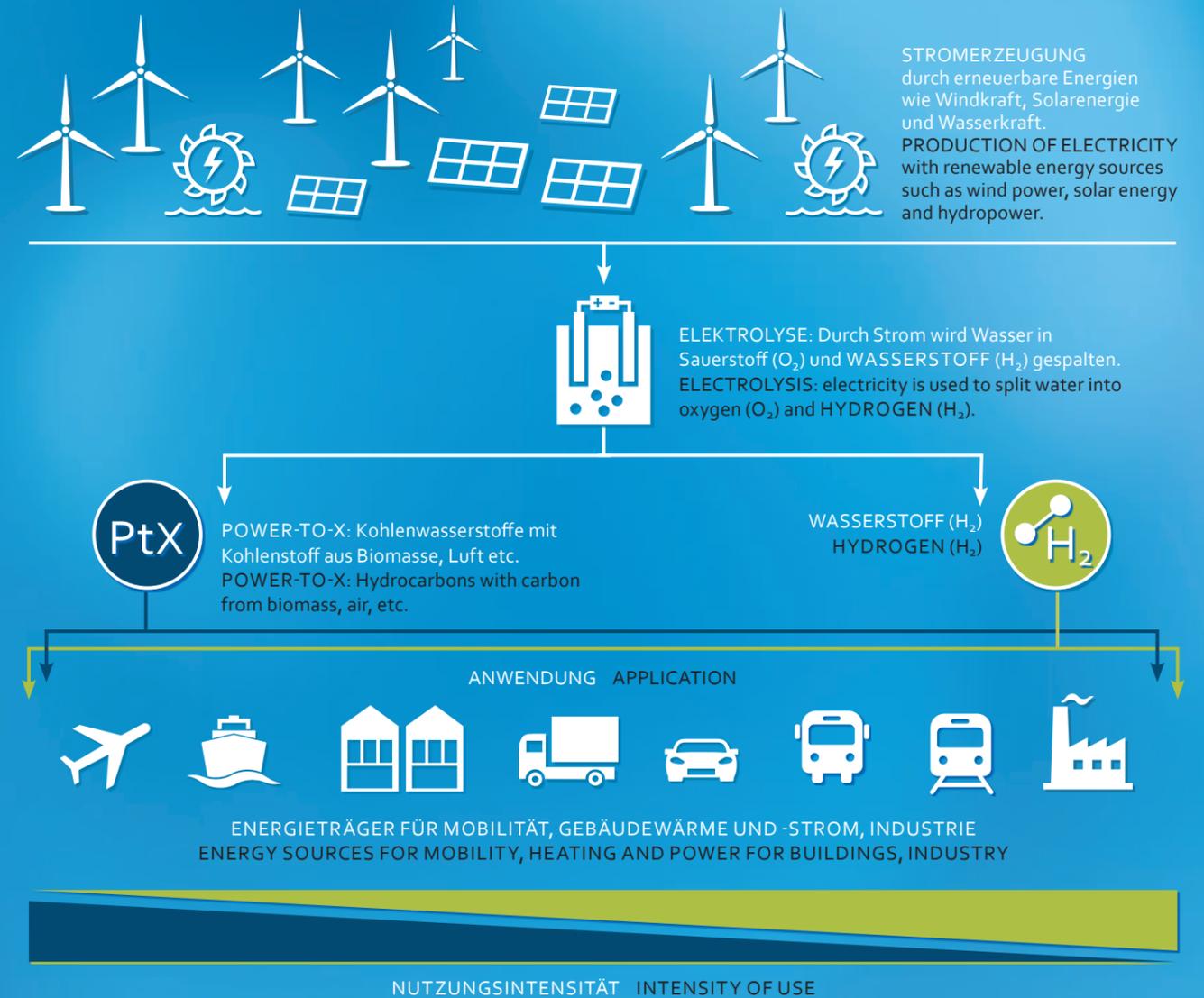
KONSEQUENZEN FÜR DIE INDUSTRIE

Im Fokus des Green Deals steht u. a. die Industrie. In diesem Sektor sollen tiefgreifende Transformationen erfolgen, vor allem in der energieintensiven Industrie. Eine Schlüsselrolle für deren Defossilisierung soll „grüner“ Wasserstoff spielen: H₂ soll die Chemieindustrie von fossilen Rohstoffen, insbesondere von Erdgas als Wasserstofflieferant, unabhängig machen und so u. a. der Düngemittelproduktion und der Petrochemie zur Klimaneutralität verhelfen. Der Stahlindustrie soll H₂ langfristig durch die Umstellung der Produktionsverfahren eine Treibhausgasreduzierung von 95% ermöglichen. Auch den Raffinerien kann H₂ bei der Transformation zur Klimaneutralität helfen: Im ersten Schritt können über den Ersatz von heute grauem, d. h. fossilem H₂ durch grünes H₂, die CO₂-Emissionen aus den Prozessen deutlich verringert werden. Im zweiten Schritt kann grünes H₂ als Basis für synthetisches Rohöl (sog. „Green Crude“) dienen.

The current “Global Risk Report 2020” provided the framework for discussions at the World Economic Forum in Davos in January 2020 where, for the first time, the climate crisis (Climate Action Failure) and its consequences for the global economy were set as a top priority of the next decade. The European Union took this as an opportunity to present the European Green Deal and to outline how Europe must be the first continent to become climate-neutral by 2050 at the latest. For the first time, hydrogen (H₂) is to become a key element of this process.

CONSEQUENCES FOR THE INDUSTRY

The Green Deal focusses on industry, among other things. In this sector, profound transformations are to take place, especially in energy-intensive industries. “Green” hydrogen is expected to play a key role in their defossilisation: H₂ can enable the chemical industry to become independent from fossil raw materials, especially from natural gas as a source of hydrogen, and thus help the fertiliser and petrochemical industries, among others, to achieve climate neutrality. In the long term, H₂ should allow the steel industry to achieve a 95% reduction in greenhouse gas emissions by adapting their production processes. H₂ can also help refineries to achieve climate neutrality: in a first step, the amount of CO₂ emitted from their processes can be significantly reduced by replacing today’s grey, i.e. fossil H₂ with green H₂. In the second step, green H₂ can serve as the basis for synthetic crude oil (so-called green crude).



In allen angesprochenen Branchen zeichnen sich erste Aktivitäten zur Erprobung des Einsatzes von grünem Wasserstoff ab. So existieren deutschlandweit mehrere Pilotprojekte zur Stahlproduktion mit Wasserstoff und auch Raffinerien planen die ersten Schritte zum Einsatz von grünem Wasserstoff in ihren Produktionsprozessen (z. B. Hydrocracking, Hydrotreating).

AUSWIRKUNGEN AUF DEN MOBILITÄTSSEKTOR

Eine große Nachfrage nach grünem Wasserstoff – entweder direkt oder in Form synthetischer Kraftstoffe – entwickelt sich derzeit auch im Mobilitätssektor, denn nachhaltige Mobilität ist ein weiteres Schwerpunktthema des Europäischen Green Deals. In Kombination mit Brennstoffzellenantrieben soll Wasserstoff die Elektrifizierung des Verkehrs unterstützen, er ist aber vor allem entscheidend für diejenigen Bereiche der Mobilität, für die es aus heutiger Sicht auch langfristig keine Alternativen zu flüssigen, kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffen geben wird: für den Flugverkehr, die internationale Seeschifffahrt und Teile des Straßengüterverkehrs. Hier stellt grüner Wasserstoff als Basis für synthetisches Kerosin (E-Kerosin) und synthetischen Diesel (E-Diesel) die Zukunftsoption dar. Auch in diesem Kontext bilden sich aktuell Allianzen: Das zeigt eine Initiative der internationalen Reedereien für die Entwicklung strombasierter Kraftstoffe ebenso wie einige Pilotprojekte von Raffinerien in Kooperation mit Flughäfen mit dem Ziel der raschen Beimischung alternativer Kraftstoffe zur Senkung des CO₂-Ausstoßes im Flugverkehr.

Initial activities to test the application of green hydrogen are emerging in all aforementioned industries. Several pilot projects involving steel production with hydrogen are underway throughout Germany, and refineries are planning their first steps towards using green hydrogen in their production processes (e.g. hydrocracking and hydrotreating).

EFFECTS ON THE MOBILITY SECTOR

A considerable demand for green hydrogen – either directly or in the form of synthetic fuels – is currently also emerging in the mobility sector, as sustainable mobility is another key topic of the European Green Deal. In conjunction with fuel cell drives, the aim is for hydrogen to support the electrification of transport. On top of that, it is particularly important in those areas of mobility without any known long-term alternatives to liquid, hydrocarbon-based fuels: air traffic, international shipping and certain road transport sectors. The option for the future in these cases is to employ green hydrogen as the basis for synthetic kerosene (e-kerosene) and synthetic diesel (e-diesel) production. New alliances are currently emerging: for example international shipping companies started an initiative for the development of electricity-based fuels, and refineries carried out several pilot projects in cooperation with airports with the aim of rapidly blending alternative fuels to reduce CO₂ emissions in air traffic.



© Daimler AG

WASSERSTOFF WIRD WELTWEITES HANDELSGUT

Weltweit werden schon heute etwa 500 Mrd. m³ Wasserstoff (H₂) erzeugt, was energetisch betrachtet ca. 1,5 % des Weltenergiebedarfs entspricht. Damit ist H₂ ein wichtiger Rohstoff für die Industrie, allerdings wird er heute kaum im Energiesektor eingesetzt. Der überwiegende Teil des Bedarfs wird zudem vor Ort aus Erdgas erzeugt, sodass H₂ heute nahezu kein Handelsgut darstellt. Die EU strebt durch den Green Deal und die Wasserstoffstrategie eine Versiebenfachung der Wasserstoffnutzung in Europa bis 2050 gegenüber 2015 an, wobei die größten Zuwächse im Verkehr und in der Industrie, aber auch zur Wärme- und Kältebereitstellung für Gebäude sowie zur Stromversorgung (u. a. als Pufferspeicher) gesehen werden. Das soll helfen, 560 Mio. t CO₂ pro Jahr zu vermeiden, jährliche Umsätze von 820 Mrd. Euro zu generieren und 5,4 Mio. Arbeitsplätze zu schaffen (zum Vergleich: EU insgesamt 2017: 3,517 Mio. t CO₂). Mit der Einschätzung, welche Möglichkeiten sich mit Wasserstoff für eine klimaneutrale Zukunft bieten, steht Europa nicht allein: Es liegen Wasserstoffstrategien aus Japan, China, Korea, den USA und Australien vor, um nur einige zu nennen. In Abstimmung (Stand 4/2020) befindet sich auch die Strategie der Bundesregierung, die Maßnahmen für die Bereiche Erzeugung, Industrie, Infrastruktur, Verkehr, Wärme und Forschung umfasst.

Grünem Wasserstoff kommt eine Schlüsselrolle in einer klimaneutralen Wirtschaft zu: Er bzw. die daraus gewonnenen synthetischen Energieträger können ähnlich wie heute Rohöl und Erdgas weltweit gehandelt werden, wobei bestehende Handelsbeziehungen erhalten bleiben und neue Handelsströme und Handelspartner hinzu kommen können. Die globale Energiewirtschaft kann somit ohne Strukturbrüche durch Transformationsprozesse aus der bestehenden Wirtschaft heraus entwickelt werden. Der Druck, schnell Lösungen umzusetzen, die kurzfristig die Treibhausgasemissionen erheblich mindern, ist hoch und wächst stetig. Daher sollten bestehende Infrastrukturen so weit wie möglich umgewidmet und weitergenutzt werden, nicht zuletzt, um dadurch „stranded investments“ zu vermeiden.

HYDROGEN BECOMES A GLOBAL COMMODITY

About 500 billion m³ of hydrogen (H₂) is already being produced worldwide, equivalent to approx. 1.5% of the world's energy demand. H₂ is therefore an important industrial raw material, although it is hardly used in the energy sector. Moreover the greater part of the demand is met locally with natural gas, so that H₂ is not really considered to be a commodity today. With its Green Deal and hydrogen strategy, the EU aims to increase the use of hydrogen in Europe by a factor of seven by 2050 compared to 2015, with the greatest growth anticipated in transport and industry and in the provision of heating, cooling and electricity supply for buildings (including buffer storage tanks). This should help to save 560 million tonnes of CO₂ per year, generate annual sales of 820 billion euros and create 5.4 million jobs (cf: EU total 2017: 3,517 million tonnes of CO₂). Europe is not on its own when it comes to evaluating the opportunities that hydrogen offers for a climate-neutral future: Japan, China, Korea, the USA and Australia, to name but a few, all have hydrogen strategies. The German Federal Government's strategy, which includes measures for production, industry, infrastructure, transport, heat and research, is also currently in the approval process (as of 04/2020).

Green hydrogen has a key role to play in a climate-neutral economy: it, or the synthetic energy sources derived from it, can be traded worldwide in a similar way as crude oil and natural gas today, while maintaining existing trade relations and developing new trade flows and trading partners. The global energy industry could develop within the existing economy without any structural discontinuities caused by transformation processes. There is high and steadily rising pressure to quickly implement solutions that significantly reduce greenhouse gas emissions in the short term. For this reason, existing infrastructures ought to be repurposed and retained as far as possible, not least in order to avoid stranded investments.

// Focus



© Alstom/René Frampe

// CO₂-freier Zug „Coradia iLint“ mit wasserstoffbetriebener Brennstoffzelle.
// CO₂-free train "Coradia iLint" with hydrogen-powered fuel cell.

Was genau in welchem Umfang gehandelt und transportiert werden wird, ist bislang offen. Es könnte Wasserstoff sein, aber auch „Green Crude“ (ein aus erneuerbaren Energien stammendes Kohlenwasserstoffgemisch ähnlich dem heutigen Rohöl „Crude Oil“). Auch der Transport von Fertigprodukten wie E-Kerosin oder E-Diesel ist denkbar. Die neuen Handelsstrukturen sind anhand der Bedürfnisse der Handelspartner auszurichten, um auch Technologien aus der „alten“ fossilbasierten Welt einen Übergang in eine „neue“, auf erneuerbaren Energien basierende Welt zu ermöglichen (z. B. Raffinerien mit „Green Crude“). Deutschland wird aller Voraussicht nach auch zukünftig Importland für Energie bleiben und sollte den Ausbau der erneuerbaren Energien weiterhin vorantreiben. Zudem kann vom Transformationsprozess über den Export von innovativen Technologien wie Elektrolyseuren, Synthesereaktoren, Brennstoffzellen u. v. m. erheblich profitiert werden. Dies der deutschen und speziell der baden-württembergischen Industrie zu ermöglichen, ist Ziel des ZSW – als Ideen- und Impulsgeber ebenso wie als Technologieentwicklungspartner.

Which commodities exactly will be traded and transported, and to what extent, has not yet been decided. It could be hydrogen, or it could be green crude (a blend of hydrocarbons from renewable energy sources similar to today's crude oil). Even finished products might be transported, such as e-kerosene or e-diesel. The new trade structures must be aligned with the needs of trading partners in order to allow technologies from the "old" fossil-based world to make the transition into a "new" world based on renewable energy sources (e.g. refineries with green crude). In all likelihood, Germany will still be an energy importing country in the future and should continue to advance the expansion of renewable energy sources. The transformation process can also yield considerable benefits through the export of innovative technologies such as electrolyzers, synthesis reactors and fuel cells. A source of ideas and impulses and a partner in technology development, ZSW aims to enable this transformation for the German industry and that of Baden-Württemberg in particular.

GRÜNER WASSERSTOFF – VON DER ERZEUGUNG BIS ZUR NUTZUNG

GREEN HYDROGEN – FROM PRODUCTION TO UTILISATION

Für eine neutrale CO₂-Bilanz von Wasserstoffanwendungen ist eine nachhaltige Wasserstoffproduktion entscheidend. Daher ist es besonders wichtig, die Herkunft des Wasserstoffs klar zu benennen. Wasserstoff wird bislang vor allem als grau, blau und grün bezeichnet. 90 % des Wasserstoffs heute wird aus fossilen Energieträgern, meistens aus Erdgas, hergestellt und verkauft. Hierbei handelt es sich um grauen oder auch blauen Wasserstoff, da bei seiner Produktion CO₂-Emissionen entstehen. Von blauem Wasserstoff spricht man, wenn die CO₂-Emissionen im Produktionsprozess abgeschieden und in unterirdischen Lagerstätten eingelagert werden.

Eine umfassend und nachhaltig klimaschützende Eigenschaft hat aber nur „grüner“ Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Quellen durch Elektrolyse gewonnen wird. Neben der Forschung und Entwicklung zu erneuerbaren Energien und Batteriespeichern am ZSW bilden die Themen Elektrolyse, Power-to-X und Brennstoffzellen den dritten technologischen Schwerpunkt. Die Arbeiten in diesem Bereich werden im Folgenden anhand beispielhafter Projekte veranschaulicht.

Sustainable hydrogen production is essential when it comes to achieving CO₂-neutral hydrogen applications. So it is of particular importance to clearly identify the hydrogen's origin. To date, hydrogen has mainly been labelled grey, blue and green. 90% of hydrogen sold today is produced using fossil energy sources, mostly natural gas. This is called grey or sometimes blue hydrogen because its production leads to CO₂ emissions. One refers to hydrogen as blue hydrogen when the CO₂ emissions are captured during the production process and then stored in underground reservoirs.

Only "green" hydrogen, however, which is produced with electricity from renewable energy sources by way of electrolysis, offers comprehensive and sustainable climate protection. Alongside research and development on renewable energy and battery storage, ZSW bundles the topics of electrolysis, Power-to-X and fuel cells as a third major area of technological focus. In the following, activities in this area will be presented by means of example projects.

ELEKTROLYTISCHE WASSERSTOFFERZEUGUNG AUS WASSER: DER ERSTE SCHRITT FÜR ALLE POWER-TO-X-VERFAHREN

Die Wasserelektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff wird im Rahmen der Energiewende bzw. zur Erreichung der Klimaziele als Bindeglied zwischen erneuerbarem Strom, anderen Energieträgern und Grundstoffen benötigt. Alleine für Deutschland wird bis zum Jahr 2050 ein erheblicher Ausbau an installierter Elektrolysekapazität im zweistelligen Gigawattbereich erwartet. Bei der Wasserelektrolyse wird über zwei Elektroden, Kathode und Anode, Wasser mittels elektrischer Energie in seine zwei gasförmigen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Die beiden Gase werden separat aufgefangen und gereinigt. Aus dieser elektrochemischen Wasserspaltung wird nur der Wasserstoff gespeichert und ggf. transportiert, da bei der Energierückgewinnung an einem beliebigen Ort der Wasserstoff mit Luft-Sauerstoff wieder zu Wasser rekombiniert werden kann. Wasserstoff (H₂) ist gasförmig und beliebig lange speicherbar. Da H₂ sowohl als chemischer Rohstoff in vielen Prozessen weltweit genutzt wird wie auch als Energiezwischenpeicher oder Energieträger, besteht eine jahrzehntelange Erfahrung im sicheren Umgang und der Nutzung von H₂.

Die drei grundlegenden Elektrolyseprinzipien sind die alkalische Elektrolyse (AEL), die wässrige Kalilauge als stromleitendes Medium nutzt, die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM), die eine ionisch leitende Membranfolie zwischen den Elektroden-schichten nutzt, sowie die Hochtemperaturelektrolyse (SOE), die eine bei hoher Temperatur leitfähige Keramikfolie zwischen den Elektroden nutzt.

ELECTROLYTIC HYDROGEN PRODUCTION FROM WATER: THE FIRST STEP OF ALL POWER-TO-X PROCESSES

As it links renewable electricity with other energy sources and raw materials, water electrolysis for the production of hydrogen is essential in the context of the energy transition and achieving climate goals. By 2050, a considerable expansion in installed electrolysis capacity in the double-digit gigawatt range is expected for Germany alone. In water electrolysis, water is split into its two constituent elements, hydrogen and oxygen, by passing electricity through two electrodes, the cathode and the anode. The two gases produced are collected and cleaned separately. Only the hydrogen produced in this electrochemical water splitting process is stored and, if necessary, transported, since hydrogen can be recombined with oxygen from the air to form water at any desired location during energy recovery. Hydrogen is gaseous and can be stored for any desired length of time. Given that H₂ is used both as a chemical raw material in many processes worldwide and as an energy buffer and energy source, a wealth of experience in the safe handling and use of H₂ has been accumulating for decades.

The three fundamental electrolysis principles are alkaline electrolysis (AEL), which uses an aqueous potassium hydroxide solution as an electrically conductive medium, polymer electrolyte membrane electrolysis (PEM), which uses an ionically conductive membrane foil between the electrode layers, and high-temperature electrolysis (SOE), which uses a ceramic film that is conductive at high temperatures between the electrodes.

ELEKTRODEN-, ELEKTROLYSEBLOCK- UND ANLAGENENTWICKLUNG

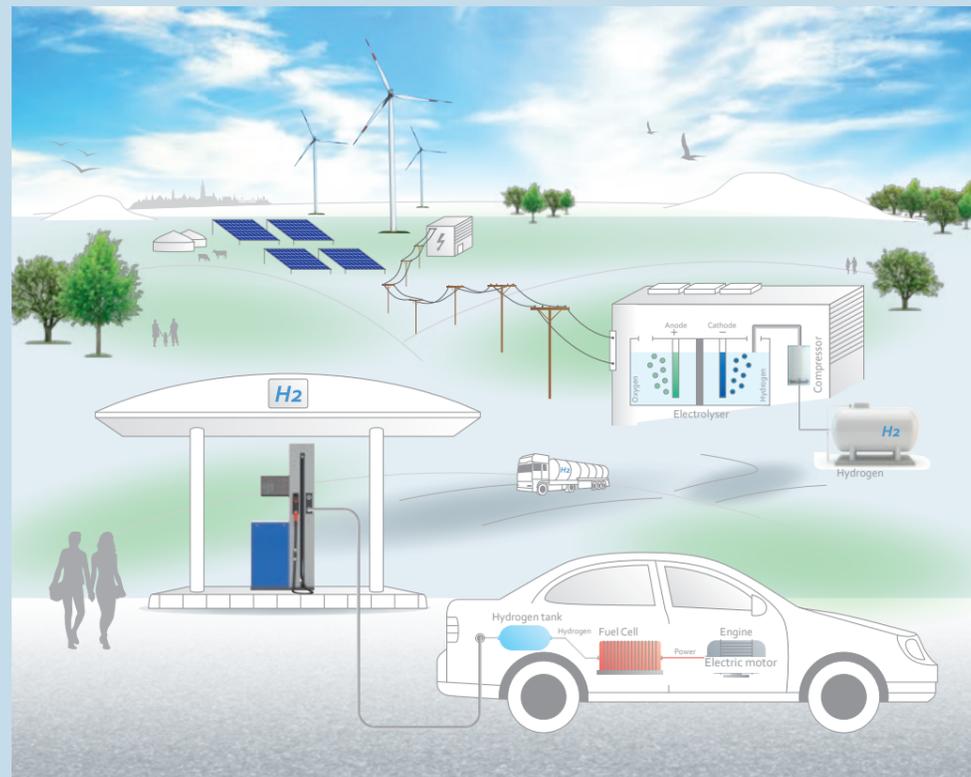
Das ZSW erforscht und entwickelt intensiv die Technologie der alkalischen Elektrolyse (AEL): von der Elektroden-, Elektrolyseblock- und Anlagenentwicklung bis zum Bau und Betrieb von Forschungs- und Demonstrationsanlagen. Die AEL wird bereits seit Jahrzehnten in Nischenanwendungen kommerziell eingesetzt. Im Rahmen mehrerer Pilotprojekte wurde in den vergangenen Jahren die Eignung für Power-to-X-Anwendungen erfolgreich nachgewiesen. Die Kosten der AEL liegen bei einer elektrischen Leistung von wenigen Megawatt bei etwa 1.000-1.500 Euro pro Kilowatt. Für einen wirtschaftlichen Betrieb in Power-to-X-Anwendungen müssen die Kosten jedoch auf wenige hundert Euro pro kW sinken. Der AEL wird neben einer guten Skalierbarkeit in große Leistungsklassen auch ein hohes Kostensenkungspotenzial attestiert. Das ZSW arbeitet insbesondere an Materialien, Methoden (z. B. Elektrodenbeschichtungen) oder verfahrenstechnischen Konzepten (z. B. Konstruktion des Elektrolyseblocks), die diese Skalierung in den Multi-MW-Maßstab unterstützen und eine Serienfertigung zulassen. Der Leistungsbereich beginnt bei wenigen Kilowatt für Forschungs- und Testsysteme zur Vorvalidierung von Materialien und Bauteilen und reicht bis in den unteren Megawatt-Maßstab für Demonstrationsanlagen. Je nach Anwendungszweck oder Kostenvorgaben werden sowohl drucklose Systeme als auch Druckelektrolyseure entwickelt und gebaut.

Die Wissenschaftler und Ingenieure konzipieren darüber hinaus Wasserstoffherzeugungsanlagen inklusive aller Nebenaggregate – vom elektrischen Anschluss bis zur Abgabe von Wasserstoff an

ELECTRODE, ELECTROLYSIS BLOCK AND SYSTEM DEVELOPMENT

Research and development of alkaline electrolysis (AEL) at ZSW is extensive: it ranges from the development of electrodes, electrolysis blocks and plants to the construction and operation of research and demonstration plants. AEL has been used in niche commercial applications for several decades. Its for Power-to-X applications has been successfully demonstrated in several pilot projects in recent years. The costs of AEL are around 1,000 - 1,500 €/kW for an electrical output of a few MW. For cost-effective operation in Power-to-X applications, the costs must be reduced to a few hundred euros per kW. In addition to good scalability to high performance ranges, AEL is expected to have high potential for cost reduction. ZSW is working on materials, methods (e.g. electrode coatings) and process engineering concepts (e.g. construction of the electrolysis block) that support this multi-MW scaling and allow for series production suitability. The power range starts at a few kilowatts for research and test systems, used to pre-validate materials and components, and extends to the lower megawatt scale for demonstration systems. Depending on application and cost specifications, both unpressurised systems and pressurised electrolyzers are being developed and built.

The scientists and engineers also design hydrogen production systems including all ancillary units – from the electrical connection to the delivery of hydrogen to users – on the basis of AEL and



// H₂ von der Erzeugung per Elektrolyse in den Tank.
// H₂ from production by electrolysis to storage in a tank.



// Betriebsfertiger 20-zelliger Elektrolyse-Versuchsblock mit ca. 105 kW.
// 20-cell electrolysis test block with approx. 105 kW ready for operation.

Nutzer – auf der Basis von AEL- und PEM-Elektrolyseuren sowie Aufstellungs-, Sicherheits- und Betriebskonzepte und unterstützen auf diese Weise ihre Partner bei der Realisierung ihrer eigenen Projekte.

Neben der Entwicklung und dem Bau von Komponenten und Anlagen spielt die Qualitätssicherung eine große Rolle. Mit hausinternen AEL-Testanlagen kann das ZSW auch Fremdentwicklungen von Elektroden, elektrochemischen Beschichtungen, Elektrolyseblöcken und anderen Systemkomponenten testen und vermessen. Dazu sind alkalische drucklose und Druck-Elektrolysetestsysteme im Leistungsbereich 1, 10 und 100 kW_{el} sowohl im atmosphärischen als auch im Druckbetrieb bis 4,0 bar vorhanden. Zusätzlich werden zugekaufte und selbst gebaute Demonstrationsanlagen mit 0,3 bzw. 0,5 MW_{el} betrieben.

POWER-TO-GAS MADE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

In einem vom Wirtschaftsministerium geförderten Leuchtturmprojekt „Power-to-Gas Baden-Württemberg“ untersuchen Wissenschaftler, wie Wasserstoff effizient und kostengünstig produziert werden kann. Dadurch sollen technologische Potenziale identifiziert sowie innovative Komponenten und Verfahren praxisnah erprobt werden. Am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein wurde hierfür ein kommerzieller 1-MW-Elektrolyseur errichtet. Ein eigen etabliertes Monitoringsystem vermisst diesen industriellen Anlagenteil. Darauf aufbauend erstellen die ZSW-Forscher einen Technologieleitfaden, der Verbesserungspotenziale aufzeigt. In der am Standort angeschlossenen Forschungsplattform testet das ZSW parallel in der Reallaborumgebung einen eigenen Elektrolyseur mit neuen Komponenten. Zum Einsatz kommen etwa günstigere und leistungsfähigere Elektroden von Forschungspartnern. Erste Testergebnisse bestätigen eine 20% höhere Leistungsdichte verglichen mit dem kommerziellen Anlagenteil.

PEM electrolyzers and develop concepts for installation, safety and operation, thus supporting their partners in the implementation of their own projects.

Quality assurance plays a major role alongside the development and construction of components and plants. ZSW can also test and measure third-party developments of electrodes, electrochemical coatings, electrolysis blocks and other system components with in-house AEL test facilities. For this purpose, ZSW uses pressureless alkaline and pressurised electrolysis test systems in the power ranges of 1, 10 and 100 kW_{el}, both for atmospheric and for pressurised operation at up to 4,0 bar. In addition, purchased and self-built demonstration plants with 0.3 and 0.5 MW_{el} are used.

POWER-TO-GAS MADE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Scientists are investigating how hydrogen can be produced efficiently and cost-effectively in a flagship project called Power-to-Gas Baden-Württemberg, funded by the State Ministry of Baden-Württemberg for Economic Affairs, Labour and Housing Construction. The aim is to identify technological potential and to test innovative components and processes under realistic conditions. For this purpose, a commercial 1-MW electrolyser was installed at the Wyhlen hydroelectric power plant on the Upper Rhine. A specially developed monitoring system is used to survey this industrial part of the plant. Based on the results, ZSW researchers are compiling a technology guideline that lists opportunities for further improvement. With the research platform connected to the site, ZSW is able to test its own electrolyser with new components in parallel in a real-world laboratory environment. More cost-effective and higher-power electrodes from research partners are used here. First test results confirm a 20% higher power density when compared to the commercial part of the plant.

Nicht nur die Elektrolyse, sondern auch die damit verbundenen Komponenten und Subsysteme werden hinsichtlich Kosten- und Effizienzpotenzialen mit dem Ziel analysiert, erfolgversprechende Ideen in P2G®-Produkte umzusetzen. Diese Arbeiten sollen dazu beitragen, dass die Erzeugung grüner Kraftstoffe mittels P2G®-Technologie zukünftig im In- und Ausland gewinnbringend verwertet werden kann, und gleichzeitig einen Beitrag für eine CO₂-neutrale Mobilität leisten. So wird der in Wyhlen erzeugte Wasserstoff vor Ort in Trailer gefüllt und kann beispielsweise Tankstellen mit regenerativem Wasserstoff versorgen. Der Standort bietet zudem die Möglichkeit, die Abwärme aus der Elektrolyse und den Nebenaggregaten künftig in einem nahegelegenen Wohngebiet zu nutzen; so lässt sich der Gesamtstromnutzungsgrad der Elektrolyseanlage auf über 90% steigern.

WYHLEN GEWINNT BEIM IDEENWETTBEWERB „REALLABORE DER ENERGIEWENDE“

Der Power-to-Gas-Standort in Wyhlen ist einer der Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“ des Bundeswirtschaftsministeriums. Bei einer Bewilligung des Vorhabens ist geplant, in einem Verbund mit Partnern aus Industrie und Forschung die Stadt Grenzach-Wyhlen zu einem Reallabor für Wasserstoff auszubauen. Das beinhaltet, dass die Anlage aus dem Leuchtturmprojekt (s. S. 22) leistungsseitig erweitert wird und der regenerative Wasserstoff in den Sektoren Industrie und Mobilität sowie die Abwärme der Prozesse zur Hausenergieversorgung wirtschaftlich genutzt werden. Das ZSW will in dem Projekt neben dem Technologiemonitoring und einer systemanalytischen Begleitforschung insbesondere an der Industrialisierung der alkalischen Elektrolyse weiterarbeiten. Das beinhaltet die Untersuchung von Materialien und Methoden, die eine Serienfertigung und Skalierung der Technologie erlauben, sowie die Erprobung von Funktionsmustern und Prototypen in der bestehenden Forschungsplattform in Reallaborumgebung.

With the aim of converting promising ideas into P2G® products, not only electrolysis itself but also the associated components and subsystems are being analysed in terms of their cost and efficiency potentials. This work is intended to help ensure that the production of green fuels using P2G® technology can be profitably harnessed in Germany and elsewhere in the future – and at the same time make a contribution to CO₂-neutral mobility. For example, hydrogen produced in Wyhlen is filled into trailers on-site to supply filling stations with regenerative hydrogen. The location also offers the future option of using waste heat produced from electrolysis and auxiliary equipment in a neighbouring residential area; this would allow the overall degree of power utilisation of the electrolyser to rise further, in excess of 90%.

WYHLEN WINS THE IDEA COMPETITION “REAL-WORLD LABORATORIES OF THE ENERGY TRANSITION”

The Power-to-Gas site in Wyhlen is one of the winners of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy’s idea competition “Real-world laboratories of the energy transition”. If the project is approved, the town of Grenzach-Wyhlen will be developed into a real-world hydrogen laboratory in a network with partners from industry and research. This entails extending the power output of the plant from the flagship project (see p. 22) and utilising regenerative hydrogen cost-effectively in the industry and mobility sectors, as well as waste heat for domestic energy supply. ZSW intends to continue working on the industrialisation of alkaline electrolysis during the project, in addition to technology monitoring and accompanying systems analytical research. This includes researching materials and methods that would allow for volume production and scaling and testing functional models and prototypes in the existing research platform in the real-world laboratory environment.



// ZSW-Forschungsplattform mit eigenem Elektrolyseur und neuartigen Komponenten am Wasserkraftwerk Wyhlen.
// ZSW research platform with its own electrolyser and novel components at the Wyhlen hydroelectric power plant.



// Erzeugung von grünem H₂ am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein – kommerzieller 1-MW-Elektrolyseur mit angebundener ZSW-Forschungsplattform.
// Generation of green H₂ at Wyhlen hydroelectric power plant on the Upper Rhine – commercial 1-MW electrolyser with connected ZSW research platform.

MOBILITÄT MIT GRÜNEM (KOHLEN-)WASSERSTOFF

MOBILITY WITH GREEN HYDROCARBON

MOBILITÄT MIT WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLE

Mit grünem Wasserstoff (H₂) betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs) sind eine der umwelt- und klimafreundlichsten Lösungen im Verkehr, vor allem auf langen Strecken. Die Brennstoffzelle hat heute schon einen etwa doppelt so hohen Wirkungsgrad wie ein Verbrennungsmotor; er liegt je nach Betrieb bei bis zu 65%. Die Technologie ist reif für den Markt und erste zehntausend Brennstoffzellenfahrzeuge werden weltweit erprobt. FCEVs werden über einen Elektromotor angetrieben, die Technik unterscheidet sich aber deutlich vom Batteriefahrzeug (Battery Electric Vehicles, BEVs), denn der Strom wird direkt an Bord aus H₂ und Luft erzeugt. Die als Nebenprodukt erzeugte Wärme kann zur Beheizung des Innenraums genutzt werden. Eine Batterie unterstützt das Brennstoffzellensystem während der Beschleunigung und beim regenerativen Bremsen. Der Vorteil von FCEVs gegenüber BEVs liegt vor allem in der schnellen Betankung und großen Reichweite (ca. 3 Minuten für 500 km) sowie dem geringeren Gewicht. Sie eignen sich neben dem Antrieb von Reiselimousinen insbesondere für Busse, den Schwerlastverkehr sowie für Züge und Schiffe. Langfristig können mit grünem Wasserstoff betriebene FCEVs wichtige Einsatzbereiche der Dieselmotoren übernehmen.

Bis Januar 2020 stieg die Zahl wasserstoffbetriebener Brennstoffzellenfahrzeuge weltweit von 11.200 Ende 2018 auf rund 19.000 Einheiten. Kommerzielle, serienreife Modelle (Pkw und Lkw), bieten in Deutschland derzeit zwei asiatische Hersteller an: Toyota seit 2014 und Hyundai seit 2013. Mercedes Benz fährt seit 2018 den GLC F-CELL als Versuchsflotte. Weitere Hersteller haben erste Flotten für Mitte der 2020er Jahre angekündigt: IVECO will den Elektro- und Brennstoffzellen-Lkw Nikola TRE ab 2021 im Ulmer Werk produzieren und bis 2023 erste Modelle ausliefern. In der Schweiz sollen 1.600 Schwerlast-Lkws von Hyundai Hydrogen Mobility (HHM) bis 2025 unterwegs sein. Darüber hinaus sind an mehreren Orten Busse sowie erste Nahverkehrszüge im Linienverkehr mit Wasserstoff unterwegs. Nach den internationalen

MOBILITY WITH HYDROGEN AND FUEL CELLS

Fuel cell electric vehicles (FCEVs) powered by green hydrogen (H₂) are one of the most environmentally and climate-friendly solutions for transport, especially over long distances. A fuel cell already has about twice the efficiency of a combustion engine. Depending on the mode of operation, efficiency is up to 65%. The technology is ready for the market, and the first ten thousand fuel cell vehicles are being tested worldwide. While FCEVs are powered by an electric motor, their technology differs significantly from battery electric vehicles (BEVs) because the electricity is generated directly on board using H₂ and air. The heat generated as a by-product can be used to heat the interior. A battery supports the fuel cell system during acceleration and regenerative braking. The main advantages of FCEVs over BEVs are fast refuelling and their long range (approx. 3 minutes for 500 km) as well as their lower weight. In addition to powering long-distance limousines, they are particularly suitable for buses, heavy-load vehicle transport, trains and ships. In the long term, FCEVs powered by green hydrogen could be used to replace diesel engines in their typical areas of application.

The number of hydrogen-powered fuel cell vehicles worldwide has increased from 11,200 at the end of 2018 to around 19,000 units in January 2020. Commercial, series-ready models, cars and lorries are currently available in Germany through two Asian manufacturers (Toyota, since 2014, and Hyundai, since 2013). Mercedes Benz has been using the GLC F-CELL as a test fleet since 2018. Other manufacturers have announced first fleets for the mid-2020s: IVECO is planning to produce the Nikola TRE battery- and fuel cell powered lorry at its Ulm plant starting in 2021 and intends to have the first models available by 2023. In Switzerland, 1,600 heavy-duty lorries from Hyundai Hydrogen Mobility (HHM) will be on the road by 2025. In addition, buses and the first scheduled hydrogen-powered local trains are already in operation in several locations. According to international roadmaps, more

Roadmaps sind für China bis zum Jahr 2030 über eine Million Brennstoffzellenfahrzeuge geplant und Korea stellt 700.000 Brennstoffzellenfahrzeuge für 2025 in Aussicht. In Japan sollen bis 2030 ca. 800.000 Brennstoffzellenautos unterwegs sein.

than one million fuel cell vehicles are planned for China by 2030, and Korea has announced 700,000 fuel cell vehicles for 2025. In Japan, about 800,000 fuel cell cars are planned to be on the road by 2030.

PRODUKTIONSFORSCHUNG ZU BRENNSTOFFZELLEN

Das Wertschöpfungspotenzial bei Brennstoffzellen ist groß. Um es zu erschließen, muss es aber gelingen, die Kosten zu senken und nennenswerte Stückzahlen anzubieten. Das Projekt „HyFaB – Forschungsfabrik für Brennstoffzellen“ dient deshalb dazu, von der aktuell handwerklichen Produktion zur industriellen Massenproduktion zu kommen. Hochleistungsbrennstoffzellenstacks (engl. stack = „Stapel“) sind komplexe Konstruktionen: hunderte von Einzelzellen, bestehend aus Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs) mit 10 Mikrometer dünnen Membranen, müssen mit Bipolarplatten mit knapp 1 Millimeter Bauhöhe und filigranen Gasverteilerstrukturen plus den Gasdiffusionslagen aus porösem Kohlefaserwolle aufeinander abgestimmt und zu einem Stapel zusammengefügt werden. Die notwendige automatisierte Fertigungstechnologie für die in Großserienautomobilen typischen Stückzahlen ist weltweit noch in einem frühen Stadium.

In HyFaB will das ZSW in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und weiteren Akteuren aus Industrie und Forschung automatisierte Prozesse zur Fertigung und Qualitätssicherung für Brennstoffzellen entwickeln und erproben. Exemplarische Themen am ZSW in Ulm sind die Assemblierung und Qualitätssicherung von MEAs sowie vollautomatische Füge- und Herstellprozesse für Zellen. Weitere Arbeiten erfolgen zu Fabrikabnahmetests und großserientauglichen Inbetriebnahmeverfahren für Brennstoffzellenstacks. Für HyFaB soll die Forschungsinfrastruktur am ZSW in Ulm deutlich ausgebaut werden.

PRODUCTION RESEARCH ON FUEL CELLS

The value-added potential of fuel cells is great. In order to exploit it, however, it is vital to lower costs and produce significant quantities. The project “HyFaB – Research Factory for Fuel Cells” therefore seeks to make the transition from current manual production to industrial mass production. High-performance fuel cell stacks are complex systems: hundreds of individual cells, consisting of membrane electrode units with 10-micrometre-thin membranes, have to be aligned with bipolar plates with an overall height of almost 1 millimetre and filigree gas distribution structures plus the gas diffusion layers consisting of porous carbon fibre fleece and then joined together to form a stack. The required automated production technology for the quantities typical in mass-produced automobiles is still at an early stage worldwide.

In HyFaB, ZSW will develop and test automated manufacturing and quality assurance processes for fuel cells in cooperation with the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE and stakeholders in industry and research. Typical activities at ZSW in Ulm include the assembly and quality assurance of membrane electrode assemblies (MEAs) as well as fully automated joining methods and manufacturing processes for cells. Further work is being carried out on factory acceptance tests and commissioning procedures for fuel cell stacks suitable for large-scale production. The research infrastructure at ZSW in Ulm will be significantly upgraded for HyFaB.



©FVV/Dirk Lässig



// Brennstoffzellenforschung: Bau eines Stacks im Fahrzeugdesign (links) sowie CAD-Brennstoffzellenstack im Forschungsdesign (oben).
// Fuel cell research: assembly of a stack in vehicle design (left) and a CAD fuel cell stack in research design (top).



// Das ZSW erforscht vollautomatische Füge- und Herstellprozesse für Brennstoffzellen.
// ZSW researches fully automated joining methods and manufacturing processes for fuel cells.

©FVV/Dirk Lässig

LEBENSDAUER VON BRENNSTOFFZELLEN

Mit der weltweit laufenden Markteinführung von Brennstoffzellen für mobile und stationäre Anwendungen steigt die Nachfrage nach unabhängigen Testeinrichtungen. Am ZSW zeigt sich dieser Trend beispielsweise anhand der Brennstoffzellen-Teststunden, die im Jahr 2019 mit 80.000 Stunden und einem H₂-Verbrauch von 21 Tonnen ein Rekordniveau erreicht haben. Die Anwendung im Straßenverkehr unter den im Fahrzyklus auftretenden hochdynamischen Belastungszuständen stellt hohe Anforderungen an die Robustheit der Brennstoffzellenstacks. Am ZSW werden hierzu entsprechende Dauerversuche gefahren. Das Prüffeld ist aktuell ausgestattet mit 25 vollautomatischen Testständen im Rund-um-die-Uhr-Betrieb, die kontinuierlich aktualisiert und ausgebaut werden. Mit einem in über 25 Jahren aufgebauten Know-how zu Brennstoffzellentests und -systemtechnik ist das ZSW Partner bei der Entwicklung zukünftiger Produkte. Durch den Betrieb unterschiedlicher Stacks werden technologische Trends nachweisbar, beispielsweise in Bezug auf die zunehmende Leistungsdichte und Robustheit der Brennstoffzellen. Industriepartner nutzen diese Expertise, um Produkte weiterzuentwickeln, zu qualifizieren sowie deren Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit durch das ZSW nachzuweisen. In öffentlich geförderten Projekten werden darüber hinaus wertvolle Daten und Erfahrungen generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

QUALITÄTSCHECK: WASSERSTOFF ALS KRAFTSTOFF

Parallel zur Markteinführung von Brennstoffzellen-Serienfahrzeugen erfolgt weltweit der Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur und -tankstellen, auch Hydrogen Refueling Stations (HRS) genannt. Bis 2025 sollen die Ende 2019 weltweit rund 260 HRS auf 3.500 H₂-Stationen gesteigert werden, 600 davon in den USA und 830 in Asien. Die Zahl in Europa soll von 118 auf 2.000 steigen. Deutschland plant – in Abhängigkeit vom bis dahin stattfindenden Fahrzeughochlauf –, die aktuell rund 80 Stationen bis 2023 auf 400 zu erweitern. Der Betankungsvorgang für Wasserstoff ist in

FUEL CELL SERVICE LIFE

With the currently ongoing global market entry of fuel cells for mobile and stationary applications, the demand for independent test facilities is on the rise. This trend is apparent at ZSW, for example in the fuel cell test times. A record level was reached in 2019 with 80,000 test hours and an H₂ consumption of 21 tonnes. Given the highly dynamic load conditions occurring during the driving cycles, road traffic applications place high demands on the robustness of the fuel cell stacks. For this reason, corresponding long-term tests are being carried out at ZSW. The test facility is currently fitted with 25 fully automatic test rigs in round-the-clock operation, which are continuously being updated and expanded. With more than 25 years of experience in fuel cell testing and system technology, ZSW is a partner in the development of future products. Technological trends can be identified by running different stacks, for example with regard to the increasing power density and robustness of fuel cells. Industrial partners make use of this expertise in order to further develop and qualify products and to have their operational safety and reliability proven by ZSW. In addition, publicly funded projects lead to valuable data and experience made available to the general public.

QUALITY CHECK: HYDROGEN AS A FUEL

Hydrogen infrastructure and filling stations, also known as Hydrogen Refueling Stations (HRS), are being built worldwide in parallel with the market launch of series-produced fuel cell powered vehicles. By 2025, the number of HRS is to increase to 3,500 H₂ stations from the 260 existing worldwide at the end of 2019. 600 of them will be in the United States and 830 in Asia. The number in Europe is expected to rise from 118 to 2,000. Depending on the vehicle ramp-up that occurs until then, Germany plans to expand the current 80 or so stations to 400 by 2023. The refuelling process for hydrogen is regulated in globally applicable standards and is thus carried out according to precisely regulated processes. 700 bar hydrogen pressure is the standard refuelling

weltweit gültigen Normen geregelt und erfolgt nach genau geregelten Abläufen. Betankungsstandard sind 700 bar Wasserstoffdruck. Die exakte Bestimmung der abgegebenen Mengen des Gases erfordert im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen aber ganz neue Methoden und Messgeräte. Die Einhaltung der Betankungsnorm an den Tankstellen muss deshalb vor der Erstinbetriebnahme abgenommen und danach regelmäßig überprüft werden. Außerdem können bei der Wasserstoffherstellung, dem Transport zur Tankstelle, beim Verdichten des Gases oder während der Betankung schädliche Verunreinigungen eingeschleppt werden.

Das ZSW ist in mehrere Projekte zum Aufbau einer europäischen Wasserstoffinfrastruktur eingebunden. Die Expertise liegt bei der Überprüfung der international gültigen Normen zum Betankungsvorgang (SAE J2601) und zur Wasserstoffqualität (ISO 14687-2, EN 17124). Zur Abnahme von Wasserstofftankstellen haben die Wissenschaftler ein mobiles Abnahmesystem entwickelt, mit dem bis Januar 2020 insgesamt 20 Abnahmen in Deutschland durchgeführt wurden. Weiterhin wurden Wasserstoffprobenahmen zur Qualitätsüberprüfung in Deutschland, Österreich und der Schweiz durchgeführt und im Ulmer Labor für Wasserstoffqualität – einem von bundesweit zwei unabhängigen Laboren zur Wasserstoffanalytik – analysiert. Dieses Labor wurde im Projekt HyLaB am ZSW realisiert und ist seit Dezember 2018 einsatzfähig.

KOSTENBETRACHTUNGEN ZU WASSERSTOFF

Die Diskussion bezüglich Betankungsinfrastruktur, Kosten und Reichweite von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen ist vergleichbar mit der über batteriebetriebene E-Autos. In beiden Fällen muss eine öffentlich zugängliche Infrastruktur aufgebaut werden. Doch in den kommenden Jahren wird sich hier einiges tun. Die Wirkungsgradverluste bei der Herstellung und dem Transport von Wasserstoff werden abnehmen, wodurch gleichzeitig die Kraftstoffkosten sinken. Verschiedene aktuelle Studien stellen für den Zeitraum bis 2030 eine Kostensenkung für viele

pressure. However, in order to determine the exact amount of gas delivered, entirely new methods and measuring devices are required. For this reason, refuelling stations must be inspected for compliance with the refuelling standard before initial commissioning, with regular follow-ups thereafter. In addition, harmful contaminants can be introduced during hydrogen production, transport to the filling station, compression of the gas or during the refuelling process itself.

ZSW is involved in several projects aimed at establishing a European hydrogen infrastructure. Its expertise lies in the review of the internationally valid standards on refuelling (SAE J2601) and hydrogen quality (ISO 14687-2, EN 17124). ZSW researchers have developed a mobile inspection system for HRS, with which a total of 20 inspections were carried out in Germany up to January 2020. They also sampled hydrogen for quality control purposes in Germany, Austria and Switzerland and analysed the extracted quantities in the Ulm Laboratory for Hydrogen Quality – one of two independent laboratories for hydrogen analysis in Germany. This laboratory was set up as part of the HyLaB project at ZSW and has been fully operational since December 2018.

COST CONSIDERATIONS FOR HYDROGEN

The discussion concerning the refuelling infrastructure, costs and range of hydrogen-powered fuel cell vehicles is comparable to that of battery-powered electric cars. In both cases, a publicly accessible infrastructure has to be built. However, there will be a flurry of activity in the coming years. Efficiency losses in the production and transport of hydrogen will decrease and lead to a reduction of fuel costs. Various recent studies predict cost reductions of up to 50% for many applications in the period leading up to 2030. The steam reforming method for natural gas is still the cheapest option for hydrogen production available today. However, hydrogen produced this way is not regenerative, unlike when renewable electricity is used in electrolysis. The cost



©FVV/Dirk Lässig

// Blick ins Brennstoffzellentestzentrum. Aktuell fahren 25 vollautomatische Teststände im Rund-um-die-Uhr-Betrieb.
// A look inside the fuel cell test centre. At present, 25 fully automatic test rigs are running in round-the-clock operation.



// ZSW-System zur Abnahme von H₂-Tankstellen nach SAE J2601.
// ZSW system for the approval of H₂ refuelling stations in compliance with SAE J2601.

Anwendungen um bis zu 50 % in Aussicht. Die Dampfreformierung von Erdgas stellt die heute noch preiswerteste Option zur Wasserstoffherstellung dar. Der so hergestellte Wasserstoff ist jedoch, anders als beim Einsatz von erneuerbarem Strom in der Elektrolyse, nicht regenerativ. Die Kosten der Wasserstoffherstellung durch Wasserelektrolyse von regenerativer Energie hängt stark von den Strom- und den Kapitalkosten der Elektrolyseanlagen ab. Unter idealen Bedingungen, wie z. B. im PtG-Projekt am Wasserkraftwerk Wyhlen, wo ein günstiger Strombezug und hohe jährliche Laufzeiten gegeben sind, werden bereits heute annähernd konkurrenzfähige Erzeugungskosten erreicht.

Um die Wasserelektrolyse und Brennstoffzellen grundsätzlich wettbewerbsfähiger zu machen, sind weitere Forschungen an alternativen Materialien für Katalysatoren und Membranen, aber auch an verfahrenstechnischen Fragen erforderlich. Weitere Kosteneinsparungen sind möglich durch den Einsatz von skalierbaren und serientauglichen Materialien sowie Fertigungsverfahren, wie sie beispielsweise im HyFaB-Projekt oder im Rahmen des Reallabors H₂-Wyhlen auf den Weg gebracht werden sollen.

PRODUKTION VON E-FUELS MIT CO₂ AUS DER LUFT

Für die erneuerbare Energieversorgung werden auch zukünftig Kohlenwasserstoffe benötigt, insbesondere in den Bereichen, die nicht vollständig elektrifizierbar sind oder in denen Wasserstoff nicht direkt genutzt werden kann. Das betrifft z. B. Kraftstoffe für den Flug-, Schiffs-, Bahn- und Schwerlastverkehr, saisonale Energiespeicher und chemische Rohstoffe. Für die Kohlenwasserstoffsynthese bedarf es neben Wasserstoff auch Kohlenstoff, der u. a. als CO₂ aus der Luft gewonnen werden kann.

of hydrogen production through water electrolysis using renewable energy sources depends on power costs and the capital cost of the electrolysis plants. Generation costs come close to being competitive already today under ideal conditions such as those found in the PtG project at the Wyhlen hydroelectric power plant, with its favourable power prices and high annual operating periods.

In order to make water electrolysis and fuel cells more competitive in general further research into alternative materials for catalysts and membranes is needed, including process engineering. Further cost savings can be achieved by using scalable materials and manufacturing processes that are suitable for series production – such as those that are to be developed in the HyFaB project or at the H₂ Wyhlen real-world laboratory.

PRODUCTION OF E-FUELS WITH CO₂ FROM THE AIR

In the future, hydrocarbons will still be needed for a renewable energy supply, especially in areas that cannot be fully electrified, or where hydrogen cannot be used directly. These hydrocarbons include fuels for air traffic, shipping, rail traffic and heavy goods transport, seasonal energy storage and chemical raw materials. In addition to hydrogen, hydrocarbon synthesis also requires carbon, which can be extracted from the air in the form of CO₂.

Die Anreicherung von CO₂ aus Luft ist zwar mit Energieaufwand verbunden, ermöglicht aber im Gegenzug eine standortunabhängige E-Fuels-Produktion. Das Verfahren ist deshalb überall dort von Bedeutung, wo keine Infrastruktur mit konzentrierten CO₂-Quellen vorhanden ist, dafür aber günstiger erneuerbarer Strom sowie genügend Wasser für die Wasserelektrolyse. Im Fokus des vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekts „CORAL“ standen deshalb die Entwicklung und der Machbarkeitsnachweis eines Verfahrens mit minimiertem Energieverbrauch für die CO₂-Gewinnung aus Luft. Durch eine Prozessintegration ist es dabei möglich, die Abwärme aus den verbundenen Prozessschritten wie Elektrolyse und Kraftstoff-(Kohlenwasserstoff-)Synthese zu nutzen. Der verbleibende Stromverbrauch für die CO₂-Bereitstellung aus der Luft (z. B. für Luftgebläse, Pumpen) geht zwar zulasten des elektrischen Wirkungsgrades der E-Fuels-Produktion, der Effizienzverlust hält sich allerdings in Grenzen: So ist die Methangewinnung aus einer konzentrierten CO₂-Quelle wie z. B. einer Biogasanlage mit einem Wirkungsgrad von 60 % nur geringfügig höher als die Methanherstellung unter Verwendung von CO₂ aus der Luft, die einen Wirkungsgrad von 55 % aufweist.

Extracting CO₂ from the air requires energy but in return allows for e-fuel production at any location. The process is thus advantageous at locations where there is no infrastructure with concentrated CO₂ sources, but where cheaper renewable electricity and sufficient water for electrolysis is available. The focus of the “CORAL” project, funded by the German Federal Ministry of Education and Research, was therefore on developing and proving the feasibility of a process with minimised energy consumption for CO₂ extraction from the air. Process integration allows the utilisation of the waste heat from the associated process steps, such as electrolysis and fuel (hydrocarbon) synthesis. Although the residual power consumption for CO₂ production from the air (e.g. for air fans and pumps) negatively affects the electrical efficiency of e-fuel production, the loss in efficiency is limited: for example, methane production from a concentrated CO₂ source, such as a biogas plant with an efficiency of 60%, is only slightly higher than methane production using CO₂ extracted from the air, which has an efficiency of 55%.

WERTSCHÖPFUNG AUS ELEKTROLYSE – EINE SYSTEMANALYTISCHE BETRACHTUNG

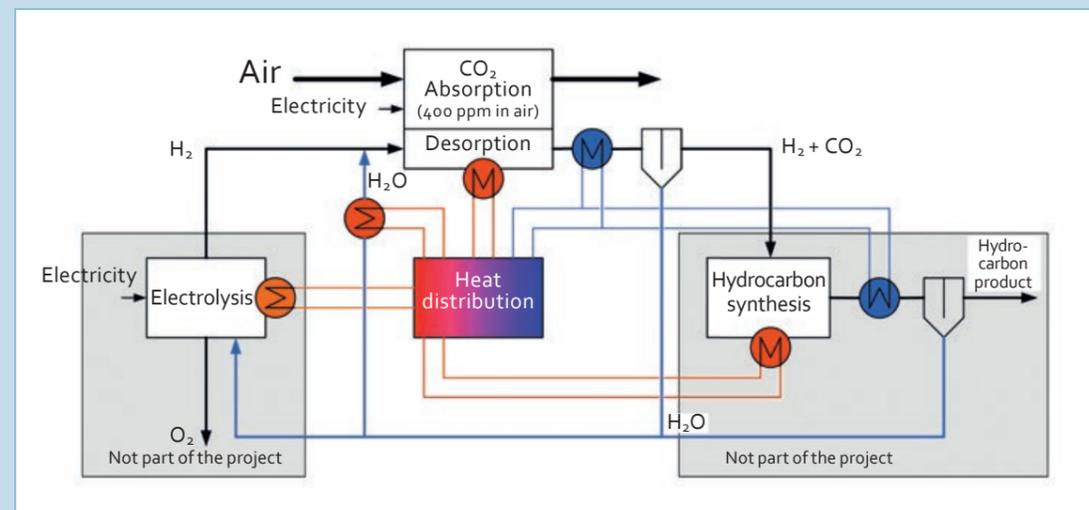
ADDED VALUE FROM ELECTROLYSIS – A SYSTEMS ANALYSIS APPROACH

Im Rahmen der systemanalytischen Forschung am ZSW werden Strategien zu Markteinführung und Entwicklung von neuen Technologien untersucht. Bei der Transformation des Energiesystems und zur zukünftigen Rolle des Wasserstoffs und seiner Syntheseprodukte in den diversen Anwendungsfeldern werden mögliche Entwicklungspfade anhand von Szenarien antizipiert. Um Rückschlüsse auf die erforderlichen technologischen Entwicklungsschritte ebenso wie auf den Markthochlauf ziehen zu können, wird der Zeitverlauf der Nachfrage abgebildet. Die Auswertung wird angesichts der globalen Entwicklungen im Bereich Wasserstoff durch detaillierte Analysen der potenziellen Beschaffungs- und Absatzmärkte für grünen Wasserstoff ergänzt, um die in den Szenarien hinterlegten Annahmen auf Plausibilität zu prüfen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um Wertschöpfungspotenziale für die heimische Industrie zu identifizieren. Im Zentrum stehen hierbei Industriestrukturen mit dem Fokus auf den benötigten Technologien, Komponenten und Fertigungsverfahren sowie dem erforderlichen Know-how.

Ziel ist zunächst die Identifikation bereits aktiver Branchen im Themenspektrum Wasserstoffherzeugung und -anwendung, aber auch potenziell geeigneter weiterer Branchen. Das bildet die Grundlage für die Quantifizierung von Wertschöpfungspotenzialen in Abhängigkeit von der weltweiten Ausbaudynamik. Über eine Analyse der Komponentenstruktur, z. B. der Elektrolysetechnologie, werden die spezifischen Vorteile des Industriestandorts Baden-Württemberg erarbeitet. Patentanalysen zu Elektrolysetechnolo-

ZSW investigates strategies for the market introduction and development of new technologies within the framework of systems analytical research. On the basis of scenarios, it anticipates possible development paths for the transformation of the energy system and the future role of hydrogen and its synthesis products in the various fields of application. ZSW maps the development of demand over time in order to be able to draw conclusions on the necessary technological development steps, as well as on the market ramp-up. In view of global developments in the hydrogen sector, it supplements the evaluation with detailed analyses of the potential procurement and sales markets for green hydrogen in order to verify the plausibility of the assumptions underlying the scenarios. The findings obtained are used to identify the value-added potential for the domestic industry. Here, the main emphasis is on industrial structures with a focus on the required technologies, components and manufacturing processes as well as the necessary know-how.

The initial aim is to identify sectors already active in the area of hydrogen production and application, but also other potentially suitable sectors. This forms the basis for a quantification of value-added potentials depending on the global expansion dynamics. The specific advantages of Baden-Württemberg as an industrial location are worked out by analysing the component structure, for example of the electrolysis technology. Patent analyses of electrolysis technologies and components also offer information on the state of national and international research and development.



// Abwärmennutzung aus dem Elektrolyse- und Syntheseprozess für die CO₂-Bereitstellung aus Luft.
// Utilisation of waste heat from electrolysis and synthesis process for supplying CO₂ from the air.

// Focus

gien und Komponenten geben darüber hinaus Aufschluss über den Stand der Forschung und Entwicklung im nationalen und internationalen Vergleich. Eine Gegenüberstellung der Analyseergebnisse zur Komponentenstruktur mit dem Branchen-Wirtschaftsprofil zeigt vorteilhafte und eher nachteilige Strukturen auf. Ein weiteres Ergebnis eines laufenden Forschungsprojekts ist eine Quantifizierung der Umsatz-, Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale der Elektrolysetechnologie für Baden-Württemberg bis 2030 und bis 2050 unter Berücksichtigung verschiedener Exportszenarien bzw. erzielbarer Weltmarktanteile. Die Resultate erlauben die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Politik bei der Transformation der baden-württembergischen Industrie hin zur Klimaneutralität unter bestmöglicher Nutzung der Chancen, die sich durch einen dynamisch wachsenden Markt für grünen Wasserstoff ergeben.

A comparison of the results of component structure analyses with the economic profile of the industry reveals advantageous and disadvantageous structures. One further result of an ongoing research project is a quantification of the turnover, value added and employment potential of electrolysis technology for Baden-Württemberg up to 2030 and up to 2050, taking into account various export scenarios and achievable world market shares. The results can be used to derive policy recommendations for the transformation of Baden-Württemberg's industry towards climate neutrality, making the best possible use of opportunities arising from a dynamically growing market for green hydrogen.

insbesondere wenn dieser auf die zu erfüllende Quote für erneuerbare Kraftstoffe anrechenbar ist. Im Verkehrssektor ist der Einsatz von grünem Wasserstoff bzw. von synthetischen Folgeprodukten wie E-Kerosin oder E-Diesel im Flug- und Schiffsverkehr für das Erreichen der Klimaneutralität zwingend notwendig. Auch im Stromsektor ergeben sich weitere Absatzmärkte, zum Beispiel über die saisonale Speicherung von Strom aus erneuerbaren Quellen.

fuels quota. In the transport sector, green hydrogen or synthetic derived products, such as e-kerosene or e-diesel in aviation and shipping, are absolutely necessary to achieve climate neutrality. Additional sales markets are also opening up in the electricity sector, for example through the seasonal storage of electricity from renewable sources.

Das ZSW leistet mit seinen Arbeiten zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung bei der Elektrolyse, zur Bereitstellung von regenerativem CO₂ für synthetische Kohlenwasserstoffe, zur Sicherung der Wasserstoffqualität an Tankstellen, mit der Entwicklung und dem Test von Hochleistungsbrennstoffzellen bis hin zu systemanalytischen Betrachtungen zu Absatzmärkten und Wertschöpfung einen Beitrag zur Industrialisierung von Wasserstofftechnologien. Im Rahmen des Technologietransfers unterstützt das ZSW Unternehmen dabei, an der Umsetzung eines nachhaltigen Wasserstoffpfads nicht nur zu partizipieren, sondern auch davon zu profitieren. Das betrifft nicht nur den in Deutschland traditionell starken Maschinen- und Anlagenbau, dem sich im Kontext der Elektrolysefertigung und der damit verbundenen Zulieferindustrie neue Absatzchancen – insbesondere im Export – bieten könnten; auch der Chemieindustrie bieten sich neue Optionen, da der grüne Wasserstoff nicht nur als Basischemikalie klimafreundliche Produkte ermöglicht, sondern weil er Wege zur klimaneutralen Produktion eröffnet. Darüber hinaus soll über die industrielle Serienfertigung von Brennstoffzellen die Fahrzeugindustrie unterstützt werden, um nur einige Beispiele zu nennen.

ZSW contributes to the industrialisation of hydrogen technologies with its efforts, such as increasing the efficiency and reducing the costs of electrolysis, providing regenerative CO₂ for synthetic hydrocarbons, assuring the quality of hydrogen at filling stations and developing and testing high-performance fuel cells as well as with its systems analyses of sales markets and value creation. In the context of technology transfer, ZSW helps companies not only to participate in the implementation of a sustainable hydrogen pathway, but also to profit from it. This applies not only to the traditionally strong mechanical and plant engineering sector in Germany, which stands to benefit from new sales opportunities – especially in terms of export – due to electrolysis production and the associated supply industry. There are also new opportunities for the chemical industry, since green hydrogen as a basic chemical not only allows for climate-friendly products but also opens up ways to overall climate-neutral production. In addition, the automotive industry is to be supported by the industrial series production of fuel cells, to name but a few examples.

Die systemanalytische Begleitforschung stellt Orientierungswissen zur Verfügung, etwa für die Politik bei Entscheidungen zur Ausrichtung ihrer Industriepolitik ebenso wie zur Ausgestaltung adäquater Rahmenbedingungen auf dem Weg zur Klimaneutralität.

Accompanying systems analysis research provides guidance, for example to policymakers, to prepare industrial policy decisions and formulate adequate framework conditions on the way to climate neutrality.

FAZIT

Mit dem zunehmenden internationalen Druck, nicht nur einzelne Sektoren klimafreundlicher zu gestalten, sondern ganzen Kontinenten den Weg zur Klimaneutralität zu ebnen, stehen die Zeichen klar auf CO₂-neutralem Wasserstoff. Große Absatzmärkte für H₂ entstehen beispielsweise in der Chemieindustrie, wenn Regularien Klimaneutralität in der Produktion fordern und der bislang aus Erdgasreformierung stammende, fossilbasierte graue Wasserstoff durch grünen Wasserstoff ersetzt wird. In der Stahlindustrie könnte sich ein vollständig neuer Absatzmarkt für „grünen Stahl“ entwickeln. Dessen Herstellung bedarf allerdings grundlegender Prozessumstellungen und entsprechender Investitionen. Raffinerien könnten zu den ersten Abnehmern für grünen Wasserstoff zählen,

SUMMARY

Given the rising international pressure to not just make individual sectors more climate-friendly but also to clear the way for entire continents to become climate-neutral, all signs clearly point to CO₂-neutral hydrogen. Large sales markets for H₂ will emerge in the chemical industry, for example, when regulations demand climate neutrality in production and the fossil-based grey hydrogen previously produced by natural gas reforming is replaced by green hydrogen. The steel industry could see the development of a completely new market for "green steel" – however, its production requires fundamental process changes and corresponding investments. Refineries could be among the first customers for green hydrogen, especially if it counts towards the renewable

// WERTSCHÖPFUNGSKETTE WASSERSTOFF

// VALUE CHAIN HYDROGEN



> ERZEUGUNG VON ERNEUERBAREM STROM
> GENERATION OF RENEWABLE ELECTRICITY



> PRODUKTION VON GRÜNEM WASSERSTOFF
> PRODUCTION OF GREEN HYDROGEN



> WASSERSTOFF-QUALITÄT
> QUALITY OF HYDROGEN



> SYNTHESE VON GRÜNEN E-FUELS
> SYNTHESIS OF GREEN E-FUELS



> TRANSPORT ZUR VERWENDUNG
> TRANSPORT TO APPLICATION



> NUTZUNG: INDUSTRIE, GEBÄUDEENERGIE, MOBILITÄT
> USE: INDUSTRY, ENERGY OF BUILDINGS, MOBILITY

// PARTNER FÜR WIRTSCHAFT, FORSCHUNG UND POLITIK A PARTNER FOR BUSINESS, RESEARCH, AND GOVERNMENT

Das ZSW blickt auf 30 Jahre vertrauensvolle Zusammenarbeit mit zahlreichen Akteuren aus Industrie, Forschung und Politik zurück. Das Spektrum der Kooperationspartner ist breit: Branchen wie der Maschinenbau für die Herstellung von Solarmodulen oder die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien, die Automobil- und Zulieferindustrie, kommunale Unternehmen und Energieversorger, Landes- und Bundesministerien, Verbände und viele andere gehören dazu.

Kunden schätzen das Verständnis der ZSW-Experten für die Abläufe in der Industrie, die flexible Auftragsbearbeitung und das umfassende Know-how: Es reicht vom Materialwissen über die Entwicklung von Produktionsverfahren bis hin zu anwendungsspezifischen Tests und Systemlösungen. Dabei arbeiten sie in einem Netzwerk von universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen und sind damit auch bestens auf Technologien der nächsten und übernächsten Generation vorbereitet.

Hinzu kommt die langjährige Erfahrung in der Entwicklung von Szenarien und Förderinstrumenten oder der Anfertigung von Marktstudien für Ministerien auf Landes- und Bundesebene sowie für die EU. Ein Beispiel ist die Mitarbeit in der Expertenkommission, die das regelmäßige Monitoring zur Energiewende der Bundesregierung („Energie der Zukunft“) kommentiert und wissenschaftlich begleitet.

Sprechen Sie uns an – nebenstehend finden Sie unsere Kontaktadressen.

ZSW has a 30-year track record of trusted collaboration with many industrial enterprises, research institutes, and public policymakers. Our alliances cover a lot of ground. We team up with mechanical engineering companies that manufacture solar modules and lithium-ion batteries, automakers and automotive suppliers, municipal utilities and power companies, state and federal ministries, nonprofit associations, and many more allies.

These customers value ZSW experts' insight into industrial processes, appreciate the agility with which they take on jobs, and benefit from their holistic skill set. Their knowledge of materials runs deep. And they have the know-how to develop production processes, application-specific testing tools, and system solutions. Our scientists also work in a broad network of university and non-university research institutions. With all these assets, we are ready to tackle the challenges of next-generation technologies and beyond.

ZSW's analysis skills have been honed over many years of developing scenarios and incentive schemes and preparing market studies for state, federal and EU ministries. For example, we are part of a commission with a panel of experts who scientifically responds to and comments on the German government's regular monitoring (Energie der Zukunft / Energy of the future) of the transition to renewables.

Let's talk about what we can do for you. You can reach us at any of the addresses on the right.

// STANDORTE LOCATIONS



// Stuttgart

Photovoltaik (mit Modultestlabor Solab), Energiepolitik und Energieträger, Zentralbereich Finanzen, IT, Personal & Recht
Photovoltaics (incl. Solab Photovoltaics Test Laboratory), Energy Policy and Energy Carriers, Central Division Finance, IT, Human Resources, & Legal Affairs

Meitnerstraße 1 | 70563 Stuttgart

Contact Claudia Brusdeylins
Phone: +49 711 7870-278
E-mail: claudia.brusdeylins@zsw-bw.de



// Widderstall

Solar-Testfeld
Solar Testing Facility

Widderstall 14 | 89188 Merklingen



// Ulm

Elektrochemische Energietechnologien (Batterien, Wasserstoff und Brennstoffzellen)
Electrochemical Energy Technologies (Batteries, Hydrogen and Fuel Cells)

Helmholtzstraße 8 | 89081 Ulm

Contact Tiziana Bosa
Phone: +49 731 9530-601
E-mail: tiziana.bosa@zsw-bw.de



// Ulm eLaB

Labor für Batterietechnologie (eLaB)
Laboratory for Battery Technology (eLaB)

Lise-Meitner-Straße 24 | 89081 Ulm

Stuttgart

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
Germany
Phone: +49 711 7870-0
Fax: +49 711 7870-100

Solar-Testfeld Widderstall

Widderstall 14
89188 Merklingen
Germany
Phone: +49 7337 92394-0
Fax: +49 7337 92394-20

Ulm

Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-0
Fax: +49 731 9530-666

Ulm eLaB

Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-500
Fax: +49 731 9530-599

www.zsw-bw.de

info@zsw-bw.de



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2015