



// Wege zur klimaneutralen Mobilität.  
On the way towards climate-neutral mobility.

# // Wege zur klimaneutralen Mobilität

## // On the way towards climate-neutral mobility



Deutschland hat sich mit dem Energiekonzept und dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung Ziele gesetzt, die langfristig die Einhaltung der Verpflichtungen aus dem Klimaabkommen von Paris sicherstellen sollen. Der Klimaschutzplan definiert dabei auch sektorspezifische Treibhausgasreduzierungen bis zum Jahr 2030. Besonders anspruchsvoll ist die Zielsetzung für den Verkehr. Hier soll bis zum Jahr 2030 eine Reduktion erreicht werden, die von heute aus gesehen etwa 40% entspricht – bei weiter steigender Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr.

The federal government set goals for Germany for 2050 through the energy concept and climate protection plan, aimed at ensuring compliance with the obligations of the Paris climate agreement in the long term. The climate protection plan also defines sector-specific greenhouse gas reductions in this regard up to the year 2030. Targets for transport are particularly ambitious. The aim in this respect is to achieve a reduction by 2030 of around 40% by today's metrics – in the face of further increases in traffic figures for passenger and freight transport.



### Die Transformation des Stromsystems hin zu erneuerbaren Energien im Verkehr

Klimaschutzziele im Verkehr können über drei Ansätze adressiert werden: Verkehr vermeiden, Verkehr auf klimafreundliche Verkehrsträger verlagern und Verkehr verbessern im Sinne einer technischen Optimierung und der Einführung neuer Technologien. Dies kann sowohl auf der Antriebsseite (Elektrifizierung des Antriebsstrangs) als auch auf der Treibstoffseite, insbesondere durch den Einsatz von regenerativem Strom und strombasierten gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen, erfolgen. Die konsequente Fortsetzung der Transformation des Stromsystems hin zu den Erneuerbaren ist somit eine Grundvoraussetzung für eine klimafreundliche Mobilität. Umgekehrt müssen aber auch alle Zukunftsoptionen der Mobilität berücksichtigt werden. So kann der Ausbau der Übertragungsnetze langfristig tendenziell geringer ausfallen, wenn Offshore-Windenergieanlagen vor Ort Wasserstoff für die Mobilität erzeugen. Auch die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge in Kombination mit dezentralen Photovoltaikanlagen kann dazu beitragen, den andernfalls notwendigen Ausbau stationärer Speicherlösungen zu reduzieren und somit die optimale Gestaltung eines vollständig integrierten Energiesystems der Zukunft unterstützen.

### Deutschland drohen Strafzahlungen gemäß Effort-Sharing-Regulation der EU

Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Verkehrsverbesserung sind seit Langem bekannt. Aktuelle Referenzszenarien gehen aber nicht davon aus, dass mit der bestehenden Maßnahmenintensität das Klimaschutzziel für 2030 erreicht werden kann. Daher werden zusätzliche und stärkere Interventionen ebenso erforderlich sein wie technologische Weiterentwicklungen und deren rasche Diffusion im jeweiligen Anwendungsspektrum.

Dies gilt nicht nur vor dem Hintergrund des Pariser Klimaabkommens und des Klimaschutzplans der Bundesregierung. Denn aufgrund der Effort-Sharing-Regulation der EU ist Deutschland verpflichtet, in denjenigen Sektoren, die nicht dem europäischen Emissionshandelssystem unterliegen – in erster Linie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft –, die Treibhausgasemissionen um 38% gegenüber 2005 zu reduzieren. Es muss deshalb zeitnah ein umfassendes und wirksames Maßnahmenpaket umgesetzt werden, da Deutschland im Falle einer Zielverfehlung erhebliche Strafzahlungen drohen.

### Transformation of the power system to accommodate renewable energy in the transport sector

Climate protection objectives in the transport sector can be addressed from three angles: reduce the amount of traffic, employ more climate-friendly modes of transport and implement technological improvements, such as optimisation schemes, new drive systems (electrification of power trains) and new fuel technologies. The latter mostly involves the use of regenerative electricity and electricity-based gaseous and liquid fuels. Continuing systematic efforts to transform the power system towards renewable energies is consequently a fundamental prerequisite for climate-friendly mobility. By the same token, however, all future options around mobility must be squarely on the table. In the long term, transmission grids may require less expansion if, for instance, offshore wind turbines are used to locally generate hydrogen for mobility. Also, the use of battery-electric vehicles in combination with decentralised photovoltaic systems may contribute towards reducing the demand for stationary storage solutions and thus support the optimal design of a completely integrated futuristic energy system.

### Germany is facing financial penalties according to the EU's Effort-Sharing Regulation

Measures to prevent, transform and improve emissions in the transport sector have long been established. Current referencing scenarios, however, do not predict that the climate protection objectives for 2030 can be met at the current intensity of efforts. For this reason, further and more forceful interventions are just as necessary as technological advancements and their rapid spread in applications.

The climate goals are not just set in the Paris climate agreement and the German Federal Government's climate protection plan, but also in the EU's Effort-Sharing Regulation, which obligates Germany to reduce greenhouse gas emissions by 38% from 2005 values in those sectors not subject to the European Union Emissions Trading Scheme. These are chiefly the transport, buildings and agricultural sectors. The prompt implementation of a comprehensive and effective package of measures is therefore necessary in order for Germany to avoid considerable financial penalties if targets are missed.



## // Focus



### Schärfere CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030

Darüber hinaus hat die EU weitere Maßnahmen ergriffen: So haben sich EU-Parlament und -Rat im Dezember 2018 auf CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für die Hersteller von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen für den Zeitraum von 2021 bis 2030 geeinigt (analog sind Standards für schwere Lkw und Busse vorgesehen). Danach sollen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU-Neuwagenflotte bis 2030 gegenüber 2021 um 37,5% auf einen Wert von etwa 71 g CO<sub>2</sub>/km gesenkt werden, was einem durchschnittlichen Benzinverbrauch von 3,0 Liter pro 100 km entspricht. Für leichte Nutzfahrzeuge wurde für den gleichen Zeitraum eine CO<sub>2</sub>-Reduktion um 31% festgelegt. Ohne erhebliche technische Weiterentwicklungen und eine deutliche Beschleunigung der Diffusion elektrischer Antriebe werden die Vorgaben nicht einzuhalten sein. Sie reichen allein auch nicht aus, um das Klimaschutzziel für 2030 zu erfüllen. Dafür sind die Grenzwerte nicht ambitioniert genug und außerdem können sich die Technologien nur über das Neufahrzeugsegment etablieren, denn eine Umrüstung des Fahrzeugbestands ist nicht möglich. Und aufgrund typischer Fahrzeughaltedauern von 10 bis 15 Jahren diffundieren neue Konzepte nur langsam, selbst wenn sie große Teile oder das gesamte Spektrum der Neuzulassungen umfassen.

### Ökostrombasierte Kraftstoffe als No-regret-Strategie

Angesichts dieser Gesamtsituation stellt sich die Frage, welche weiteren technischen Optionen infrage kommen, zu welchem Zeitpunkt sie zur Verfügung stehen (müssen) und welchen Beitrag sie jeweils leisten können. Während die direkte Nutzung erneuerbaren Stroms aus einer Batterie oder bei Lkw oder Bussen aus einer Oberleitung energetisch gesehen die beste Lösung darstellt, wird in Brennstoffzellenkonzepten ebenfalls der Effizienzvorteil des elektrischen Antriebs genutzt. Hier entstehen jedoch gegenüber der direkten Stromnutzung Umwandlungsverluste bei der Wasserstoffherstellung und -rückverstromung.

Daneben ist der Einsatz von strombasierten gasförmigen oder flüssigen regenerativen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren zu diskutieren, selbst wenn hierdurch keine Effizienzfortschritte in der Fahrzeugtechnologie erzielt werden können und somit vollständig auf die Treibhausgasreduktionswirkung der erneuerbaren Energien gesetzt werden muss. Die Umwandlungsverluste bei der Kraftstoffproduktion lassen diese synthetischen Kraftstoffe gegenüber elektrischen Antrieben nur als zweitbeste Option erscheinen, angesichts der kurzen verbleibenden Zeit für das Erreichen der Klimaziele ist ihre vorübergehende Nutzung jedoch für den Fahrzeugbestand von Pkw und Lkw analog zu

### More stringent CO<sub>2</sub> fleet limits for passenger vehicles and light commercial vehicles by 2030

The EU has taken further steps: in December 2018, for instance, the European Parliament and Council agreed to CO<sub>2</sub> fleet limits for manufacturers of passenger vehicles and light commercial vehicles for the period 2021 to 2030 (standards are similarly envisaged for HGVs and buses). This aims to reduce the CO<sub>2</sub> emissions of new vehicles within the EU by 37.5% from 2021 values to approx. 71g CO<sub>2</sub>/km in 2030, equivalent to an average fuel consumption of 3.0 litres per 100 km. For light commercial vehicles, a CO<sub>2</sub> reduction of 31% has been defined for the same period. Meeting these targets will not be possible without considerable technical advancements and rapid acceleration of the spread of electric drive systems. And even if they are met, the climate protection objective for 2030 will still fail. The CO<sub>2</sub> limits are not ambitious enough and, additionally, the technologies can only be established via the new vehicles segment, since converting existing vehicles is not an option. With vehicles typically in use for 10 to 15 years, the time required for new concepts to gain market traction is therefore lengthy, even if large parts of or even the entire spectrum of new registrations is included.

### Fuels based on green electricity as a "no regret" strategy

In view of this overall situation, it is necessary to assess all of the other technical options, the timeframes in which these will/must be available and the contribution each is likely to make. While the direct use of renewable electricity from a battery or, in the case of trucks or buses from overhead wiring, would seem to represent the best solution from an energy efficiency perspective, fuel cell concepts also draw on the efficiency advantages of an electric drive. However, conversion losses are involved in the production of hydrogen and its conversion back into power, making this less attractive than direct electricity use.

It is also worth discussing the use of electricity-based gaseous and liquid regenerative fuels in combustion engines, even with little prospect of achieving efficiency advances in vehicle technology. This means that, we can focus fully on the impact of renewable energies on greenhouse gas emissions. These synthetic fuels would seem to be an option of "secondary importance" behind electric drives due to conversion losses in fuel production. However, given the short time remaining to meet climate change targets, it is worth considering their temporary use along similar lines as biofuels for passenger cars and trucks.

Biokraftstoffen in Betracht zu ziehen. Zudem bestehen Anwendungsbereiche, für die sich auch langfristig noch keine sinnvollen Alternativen zu Verbrennungsmotoren mit kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen abzeichnen. Zu nennen sind der Flugverkehr, der internationale Schiffsverkehr sowie Teile des Schwerlastverkehrs auf der Straße oder Teile des Eisenbahnverkehrs. Das bedeutet auch, dass der schnelle und weltweite Auf- und Ausbau von Produktionsstätten für strombasierte regenerativkraftstoffe eine No-regret-Strategie darstellt.

### Die Bewertungskriterien nachhaltiger Alternativen im Verkehr

Der Klimaschutz ist zwar ein sehr wichtiges, jedoch nicht das einzige Kriterium, nach dem sich die Ausgestaltung der Mobilität der Zukunft richten muss. Neben weiteren ökologischen Aspekten wie Luftreinhaltung und Lärm, die auch im direkten Zusammenhang mit der menschlichen Gesundheit stehen, sind ökonomische und soziale Komponenten zu beachten. Die Bewertung nachhaltiger Alternativen im Verkehrssektor ist somit mehrdimensional und komplex. Eine einfache Antwort gibt es nicht.

Nicht zuletzt aus diesem Grund ist das ZSW im Themenfeld Mobilität der Zukunft sehr breit aufgestellt und unterstützt mit seinen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten robuste Optionen, ohne sich auf einen bestimmten Pfad festzulegen. In der Abbildung auf Seite 22 sind ausgewählte Kriterien aufgeführt, die heute für die Bewertung der Einzeltechnologien herangezogen werden. Im Bereich der Technikbewertung sind dies etwa die Energieeffizienz in der Well-to-Wheel Betrachtung von der Energiegewinnung bis zur tatsächlichen Fortbewegung, die Reichweite der Fahrzeuge oder das Vorhandensein von Infrastrukturen (Kraftstoffherzeugung und Tankstellen). Für die ökologische Bewertung stellen die Treibhausgasemissionen, die lokalen Emissionen und der Ressourcenbedarf die wesentlichen Schwerpunkte dar, während in der ökonomischen Dimension einerseits die Kostenseite der Well-to-Wheel-Betrachtung im Vordergrund steht, andererseits aber auch sehr intensiv über Fragen der Wertschöpfung, Arbeitsplätze und einen möglichen Wandel von Industriestrukturen nachgedacht wird. Hier muss der Bewertungsrahmen auch um weitere gesellschaftspolitische Aspekte erweitert werden, die es ermöglichen, Transformationsprozesse ganzheitlich zu betrachten. Das ZSW arbeitet in allen Dimensionen daran, durch technologische und konzeptionelle Weiterentwicklungen einen Beitrag zum Erfolg der Energie- und Verkehrswende zu leisten und damit die jeweilige Bewertung zu verbessern. Zu den dringlichsten Entwicklungsaufgaben zählt dabei die Beseitigung der sog. „bottlenecks“ (in der Abbildung auf Seite 22 grau hinterlegt).

Application areas also exist where no meaningful alternatives at all to combustion engines powered by carbon-containing fuels are apparent, even in the long term. Examples include air traffic, international shipping, heavy freight traffic on roads, to some degree, and parts of rail transport. This also means that the rapid and worldwide construction and expansion of production facilities for electricity-based regenerative fuels represents a "no regret" strategy.

### Assessment criteria for sustainable alternatives in transport

Climate protection is certainly a very important criterion in steering the future of mobility, although not the only one. Alongside further green considerations such as prevention of air pollution and noise, which also have a direct bearing on human health, economic and social components warrant attention. Assessing sustainable alternatives in the transport sector is therefore complex and multidimensional. There is no simple answer.

Mainly for this reason, ZSW is very broadly positioned when it comes to future mobility and supports robust options through its research and development work, without having to commit to a singular path. Selected criteria now used to assess individual technologies are presented in the figure on page 22. In terms of technical assessment, these include energy efficiency in the well-to-wheel evaluation from energy generation to effective motion, the range of vehicles and the presence of infrastructures (fuel production and fuel stations). For ecological assessment, the key focus is on greenhouse gas emissions, local emissions and resource requirements, while the economic side looks at the cost aspects of the well-to-wheel evaluation while also focussing intently on issues like added value, jobs and potential changes to industrial structures. This necessitates extending the assessment framework to include additional socio-political aspects and allow transformation processes to be holistically observed. ZSW is working at every level to contribute to the success of efforts towards the transformation of energy and transport and, consequently, to improve relevant assessments through technological and conceptual advancements. Eliminating bottlenecks is among the most pressing development tasks (highlighted in grey in the figure on page 22).



// Kriterienauswahl zur Bewertung der Einzeltechnologien hinsichtlich technologischer, ökonomischer und ökologischer sowie gesellschaftspolitischer Aspekte.

// Selection criteria for assessing individual technologies with respect to technological, economic, ecological and socio-political aspects.

Die folgenden ausgewählten ZSW-Projekte veranschaulichen die Arbeiten der ZSW-Wissenschaftler an den sogenannten „bottlenecks“, von der Erschließung von Verbesserungspotenzialen im technologischen Bereich über die ökonomische und ökologische Bewertung bis hin zum notwendigen gesellschaftlichen Transformationsprozess.

The following selected ZSW projects illustrate how ZSW scientists work to resolve bottlenecks, from exploiting development potential in the area of technology and assessing economic and ecological aspects through to the necessary social transformation process.

## Die Technologien für eine nachhaltige Mobilität

### Technologies for sustainable mobility

Voraussetzung für eine nachhaltige Mobilität sind klimaneutrale Energietechnologien, die sich erfolgreich am Markt etablieren können. Um hierfür die Grundbedingungen zu schaffen, arbeitet das ZSW in den folgenden beispielhaften Projekten an der weiteren technischen Verbesserung. Diese haben u. a. das Ziel, die Energiedichte von Batterien zu erhöhen oder die Energieeffizienz bei der Herstellung von Wasserstoff und strombasierten synthetischen Kraftstoffen zu steigern.

The prerequisites for sustainable mobility are climate-neutral energy technologies that can be successfully established in the market. To lay the necessary groundwork in this respect, ZSW is working to further improve components along technical lines in the following example projects. One aim is to increase the energy density of batteries and to boost energy efficiency in the production of hydrogen and electricity-based synthetic fuels.

#### HÖHERE REICHWEITE FÜR BATTERIEELEKTRISCHE FAHRZEUGE. Das FiveVB-Projekt 29Ah

Mit der stetig wachsenden Akzeptanz der Elektromobilität wächst auch die Anzahl von Plug-in-Hybrid- und Elektrofahrzeugen auf den Straßen. Die vollständige Marktdurchdringung wird aber nur mit leistungsfähigen, wegweisenden Innovationen bei der Zell- und Batterietechnologie gelingen. In den nächsten Jahren werden Verbesserungen bei zentralen Parametern wie Energie, Kosten, Lebensdauer und Sicherheit erwartet. Beispielsweise weisen Speichersysteme mit siliziumbasierten Anoden und Ni-reichen  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ -Kathoden eine weitaus höhere Kapazität auf und ermöglichen so Batterien mit höherer Energie.

#### GREATER RANGE FOR BATTERY-ELECTRIC VEHICLES. The FiveVB project 29Ah

The acceptance of electromobility by the consumer is steadily increasing and so the number of plug-in hybrid and full electric vehicles on the road. However, full market penetration will only be achieved with further breakthrough innovations concerning cell and battery technologies. Key parameters such as energy, costs, durability and safety are all expected to be improved in the coming years. Silicon-based anodes and Ni-rich  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  cathodes show much higher capacities than state-of-the-art ones, thus allowing for batteries with higher energy.

In dem von der EU geförderten Projekt „FiveVB“ ist es dem ZSW gelungen, leistungsstarke Anoden aus Si-Legierung und  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ -Kathoden zu entwickeln – vom Labormaßstab bis hin zum industriellen Maßstab. Zunächst wurden die neuen chemischen Zellstrukturen in gestapelten Pouch-Zellen mit 1,4 Ah demonstriert. Durch die Optimierung der Mikrostruktur der Elektroden, der Beladung und des Zellausgleichs konnten Zellen mit guter Zyklenfestigkeit, hervorragendem Leistungsverhalten und einer bemerkenswerten spezifischen Energie und Energiedichte, die 21% bzw. 15% über dem Stand der Technik von Graphit-/ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ -Zellen liegen, hergestellt werden. Schließlich gelang es mit der Produktionsforschungsanlage des ZSW in einem ersten Versuch, die neu entwickelten Elektroden in Zellen zu integrieren, die typischerweise bei Automobilanwendungen zum Einsatz kommen. Die prismatischen Hardcase-PHEV-1-Zellen liefern 29 Ah und 187 Wh/kg.

Within the scope of the “FiveVB” project, sponsored by the EU, ZSW has succeeded in developing high performance Si-alloy anodes and  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$  cathodes all the way from lab scale up to an industrial relevant environment. First, the new cell chemistries were validated in multi-layer stacked soft pouch cells of 1.4 Ah. The optimisation of the electrode microstructure, loading and cell balancing allowed manufacturing cells with good cycling stability, excellent power performance and a remarkable +21% specific energy and +15% energy density in comparison to state-of-the-art Graphite/ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$  cells. Finally, making use of the ZSW production research facilities, we successfully demonstrated a first attempt to integrate the newly developed electrodes in standard automotive cells. Our prismatic hard case PHEV-1 cells deliver 29 Ah and 187 Wh/kg.

// Am ZSW hergestellte prismatische PHEV-1-Zellen (29 Ah).  
// Prismatic PHEV-1 cells (29 Ah) produced at ZSW.



## GRÜNER WASSERSTOFF SOLL WETTBEWERBSFÄHIG WERDEN. Das Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg

Ökostrombasierter Wasserstoff ist die Voraussetzung für eine CO<sub>2</sub>-freie Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen und gleichzeitig die Basis für die Herstellung von E-Fuels. Hocheffiziente Elektrolyseure sind essenziell für die Verbesserung der Well-to-Wheel-Wirkungsgrade beim Einsatz strombasierter Kraftstoffe.

Im Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg, das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg gefördert und vom ZSW koordiniert wird, untersuchen die Wissenschaftler, wie Wasserstoff zukünftig effizienter produziert werden kann. Hierfür wurde am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein ein kommerzieller 1-MW-Elektrolyseur mit angebundener Forschungsplattform errichtet. Ein eigens hierfür entwickeltes Monitoringsystem vermisst den industriellen Anlagenteil fortlaufend über den gesamten Projektzeitraum. Darauf aufbauend erstellen die ZSW-Forscher einen Technologieleitfaden, der Verbesserungspotenziale in der Elektrolyse aufzeigt. In der angeschlossenen Forschungsplattform testet das ZSW in Reallaborumgebung einen eigenen Elektrolyseur mit neuen Komponenten. Zum Einsatz kommen etwa günstigere Elektroden und effizientere Katalysatoren, um den Elektrolysewirkungsgrad auf bis zu 85 % zu steigern. Der erzeugte Wasserstoff wird vor Ort in Trailer vertankt und kann so beispielsweise Tankstellen mit regenerativem Wasserstoff versorgen. Der Standort bietet zudem die Möglichkeit, die Abwärme aus der Elektrolyse und den Nebenaggregaten (z. B. Verdichter) künftig in einem nahegelegenen Wohngebiet zu nutzen; so lässt sich der Gesamt-Stromnutzungsgrad der Anlage noch weiter auf bis zu über 90 % steigern.

## GREEN HYDROGEN TO BECOME COMPETITIVE. Flagship project: Power-to-Gas Baden-Württemberg

Hydrogen based on green electricity is the prerequisite for the CO<sub>2</sub>-free supply of fuel cell vehicles, while at the same time the basis for manufacturing e-fuels. Highly efficient electrolyzers are essential to improving levels of well-to-wheel efficiency in the use of electricity-based fuels.

In the 'Power-to-Gas Baden-Württemberg' flagship project, which is supported by the Baden-Württemberg Ministry for Economic Affairs and is coordinated by ZSW, scientists are investigating how hydrogen can be produced more efficiently in future. This has included constructing a commercial 1 MW electrolyser with connected research platform at the Wyhlen hydropower plant on the Upper Rhine. A monitoring system developed specifically for this project measures the industrial plant section continuously throughout the full project period. Based on the results, ZSW researchers are drawing up technology guidelines illustrating potential for improvement in electrolysis. In the connected research platform, ZSW is testing its own electrolyser in a real laboratory environment with new components. For instance, more cost-effective electrodes and more efficient catalysts are used to boost the electrolysis efficiency level to up to 85%. The hydrogen produced is stored locally in trailers and is thus able to supply fuel stations, for example, with renewable hydrogen. The location also offers the future option of using the waste heat produced by electrolysis and auxiliary equipment (such as compressors) in a neighbouring residential area. This would allow the overall efficiency of power utilisation at the plant to further rise in excess of 90%.

## CO<sub>2</sub> AUS DER LUFT ALS ROHSTOFF FÜR E-FUELS. Das Projekt CORAL

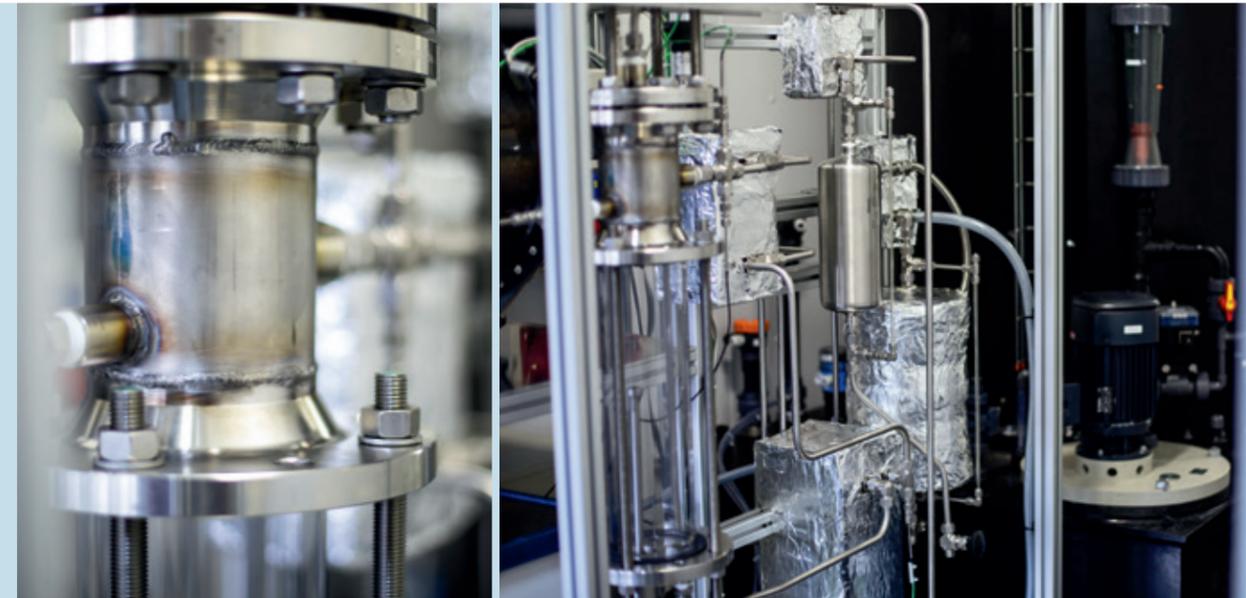
Die Erzeugung von E-Fuels besteht im Wesentlichen aus den Prozessschritten der Wasserstofferzeugung und einer nachfolgenden Kohlenwasserstoffsynthese. Als erneuerbare Kohlenstoffquelle kann dazu CO<sub>2</sub> aus der Luft eingesetzt werden, um auf diese Weise unabhängig von einer lokalen (meist fossilen) Kohlenstoffquelle nahezu beliebige Mengen E-Fuels klimaneutral herstellen zu können. Die gängigen Verfahren sind jedoch mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden. Im vom BMBF geförderten Projekt CORAL wird deshalb ein neues Verfahren entwickelt, bei dem der Energieaufwand zur CO<sub>2</sub>-Bereitstellung nicht mehr allein aus hochwertigem elektrischem Strom, sondern hauptsächlich aus Abwärmen der Elektrolyse und Synthese gedeckt werden kann. Verwendet wird ein Waschprozess mit einer wässrigen Polyethylenimin-Lösung und anschließender thermischer CO<sub>2</sub>-Desorption. Zur Ermittlung der charakteristischen Verfahrensparameter und der weiteren Entwicklung wird derzeit eine Versuchsanlage am ZSW aufgebaut.

## CO<sub>2</sub> FROM AIR AS A RAW MATERIAL FOR E-FUELS. The CORAL project

Producing e-fuels essentially involves the processing steps of hydrogen generation and subsequent hydrocarbon synthesis. CO<sub>2</sub> from the air can be used in this process as a renewable carbon source to facilitate the production of just about any volume of e-fuel in a climate-neutral process, irrespective of any local (usually fossil) carbon source. Established procedures, however, are associated with a considerable energy cost. The CORAL project funded by the BMBF is therefore developing a new procedure in which energy requirements for providing CO<sub>2</sub> are no longer covered solely by high-cost electrical power but primarily by waste heat produced by electrolysis and synthesis. A washing process is used with an aqueous polyethylenimine solution and subsequent thermal CO<sub>2</sub> desorption. A pilot plant is currently being built at ZSW to determine the characteristic process parameters and provide an experimental platform for further development.



// Forschungsplattform (links) und Elektrolyseblock (rechts) des ZSW an der Power-to-Gas Anlage in Wyhlen.  
// ZSW Research platform (left) and electrolysis block (right) at the Power-to-Gas plant in Wyhlen.



// Imine-Wäscher zur CO<sub>2</sub>-Adsorption aus der Luft.  
// Imine washer for CO<sub>2</sub> adsorption from the air.

Transformationsprozesse stehen im engen Zusammenhang zu den dafür benötigten Infrastrukturen. Können bestehende Infrastrukturen unverändert weitergenutzt werden, ist eine Umstellung in der Regel schnell zu vollziehen. Sind neue Infrastrukturen erforderlich, müssen diese zunächst entwickelt und verbreitet werden. Robustheit und Zuverlässigkeit stehen hier für die Nutzer im Vordergrund, wenn Entscheidungen für oder gegen neue Technologien getroffen werden.

Transformation processes are closely tied to the infrastructures they require. If the continued use of infrastructures is possible without change, conversion is usually quick. If new infrastructures are required, these first need to be developed and rolled out. When it comes to making a decision for or against new technologies, robustness and reliability are key factors where users are concerned.

## INFRASTRUKTUREN FÜR EINE NACHHALTIGE MOBILITÄT. Die energieeffiziente Stadt im QUARREE100

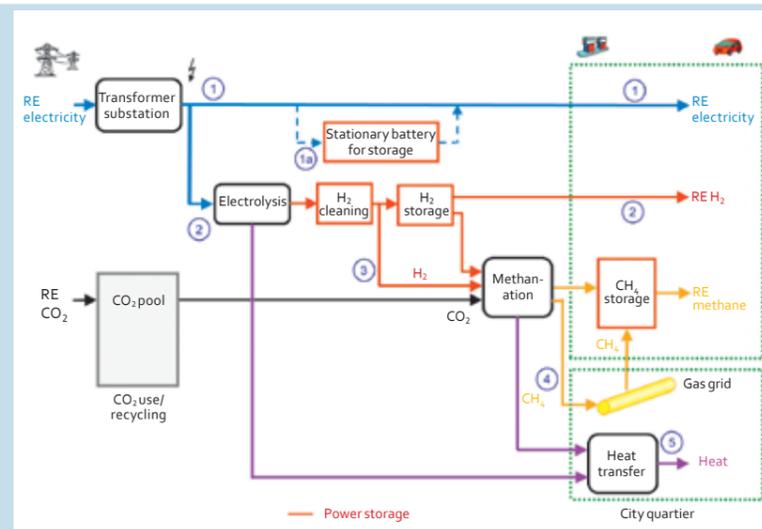
Im Zentrum des vom BMBF geförderten Projektes steht der nachhaltige Umbau des bestehenden Stadtviertels „Rüsdorfer Kamp“ der Stadt Heide in Schleswig-Holstein zur „energieeffizienten Stadt“. Ziel ist die möglichst vollständige Verwertung erneuerbarer Energien, insbesondere aus den benachbarten Windparks. Das Modell soll bundesweit auf andere Städte und Regionen übertragbar sein. Für den öffentlichen und Individual-Verkehr entwickelt das ZSW das Konzept der „Tankstelle der Zukunft“, das im Rüsdorfer Kamp demonstriert werden soll. Das Tankstellenkonzept basiert auf regenerativ erzeugtem Strom, der in drei unterschiedlichen Formen für den Verkehr bereitgestellt wird: als elektrische Energie für Elektrofahrzeuge, als Wasserstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge und in Form von Methan für den Erdgasantrieb.

Das Energiewandlungskonzept „Elektrische Energie – Wasserstoff – Methan“ wird kaskadiert genutzt, d. h. nur dann, wenn elektrische Energie nicht weiter gespeichert werden kann, wird Wasserstoff erzeugt. Methan wird nur produziert, wenn der Wasserstoffspeicher voll ist. Für dieses Projekt entwickelt das ZSW gezielt einen Elektrolyseblock mit geringerem spezifischem Energieverbrauch. Für die Methanisierung wird ein neuartiges Reaktor-konzept aufgebaut sowie ein angepasstes Gasreinigungs- und Zwischenspeicher-konzept für den Wasserstoff entwickelt.

## INFRASTRUCTURES FOR SUSTAINABLE MOBILITY. Energy-efficient city in QUARREE100

The BMBF-funded project centres around sustainably converting the existing “Rüsdorfer Kamp” quarter of Heide in the German Federal State of Schleswig-Holstein into an “energy-efficient city”. The aim is to use only renewable energies to the extent possible, in particular from neighbouring wind farms. The model is expected to be transferable to other cities and regions across Germany. For public and individual transport, ZSW is developing the “Fuel station of the future” concept, which it plans to demonstrate in Rüsdorfer Kamp. The fuel station concept is based on regeneratively generated electricity being supplied for transport in three different forms: as electrical energy for electric vehicles, as hydrogen for fuel cell vehicles and in the form of methane for natural gas engines.

The “electrical energy – hydrogen – methane” energy conversion concept follows a cascaded utilisation approach, i.e. hydrogen is generated only when electrical energy cannot be stored further. Methane is produced only when the hydrogen storage limit is reached. The project involves the targeted development by ZSW of an electrolysis block with reduced specific energy consumption. For methanation, an innovative reactor concept is being built, and an adapted gas purification and intermediate storage concept is also being developed for hydrogen.



// Das ZSW-Konzept „Tankstelle der Zukunft“ liefert kaskadiert Strom, Wasserstoff sowie das Erdgasäquivalent Methan aus regenerativen Quellen.  
// The ZSW “Fuel station of the future” concept delivers electricity, hydrogen and natural gas substitute methane from renewable sources based on a cascaded model.



// Umbau des bestehenden Stadtviertels „Rüsdorfer Kamp“ in Heide/Schleswig-Holstein zur „energieeffizienten Stadt“.  
// Conversion of the existing “Rüsdorfer Kamp” quarter in Heide/Schleswig-Holstein to an “energy-efficient city”.

## Nachhaltige Schlüsseltechnologien zur industriellen Reife führen Guiding sustainable key technologies through to industrial maturity

Neben der technischen Optimierung sind ökonomische Kriterien in der Regel entscheidend für den Einsatz neuer Technologien. Aus diesem Grund wird in den folgenden Projekten explizit an der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei der Entwicklung von Komponenten gearbeitet.

Alongside technical optimisation, economic criteria are also usually decisive when it comes to the implementation of new technologies. The following projects therefore look specifically at improving economic efficiency when developing components, whether in terms of bringing down specific costs or making use of indirect cost savings options in the course of industrialisation.

### DIE AUTO-BRENNSTOFFZELLE GEHT IN SERIE. Die Projekte AutoStack-CORE und AutoStack-Industrie

Die Brennstoffzellen-Technologie hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht, dennoch steckt die notwendige Industrialisierung noch in einem sehr frühen Stadium. In Europa fehlen bislang wettbewerbsfähige Brennstoffzellen-Stacks für Automobilanwendungen. Nur wenige europäische Hersteller können ausgereifte, hochmoderne Komponenten mit den gewünschten Spezifikationen liefern. Mit dem vom ZSW koordinierten europäischen Projektverbund „AutoStack-CORE“ konnte 2017 erfolgreich eine Hochleistungsbrennstoffzelle mit einer Leistungsdichte von mehr als  $4 \text{ kWl}^{-1}$  bei Spitzenlast demonstriert werden, die in den Motorraum eines Pkw passt. Aufbauend auf diesem Funktionsmuster soll jetzt mit dem vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur geförderten Vorhaben „AutoStack-Industrie“ bis 2021 die Basis zur Industrialisierung geschaffen werden. Der Verbund von zehn Unternehmen der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie und dem ZSW will Brennstoffzellen zur industriellen Reife bringen. Hierbei geht es darum, Prozesse und Verfahren zur Serienfertigung zu entwickeln. Im Fokus der ZSW-Wissenschaftler stehen die Entwicklung von Brennstoffzellen-Komponenten sowie einheitlicher Testprotokolle und Prüfverfahren.

### AUTOMOTIVE FUEL CELLS ENTER SERIES PRODUCTION. The AutoStack-CORE and AutoStack-Industrie projects

Fuel cell technology has come along in leaps and bounds in recent years, although the necessary industrialisation remains at a very early stage. In Europe, competitive fuel cell stacks for automotive applications have been lacking up to now. Only a handful of European manufacturers are able to supply technically mature, ultra-modern components with the required specifications. In 2017, the European “AutoStack-CORE” project group coordinated by ZSW was able to successfully demonstrate a high-performance fuel cell with a power density in excess of  $4 \text{ kWl}^{-1}$  under peak load that fits into an engine bay. Based on this functional model, the “AutoStack-Industrie” project backed by the German Federal Ministry of Transport and Infrastructure is now expected to lay the groundwork for industrialisation by 2021. The association of ten companies from the German automotive and supplier industries and ZSW intends to bring fuel cells up to industrial maturity and to develop processes and procedures for series production. ZSW scientists are looking specifically at the development of fuel cell components and standardised test protocols and procedures.



// 100-kW-Brennstoffzellenstack für den Fahrzeugantrieb.  
// 100-kW fuel cell stack for vehicle propulsion.

## DIE KOMMERZIELLE PRODUKTION VON LITHIUM-IONEN-ZELLEN. Die ZSW-Forschungsplattform

Durch den entstehenden Boom in der Elektromobilität – für 2025 werden weltweit 20 Millionen Fahrzeuge prognostiziert – bestehen aktuell große Engpässe in den weltweiten Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Zellen. Selbst um konservative Prognosen zu bedienen, werden bis zu 20 Gigafactories für Li-Ionen-Zellen benötigt. Umso bedeutender ist eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen. Hierfür ist das Beherrschen aller Herstellprozesse unter realen Produktionsbedingungen entscheidend. Denn die Qualität, Geschwindigkeit und Robustheit der Prozesse bestimmen die Kosten, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Zelle.

Um diese Zusammenhänge systematisch aufzuklären und in Deutschland zugänglich zu machen, betreibt das ZSW seit 2014 eine europaweit einmalige „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen“, d. h. Hard-case-PHEV-1-Zellen > 25 Ah, wie sie in Elektrofahrzeugen oder zur Speicherung von erneuerbarer Energie zum Einsatz kommen.

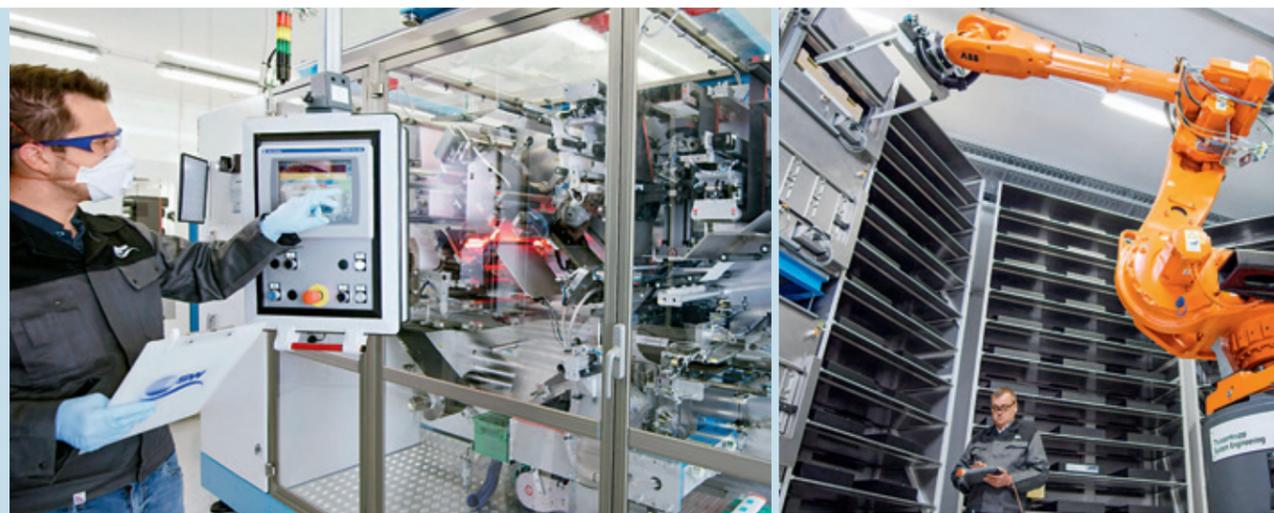
Im Rahmen von Industrie- und Forschungsvorhaben untersuchen die Wissenschaftler produktionsnahe Fragestellungen, von der Anlagenentwicklung über die Verbesserung von Einzelschritten bis zu den Qualitätssicherungsverfahren. Im Fokus stehen das Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten sowie Fragen zur Inline-Sensorik, zu Fertigungstoleranzen und kosteneffizienten Abläufen. Mit dem Aufbau der FPL wurde die Lücke beim Übergang vom Labormaßstab zur kommerziellen Serienfertigung von Lithium-Ionen-Zellen geschlossen. Mit dem Betrieb werden seither Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung in serienfähige Lösungen überführt, wie dies unter anderem in den vom BMBF geförderten Projekten STACK und QS-Zell demonstriert wird.

## COMMERCIAL PRODUCTION OF LITHIUM-ION CELLS. ZSW research platform

The current e-mobility boom, with projections of 20 million vehicles worldwide by 2025, is revealing considerable bottlenecks in global production capacities for lithium-ion cells. Even by conservative estimates, up to 20 gigafactories will be required for lithium-ion cells. Successful further development of lithium-ion cells production processes is therefore of great significance. Key to this is mastering all manufacturing processes under real production conditions since the quality, speed and robustness of the production processes determine the costs, service life and performance capability of the cells.

To systematically clarify these relationships and make them accessible in Germany, ZSW has been operating, already since 2014, a one of its kind in Europe "research platform for the industrial production of large lithium-ion cells (FPL)", i.e. hard-case PHEV-1 cells above 25 Ah as used in electric vehicles or for storage of renewable energy.

As part of industry and research projects, scientists are exploring production-related aspects from system development to improving individual steps, right up to quality assurance processes. Research is focussed on the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in terms of quality, reliability and manufacturing costs as well as issues around inline sensors, manufacturing tolerances and cost-efficient workflows. The FPL research platform has allowed gaps in transitioning from laboratory scale to the commercial series production of lithium-ion cells to be successfully closed. Its operation has since enabled insights from fundamental research to be carried over into series-capable solutions, as demonstrated in the STACK and QS-cell projects funded by the BMBF, amongst others.



// Seriennahe Zellaassemblierung am ZSW im 200-m<sup>2</sup>-Trockenraum.  
// Near-series cell assembly at ZSW in 200 m<sup>2</sup> dry room.

## Ökologische Bewertung alternativer Antriebstechnologien

### Ecological assessment of alternative drive technologies

*Um technisch ausgereifte und wirtschaftliche Lösungen erfolgreich in die Anwendung zu bringen, müssen weitere Kriterien erfüllt werden, um die Akzeptanz der Nutzer zu finden. Auch wenn die Akzeptanzbildung von sehr vielen Informationen beeinflusst wird, stehen Umweltauswirkungen der neuen Technologie besonders im Fokus. Dabei geht es nicht nur um CO<sub>2</sub>-Emissionen und Klimaschutz, sondern auch um Luftschadstoffe, Rohstoffverfügbarkeiten und Recycling. Das ZSW widmet sich auch diesen Aspekten.*

*To make successful use of technically mature and economically efficient solutions, further criteria need to be satisfied to find acceptance amongst users. Although a wide range of information has a bearing on acceptance, the environmental implications of new technology come under particular scrutiny. Concerns in this regard go beyond CO<sub>2</sub> emissions and climate protection and touch on air pollutants, raw material availability and recycling. ZSW also commits itself to these aspects.*

## FEINSTAUB UND STICKOXIDE VERMEIDEN. Das Projekt EmoGeFlott

Im Projekt „Potenziale der Elektromobilität in gewerblichen Flotten in Baden-Württemberg (EmoGeFlott)“ untersuchten die ZSW-Wissenschaftler im Auftrag des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg das Reduktionspotenzial für lokale Luftschadstoffemissionen wie Feinstaub und NO<sub>x</sub>, das durch den Ersatz von konventionellen Fahrzeugen mit Diesel- bzw. Benzinmotor durch Elektrofahrzeuge erschlossen werden könnte. Dabei wurden jeweils branchenübliche Referenzfahrzeuge mit jeweils nutzungsspezifischen Fahrprofilen für die Vergleichsrechnungen herangezogen, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Im Ergebnis können durch den Ersatz von alten Dieselfahrzeugen durch Elektrofahrzeuge in Baden-Württemberg bei leichten Nutzfahrzeugen 94 % und bei Pkw 91 % der NO<sub>x</sub>-Emissionen sowie 85 % bzw. ca. 30 % der Feinstaubemissionen reduziert werden, was den gesamtgesellschaftlichen Nutzen des Einsatzes von Elektrofahrzeugen unterstreicht.

## PREVENT PARTICULATES AND NITROGEN OXIDES. The EmoGeFlott project

The "E-mobility potential in commercial fleets in Baden-Württemberg (EmoGeFlott)" project saw ZSW scientists examine the potential to reduce local air pollutant emissions such as particulates and NO<sub>x</sub>, conceivable by replacing conventional diesel and petrol engine powered vehicles with electric vehicles, on behalf of the Baden-Württemberg Ministry of Transport. The research involved using the standard industry specifications of reference vehicles with corresponding usage-specific driving profiles for comparative calculations to achieve as realistic a result as possible. Results indicate the potential to reduce NO<sub>x</sub> emissions in Baden-Württemberg by 94% for light commercial vehicles and by 91% for passenger vehicles and particulate emissions by 85% and approx. 30% respectively by replacing old diesel vehicles with electric vehicles, underlining the overall social benefit of their use.



// Potenzialanalyse zum Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Flotten in Baden-Württemberg.  
// Potential analysis for use of electric vehicles in commercial fleets in Baden-Württemberg.

## RESSOURCEN SCHONEN. Kobaltfreie Batterien im Projekt Li-EcoSafe

Die Verfügbarkeit sicherer, umweltverträglicher und kostengünstiger Lithium-Ionen-Batterien ist eine zentrale Herausforderung für die Elektromobilität und für die Zwischenspeicherung regenerativer Energien. In allen gängigen Lithium-Ionen-Zellen wird Kobalt als Kathodenmaterial verwendet, auch in neuartigen Kombinationen. Es sorgt für die nötige Stabilität und Energiedichte sowie bei Hochleistungs-Akkus für Autos oder stationäre Speicher für die nötige Lebensdauer und Reichweite. Kobalt gilt aber als toxisch, ist auf der Erde nur begrenzt verfügbar und wird von der Europäischen Union als kritischer Rohstoff eingestuft.

Um Kobalt künftig zu ersetzen, hat das ZSW bereits 2015 im Projekt „Li-EcoSafe“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ein neues, kobaltfreies Kathodenmaterial auf der Basis von Lithium-Nickel-Manganoxid ( $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ ) entwickelt und im Labormaßstab erzeugt. Die neue Materialkombination zeigt eine sehr gute Leistungs- und Energiedichte bei hinreichender Sicherheit. Derzeit soll die Funktions- und Prozessfähigkeit des Materials durch Zell-Prototypen demonstriert werden.

Am ZSW sollen schrittweise vom Labor bis zum Industriemaßstab großformatige PHEV-1-Zellen > 25 Ah entwickelt und hergestellt werden. Hierfür sind mehrere Kilogramm Materialpulver zum Beschichten der Elektroden notwendig. Zur Entwicklung des Syntheseprozesses wurde 2018 das Syntheselabor um Reaktoren für bis zu 30 Kilogramm Materialpulver erweitert.

## PROTECTING RESOURCES. Cobalt-free batteries in Li-EcoSafe project

The availability of safe, environmentally compatible and cost-effective lithium-ion batteries is a central challenge for e-mobility and for the intermediate storage of renewable energies. Cobalt is used today in the cathode material of all common lithium-ion cells, also in innovative combinations. It ensures the necessary stability and energy density and also the necessary lifespan and range in high-performance batteries for cars or stationary storage facilities. Cobalt, however, is toxic and its availability as a raw material is limited. It has also been designated a critical raw material by the European Union.

To replace cobalt in the future, ZSW developed and produced a new, cobalt-free cathode material based on lithium-nickel manganese oxide ( $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ ) at laboratory scale already in 2015 in the „Li-EcoSafe“ project funded by the German Federal Ministry of Education and Research. The new material combination demonstrates an excellent performance and energy density with adequate safety. The functional and process capability of the material through cell prototypes are currently being illustrated.

The current aim at ZSW is to progressively develop and produce large-scale PHEV-1 cells >25 Ah from laboratory to industrial scale. This will require several kilograms of material powder for the coating of electrodes. To facilitate their production, the synthesis laboratory was expanded in an initial phase in 2018 to include reactors for up to 30 kilograms of material powder.



// Synthesereaktoren am ZSW zur Herstellung von bis zu 30 Kilogramm Aktivmaterial.  
// New synthesis reactors at ZSW for producing up to 30 kilograms of active material.

## Die Akzeptanz der Energiewende in der Gesellschaft

### Acceptance of energy transition in society

#### AUF DEM WEG ZUR GESELLSCHAFTLICHEN TRANSFORMATION. Das Projekt ENavi

Das Erreichen der Klimaschutzziele bedarf nicht nur des Einsatzes neuer Technologien und damit einer technologischen Transformation, sondern eines grundlegenden gesellschaftlichen Wandels. Wie dieser gestaltet werden kann und muss, wird im Rahmen des vom BMBF geförderten Kopernikus-Projektes ENavi zur Systemintegration untersucht. Im Mittelpunkt steht die Aufgabe, Transformationsprozesse zu modellieren und ihre intendierten und nicht-intendierten direkten und indirekten Wirkungen bzw. Folgen zu erfassen und zu analysieren. Ziel ist es, nachhaltige Entwicklungspfade zu identifizieren und Politikinstrumente zu entwickeln, deren Implementierung eine Umsetzung der Pfade erlaubt.

Das ZSW beteiligt sich hieran u. a. mit einem agentenbasierten Modell zur Analyse der Diffusion von Elektrofahrzeugen. Hiermit kann die Wirkung von Politikmaßnahmen ex ante, d. h. vor deren Implementierung, prognostiziert werden. Über die Vorab-Folgenabschätzung und Modifikation der Politikinstrumente ebenso wie durch den im Rahmen des Projekts stattfindenden transdisziplinären Diskurs, d. h. die Einbindung wichtiger Vertreter der unterschiedlichen gesellschaftlichen Gruppen, kann eine deutlich höhere Wirksamkeit der Maßnahmen erzielt werden. Dies wiederum kann das Vertrauen in die politische Umsetzung der Energiewende und damit deren Akzeptanz in der Bevölkerung stärken. Dies ist deshalb so wichtig, weil der eingangs beschriebene notwendige Transformationsprozess nur gemeinsam mit und durch die Gesellschaft gelingen kann.

#### EN ROUTE TO SOCIETAL TRANSFORMATION. ENavi project

Achieving climate change targets not only requires the use of new technologies and thus a technological transformation, but also a fundamental shift in society. How this can and must be brought about is looked at in the ENavi Kopernikus project for system integration, backed by the German Federal Ministry of Education and Research. The work centres around modelling transformation processes and recording and analysing their intended and unintended direct and indirect implications and consequences. The aim is to identify sustainable development paths and to develop political tools that can be used to enable such paths to be taken.

ZSW is involved with an agent-based model for analysing the spread of electric vehicles, among other contributions. The model allows the implications of political measures to be predicted ex ante, i.e. before being implemented. Much greater efficacy can thus be achieved by means of this advanced impact assessment and the modification of political tools and, similarly through transdisciplinary debate, i.e. involving key representatives of societal groups. As a result, improved trust in the political implementation of the energy transition and, consequently, its acceptance among the population at large is expected. This is particularly crucial given that any success in implementing the essential transformation process described at the outset rests upon efforts with and through society.

*Das ZSW unterstützt die notwendigen Prozesse auf dem Weg zur Mobilität der Zukunft auf sehr unterschiedliche Weise, jedoch immer mit dem Ziel, technische Lösungen zu entwickeln, die ökonomisch und ökologisch tragfähig und gesellschaftlich akzeptiert ein langfristig klimaneutrales und nachhaltiges Energie- und Mobilitätssystem gestalten.*

*ZSW supports the necessary processes en route to future mobility in a variety of different ways, however with a unifying purpose: to develop technical solutions aimed at delivering a long-term climate-neutral and sustainable energy and mobility system that enjoys the acceptance of society and boasts favourable economical and environmentally sustainable credentials.*



// Der für eine erfolgreiche Energiewende notwendige gesellschaftliche Wandel steht im Mittelpunkt des Kopernikus-Projektes ENavi.  
// The necessary societal shifts in order to successfully achieve the energy transition is the focus of the ENavi Kopernikus project.

---

**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](http://www.zsw-bw.de)

[info@zsw-bw.de](mailto:info@zsw-bw.de)



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