

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 9001:2008

// Mobilität der Zukunft
Mobility of the Future

// Mobilität der Zukunft

// Mobility of the Future



Elektromobilität – Schlüsseltechnologien und Energieversorgung für eine nachhaltige Mobilität

E-mobility – key technologies and energy supply for sustainable mobility

Abbildung ©Daimler AG

Vor 140 Jahren stieß der Benz Patent-Motorwagen in der Bevölkerung überwiegend auf Kritik. Erst als Berta Benz 1888, heimlich und gemeinsam mit ihren Söhnen und Kraftstoff aus der Apotheke, mit dem Fahrzeug ihres Mannes Carl die 106 km von Mannheim nach Pforzheim fuhr, begannen sich die Vorbehalte in der Öffentlichkeit zu reduzieren.

140 years ago, reactions to the Benz patent motor car were predominantly critical. It was not until Berta Benz bought fuel at the pharmacy and took her two sons on a secret 106-km drive from Mannheim to Pforzheim in her husband Carl's vehicle in 1888 that the public started to become less reserved.



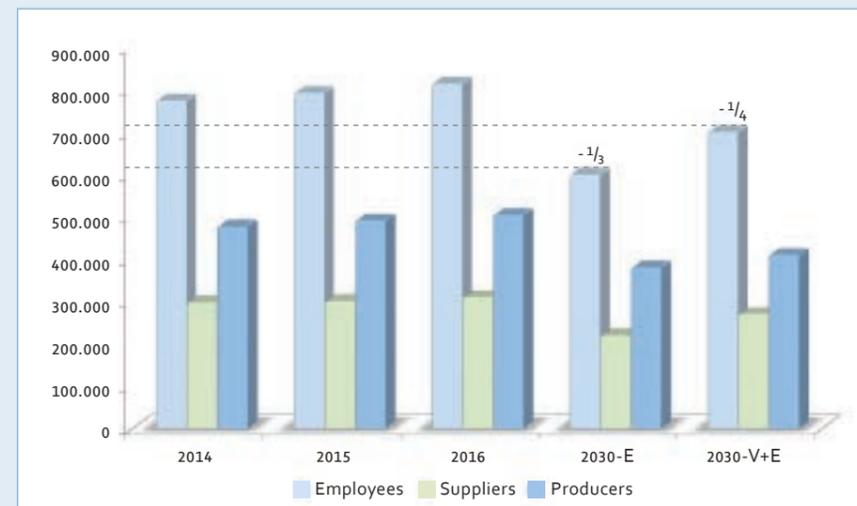
// Brennstoffzellenauto an der Wasserstoffstation (H₂-Tankstelle) am ZSW in Ulm.
// Fuel cell car at the hydrogen fuelling station at ZSW in Ulm.

Erst 20 Jahre später begann mit Henry Ford und der Massenfertigung des Model T der Siegeszug des Automobils, das bis heute, rund 100 Jahre später, ein wesentlicher Bestandteil unseres Alltags ist. Mehr als eine Milliarde Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind auf den Straßen der Welt unterwegs. Jedes Jahr werden mehr als 90 Millionen neue Autos – davon alleine 25 Millionen in China – produziert. In Deutschland hängen sehr viele Arbeitsplätze am Automobil (s. Abb. unten).

20 years later, Henry Ford and his mass-produced Model T kicked off the triumphal march of the automobile which today, around 100 years later, determines our daily life. Over one billion diesel and petrol vehicles running on fossil fuels are populating the streets of the world today. Every year, over 90 million new cars are being produced, with China accounting for 25 million alone. In Germany, many jobs are related to the automotive industry (see fig. below).

Mit der Elektromobilität scheint sich die Geschichte zu wiederholen. 2016 kann als Wendepunkt des Automobils bezeichnet werden. Elektrofahrzeuge, ob mit Batterien, Brennstoffzelle oder als Hybridantrieb, gewinnen rasant an Bedeutung. Ende 2016 waren weltweit mehr als 2 Millionen elektrisch betriebene Fahrzeuge auf der Straße. Die jährliche Produktionsrate nimmt extrem schnell zu und wird 2017 ein Niveau von einer Million Elektrofahrzeugen überschreiten. Im Jahr 2025 wird diese Zahl bei etwa 20 Millionen liegen. Damit einher gehen große technologische Veränderungen. Dieseleinspritzpumpen, Ventile und Kolben, Getriebe und Kupplungen verlieren an Bedeutung. Batterien, Brennstoffzellen, Elektromotoren und Leistungselektronik bestimmen die Charakteristika künftiger Fahrzeugantriebe. Nach einer aktuellen Abschätzung des Center of Automotive Management (CAM) werden von den heute 800.000 Beschäftigten der Automobilindustrie, je nach Anteil der Elektrofahrzeuge (s. Abb. unten), zwischen 100.000 und 200.000 Arbeitsplätze bis 2030 verloren gehen, sofern nicht gegengesteuert wird und hohe Anteile der Wertschöpfungskette der Elektromobilität in Deutschland etabliert werden.

History appears to repeat itself in the field of e-mobility. 2016 now looks like the turning point in the history of the motorcar. E-vehicles, whether powered by batteries, fuel cells or hybrid motors, are rapidly gaining popularity. At the end of 2016, over 2 million electric cars were on the streets worldwide. The annual production rate is accelerating rapidly, and the threshold of one million electric cars will be crossed in 2017. In 2025, around 20 million electric cars will be produced. This trend entails significant technological change. Diesel injection pumps, valves and pistons and gears and clutches are all becoming less important, while batteries, fuel cells, electric motors and power electronics are determining the properties of future vehicle drives. According to current estimates by the Center of Automotive Management (CAM), around 100,000 to 200,000 of the current 800,000 jobs in the automotive industry will be lost by 2030, depending on the share of electric cars (see fig. below), unless countermeasures are taken and a high proportion of the added value chain for electric mobility can be established in Germany.



// Szenario der Arbeitplatzeffekte in Deutschland bis 2030 durch Elektromobilität (100% E versus 50% V+E Marktanteil).
// Scenario of the employment effects in Germany through electric mobility (100% E versus 50% V+E market share).
Source: CAM.



// Forschungsplattform zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen: Anlage zum Vorformieren prismatischer Wickelzellen (PHEV-1-Format).
// Research platform for the industrial production of lithium-ion-cells: Preformation system for wound prismatic cells (PHEV-1-format).

Schlüsseltechnologie Lithium-Ionen-Batterie

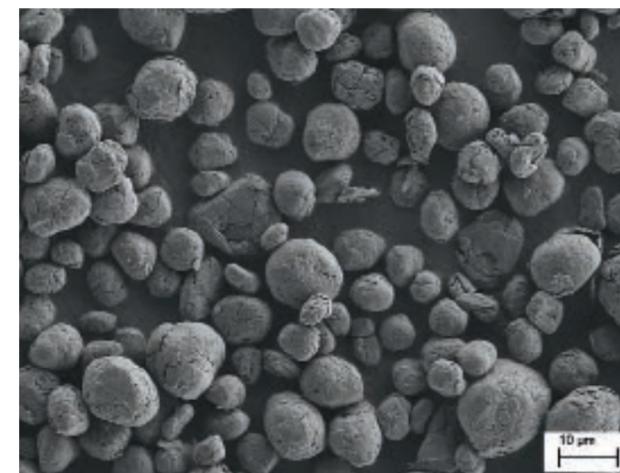
Die Lithium-Ionen-Technologie feierte 2016 ihr 25-jähriges Jubiläum. Die grundlegenden Forschungsarbeiten zur Interkalation von Lithium-Ionen (daher der Name) in einen Festkörper wie Grafit oder Metalloxid fanden in den 1970er Jahren an der TU München (J.O. Besenhard et al) statt. 1991 begann Sony die Kommerzialisierung und verhalf damit der portablen Unterhaltungselektronik zum Durchbruch. Heute werden beispielsweise 150 Millionen Smartphones mit Lithium-Ionen-Zellen pro Monat produziert. E-Bikes, Power Tools und Tablets sorgen zusätzlich für hohe Wachstumsraten bei der Produktion von Batterien. 2016 lag der weltweite Umsatz für Lithium-Ionen-Zellen bei mehr als 20 Mrd. US-Dollar (bei jährlichen Wachstumsraten von etwa 20%).

Ein erheblicher Anteil der Wertschöpfung entfällt auf die Antriebsbatterien, wofür die Lithium-Ionen-Technologie die Speichertechnologie der Wahl ist. Die automobiltypischen Anforderungen wie extreme Temperaturbereiche, Energiedichte, Leistung, Crash-Sicherheit und Kosten stellen auch weiterhin große Herausforderungen für die Materialforschung und Elektrochemie dar. Die kurz- und mittelfristig geplanten Produktionsmengen für Fahrzeuge erfordern nicht nur Investitionen in neue Fabriken im zweistelligen Milliarden-Euro-Bereich, sondern auch neue, fortschrittliche Produktionstechnologien (s. Abb. oben).

Key technology Lithium-ion battery

Lithium-ion technology celebrated its 25th anniversary in 2016. The basic research on the intercalation of lithium-ions (hence the name) into a solid body, such as graphite or metal oxides, was carried out at the Technical University of Munich in the 1970s (J.O. Besenhard et al). In 1991, Sony started commercialising the technology, thereby paving the way for the breakthrough of mobile consumer electronics. For instance, 150 million smartphones with lithium-ion cells are currently being produced every month. E-bikes, power tools and tablets also drive growth rates in battery production. In 2016, global turnover generated with lithium-ion cells topped USD 20 billion (with annual growth rates of approx. 20%).

A major share of the added value in electric mobility is in the traction batteries, whereby the lithium-ion technology is the storage technology of choice. Specific automotive requirements (extreme temperature ranges, energy density, performance, crash resistance and costs) continue to pose significant challenges in terms of materials research and electrochemistry. The vehicle production volumes planned in the short- and medium-term require investments in new factories in the double-digit billions (euros) as well as new, advanced production technologies (see fig. above).



// Mikroskopische Aufnahme gerundeter Naturgraphitpartikel.
// Microscopic imaging of spheroidised natural graphite particles.



// Analyse der Partikelstruktur in einem Lichtmikroskop.
// Particles structure analysis in an optical microscope.

Eines der Topthemen für künftige Batteriegenerationen ist die Entwicklung neuer Aktivmaterialien, um Engpässe bei der Verfügbarkeit von speziellen Rohstoffen zu umgehen. Ein Beispiel dafür ist Grafit. Mit ca. 90% Marktanteil stellt es das wichtigste Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien dar. Ungefähr die Hälfte davon entfällt auf Naturgraphit, der heute vorwiegend in China abgebaut wird. Um neue Quellen und Lieferanten für Grafit zu erschließen, ist es entscheidend, die Veredelungsprozesse vom Rohmaterial hin zu einem guten Anodenmaterial zu verstehen. Dazu gehört der sogenannte Rundungsprozess für die Grafitpartikel („sphäroidisierter Grafit“ s. Abb. oben). Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „Li-EcoSafe“ konnte am ZSW dieser Rundungsprozess für Grafit erfolgreich etabliert werden. Ein zentraler Aspekt ist dabei die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften und elektrochemischer Performance. Dieses Verständnis ist entscheidend, um neue Lieferanten bei der Qualifikation ihrer neuen Produkte für die Zellhersteller zu unterstützen.

Eine andere Alternative ist die Verwendung von Silizium (Si) als Anodenmaterial. Die Verfügbarkeit von Silizium kann fast als unbegrenzt bezeichnet werden und die Kapazität des Materials ist hoch. In dem europäischen Verbundprojekt „5VB“ entwickelt das ZSW innovative Batteriezellen von der Elektrodenpaste bis zur kompletten Zelle auf Basis eines neuen Silizium-Kompositmaterials. Das neue Aktivmaterial weist mit 1.100 mAh/g etwa die dreifache Kapazität des heutigen grafitbasierten Anodenmaterials auf. Das bedeutet, dass Zellen mit diesem neuen Material eine um mehr als 20% höhere spezifische Energiedichte aufweisen. Der größte Erfolg ist bisher die im Vergleich zu anderen Si-haltigen Anodenmaterialien recht gute Zyklenstabilität. In ersten Zellen konnten bereits mehr als 300 Vollzyklen demonstriert werden, bevor sich die Anfangskapazität auf 80% reduziert hat.

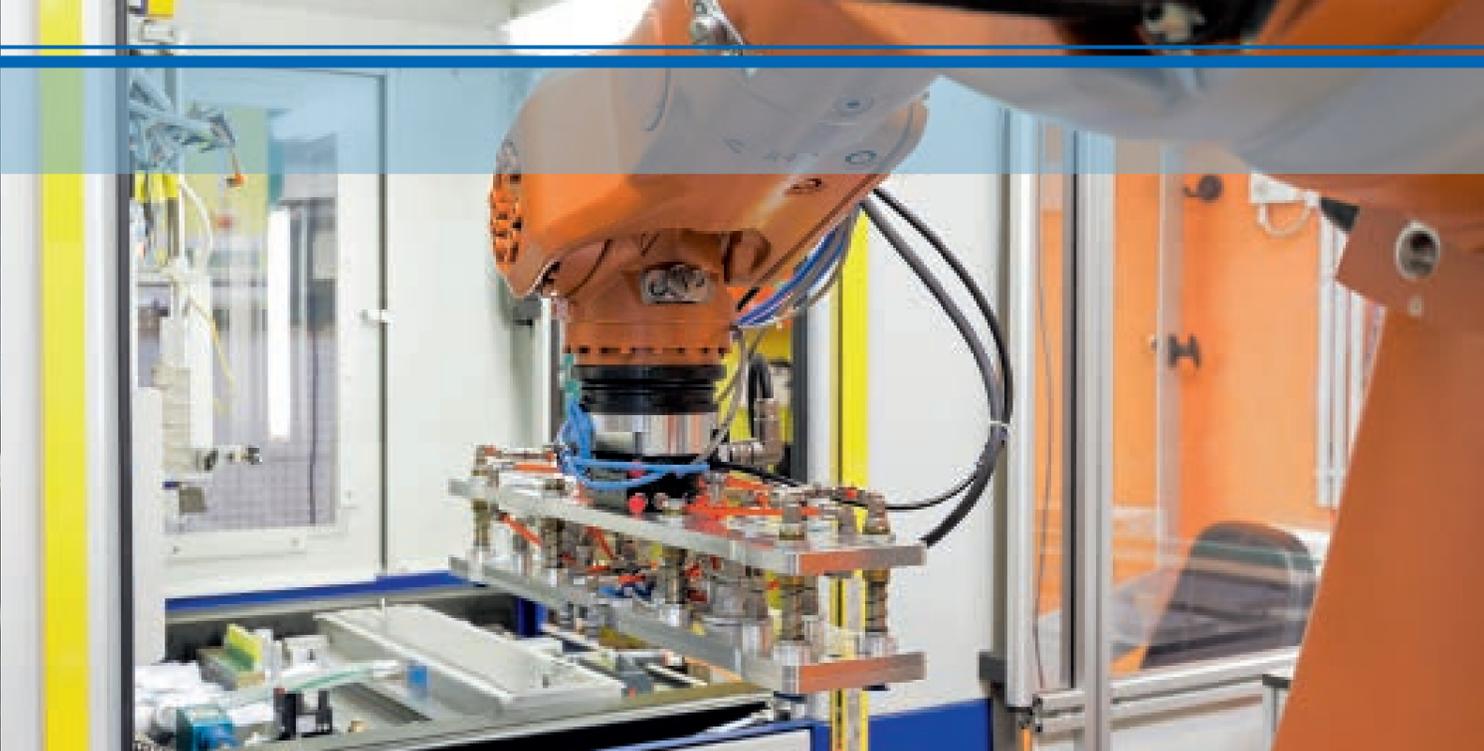
Among the key subjects relevant to future battery generations is the development of new active materials to tackle availability issues of special raw material. One example is graphite which, at a 90% market share, is the most important anode material in lithium-ion batteries. Natural graphite, which is now predominantly mined in China, accounts for approx. one half of this. The identification of new graphite sources and suppliers requires a thorough understanding of the refinement processes from raw material to high-quality anode material. This includes the so-called rounding process for graphite particles (‘spheroidised graphite’, see image above). In the context of the “Li-EcoSafe” project funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), ZSW has succeeded in establishing such a graphite rounding process. The investigation of correlations between material properties and electrochemical performance is a central aspect of the project. This understanding is crucial when it comes to assisting new suppliers to qualify their new products for cell manufacturers.

Alternatively, silicon (Si) can be used as an anode material. The availability of silicon is almost unlimited, and the material’s capacity is high. In the context of the joint European “5VB” project, ZSW is developing innovative battery cells, from electrode slurry to the full cell, based on new silicon composite materials. At 1,100 mAh/g, this new active material has around three times the capacity of current graphite-based anode materials. This means that the specific energy density of cells made from the new material is over 20% higher. The biggest success so far has been the respectable cycle stability of the material compared to other silicon anode materials. Initial cells have survived over 300 full cycles before the initial capacity declined to 80%.

// Focus



// Fahrzeugtaugliche Hochleistungsbrennstoffzelle mit 100-kW-Dauerleistung im ZSW-Teststand.
// Vehicular high-performance fuel cell with 100 kW continuous power on the ZSW test bench.



// Montageanlage mit Mehrachsroboter zum lagegerechten Positionieren einzelner Brennstoffzellenkomponenten.
// Assembly line with multiaxial robot for accurate positioning of individual fuel cell components.

Schlüsseltechnologie Brennstoffzelle

Elektromobilität umfasst auch Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle, die Wasserstoff in Strom wandeln. Bei dieser Antriebsvariante erfolgt die Energiespeicherung über Wasserstoff, der in Drucktanks gespeichert wird. Der Standard für Pkw ist die 700-bar-Technologie. Dies hat zur Folge, dass das Wiederaufladen, sprich „Betanken“, nur drei Minuten dauert und die Reichweite von Brennstoffzellen-Fahrzeugen je nach Fahrzeugtyp zwischen 400 und 700 km liegt. Für den Fahrer bedeutet das eine ähnlich flexible und bequeme Nutzung seines Fahrzeugs, wie er es heute mit klassischen Antrieben gewohnt ist. Bevorzugte Anwendungen sind Reiselimousinen, Transporter und Stadtbusse – emissionsfrei.

Der Wirkungsgrad („Tank-to-Wheel“) von Brennstoffzellen ist zwar geringer als der von batterieelektrischen Antrieben, aber immer noch doppelt so hoch wie der von Verbrennungsmotoren. Die Verluste in der Brennstoffzelle haben einen wichtigen und positiven Nebeneffekt für den Nutzer: Mit der „kostenlosen“ Abwärme der Brennstoffzelle kann das Fahrzeug an kalten Tagen sehr einfach beheizt werden.

Die Kommerzialisierung von Brennstoffzellenfahrzeugen hat Fahrt aufgenommen. Im letzten Jahr wurden weltweit bereits 5.000 Fahrzeuge verkauft. Für eine breite Marktdurchdringung ist vor allem der Aufbau einer spezifischen Zulieferindustrie er-

Key technology fuel cell

E-mobility also comprises electric cars driven by fuel cells converting hydrogen into electricity. In this type of drive system, energy is stored via hydrogen which, in turn, is stored in pressure tanks. The standard for passenger cars is the 700-bar technology. Recharging, in other words fuelling the car, only takes three minutes and provides the fuel cell car with a range between 400 and 700 km, depending on the specific type of vehicle. For drivers, this means that fuel cell cars can be used as flexibly and conveniently as conventional cars. Preferred applications include long distance cars, transporters and city buses – all emission-free.

Although the tank-to-wheel efficiency of fuel cells is lower than that of battery electric drives, it is still twice the figure reached by combustion engines. Losses in the fuel cells have an important positive side effect for users: the 'free' waste heat produced by the fuel cell can be conveniently used to heat the vehicle on cold days.

The commercialisation of fuel cell cars has picked up speed. Last year, as many as 5,000 cars were sold worldwide. Broad market penetration especially requires the establishment of a specific supplier industry. The European 'Auto-StackCORE' research

förderlich. Mit dem Ziel, eine neue Generation fahrzeugtauglicher Brennstoffzellen zu entwickeln und die Grundlagen für eine europäische Serienfertigung zu legen, wurde 2013 der europäische Forschungsverbund „Auto-StackCORE“ initiiert. Das ZSW koordiniert das Netzwerk aus neun Automobilherstellern und Zulieferern sowie fünf Forschungsinstituten. Die neuen Brennstoffzellen sollen die Fahrzeuganforderungen an Volumen, Leistung, Lebensdauer und Sicherheit erfüllen sowie eine deutliche Kostenreduktion ermöglichen.

Im Rahmen von „AutoStackCORE“ konnte inzwischen die zweite Entwicklungsgeneration einer Hochleistungsbrennstoffzelle erfolgreich demonstriert werden (s. Abb. links oben). Mit einem Volumen von weniger als 30 Litern für einen Brennstoffzellenstack mit rund 100 kW Dauerleistung konnte das Team einen weltweiten Rekord verbuchen. Die Brennstoffzelle inklusive des Luftkompressors, des Wasserstoff-Rezirkulationsgebläses und der Kühlwasserpumpe passt inzwischen unter die Motorhaube und beansprucht nur noch einen ähnlichen Bauraum wie ein Verbrennungsmotor.

consortium was established in 2013 with the aim of developing a new generation of automotive fuel cells for cars and laying the foundation for series production in Europe. ZSW is in charge of coordinating the consortium, which consists of nine car manufacturers and suppliers as well as five research institutes. The new fuel cells should meet the vehicle specifications pertaining to volume, performance, durability and safety, while offering significant cost reductions.

In the context of 'AutoStackCORE', the second development generation of a high-performance fuel cell has now been successfully demonstrated (see image, above left). The team has achieved a global record with a volume of less than 30 l for a fuel cell stack providing around 100 kW continuous power. On top of this, the fuel cell including air compressor, hydrogen recirculation fan and cooling water pump now fits under the hood of a car, roughly occupying the same space as a combustion engine.



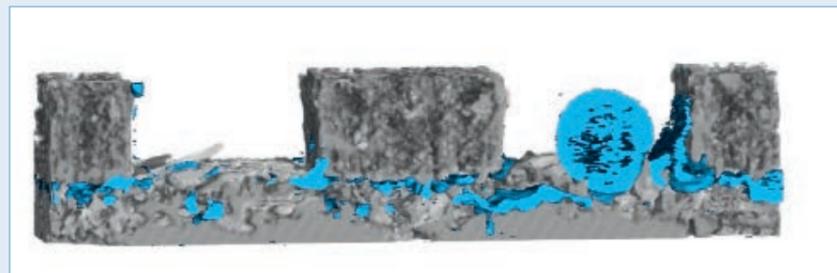
// Qualitätssicherung der Gasverteilerstrukturen mittels Weißlichtinterferometer.
// Quality assurance of the gas distribution field using white light interferometers.



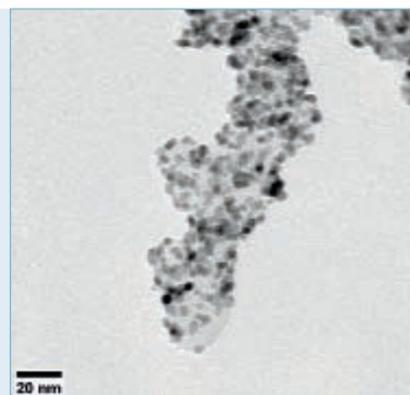
// Brennstoffzellenstack auf dem Vibrations- und Schockprüfstand.
// Fuel cell stack at the vibration and shock test rig.

Das ZSW hat mit der Optimierung der Gasverteilerstrukturen und seinem tiefen Verständnis für Wassertransportvorgänge und Elektrochemie (Beispiele s. unten) in der Zelle wichtige Beiträge zu diesem Erfolg geleistet. Bei Stromdichten von bis zu 3 A/cm^2 und einer Zelldicke von $1,2 \text{ mm}$ bedarf es einer mikrometergenauen Anpassung der Kanäle für die Luft- und Wasserstoffversorgung, um eine homogene Medien- und Temperaturverteilung über alle Betriebszustände und über lange Betriebszeiten sicherzustellen. Inhomogenitäten würden zu einer gravierenden Schädigung von Katalysator und Membran führen. Daher spielt die Entwicklung von neuen Methoden zur Qualitätssicherung bei der Herstellung und Überprüfung von Bauteilen und der hochpräzisen Assemblierung der Zellen eine wichtige Rolle. Roboterunterstützte Zellmontage oder Weißlichtinterferometer zur Prüfung der Gaskanalstrukturen sind nur zwei Beispiele (s. Abb. S. 21).

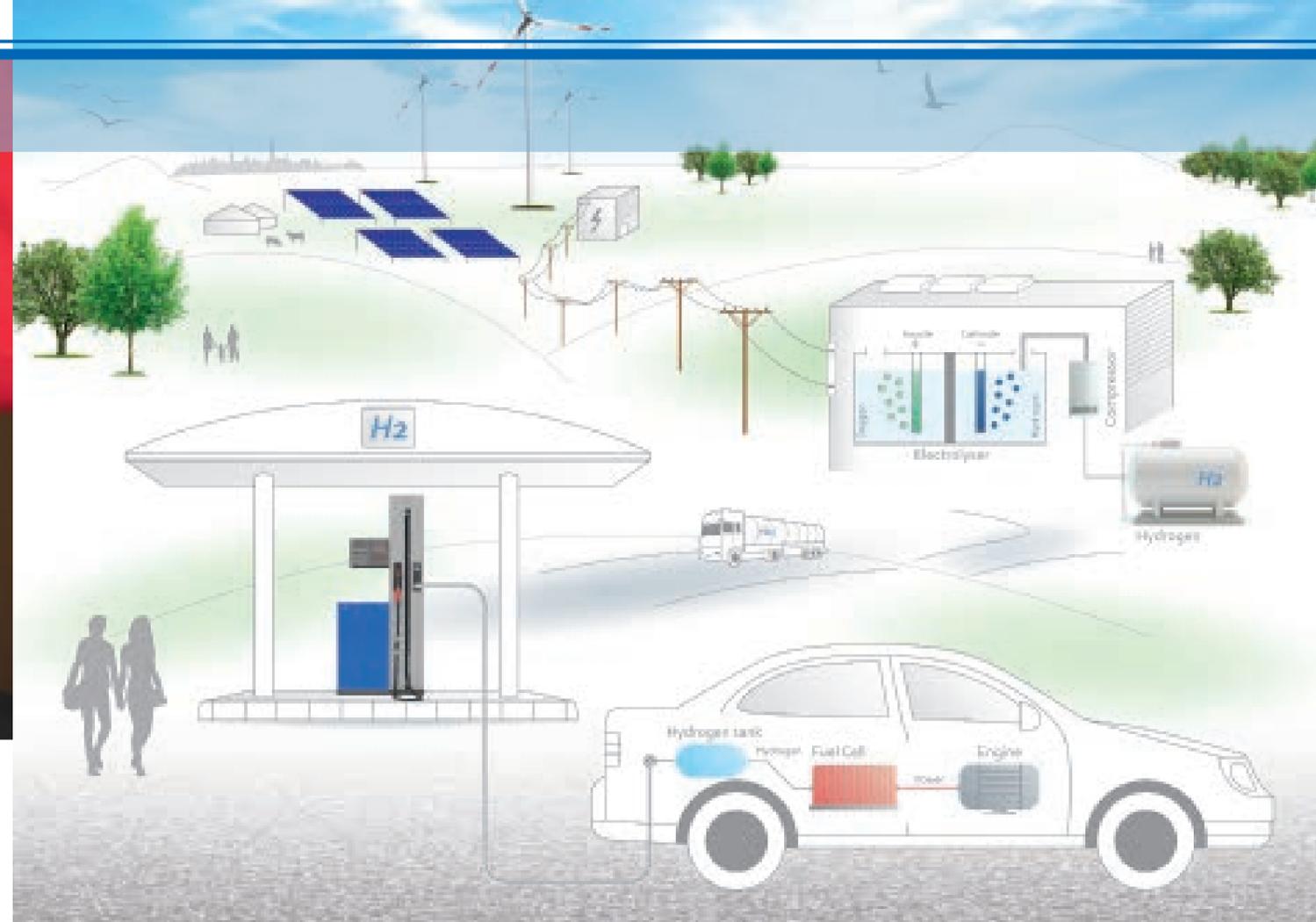
ZSW's optimisation of the gas distribution field and its in-depth knowledge of water transport processes and electrochemistry in cells have made important contributions to this success (see examples below). At power densities of up to 3 A/cm^2 and cell thicknesses of 1.2 mm , the air and water supply channels must be adjusted down to the micrometre to ensure homogeneous media and temperature distribution across all operating conditions and over long operating hours. Inhomogeneity leads to serious damage of the catalyst and the membrane. Both the development of new quality assurance methods in the manufacture and testing of components and the highly precise assembly of the cells play an important role. Robot-assisted cell assembly and the use of white light interferometers in gas canal structure testing are just two examples (see image, p. 21).



// Mittels Synchrotron-Tomographie visualisierte Wasserverteilung in einer Brennstoffzellenelektrode im Betrieb bei 1 A/cm^2 .
// Water distribution in a fuel cell electrode visualised via synchrotron tomography in operation at 1 A/cm^2 .



// Mikroskopische Aufnahme (TEM) von Platin-Nanopartikeln auf einem neuen Katalysatorträger.
// Microscopic imaging (TEM) of platinum nano-particles on new catalyst support material.



// Wie aus Wind und Sonne über Elektrolyse Wasserstoff als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge wird.
// How electrolysis can transform wind and sunlight into hydrogen for fuel cell cars.

Infrastruktur für die Elektromobilität: Strom und Wasserstoff tanken

Der typische deutsche Pkw-Fahrer nutzt sein Fahrzeug im Normalfall eine, höchstens zwei Stunden am Tag. In dieser Zeit legt er höchstens 40 km zurück. Übertragen auf ein batterieelektrisches Fahrzeug bedeutet dies, dass täglich weniger als 10 kWh Strom nachgeladen werden müssen und dafür mehr als 22 Stunden zur Verfügung stehen. Dafür reicht eine normale Steckdose zu Hause oder am Arbeitsplatz aus. Für Langstreckenfahrten und kommerzielle Nutzer wie Taxis und Paketdienste ist eine Schnellladung der Batterie wünschenswert. Dafür werden derzeit, insbesondere entlang der Autobahnen, Schnellladestationen mit Leistungen bis zu 300 kW aufgebaut. Dieses Schnellladen erfordert allerdings auch Technologien (Aktivmaterialien, Zelldesign, Batteriekühlung), die eine Schädigung der Zellen minimieren. Aber auch die Stromversorgung an der Tankstelle muss für diese Ladeleistung ausgelegt sein. Häufig ist dort der Einsatz einer Pufferbatterie sinnvoll, um damit den teuren Ausbau des lokalen Netzes zu vermeiden.

Bei der Infrastruktur zum Betanken von Brennstoffzellenfahrzeugen mit Wasserstoff ist die Situation dagegen ganz anders und vergleichbar mit dem heute gewohnten Tanken fossiler Kraftstoffe. Aufgrund der hohen Reichweite und kurzen Betankungszeit der Brennstoffzellenfahrzeuge müssen heutige Tankstellen „nur“ mit einer zusätzlichen Zapfsäule für Wasserstoff nachgerüstet werden.

E-mobility infrastructure: filling up on electricity and hydrogen

In Germany, drivers typically use their cars for no more than one or two hours a day. During this time, they usually cover less than 40 km . In terms of battery electric cars, this translates into a power requirement of less than 10 kWh , leaving over 22 hours charging time. A normal socket at home or at work is sufficient to cover this requirement. Long-distance travel and commercial use, such as taxis or delivery services, require fast battery charging. Along the motorways, fast charging stations are currently being set up with outputs of up to 300 kW . However, fast charging also requires technologies (active materials, cell design and battery cooling) that minimise cell damage. In addition, the power supply at the filling station must support the required power level. The use of stationary buffer batteries is often expedient to avoid costly expansion of local networks.

The infrastructure for fuel cell cars running on hydrogen is a different matter altogether. Here, the situation is similar to conventional fossil fuel stations. Thanks to the extensive range and short fuelling time of fuel cell cars, current filling stations 'simply' need to be retrofitted with an additional hydrogen fuel dispenser.



// Zum Laden von batterieelektrischen Autos reicht eine „normale“ Steckdose.
// A normal socket is sufficient to charge a battery electric vehicle.

Die Tankstellentechnologie für Wasserstoff steht heute noch am Anfang der Industrialisierung und erfordert noch einigen Aufwand, bis eine flächendeckende und zuverlässige Infrastruktur steht.

Ein Element aus dem Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur ist die Sicherstellung der für Brennstoffzellen erforderlichen Wasserstoffqualität. Dabei geht es nicht darum, eine möglichst hohe Reinheit des Wasserstoffs zu erzielen – das wäre viel zu teuer. Vielmehr muss sichergestellt werden, dass der Wasserstoff keine Katalysatorgifte enthält. Dazu gehören z. B. Kohlenmonoxid oder schwefelhaltige Kohlenwasserstoffe. Das ZSW hat jüngst eine neue Methode entwickelt, mit der sehr einfach und vor Ort die Qualität überprüft werden kann. Im nächsten Schritt geht es darum, diese Methode gemeinsam mit einem Industriepartner zu einem alltagstauglichen Sensor weiterzuentwickeln.

Ein weiteres Thema, das ebenfalls vom Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg gefördert wurde, ist die Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit des Betankungsvorgangs. Hierzu hat das ZSW ein mobiles Abnahmesystem entwickelt, das eine exakte Überprüfung der getankten Menge Wasserstoff erlaubt (s. Abb. unten). Damit können sowohl neue Tankstellen freigegeben, als auch bestehende Tankstellen regelmäßig überprüft und geeicht werden.



// Mobiles Messsystem zur Abnahme von H₂-Tankstellen.
// Mobile measuring system for inspecting H₂ filling stations.



// Die Betankung von Brennstoffzellenautos mit H₂ erfolgt über Druckgas an Wasserstofftankstellen.
// Filling of a fuel cell car is possible via compressed gas at H₂ filling stations.

Hydrogen fuelling station technology is still at the beginning of the industrialisation stage and requires more work and funds before a comprehensive, reliable infrastructure is in place.

When setting up the hydrogen infrastructure, it is important that the hydrogen quality required for fuel cells is guaranteed. This is not a question of maximising the hydrogen purity – which would be far too expensive. It is rather a question of ensuring that catalyst poisons are not in the hydrogen. The latter include, for instance, carbon monoxide and sulphur containing hydrocarbons. ZSW has recently developed a new method for convenient on-site hydrogen quality testing. As a next step, this method must be refined in conjunction with an industrial partner to develop a sensor that is suitable for everyday use.

A further aspect, which was also funded by the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg, is the reproducibility and measurement accuracy of the fuelling process. ZSW has developed a mobile inspection system that allows for accurate measuring of the amount of hydrogen fuel (see fig. below). This system facilitates both the approval of new fuelling stations and regular checks and calibrations of existing stations.

Erneuerbare Energien und Elektromobilität

Die Versorgung mit Strom, Wärme und Kraftstoff der mehr als sieben Milliarden Menschen weltweit basiert heute zu etwa 80 % auf fossilen Energien wie Kohle, Erdgas und Erdöl. Die Zahlen gelten in etwa auch in Deutschland und der Europäischen Union. Die intensive Nutzung verfügbarer fossiler Energieträger ist die Kernursache des Klimawandels. Unsere Mobilität heute – mit Ausnahme der Schienenfahrzeuge – basiert sogar zu 95 % auf fossilen Kraftstoffen. In Deutschland stammen nur etwa 5 % des Kraftstoffes (Biodiesel, Ethanol) aus erneuerbaren Quellen (s. Abb. S. 26 links).

Die Förderung von Erdöl ist traditionell auf wenige geografische Regionen begrenzt. Daraus resultieren enorme Abhängigkeiten, sowohl bei den Ländern, die Erdöl importieren müssen – in Deutschland sind das 98 % des benötigten Erdöls (s. Abb. S. 26 rechts) –, als auch bei den Exportländern, deren Staatshaushalte teilweise extrem vom Verkauf des Erdöls abhängen. Analog gilt dies auch für Erdgas und zunehmend auch für Kohle. In direktem Zusammenhang damit stehen die schon seit 100 Jahren andauernden globalen Konflikte um die Sicherstellung der Rohstoffverfügbarkeit.

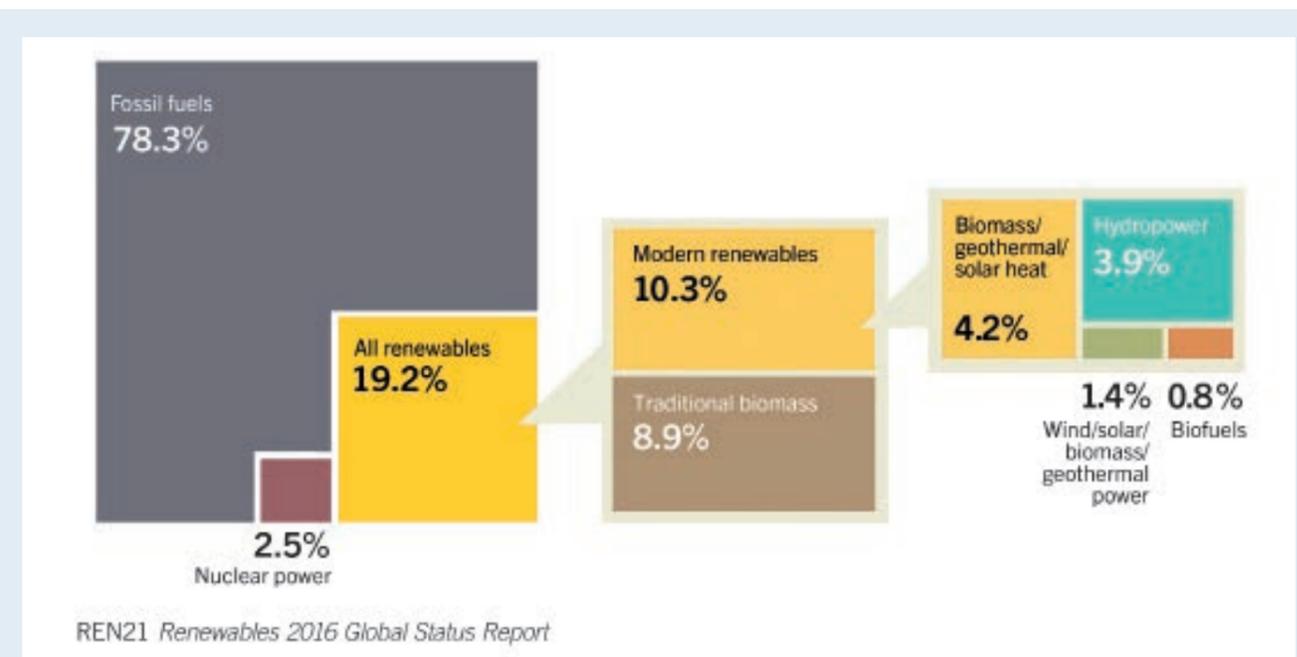
Gleichzeitig steigt der Kraftstoffverbrauch weltweit wie auch in Deutschland kontinuierlich an. Mehr als eine Milliarde Fahrzeuge, die auch ständig schwerer und größer werden und immer weitere Strecken zurücklegen, müssen mit Sprit versorgt werden. Und dann kommen künftig Länder wie Indien hinzu, die noch am Anfang des Ausbaus der individuellen Mobilität stehen.

Renewable energy and e-mobility

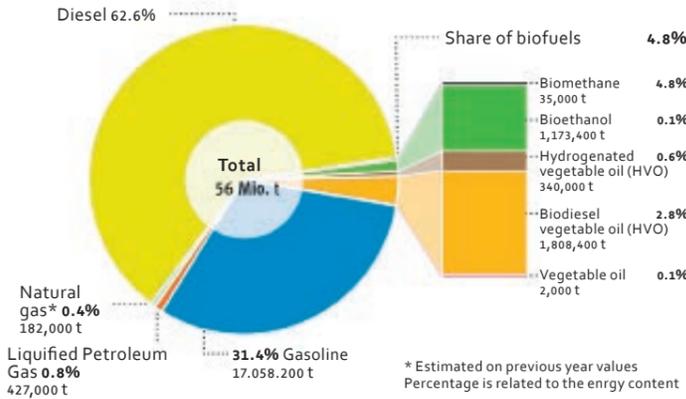
At present, almost 80% of the electricity, heat and fuel supplying our global population of more than seven billion people consists of fossil energy such as coal, natural gas and crude oil. These figures more or less also apply to Germany and the European Union. The high use of finite fossil energy sources is the key cause of climate change. At present, fossil fuels power as much as 95% of our mobility – with the exception of rail transport. In Germany as little as 5% of all fuels are based on renewable sources (biodiesel, ethanol), (see fig. p.26 left).

The production of crude oil has traditionally been restricted to a few geographic regions. This has led to huge dependencies, both among the oil-importing countries (Germany imports 98% of its crude oil demand, see fig. p.26 right) and among the exporting countries whose national budgets are extremely reliant on the sale of crude oil. The same applies to natural gas and, increasingly, coal. There is a direct connection between these dependencies and the commodity-related global conflicts that have been going on for 100 years – in order to secure the supply.

At the same time, fuel consumption is rising inexorably, both in Germany and worldwide. Over 1 billion vehicles, which are constantly increasing in weight and size and travel longer distances, require fuel. Compounding the problem are countries like India which are still at the beginning of their expansion into individual mobility.

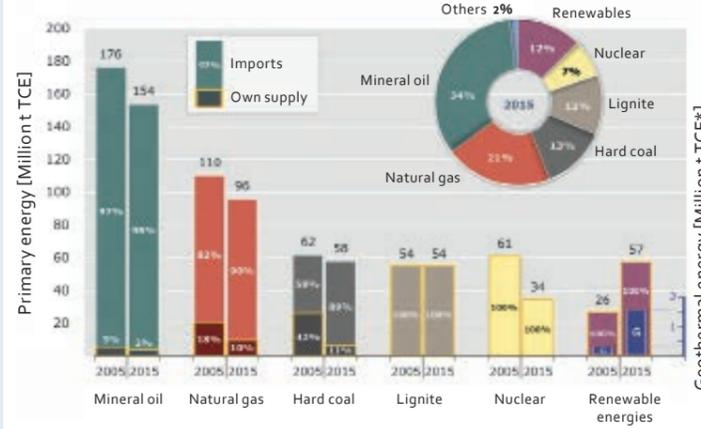


// Geschätzter Anteil erneuerbarer Energien am weltweiten Energieverbrauch 2014.
// Estimated share of renewable energy in global energy consumption, 2014.
Source: REN21 Renewables 2016 Global Status Report.



Source: FNR according BAFA, Destatis, DVFG, BMF (July 2016)

// Kraftstoffverbrauch in Deutschland 2015.
 // Fuel consumption in Germany, 2015.
 Source: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).



Source: BGR

// Importabhängigkeit und Selbstversorgungsgrad Deutschlands bei einzelnen Primärenergierohstoffen 2005 und 2015.
 // Germany's import dependency and domestic supply levels for specific primary energy resources in 2005 and 2015.
 Source: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, BGR).

Der Kraftstoffverbrauch in Deutschland ist seit 2011 um 3,3 Millionen Tonnen auf 56 Millionen Tonnen (2015) gestiegen. Gleichzeitig ist der Anteil an Biokraftstoffen von 5,6 % auf 4,8 % gesunken. Mit dem steigenden Verbrauch an fossilen Kraftstoffen nehmen auch die CO₂-Emissionen stetig zu – ganz im Gegensatz zu den Vereinbarungen, die im Dezember 2015 auf der COP21 in Paris getroffen wurden. So stiegen 2015 in Deutschland die CO₂-Emissionen um etwa 8 Millionen Tonnen, anstatt zu fallen, um die vereinbarten Klimaziele zu erreichen (s. Abb. S. 27). Diese Faktoren zusammen zeigen, wie dramatisch die Situation in Bezug auf einen klimafreundlichen Verkehr ist.

Der Einstieg in die Elektromobilität ist dafür ein zentraler Lösungsansatz, allerdings nur, wenn der Strom aus regenerativen Quellen stammt. Die von der Bundesregierung geplante eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen bis 2020 würden etwa zwei Terawattstunden (TWh) Strom pro Jahr benötigen. Das entspricht etwa 0,3 % der heutigen gesamten jährlichen Stromerzeugung oder 1 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen (2016: 191 TWh). Im Jahr 2030 werden fast 140 GW an erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen installiert sein. Sollten in diesem Jahr sechs Millionen Elektrofahrzeuge unterwegs sein, dann würden sie 4 % des prognostizierten erzeugten erneuerbaren Stromes brauchen.

Der Ausbau der Elektromobilität kann in Zukunft auch einen nennenswerten Beitrag zum effizienten Management des Stromsystems leisten, indem Stromüberschüsse aus Wind und Sonne über intelligente Ladestrategien für die Batterie im Auto oder über den einfach speicherbaren Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge genutzt werden können.

Since 2011, fuel consumption in Germany has risen by 3.3 million tonnes to 56 million tonnes (2015). At the same time, the share of biofuels has declined from 5.6% to 4.8%. CO₂ emissions are rising in line with growing fossil fuel consumption – in contrast to the agreements passed at COP21 in Paris in December 2015. In 2015, CO₂ emissions in Germany rose by about 8 million tonnes instead of falling as would be necessary to ensure that the agreed climate targets is reached (see fig. p. 27). In terms of climate-friendly mobility, the combination of these factors shows how dramatic the situation really is.

The widespread market introduction of electric vehicles is a key approach to reduce CO₂ emissions, but only if the electric power is generated by regenerative sources. The one million electric cars on German streets by 2020, as planned by the federal government, would require around two terawatt hours (TWh) of electricity per year. This corresponds to approx. 0.3% of today's total annual electricity generation or 1% of the electricity generated from renewable sources (2016: 191 TWh). In 2030, nearly 140 GW of renewable electricity generation plants will be installed. If by then six million electric cars were on the roads, these cars would require 4% of the projected renewable electricity production.

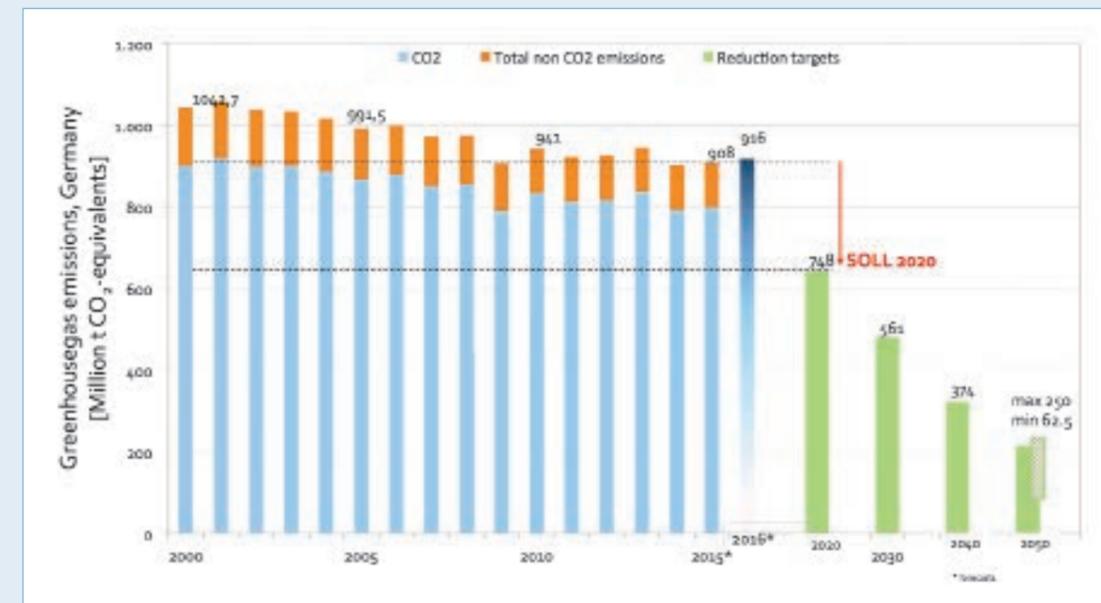
Based on the expected growth rates, electromobility will be a major contributor to an efficient energy management system by using excess power from wind and photovoltaics in combination with either smart charging strategies for car batteries or by producing easily storable hydrogen for fuel cell cars.

Das Erreichen der Ziele bei den Treibhausgasemissionen in Deutschland wird immer schwieriger (s. Abb. unten). Der von der Bundesregierung im Lichte des Klimaschutzabkommens von Paris entwickelte Klimaschutzplan bis 2050 setzt erstmals sektorspezifische Minderungsziele für die Treibhausgasemissionen für das Jahr 2030. Für den Verkehr ist das Ambitionsniveau mit einer Reduktion um knapp 40% gegenüber heute besonders hoch. Die Bedeutung des Verkehrssektors für den Klimaschutz nimmt sukzessive zu, da in anderen Sektoren wie der Stromerzeugung bereits erhebliche Fortschritte erzielt werden konnten, während die Emissionen im Verkehrssektor bislang nahezu unverändert auf dem Niveau von 1990 verharren. Auch die Europäische Union erhöht mit ihrem Vorschlag zur Festlegung verbindlicher nationaler Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021–2030 (Effort Sharing Regulation) den Druck auf die Bereiche außerhalb des Emissionshandels. Dem Verkehr kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, denn übersetzt man die CO₂-Minderungsziele in energiebezogene Ziele, so wird klar, dass im Verkehrssektor (trotz weiterhin steigender Verkehrsleistung) der Energiebedarf bis zum Jahr 2030 um ein Drittel reduziert werden muss. Das ist nur über eine zunehmende Elektrifizierung und die damit verbundenen Effizienzfortschritte möglich.

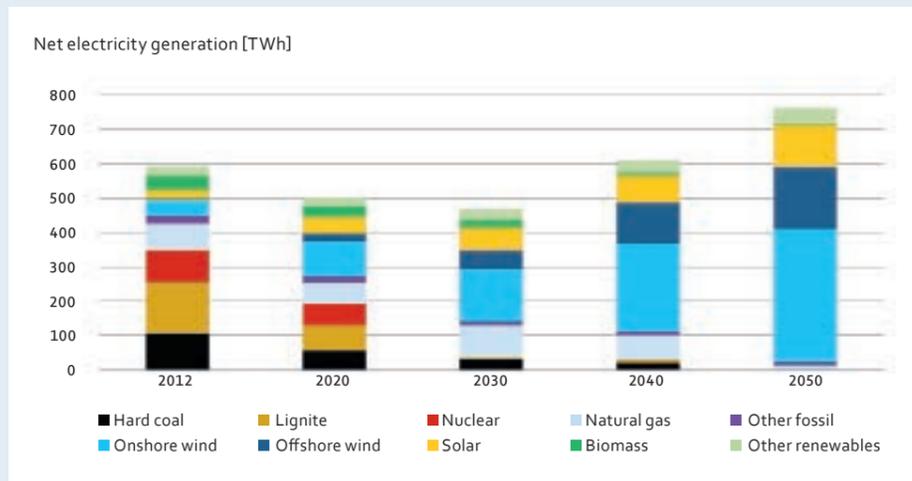
In Folge müssten im Jahr 2030 mindestens sechs Millionen Pkw über einen elektrischen Antrieb verfügen. Auch im Bereich der Nutzfahrzeuge und des Güterverkehrs ist die Verbreitung strombasierter Antriebsalternativen unumgänglich, da der Einsatz von

Meeting the targets for greenhouse gas emissions in Germany is becoming more and more challenging (see fig. below). For the first time, the German federal government's climate protection plan until 2050, which was developed in light of the Paris Climate Protection Agreement, has set sector-specific reduction targets for greenhouse gas emissions for the year 2030. In the transport sector, the target of nearly 40% reduction compared to today is particularly ambitious. The importance of the transport sector to climate protection is growing successively since significant progress has already been made in other sectors, for instance in the field of electricity generation, while emissions in the transport sector have remained almost unchanged since the 1990s. The European Union is also increasing pressure on areas outside emission trading by proposing binding annual national targets for the reduction of greenhouse gas emissions in the period 2021 to 2030 (effort-sharing regulation). Transport plays a key role in this context. If the CO₂ reduction targets are translated into energy-specific targets, it becomes clear that the energy requirement in the transport sector will have to be reduced by one third by 2030 (despite a further rise in transport capacity). This can only be achieved via increasing electrification and associated progress in the field of efficiency.

In consequence, six million cars would have to be powered by an electric drive in 2030. In the utility vehicle and goods transport fields, an expansion of electricity-based alternative drive systems



Die Treibhausgasemissionen in Deutschland steigen wieder. Entwicklung seit 2000 und Ziele für 2020 und 2030 (Quelle: Umweltbundesamt). Schätzungen für 2015 und 2016 (Quelle: AGORA Energiewende).
 // Greenhouse gas emissions in Germany since 2000 and goals for 2020 and 2030 (Source: Umweltbundesamt). Estimates for 2015 and 2016. (Source: AGORA Energiewende).



// Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 2050 (Klimaschutzszenario 95) nach Energieträgern 2012–2050, in TWh.
 // Net electricity generation 2050 (Climate Protection Scenario 95) by energy carrier 2012 - 2050, in TWh.
 Source: Öko-Institut und Fraunhofer ISI.



biogenen Kraftstoffen – die bislang dominierende Option des Einsatzes erneuerbarer Energien im Verkehrssektor – kaum über das heutige Maß hinaus steigerungsfähig ist.

Um beides, die Energiereduktionsziele und auch die Klimaschutzziele, zu erreichen, ist es zwingend erforderlich, im Verkehrssektor Strom aus erneuerbaren Energien einzusetzen. Es ist deshalb wichtig und richtig, dass der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung sehr dynamisch fortgesetzt wird.

Im Klimaschutzszenario 95 (s. Abb. oben) ist ein äußerst ambitioniertes Ausbauszenario für die erneuerbaren Energien dargestellt. Das wäre auch notwendig, um in Deutschland die in Paris (COP21) vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen. Demnach müssten 2030 326 TWh (2016: 191 TWh) oder 70 % (2016: 32 %) des erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien kommen. Über eine intelligente Verknüpfung der Energieverbrauchssektoren mit der Stromerzeugung können neue Lastverschiebepotenziale erschlossen werden, wodurch die Nutzung der fluktuierenden Erzeugung aus Windenergie und Photovoltaik erleichtert wird. An das Stromnetz angeschlossene Elektrofahrzeuge können wie stationäre Batteriespeicher intelligent ge- und entladen werden und so zur Systemstabilität beitragen. Neben der direkten Verknüpfung mit dem Stromnetz können auch Elektrolyseanlagen, die aus erneuerbarem Strom Wasserstoff und ggf. weitere chemische Energieträger erzeugen, Schwankungen in der Stromerzeugung abfangen helfen, indem sie in Abhängigkeit vom Stromangebot eingesetzt werden. Die so erzeugten chemischen Energieträger können überall dort im Verkehrssektor eingesetzt werden, wo eine direkte Stromnutzung nicht möglich ist (z. B. Schiffs- und Flugverkehr, Teile des Schwerlastverkehrs).

is also indispensable, since the use of biogenic fuels – currently the dominating option for renewable energy in the transport sector – cannot be stretched much further beyond its current scope.

Use of renewable energy in the transport sector is of crucial importance in order to reach both the energy reduction targets and the climate protection targets. It is therefore important and necessary to continue with a very dynamic expansion of renewable power generation.

Although the Climate Protection Scenario 95 (see fig. above) is very ambitious, this level of expansion of renewable energies would be essential to meet the climate targets agreed upon at COP21 in Paris. Thus, 326 TWh (2016: 191 TWh) or 70% (2016: 32%) of the electricity will need to be produced by renewable energies in 2030. Smart linking of energy consumption sectors with the electricity generation sector can open up new load shift potentials which would facilitate the use of fluctuating wind and solar energy. Similar to stationary battery storage systems, electric cars which connect to the power grid allow for smart charging and discharging and thus contribute to increased system stability. Aside from their direct link with the electricity grid, electrolysis plants which generate hydrogen and, conceivably other chemical fuels made from renewable energy can help offset fluctuations in electricity generation if their use is coordinated with the available electricity supply. The resulting chemical fuels can be utilised in all areas of the transport sector where direct electricity use is not possible (e.g. shipping and aviation and certain heavy-load vehicle transport segments).

Ausblick: Energiewandel bedeutet Strukturwandel

Der globale Strukturwandel nimmt mit all seinen Konsequenzen an Fahrt auf. Erneuerbare Energien sind auf dem Weg, die „fossile Welt“ bei der Stromerzeugung abzulösen. So wurden 2015 weltweit 285 Milliarden Dollar primär in Photovoltaik und Windenergie investiert, und das vorwiegend in Ländern wie China und den USA. Im gleichen Zeitraum lagen die Investitionen für fossile Kraftwerke nur noch bei 110 Milliarden Dollar.

Ein analoger Strukturwandel im Verkehrssektor hat gerade begonnen. Der weitreichende Ersatz von konventionellen Motoren- und Antriebstechnologien durch elektrische Antriebssysteme verlangt neues Know-how und neue Fertigungsprozesse. Neue Marktteilnehmer werden in Konkurrenz mit den bisher dominierenden Unternehmen treten und diese herausfordern. Das ZSW mit seinen umfassenden Forschungskompetenzen zu Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstoff unterstützt die Wirtschaft, damit sie den Strukturwandel erfolgreich bewältigen kann.

Outlook: energy transition means structural change

Global structural change is picking up speed – with all its associated consequences. Renewable energies are on their way to replace the “fossil world” in power generation. In 2015, USD 285 billion were invested worldwide, primarily in photovoltaics and wind energy and mainly in countries like China and the USA. In the same period, investment in fossil power stations amounted to USD 110 billion only.

Structural changes in the transport sector have also only just begun. The far-reaching replacement of conventional engine and drive technologies with electric drive systems requires new know-how and new manufacturing processes. New market players will enter into competition with today’s dominating companies and provide fresh challenges. With its comprehensive research expertise in the fields of batteries, fuel cells and hydrogen, ZSW will support the industry to successfully manage these structural changes.