

// Schwerpunktbericht 2013

Focus Report 2013

Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende

Hydrogen – a Key to the Energy Turnaround

// Schwerpunktbericht 2013

Focus Report 2013

Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende Hydrogen – a Key to the Energy Turnaround

// FOCUS

// Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende

Seit seiner Gründung vor 25 Jahren beschäftigt sich das ZSW mit der Erzeugung und Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff (H₂) als Energieträger. Vor dem Hintergrund der stetigen Verknappung fossiler Brennstoffe sowie der globalen und nationalen Klimaschutzziele hatte dieses Thema schon immer eine besondere Relevanz für die Forschungen am ZSW. Die Gründerväter des ZSW haben das Potenzial von H₂ für den Kraftstoff- und Energiemarkt von Beginn an erkannt, und so trägt unser Institut nicht zufällig den Begriff „Wasserstoff“ in seinem Namen.

// Hydrogen – a key to the energy turnaround

Since it was founded 25 years ago, ZSW has been concerned with the generation and use of renewable hydrogen (H₂) as an energy carrier. In view of the increasing shortage of fossil fuels and the global and national climate protection goals, this issue has always had a particular relevance for the research at ZSW. The founding fathers of ZSW recognised the potential of H₂ for the fuel and energy market right from the beginning, and it is therefore no coincidence that the institute bears the word "Hydrogen" in its name.

Wasserstoff wird heute in der fast unvorstellbaren Menge von jährlich 500 Milliarden Kubikmetern in der chemischen Industrie und Petrochemie erzeugt. Ein Großteil dient der Herstellung von Ammoniak für die Kunstdüngerherstellung, aber auch für Kunststoffe, bei der Fetthärtung, der Stahlproduktion sowie in der Glas- und Halbleiterindustrie wird Wasserstoff benötigt. Dieser Wasserstoff wird heute fast ausschließlich durch Reformierung aus Erdgas oder anderen Kohlenwasserstoffen hergestellt.

Der regenerativen Erzeugung von H₂ kommt derzeit weltweit ein deutlich steigender Stellenwert zu – auch in der Forschung an den beiden Standorten des ZSW in Stuttgart und Ulm. H₂ ist das Synonym für eine nachhaltige Energieversorgung, die weitgehend – und in der Zukunftsperspektive auch vollständig – auf erneuerbaren Energien beruht. Die Forschungen in den Bereichen Elektrolyse, Power-to-Gas (P₂G[®]) und Brennstoffzellen zählen zu den wichtigsten Schwerpunkten des ZSW – und die Brücke zwischen all diesen Technologien bildet Wasserstoff.

// Impuls für die Wirtschaft

Wasserstoff als Energieträger kann vielfältig verwendet werden: als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge oder zur Einspeisung in das Erdgasnetz verbunden mit der anschließenden Strom- bzw. Wärmeerzeugung mit Gasturbinen, Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen. Ganz im Gegensatz zu den heute getrennten Systemen der Stromversorgung und der Kraftstoffversorgung ermöglicht es Wasserstoff, die unterschiedlichen Wirtschafts- und Industriebranchen miteinander zu verbinden: Automobilhersteller, die Mineralölwirtschaft, die an ihren Tankstellen zusehends Wasserstoff anbieten wird, Strom- und Gaserzeuger, die chemische Industrie und auch private Haushalte werden Teil der H₂-Infrastruktur im Energiesystem der Zukunft. Insbesondere die Automobilindustrie hat die Chance, über Wasserstoff den Kraftstoffanteil aus erneuerbaren Energien deutlich zu erhöhen.

Daraus ergeben sich auch neue Impulse für die Wirtschaft, wie eine ZSW-Studie aus dem vergangenen Jahr zeigt: Bis zum Jahr 2030 sind über alle Marktsegmente für Wasserstoff und Brenn-

Today, an almost unimaginable volume of hydrogen amounting to 500 billion cubic metres is produced each year by the chemical and petrochemical industries. Most of it is used for manufacturing ammonia for the production of artificial fertiliser, but hydrogen is also used for plastics, the hydrogenation of fats, steel production and in the glass and semiconductor industries. Today, hydrogen is almost exclusively produced by reforming natural gas or other hydro-carbons.

At present, the renewable generation of H₂ is gaining increasing importance worldwide – and this is also reflected in the research at the two ZSW sites in Stuttgart and Ulm. H₂ is the synonym for a sustainable energy supply that is largely based – and will in the future be entirely based – on renewable energy sources. The research in the electrolysis, Power-to-Gas P₂G[®] and fuel cell fields is one of the most important focus areas at ZSW – and the bridge between all these technologies is hydrogen.

// Economic impetus

Hydrogen can be used as an energy carrier in many ways: as a fuel for fuel cell vehicles or for feeding into the natural gas grid combined with the subsequent generation of electricity and heat using gas turbines, combustion engines and fuel cells. In complete contrast to the currently separate systems for supplying electricity and fuel, hydrogen enables the different business and industry sectors to be linked with one another: automotive manufacturers, the petroleum industry (that will increasingly offer hydrogen at their refuelling stations), electricity and gas producers, the chemical industry and even private households will become part of the H₂ infrastructure in the energy system of the future. In particular the automotive industry has a chance to utilise hydrogen to considerably increase the proportion of fuel from renewable energy sources.

This also produces new impetus for the economy, as has been shown by a ZSW study from last year: by 2030, annual turnovers amounting to 4.5 billion euros are possible in Baden-Württemberg



stoffzellen jährliche Umsätze von bis zu 4,5 Mrd. Euro allein in Baden-Württemberg möglich. Dadurch können 20.000 neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Diese Potenziale könnten bis zum Jahr 2050 auf bis zu 25 Mrd. Euro Umsatz und 100.000 Beschäftigte anwachsen.

alone for all hydrogen and fuel cell market segments. This could create 20,000 new jobs. By 2050, this potential could even grow to a turnover of 25 billion euros and 100,000 jobs.



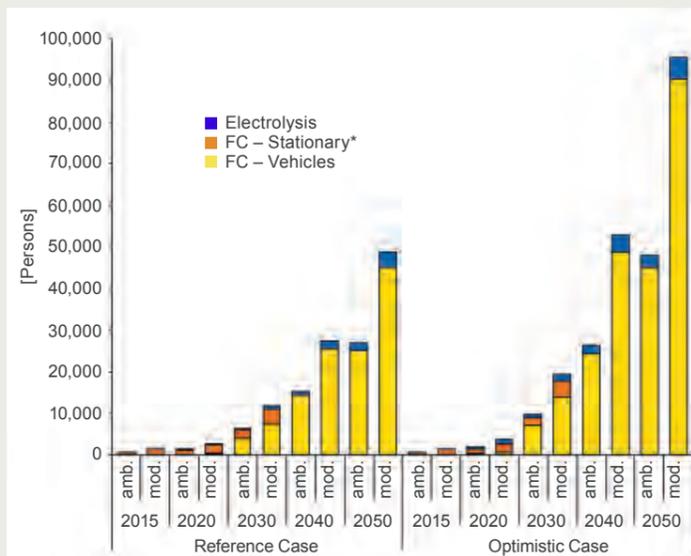
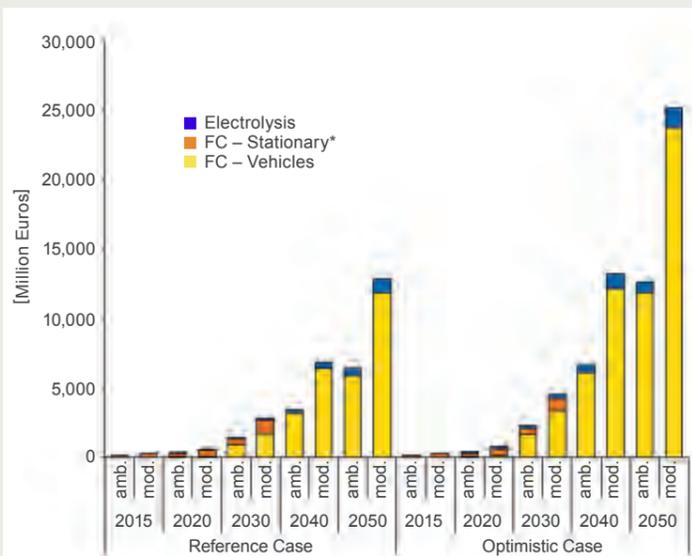
// Focus

// Die Energiewende und der Ausbau fluktuierender Energiequellen

Unser künftiges Energiesystem muss sich zu 100 % auf erneuerbare Energien stützen. Dieses Ziel betrifft nicht nur die Stromversorgung, sondern auch Wärme und Kraftstoffe. Gleichzeitig soll Energie jederzeit ohne Einschränkungen verfügbar sein. Dazu werden vor allem die Photovoltaik und die Windkraft ausgebaut, wobei beide Energien stark fluktuierend anfallen. Der Ausbau der Netze allein kann diese Fluktuation nicht kompensieren. Überschüssige Energie aus Sonne und Wind muss sich speichern lassen, um auch zu Zeiten mit einem geringen regenerativen Angebot die Nachfrage decken zu können. Verschiedene Speicherverfahren befinden sich in der Entwicklung oder werden bereits angewendet, wie beispielsweise Pumpspeicherwerke, Druckluftspeicher oder Batterien. Ein täglicher Ausgleich, z. B. für Photovoltaikspitzen, ist mit diesen Technologien machbar; jedoch haben sie entweder nicht die nötige Speicherkapazität oder nicht die notwendige Verfügbarkeit, um längerfristige Überschüsse oder Erzeugungsdefizite, vor allem der Windkraft, auszugleichen. So beträgt die derzeit durch Pumpspeicherkraftwerke vorhandene Speicherkapazität in Deutschland 0,04 TWh. Der zukünftige Speicherbedarf bei einer zu 100 % erneuerbaren Stromversorgung wird indes auf einen zweistelligen TWh-Bereich geschätzt.

// The energy turnaround and the development of fluctuating energy sources

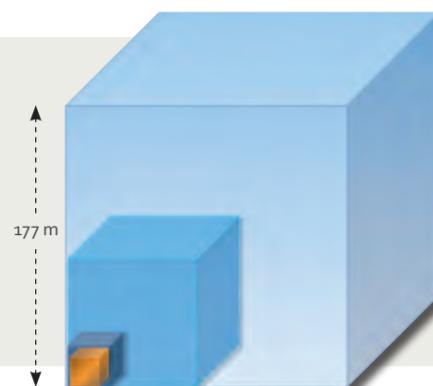
Our future energy system must be entirely based on renewable energy sources. This goal relates not only to the electricity supply but also to heating and fuels. At the same time, energy should be available at all times and without limitations. For this purpose, photovoltaics and wind energy are in particular being expanded, whereby both forms of energy fluctuate by considerable amounts. The expansion of the grids is not enough in itself to compensate this fluctuation. It must be possible to store surplus solar and wind energy to supply electricity during periods when there is little renewable energy available. Various storage methods are therefore either currently under development or are already being used, such as pumped storage plants, compressed air reservoirs and batteries. While daily balancing is feasible with these technologies, for example to cover peaks from photovoltaic sources, they have either insufficient storage capacity or a lack of availability to compensate for longer-term surpluses or generation deficits, in particular from wind energy. The storage capacity provided by pumped storage plants in Germany currently amounts to 0.04 TWh. However, the future storage requirement with up to 100% renewable electricity supply is now estimated to be in the double-figure TWh range.



// Umsatz- und Beschäftigungspotenzial für Baden-Württemberg in allen betrachteten Bereichen. Eigene Berechnungen. * Für stationäre Brennstoffzellen wurde nur das Mittelfrist-Potenzial abgeschätzt. // Turnover and employment potential for Baden-Württemberg in all areas considered. Own calculations. * Only the medium-term potential was estimated for stationary fuel cells.

Somit bewegen sich die Potenziale langfristig in ähnlichen Größenordnungen, wie sie die Schlüsselbranchen des Landes „Maschinenbau“ und „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ bereits heute aufweisen.

The long-term potential therefore has a similar order of magnitude as the federal state's key industries such as mechanical engineering and the automotive and automotive parts industries.



// Um eine Terawattstunde Energie zu speichern, benötigt man Storing one TWh of energy requires:

- 5,5 Millionen Kubikmeter Wasser in einem Pumpspeicherkraftwerk mit einer Höhendifferenz von 83 m
- 0,5 Millionen Kubikmeter Luft in einem Druckluftspeicher bei ca. 50 bar
- 0,017 Millionen Kubikmeter Wasserstoff bei ca. 50 bar
- 0,006 Millionen Kubikmeter Erdgas bei ca. 50 bar

// Focus



Batterien sind gute Kurzzeitspeicher, aber lediglich chemische Energieträger wie Wasserstoff oder Methan – hergestellt im Power-to-Gas (P2G®)-Verfahren aus erneuerbarem Strom – erfüllen die Anforderungen der Langfristspeicherung, die die Energiewende an unser zukünftiges Energiesystem stellt. Zudem kann die Elektrolyse als regelbare Last einen bedeutenden Beitrag zu stabilen Stromnetzen und sicherer Energieversorgung erbringen. Die Vorteile chemischer Energieträger beschränken sich jedoch nicht auf die Fähigkeit, Sonne und Wind speicherbar und bei Bedarf wieder verfügbar zu machen. Mit ihnen lassen sich sowohl nachhaltige Wärme als auch regenerative Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft erzeugen. Häufig wird der schlechte Wirkungsgrad der Wasserstoffspeicherung kritisiert. Beim Betrachten aller Kriterien wie Verfügbarkeit, Kosten und Breite der Anwendungsmöglichkeiten zeigt sich aber sehr schnell, dass chemische Energieträger – allen voran erneuerbarer Wasserstoff – zum Gelingen vieler Facetten der Energiewende beitragen werden.

// Altes Verfahren, neue Perspektiven: die Wasserelektrolyse

Wasserstoff durch elektrochemische Zersetzung von Wasser wurde 1929 erstmals industriell im norwegischen Rjukan erzeugt. Der Strom kam aus einem Wasserkraftwerk. Großtechnisch wurde die H₂-Erzeugung bislang stets dort angewandt, wo regelmäßig zu viel Elektrizität anfällt. Mit dem Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien, insbesondere der Windkraft, ermöglichen moderne Elektrolyseure die Umwandlung von Strom in den einfach speicherbaren und vielseitig nutzbaren Energieträger Wasserstoff.

Heute stehen drei Wasserelektrolysetechnologien mit unterschiedlichem Entwicklungsstand zur Verfügung: die alkalische Wasserelektrolyse (AEL; alkalische Elektrolyse) mit dem am weitesten entwickelten technischen Stand, die Proton-Exchange-

Batteries provide good short-term storage systems. However, only chemical energy carriers such as hydrogen or methane – produced from renewable electricity in the P2G® Power-to-Gas process – meet the long-term storage requirements needed for the energy turnaround as part of our future energy system. Electrolysis as a controllable load, can make an important contribution to ensuring stable electricity grids and securing energy supply. The advantages of chemical energy carriers are, however, not just limited to their ability to store solar and wind energy and make it available as required. They can also be used to generate sustainable heat and renewable fuels for future mobility. The poor efficiency of hydrogen storage is often criticised. However, when considering all criteria such as the availability, cost and scope of the application possibilities, it very quickly becomes apparent that chemical energy carriers – in particular renewable hydrogen – will contribute to the success of many facets of the energy turnaround.

// Old process, new prospects: water electrolysis

Hydrogen created by the electrochemical decomposition of water was first produced on an industrial scale in Rjukan in Norway in 1929. The electricity came from a hydroelectric power station. Until now, the large-scale production of H₂ has always occurred in places where too much electricity is regularly available. With the expansion of fluctuating renewable energy sources, in particular wind power, modern electrolyzers enable electricity to be converted into hydrogen, which, as an energy carrier, is easily storable and can be used in diverse ways.

Today, three technologies to electrolyse water at different stages of development are available: alkaline water electrolysis (AEL), which is the most advanced in terms of technology, proton exchange membrane electrolysis (PEM electrolysis), which is

// Das ZSW hat den Bau der 6-MW-Elektrolyse in Werlte wissenschaftlich unterstützt.
// ZSW has provided scientific support for the construction of the 6-MW electrolyser in Werlte.



Membrane-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse), die sich für den industriellen Maßstab derzeit im Entwicklungsstadium befindet, und die Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse (SOEL; engl.: Solid Oxide Electrolysis), die sich noch im frühen Forschungsstadium befindet.

// Alkalische Elektrolyse (AEL)

Die alkalische Wasserelektrolyse ist seit mehr als 80 Jahren industriell verfügbar. Die Elektroden bestehen aus strukturierten Nickelblechen, -geweben oder -vliesen, die mit Katalysatoren aus Raney-Nickel oder Mischoxiden (nur Kathode) beschichtet sind. Die Elektroden werden durch ein poröses Diaphragma aus Nickeloxid oder Zirkonoxid/Kunststoff-Komposit-Membranen getrennt. Die Zellen werden typischerweise von heißer (60–90 °C), 30 %iger Kalilauge durchströmt. Der Betriebsdruck liegt bei vielen Anlagen bei etwa 30 bar. Der Energieverbrauch bewegt sich im Bereich zwischen 4,5 und 5 kWh pro erzeugtem Nm³ Wasserstoff; das entspricht einem Wirkungsgrad von 60–67% (bezogen auf den unteren Heizwert). Alkalische Elektrolyseure sind im Leistungsbereich von wenigen Kilowatt bis zu einigen Megawatt elektrischer Leistung verfügbar. Technologische Herausforderungen sind der Umgang mit dem sehr korrosiven Elektrolyten und besonders im Teillastbereich die Trennung der Produktgase und im Teillastbetrieb Leckageströme beim Abschalten.

// Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse PEM

Die sogenannte PEM-Elektrolyse wird noch nicht großtechnisch eingesetzt, ist aber als kommerzielles Produkt mit bis zu 100 kW Leistung verfügbar und kann ebenfalls in einem weiten Bereich von Umgebungsdruck bis über 100 bar betrieben werden. Bei dieser Elektrolyseart bestehen die Elektroden aus edelmetallbeschichteten, porösen Titanstrukturen (Gewebe, Vliese). Die Elektroden werden durch eine protonenleitende Membran getrennt, die gleichzeitig als Elektrolyt dient. Der wesentliche Vorteil dieser Elektrolyseart gegenüber der alkalischen Elektrolyse ist der Wegfall des Laugenkreislaufs. Statt mit der hochkorrosiven Kalilauge wird hier mit einem einfachen Wasserkreislauf gearbeitet. Damit in Zusammenhang steht auch das bessere Teillast- und Abschaltverhalten (Gasqualität, Leckageströme). Die Herausforderungen für die Technologie liegen in den teuren Zellmaterialien (Titan) und Katalysatoren (Iridium).

currently being developed up to an industrial scale, and high-temperature solid oxide electrolysis (SOEL), which is currently at an early research stage.

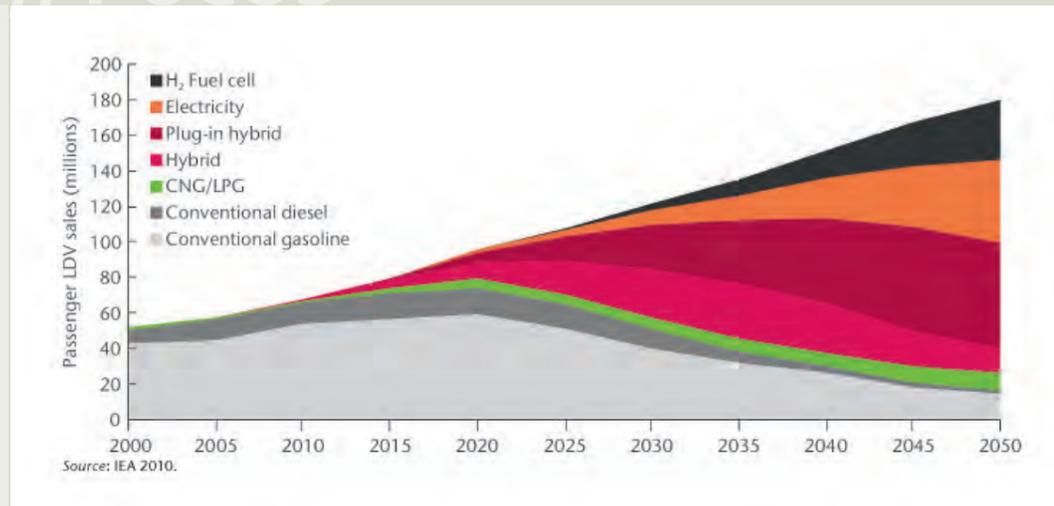
// Alkaline electrolysis (AEL)

Alkaline water electrolysis has been industrially available for more than 80 years. The electrodes consist of textured nickel sheets, fabrics or fleeces that are coated with catalysts made of Raney nickel or mixed oxides (cathode only). The electrodes are separated by a porous diaphragm made of nickel oxide or zirconium oxide/plastic composite membranes. A hot (60–90 °C) potassium hydroxide solution (30%) typically flows through the cells. The operating pressure for many plants is about 30 bar. The energy consumed ranges between 4.5 and 5 kWh for each Nm³ of hydrogen generated; this corresponds to an efficiency of 60–67% (related to the lower heating value). Alkaline electrolyzers are available at capacities ranging from just a few kilowatts to several megawatts of electrical power. Technical challenges include dealing with the very corrosive electrolytes and, particularly in the partial load area, the separation of the product gases and, during partial load operation, the shunt currents flows when switching off.

// Proton exchange membrane electrolysis (PEM)

Although PEM electrolysis is not yet being used on a large scale, it is already available as a commercial product with a capacity of up to 100 kW and can also be operated in a wide range from ambient pressures up to over 100 bar. With this type of electrolysis, the electrodes consist of porous titanium structures (cloth and fleece), which are coated with precious metal. The electrodes are separated by a proton-conducting membrane that also acts as the electrolyte. The main advantage of this kind of electrolyte compared to alkaline electrolysis is that it eliminates the need for a potassium hydroxide circuit. Instead of using highly corrosive potassium hydroxide, a simple water circuit is used. This also improves the partial load and switching-off behaviour (gas quality and shunt currents). The challenges posed by this technology relate to the expensive cell materials (titanium) and catalysts (iridium).

// Focus



// Jährlicher Absatz an leichten Nutzfahrzeugen und Pkw aufgeteilt nach Antriebstechnologien (Blue Map Szenario).
// Annual light-duty vehicle sales by technology type, Blue Map scenario.



// Brennstoffzellen-Fahrzeug im Einsatz.
// Fuel cell car on the road.

// Wasserstoff – Energieträger der Zukunft

Gegenstand weltweiter Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrssektor. Hierzu gehört sowohl die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben als auch der Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur. Wasserstoff kann auch bis zu einem gewissen Prozentsatz in das Erdgasnetz eingespeist und anschließend dem klassischen Strom- und Wärmemarkt zugeführt werden. Sind geeignete CO₂-Quellen (z. B. Biogasanlagen) vorhanden, dann bietet sich auch die Umwandlung von Wasserstoff und CO₂ in Methan an, das dann als Kraftstoff oder für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden kann.

// Wasserstoff für die Mobilität von morgen

Fast unsere komplette Mobilität basiert auf fossilen Kraftstoffen. Die Wachstumsprognosen weltweit sind weiterhin enorm. Bereits heute befahren mehr als eine Milliarde Fahrzeuge die Straßen der Welt. Gleichzeitig ist bekannt, dass die fossilen Energiequellen begrenzt sind und das Fördermaximum bei konventionellem Öl überschritten ist (Peak Oil). Öl muss immer aufwendiger in der Tiefsee, durch Fracking aus Schiefergesteinen usw. gefördert werden. Damit einher gehen sich verschärfende Umweltgesetzgebungen, die die Automobilhersteller vor weitere große Herausforderungen stellen. Ein Dilemma für die Verbrennungsmotoren ist ein physikalisches Grundprinzip: der Carnot-Prozess und der damit verbundene maximale Wirkungsgrad. So nutzen moderne Motoren für den Antrieb nur etwa 20 % (Ottomotor) bis 25 % (Dieselmotor) der Energie, die im Kraftstoff steckt (über einen typischen Fahrzyklus gerechnet); der Rest endet als heiße Abluft in der Umwelt. Elektroantriebe haben diese Begrenzung nicht: Elektroantriebe mit Strom aus wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen nutzen etwa 50 % der im Tank gespeicherten Energie für die Fortbewegung, bei batterieelektrischen Antrieben sind es sogar etwa 80 %.

// Hydrogen – an energy carrier of the future

A subject of worldwide research and development activities is the use of hydrogen as a fuel in the transport sector. This includes both the development of fuel cell drives as well as the installation of a hydrogen refuelling station infrastructure. A certain percentage of hydrogen can also be fed into the natural gas network and then subsequently added to the traditional electricity and heating market. If suitable CO₂ sources are available (for example, biogas plants), it is also possible to convert hydrogen and CO₂ into methane, which can then be used as a fuel or for generating electricity and heat.

// Hydrogen for tomorrow's mobility

Almost all our mobility is based on fossil fuels. The growth forecasts continue to be enormous throughout the world. Today, there are already more than 1 billion vehicles on the world's roads. At the same time, it is known that fossil fuels are limited and that the production maximum for conventional oil has already been exceeded (peak oil). Oil has to be increasingly produced from deep sea or by fracking shales. In addition, stricter environmental legislations are challenging automotive manufacturers. A dilemma for combustion engines is a physical principle: the Carnot cycle and the associated maximum efficiency. Modern engines use only between 20% (Otto engine) to 25% (diesel engine) of the energy contained in the fuel for propulsion (when calculated across a typical driving cycle). The rest ends up as hot exhaust air that is emitted to the environment. Electric motors do not have this limitation. Electric motors using electricity from hydrogen-operated fuel cells utilise about 50% of the energy stored in the tank for the propulsion while battery-powered drives even utilise about 80%.

// Wann sind Brennstoffzellen-Antriebe verfügbar?

Die meisten Automobilhersteller weltweit entwickeln seit vielen Jahren Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Auf Millionen von Kilometern haben diese Fahrzeuge inzwischen ihre Alltagstauglichkeit bewiesen. Sie zeichnen sich durch kurze Betankungszeiten, hohe Reichweiten und exzellenten Fahrkomfort aus und brauchen somit den Vergleich zu heutigen Antriebstechnologien nicht zu scheuen. Hyundai hat als erster Hersteller die kommerzielle Vermarktung begonnen. Ab 2015 werden Honda und Toyota folgen. Daimler wird in Kooperation mit Ford und Nissan im Jahr 2017 ca. 100.000 Fahrzeuge auf die Straße bringen.

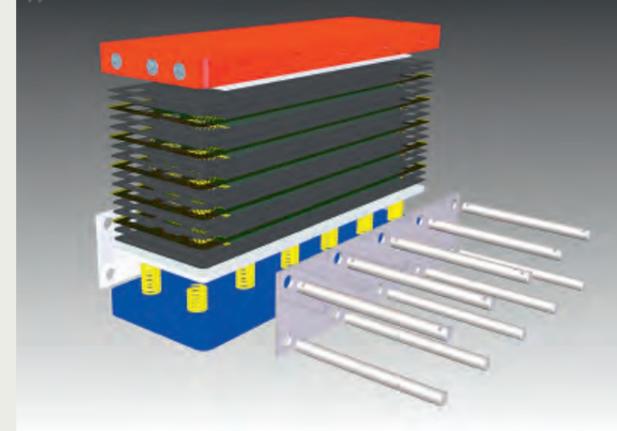
Auf dem Weg zur Kommerzialisierung europäischer Brennstoffzellen-Fahrzeuge ist der Aufbau einer durchgängigen und wettbewerbsfähigen Zulieferindustrie entscheidend. Noch ist Asien einen Schritt voraus. Für das Automobilland Deutschland geht es jetzt darum, rechtzeitig marktfähige Brennstoffzellen für Fahr-

// When will fuel cell engine become available?

Most of the world's automotive manufacturers have been developing fuel cell vehicles for many years. These vehicles have now proved their suitability for everyday use across millions of kilometres. They feature short refuelling times, high range and excellent driving comfort, and can therefore easily stand comparison with the current engine technologies. Hyundai is the first manufacturer to have started commercial marketing of the vehicles. It is being followed by Honda and Toyota in 2015. In cooperation with Ford and Nissan, Daimler is planning to launch approx. 100,000 vehicles on the roads in 2017.

On the path to commercialising European fuel cell vehicles, the development of a continuous and competitive supply industry is decisive. Asia is still one step ahead in this regard. For Germany, as an automotive country, it is now important to provide market-ready fuel cells for vehicles in good time and thereby position itself in

// Auto-Stack-Tool



// ZSW-Entwicklungsplattform für Hochleistungsbrennstoffzellen
Das ZSW kann eine 25-jährige Expertise bei der Entwicklung von Brennstoffzellen vorweisen sowie eine hervorragende technische Ausstattung mit allen notwendigen Entwicklungswerkzeugen für die Optimierung von Komponenten, Zellen und Stacks. So steht am Standort Ulm beispielsweise seit 2012 das Werkzeug „Auto-Stack-Tool“ mit dazugehörigem Prüfstand zur Verfügung. Dieses Tool dient der Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten und der Entwicklung von Hochleistungs-Brennstoffzellen unter fahrzeugtypischen Bedingungen. Das Werkzeug kann flexibel an kundenspezifische Anforderungen angepasst und bildet damit eine Technologiebasis für die Industrialisierung von fahrzeugtauglichen Brennstoffzellen in Deutschland.

// ZSW development platform for high-performance fuel cells
ZSW can boast 25 years of expertise in the development of fuel cells as well as excellent technical facilities with all the necessary development tools for optimising components, cells and stacks. For instance, the "Auto Stack Tool" including its test stand, has been available at the Ulm site since 2012. This tool is used for characterising fuel cell components and developing high-performance fuel cells under vehicle-typical conditions. The tool can be flexibly adapted to meet customer-specific requirements and thus provides a technological basis for the industrialisation of vehicle-suitable fuel cells in Germany.

// Focus



zeuge anbieten und sich in dem zukunftsrichtigen Thema Brennstoffzellenantriebe am Weltmarkt zu positionieren. Um all die notwendigen Technologiekompetenzen durchgängig aufzubauen, gilt es, Know-how aus Forschung und Industrie zu bündeln.

Für die erfolgreiche Etablierung neuer Brennstoffzellen-Systeme und entsprechender Lieferanten am Markt sollen Hochleistungsbrennstoffzellen eine ganze Reihe wichtiger Eigenschaften erfüllen – von der extremen Leistungsdichte über gute Kaltstarteigenschaften bis zu hoher Lebensdauer bei hochdynamischem Betrieb. Dafür müssen einzelne kostengünstige Bauteile aufeinander abgestimmt und in ihrer Funktion optimiert werden. Beispielsweise ist es erforderlich, Hochleistungsbrennstoffzellen und Brennstoffzellen-Komponenten in einer prozesssicheren Umgebung vorzuqualifizieren und zu testen. Dazu gehören herstellereutrale Tests mit fahrzeugtauglicher Leistungscharakteristik, um die Qualität der Komponenten nachzuweisen oder Entwicklungszyklen zu verkürzen. Ein weiterer Aspekt sind unabhängige Leistungs- und Lebensdauertests in Realdesign und unter realen Bedingungen für standardisierte, anonymisierte Produktvergleiche. Des Weiteren müssen optimale Betriebsbedingungen für Komponenten herausgefunden sowie Kanalgeometrien oder mechanische Eigenschaften der Gasdiffusionslagen angepasst werden, um die geforderten Leistungsdaten zu erreichen. Besonders mittelständischen Unternehmen fehlen oft eigene Ressourcen, um innovative Konzepte für Komponenten, deren Herstellprozesse und Qualitätssicherungsmaßnahmen zu erproben.

// Infrastruktur von Wasserstofftankstellen

Die größte Hürde für Brennstoffzellen-Fahrzeuge ist der Aufbau eines flächendeckenden Wasserstofftankstellennetzes. Die Bundesregierung hat im Jahr 2009 hierzu in ihrer Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie unter dem Motto „Weg vom Öl“ beschlossen, den Aufbau der notwendigen Infrastruktur zu unterstützen. Dies geht einher mit der Strategie der europäischen Kommission „Clean Power for Transport: A European Alternative Fuels Strategy“. Demnach soll EU-weit bis 2020 alle 300 km eine Wasserstofftankstelle zur Verfügung stehen. In diesem Kontext hat sich die beteiligte Industrie zusammengeschlossen und plant, bis 2023 insgesamt 400 Wasserstofftankstellen allein in Deutschland zu errichten (H₂-Mobility).

the global market for the promising fuel cell engine segment. In order to continuously develop all the necessary technological expertise it is important to bundle the know-how from research and industry.

In order to establish new fuel cell systems and the corresponding suppliers in the market, high-performance fuel cells must fulfil a whole set of important criteria, ranging from extreme power density and good cold start properties to a long service life with highly dynamic operation. For this purpose, cost-effective components must be matched with one another and optimised in terms of their function. For example, it is necessary to pre-qualify and test high-performance fuel cells and fuel cell components in a reliable environment. This includes manufacturer-neutral tests with vehicle-suitable performance characteristics in order to verify the quality of the components or shorten development cycles. Independent performance and service life tests using real designs and under real conditions for standardised, anonymous product comparisons are a further aspect. In addition, optimum operating conditions for components must be determined and the channel geometries and mechanical properties of the gas diffusion layers adapted in order to achieve the required performance data. Particularly medium-sized companies often lack the resources to test out innovative concepts for their components, production processes and quality assurance measures.

// Infrastructure for hydrogen refuelling stations

The greatest hurdle for fuel cell vehicles is the development of a comprehensive H₂ refuelling station network. Under the maxim “Away from oil”, the German federal government therefore decided in 2009 to support the development of the necessary infrastructure as part of its mobility and fuel strategy. This complements the European Commission strategy entitled “Clean Power for Transport: A European Alternative Fuels Strategy”. The strategy aims to provide hydrogen refuelling stations every 300 kilometres in the EU by 2020. In this context, the industries concerned have combined forces and are planning to construct a total of 400 hydrogen refuelling stations in Germany alone by 2023 (H₂ Mobility project).



// P₂G® – eine ZSW-Technologie auf der Erfolgsspur

Mit dem sogenannten Power-to-Gas-Verfahren kann Wasserstoff und bei Bedarf Methan hergestellt werden. Die einzelnen Schritte von Power-to-Gas (P₂G®)-Elektrolyse und Methanisierung sind zwar bekannt – neu ist, neben zahlreichen Effizienzsteigerungen bei der Anwendung, die Kombination dieser beiden Prozesse. Erneuerbares Methan, hergestellt aus Wind- und Sonnenenergie, ist von seiner Zusammensetzung her nichts anderes als Erdgas und kann dementsprechend in das gut ausgebaute Erdgasnetz eingespeist und effizient gespeichert werden. Zur vorhandenen Erdgas-Infrastruktur zählen neben den eigentlichen Leitungen Gastanks und unterirdische Kavernen. All diese Speichermöglichkeiten stehen bereits zur Verfügung und bieten mit mehr als 200 TWh immense Kapazitäten. Sowohl Methan als auch in bestimmten Mengen Wasserstoff können darin aufgenommen, verteilt und zur bedarfsgerechten Nutzung bereitgestellt werden. Die Gase können zudem mehrere Monate verlustfrei in den genannten Möglichkeiten gespeichert werden. So bietet der P₂G®-Prozess die Option auf ein Zusammenwachsen von Stromnetz und Gasnetz zu einem integrierten Gesamtsystem.

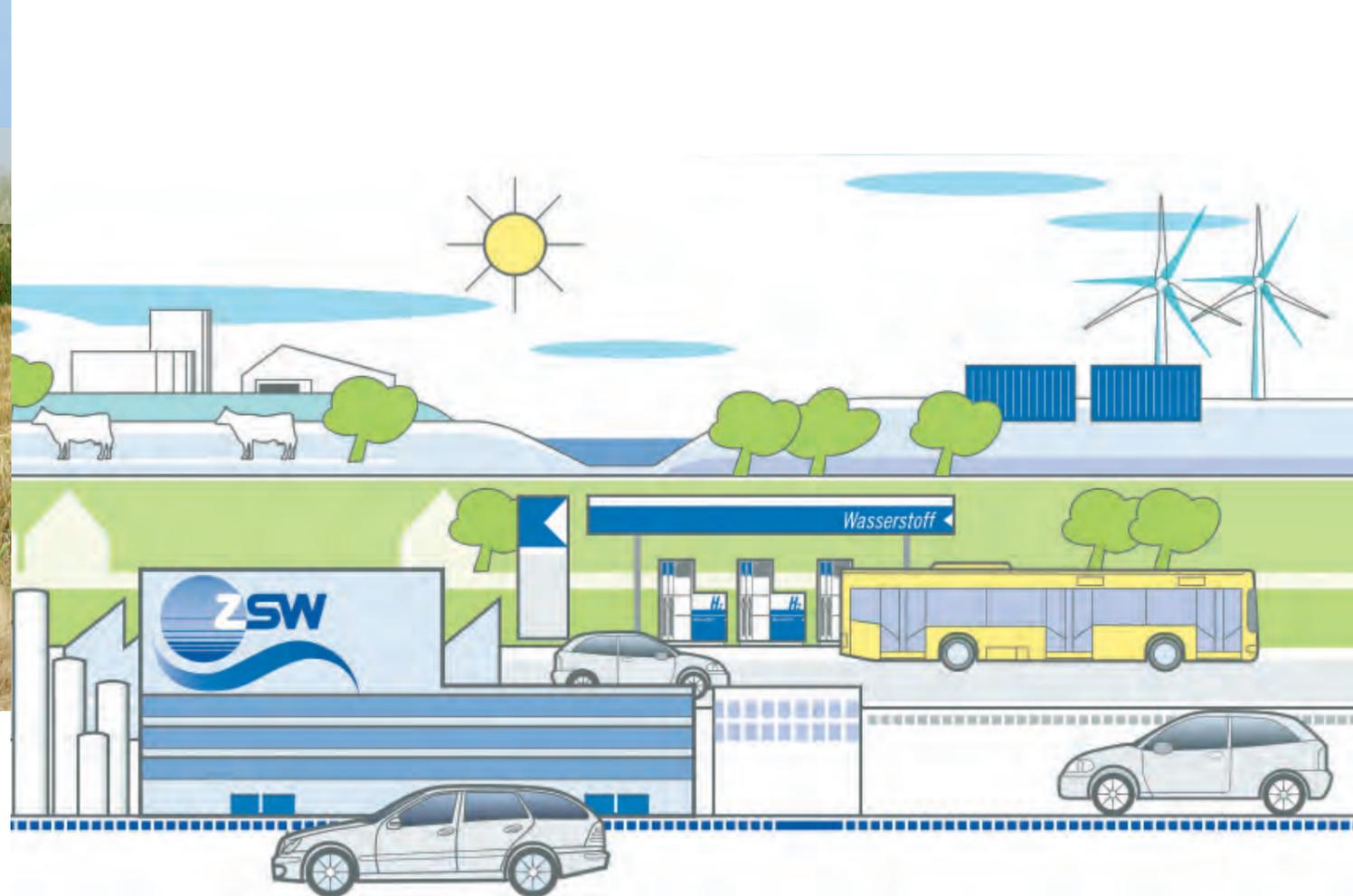
Als CO₂-Quelle für den Methanisierungsprozess kommen beispielsweise Biogasanlagen, Anlagen zur Bioethanolproduktion, Kraftwerksprozesse und die chemische Industrie infrage. Der Zugang zu weiteren CO₂-Quellen ist weiterhin Gegenstand aktueller Forschungen am ZSW. Das synthetische Erdgas kann bei Bedarf in modernen Gas- und Dampfkraftwerken oder in dezentralen Blockheizkraftwerken zurückverstromt werden, in der Industrie zum Einsatz kommen oder aber als Kraftstoff, z. B. für Erdgasautos, Verwendung finden. Gerade letztgenannte Option kann eine entscheidende Lösung bei der Energiewende im Verkehrssektor bieten, zumal die Antriebstechnik von Erdgasautos bereits ausgereifter als die

// P₂G® – a ZSW technology on route to success

The so-called Power-to-Gas process makes it possible to produce hydrogen and, if required, methane. While the individual steps in Power-to-Gas P₂G® electrolysis and methanisation have been known for a long time, new aspects include not just the numerous improvements in efficiency during implementation but also the combination of these two processes. In terms of its composition, renewable methane produced from wind and solar energy is nothing other than natural gas and can accordingly be fed into the well-developed natural gas grid and efficiently stored there. The existing natural gas infrastructure includes the existing pipelines, gas tanks and underground caverns. All these storage alternatives already exist and offer immense capacities exceeding 200 TWh. Both methane and, to a limited extent, hydrogen can be integrated, distributed and made available for use in accordance to the demand. The gases can also be stored in the alternative locations mentioned above for several months without any losses. The P₂G® process makes it possible for the electricity grid and the gas network to grow together to form an integrated overall system.

Possible sources of CO₂ for the methanisation process include biogas plants, bioethanol production plants, power plant processes and the chemical industry. Research on accessing further CO₂ sources is currently being conducted at ZSW. The synthetic natural gas can be used for generating electricity in modern combined cycle power plants or in decentralised CHP plants, it can be deployed in industry and it can be used as a fuel, for example, in natural gas vehicles. Particularly the latter option could offer a decisive solution for the energy turnaround in the transport sector, especially since the drive technology for natural gas vehicles is already more mature than other environmentally friendly technologies.

// Focus



anderer umweltfreundlicher Techniken ist. Auch das Tankstellennetz für CNG (Compressed Natural Gas) ist verhältnismäßig gut ausgebaut. Das Engagement eines Automobilherstellers, der mit wissenschaftlicher Unterstützung des ZSW die erste industrielle P2G®-Anlage (6 MW_{el}) gebaut hat, verdeutlicht das enorme Potenzial. Auch der im P2G®-Prozess erzeugte Wasserstoff kann für die Mobilität von morgen genutzt werden.

Zusammenfassend betrachtet, bildet P2G® auch eine wichtige Basis für das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele im Mobilitätssektor und ermöglicht sowohl eine Kurz- als auch Langstreckenmobilität. Die Erzeugung von Wasserstoff und Methan ist gegenüber flüssigen erneuerbaren synthetischen Energieträgern technologisch einfacher, energetisch effizienter und im Entwicklungsstadium weiter voran. Die Systemlösung P2G® ist darüber hinaus geeignet, Deutschlands technologischen Vorsprung zu sichern sowie die Abhängigkeit von Erdgasimporten – und mit Blick auf den Mobilitätssektor auch die Abhängigkeit von Mineralöl – zu verringern. Die P2G®-Technologie hat bereits den Schritt in die Industrialisierung geschafft. Der Weg dorthin war lang und konsequent. Chemische, wasserstoffbasierte Energieträger – von Methanol mit CO₂-Gewinnung aus der Luft bis hin zu CNG – erforscht das ZSW seit seinem Bestehen. Das Basic Engineering für P2G®-Anlagen und die Anpassung an spezifische Anforderungsprofile bilden dabei einen Schwerpunkt. Im Jahr 2009 hat das ZSW bereits erfolgreich nachgewiesen, dass das P2G®-Konzept einwandfrei funktioniert: anhand einer containerintegrierten 25-kW_{el}-Testanlage. Diese wurde 2011 an verschiedenen Standorten mit verschiedenen CO₂-Quellen betrieben. Im Herbst 2012 nahm das ZSW eine zehnmal leistungsstärkere 250-kW_{el}-Pilotanlage in Betrieb. Die Erfahrungen aus dem dortigen Forschungsbetrieb fließen auch in das Projekt im niedersächsischen Werlte ein (6000 kW_{el}).

The refuelling station network for CNG (compressed natural gas) is also relatively well developed. The enormous potential is demonstrated by the commitment of an automotive manufacturer who, with ZSW's scientific support, has constructed the first industrial-scale P2G® plant (6 MW_{el}). The hydrogen generated in the P2G® process can also be used for future mobility.

Seen as a whole, P2G® also provides an important basis for achieving the sustainability goals in the mobility sector and enables both short and long-distance mobility. Relative to liquid-based, renewable synthetic energy carriers, the generation of hydrogen and methane is technologically easier, more energy efficient and further developed. In addition, the P2G® system solution is also suitable for securing Germany's technological lead as well as reducing its dependence on natural gas imports and, with regard to the mobility sector, its dependence on petroleum. The P2G® technology has already made the step towards industrialisation. The path was long and rigorous. Since it came into existence, ZSW has been researching chemical, hydrogen-based energy carriers, ranging from methanol using CO₂ captured from the air to CNG. The basic engineering for P2G® systems and their adaptation to meet specific requirement profiles have formed one focus area. ZSW already successfully proved in 2009 that the P2G® concept works faultlessly, using a container-integrated 25-kW_{el} test plant. In 2011, this was operated at different locations with different CO₂ sources. In autumn 2012, ZSW began operating a 250-kW_{el} pilot plant with ten times the capacity. The experience gained from the research operation there is now being incorporated in the project in Werlte in Lower Saxony (6000 kW_{el}).

// Effiziente Biomassenutzung durch Elektrolyse-H₂

Unser derzeitiges Energiesystem basiert auf der Nutzung fossiler, kohlenstoffhaltiger Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Auch in Zukunft werden weiterhin kohlenstoffhaltige Kraftstoffe (C-Fuels) gebraucht, zumal C-Fuels in verschiedenen Nutzungsektoren kaum zu ersetzen sind. Das betrifft insbesondere den Kraftstoffbedarf für Flugverkehr oder die Lkw-Langstrecke. Die einzige erneuerbare Energie, die Kohlenstoff enthält, ist Biomasse. Daher hat sie – in Verbindung mit regenerativ erzeugtem Elektrolyse-Wasserstoff – das Potenzial, eine Schlüsselrolle bei Energiewende und Klimaschutz zu spielen. Durch fermentative und thermochemische Konversion kann Biomasse in einspeisefähiges Gas umgewandelt werden, das sich über Monate verlustfrei im Erdgasnetz speichern lässt.

Biomasse ist jedoch in vielen Ländern knapp. Mit Elektrolyse-Wasserstoff kann die Effizienz bzw. die Reichweite der Ressource Biomasse bei der Erzeugung von kohlenstoffbasierten Kraftstoffen um den Faktor 2 bis 3 erhöht werden. Im Vergleich zu den heute üblichen Biokraftstoffen entspricht das sogar einem sechsfach höheren Kraftstofftrag. Damit verringert sich der Agrarflächenbedarf drastisch: auf bis zu einem Sechstel.

// Efficient biomass utilisation using electrolysis H₂

Our current energy system is based on the use of carbon-based fossil fuels such as coal, crude oil and natural gas. Carbon-based fuels (C-fuels) will continue to be required in the future, particularly as C-fuels are almost impossible to replace in various market sectors. This applies especially to the fuel required for aviation or long-distance lorries. The only renewable energy source that contains carbon is biomass. In conjunction with renewably generated electrolysis hydrogen, it therefore has the potential to play a key role in the energy turnaround and climate protection. By means of fermentative and thermochemical conversion, biomass can be transformed into feed-in gas that can be stored in the natural gas network for months without loss.

However, there is a shortage of biomass in many countries. Electrolysis hydrogen enables the efficiency and the range of biomass as a resource to be increased by two- to threefold when generating carbon-based fuels. Compared with the currently used biofuels, this even corresponds to a sixfold increase in the fuel yield. This therefore means a dramatic reduction of the need for agricultural land – by up to a sixth.