


// **Schwerpunktbericht**
Energie als System betrachtet
Focus Report
Energy considered as a system



// Energie als System betrachtet Energy considered as a system



Denn die heutigen Energiewandlungs- und -bereitstellungstechnologien basieren auch in Deutschland noch zu rund 80 % auf dem Einsatz kohlenstoffhaltiger fossiler Brennstoffe. In der Stromerzeugung sind dies vor allem Braunkohle, Steinkohle und Erdgas, in der Wärmebereitstellung dominieren Erdgas und Heizöl, im Mobilitätssektor kommen nahezu ausschließlich die mineralölbasierten Kraftstoffe Benzin und Diesel zum Einsatz. Der erforderliche Transformationsprozess umfasst jedoch weit mehr als die technische Dimension, denn er muss nicht nur ökonomisch tragfähig gestaltet, sondern auch aktiv von der Gesellschaft getragen werden. Um das erforderliche Vertrauen in eine Energieversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien zu schaffen, sind Transparenz und die Bereitstellung fundierter, neutraler und verständlicher Informationen von großer Bedeutung.

Das Fachgebiet Systemanalyse leistet dafür an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik bzw. Gesellschaft einen wichtigen Beitrag. So konnte beispielsweise über die Anwendung des im Rahmen des Monitoringprozesses „Energie der Zukunft“ von der Expertenkommission entwickelten Ansatzes der energiewirtschaftlichen Gesamtrechnung das Argument, dass die Energiewende die Volkswirtschaft über Gebühr belastete, faktenbasiert entkräftet werden. Gerade in Baden-Württemberg hat die im Rahmen des Projektes „Monitoring der Energiewende“ aufgebaute breite und transparente Informationsbasis sehr zur Versachlichung der Diskussion beigetragen, sodass nunmehr ein konstruktiver Dialog möglich ist.

Die technologischen Möglichkeiten zur klimaneutralen Stromerzeugung sind vielfältig, die industrielle Umsetzung und die damit verbundene Kostenreduktion in vollem Gange. So entstehen vielversprechende neue Wirtschaftszweige für Energieeffizienztechnologien und dezentral orientierte regenerative Stromerzeugungsanlagen. Es besteht heute kein Zweifel mehr daran, dass mittel- bis langfristig eine vollständige Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien möglich ist. Die tragenden Säulen werden die Windenergie an Land und auf See sowie die Photovoltaik sein, während die Wasserkraft, die Biomasse und die Tiefengeothermie ihrem Potenzial entsprechend flankierende Beiträge liefern werden. Diese sind deshalb nicht gering zu schätzen, weil sie nicht fluktu-

After all, even in Germany about 80% of the current energy conversion and supply technologies are still based on the use of carbon-containing fossil fuels. In the electricity generating sector, these are mainly lignite, hard coal and natural gas. Natural gas and heating oil, on the other hand, dominate in the heating sector, while mineral oil-based petrol and diesel fuels are almost exclusively used in the mobility sector. However, the required transformation process involves far more than the technical aspects, as it must not only be economically viable but also actively supported by society. In order to create the necessary confidence in an energy supply based on renewable energies, transparency and the provision of sound, neutral and comprehensible information are very important.

As an interface between science, policy and society, the Systems Analysis research department provides an important contribution in this regard. For example, based on facts and by using the energy industry-based economic accounting approach developed by the Expert Commission as part of the “Energy of the Future” monitoring process, the argument that the energy transformation burdens the economy through fees has successfully been dispelled. Especially in Baden-Württemberg, the broad and transparent information basis developed in the “Monitoring the energy transition” project has greatly contributed to ensuring a more objective discussion, so that a constructive dialogue is now possible.

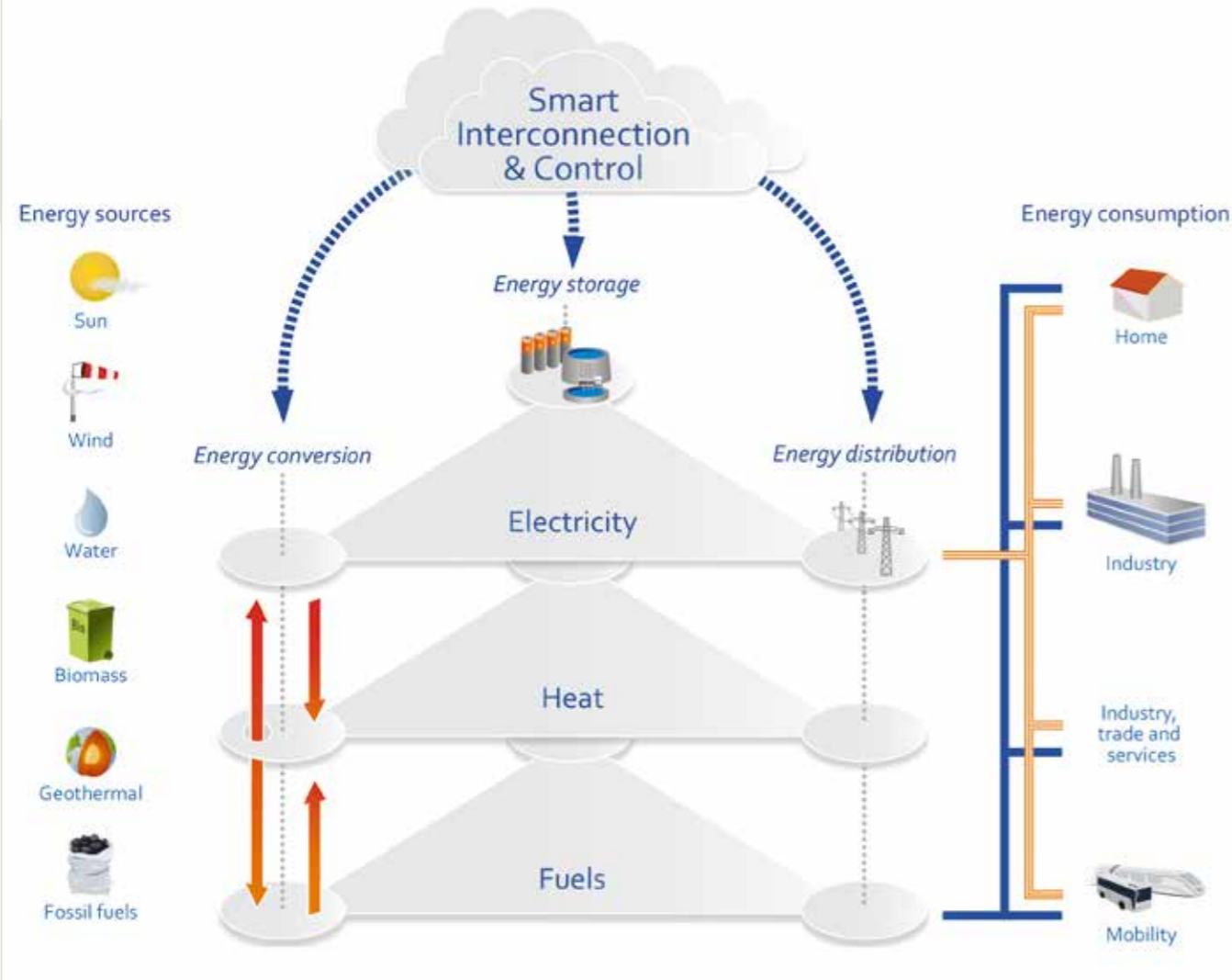
There are diverse technological possibilities for generating climate-neutral electricity, and their industrial implementation and the associated reductions in costs are now well underway. For instance, promising new economic sectors are being created for energy efficient technologies and decentralised renewable electricity generation systems. Today, there is no longer any doubt that an electricity supply completely based on renewable energies is possible in the medium to long term. The cornerstones will be onshore and offshore wind energy together with photovoltaics, while hydropower, biomass and deep geothermal energy will provide supporting roles in accordance with their respective potential. These, however, should not be underestimated, because they do not produce intermittent energy but largely constitute controllable electricity generation technologies.

// Sektorkopplung – Voraussetzung für Energiewende und Klimaschutz

Kommenden Generationen ähnliche Lebensbedingungen zu hinterlassen, wie sie heutige Generationen vorgefunden haben, ist nur mit konsequentem und effektivem Klimaschutz möglich. Das haben auch die Diskussionen und Beschlüsse auf der Weltklimakonferenz Ende 2015 in Paris bestätigt. Dort gelang es, einen Klimavertrag zu schließen, der die globale Erwärmung auf unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten begrenzen soll, wenn möglich sogar auf 1,5 °C. Nach dieser internationalen Einigung muss auf nationaler Ebene die Umsetzung folgen. Das ist nur über einen systematischen Umstieg auf erneuerbare Energien möglich, womit wiederum vielfältige Transformationsprozesse verbunden sind.

// Sector coupling – a prerequisite for the energy transition and climate protection

It will only be possible to leave future generations with living conditions similar to those found by current generations through providing consistent and effective climate protection. This has been confirmed by the discussions and decisions taken at the World Climate Conference, which was held at the end of 2015 in Paris. There a climate treaty was successfully negotiated that limits global warming to within 2 degrees Celsius of pre-industrial levels and if possible, 1.5 degrees. Now that this international agreement has been reached, its adoption needs to follow at the national level. This is only possible by systematically converting to renewable energies, which in turn incurs diverse transformation processes.



ierend erzeugen, sondern zumindest zum Großteil regelbare Stromerzeugungstechnologien darstellen. Sie bieten somit einen wichtigen Teil der zukünftig erforderlichen Systemflexibilität.

Den heutigen Energiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser mit erneuerbaren Energien zu decken, erscheint indes schwierig. Den heutigen Bedarf an chemischen Energieträgern allein aus biomassebasierten Ersatzbrennstoffen zu decken, ist aufgrund von deren beschränkten Potenzialen sogar unmöglich. Der Einsatz von Solarthermie, oberflächennaher und tiefer Geothermie sowie Umweltwärme kann Abhilfe schaffen, verlangt aber neue Lösungen der Wärmeversorgung z. B. mit Nahwärmenetzen. Die Nutzung von Umweltwärme und oberflächennaher Geothermie erfordert den Einsatz von elektrischen Wärmepumpen. Das bedeutet neue Stromanwendungen, die wiederum mit erneuerbarem Strom zu versorgen sind. Auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen können klimaneutral betrieben werden, wenn ihre Brennstoffe entweder biogenen Ursprungs sind oder synthetisch über Elektrolyse und ggf. Methanisierung auf Basis von erneuerbarem Strom erzeugt wurden. Zusammen mit entsprechenden Anstrengungen zur Reduktion des Wärmebedarfs erscheint auch der Wärmebereich klimaneutral darstellbar, sofern eine stärkere Verknüpfung mit dem Stromsektor stattfindet.

Die größte Herausforderung für die Einhaltung der Klimaziele besteht im Mobilitätssektor, der heute nahezu vollständig vom Einsatz fossilbasierter Kraftstoffe abhängt. Ein Ersatz durch

They therefore provide an important part of the system flexibility required in future.

Covering the current energy demand for providing space heating and hot water with renewable energy appears, however, to be more difficult. It is even impossible to meet the current demand for chemical energy carriers using solely biomass-based alternative fuels because of their respective limited potential. The use of solar thermal energy, shallow and deep geothermal energy as well as environmental heat can help, but requires new heating supply solutions, for example with district heating networks. The use of environmental heat and shallow geothermal energy requires the use of electric heat pumps. This means new power applications, which in turn need to be supplied with renewable electricity. Cogeneration plants can also be operated carbon-neutrally if their fuels are either of biogenic origin or are synthetically generated by means of electrolysis and, possibly, methanisation using renewable electricity. Together with corresponding efforts to reduce the heat demand, it therefore seems that the heating sector could also be made more climate neutral provided that a stronger link is made with the electricity sector.

The greatest challenge for meeting the climate targets lies in the mobility sector, which is currently entirely dependent on the use of fossil-based fuels.

// Focus

biogene Kraftstoffe ist bedingt durch Potenzialgrenzen, auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten, bislang nur zu einem sehr kleinen Teil möglich. Die Elektromobilität – mit batterieelektrischem ebenso wie mit Brennstoffzellenantrieb – bietet eine Alternative. Strombasierte, CO₂-neutrale Kraftstoffe können als Übergangslösung wie heutige fossilbasierte chemische Energieträger (flüssig und gasförmig) in effizienten Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Hier zeigt sich somit auch für den Mobilitätssektor zukünftig eine enge Verzahnung mit dem Stromsektor.

Bislang wird die Kopplung der Sektoren jedoch ausschließlich als Verwertung möglicher Stromüberschüsse definiert. Dieser Blickwinkel ist angesichts der Anforderungen des Klimaschutzes zu eng, da allein die Kopplung der Sektoren die Chance bietet, das Energiesystem insgesamt regenerativ zu gestalten. Hierzu muss jedoch der Bedarf dieser Sektoren an erneuerbarem Strom sowohl in der direkten Anwendung als auch als Rohstoff für die Produktion strombasierter Bren- und Kraftstoffe berücksichtigt werden.

Die Betrachtung der Energiewelt der Zukunft als Gesamtsystem ermöglicht es, alle Nutzenergieformen jeweils am richtigen Ort und zur richtigen Zeit kosteneffizient bereitzustellen. Die Schnittstellen zwischen den bisher überwiegend getrennt agierenden Systemen sind Energiewandler, Wärmepumpen, Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen oder Infrastrukturen wie Ladesäulen, Wärmenetze und -speicher usw.

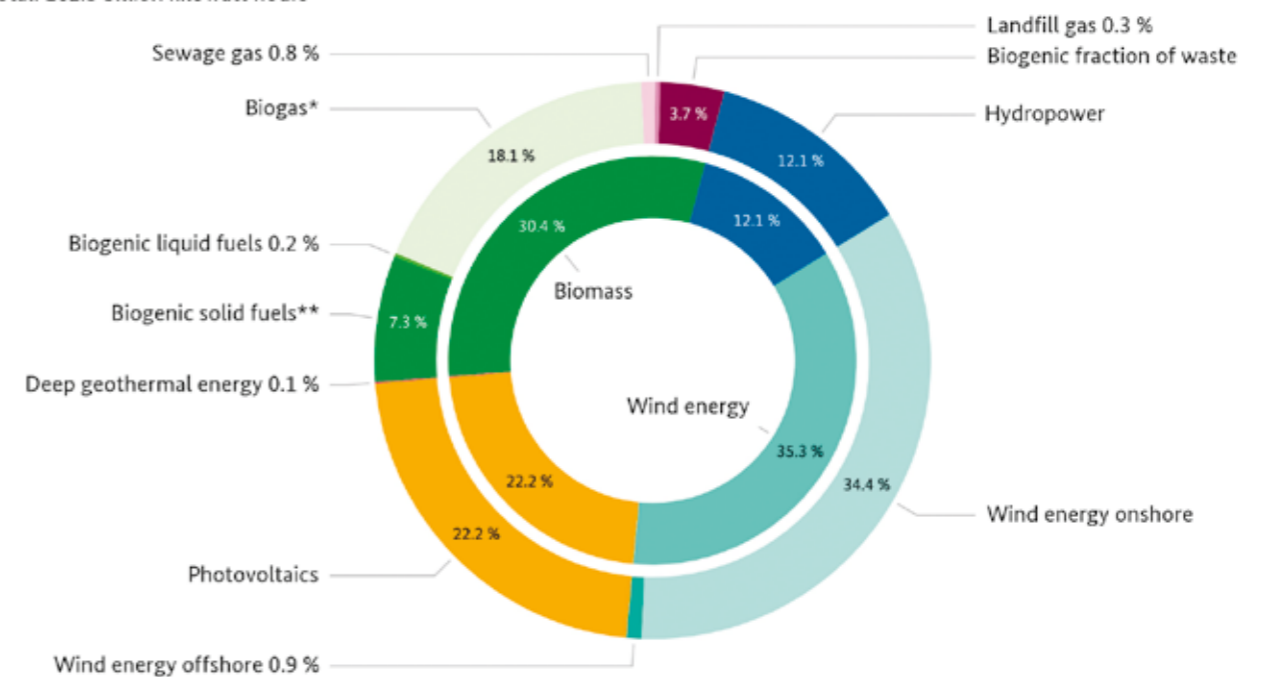
Until now, it has only been possible to replace these with biofuels on a very small scale, since these offer only limited potential, including with regard to sustainability aspects. Electromobility – powered by electric batteries or fuel cells – offers an alternative. Electricity-based, CO₂-neutral fuels can be deployed like current fossil-based chemical fuels (liquid and gaseous) as a temporary solution in efficient combustion engines. This shows that the mobility sector will also be closely linked with the electricity sector in future.

To date, however, the coupling of the sectors has been solely defined in terms of recycling possible electricity surpluses. Given the climate protection requirements, this point of view is too narrow, however, since it is only through coupling these sectors that there is any possibility for making the overall energy system renewable. To achieve this, however, it is necessary to consider the renewable electricity required by these sectors both for direct applications as well as a raw material for producing electricity-based fuels.

Considering the future energy world as a holistic system enables all useable energy forms to be provided cost-effectively in the right place and the right time. The interfaces between the previously mostly isolated systems are provided by energy converters, heat pumps, CHP plants, fuel cells and infrastructure such as charging stations, heating networks and storage systems, etc.

Renewables-based electricity generation in Germany 2014

Total: 162.5 billion kilowatt hours



* incl. biomethane, ** incl. sewage sludge; BMWi based on Working Group on Renewable Energy-Statistics (AGEE-Stat); as at December 2015; all figures provisional



// Focus

// Blockheizkraftwerk.
// Heat and power plant.

Neben der Bereitstellung geeigneter Energiewandler ist die zeitliche und räumliche Abstimmung der Energieströme notwendig. Da die Hauptenergiequellen der Zukunft, Wind und Sonne, fluktuierend Strom erzeugen, muss das System ein Höchstmaß an Flexibilität aufweisen, was einerseits durch eine zeitliche Verschiebung des Abrufs von elektrischer oder thermischer Energie (Lastverschiebung) und andererseits durch eine geeignete Pufferung in Speichern für Strom, Wärme und chemische Energieträger sowie Infrastrukturen zur Wandlung in eine speicherfähige Form ermöglicht wird. Um das Verschiebungspotenzial auch zwischen den Sektoren maximal nutzen zu können, müssen die Einzelkomponenten entsprechend intelligent vernetzt werden. Das ist nur möglich, wenn sich die Digitalisierung der Energiewende dynamisch fortsetzt. Hierzu zählen beispielsweise die Messung, Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Daten, wenn möglich in Echtzeit, die Entwicklung geeigneter Steuerungssignale und deren realer Einsatz.

// Kopplung Strom ↔ Wärme

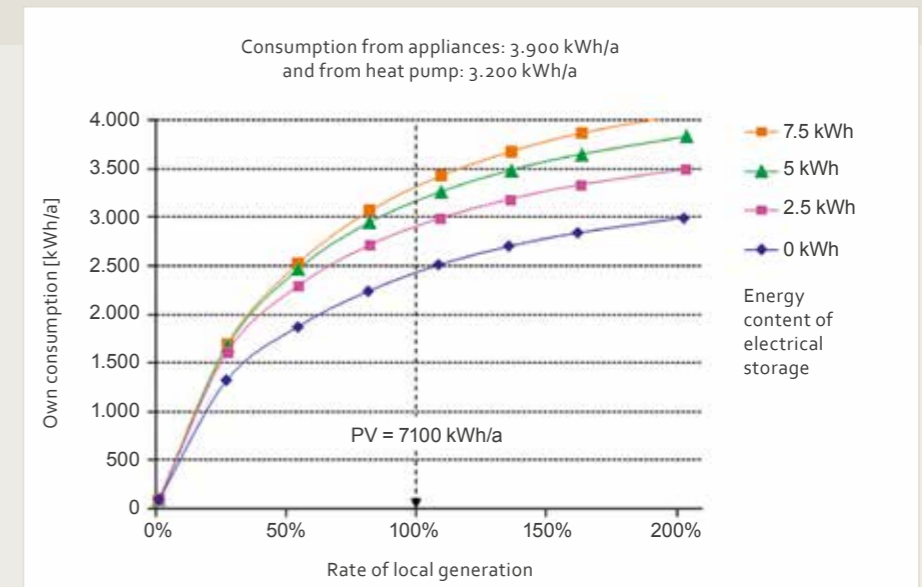
Die Verzahnung der beiden Sektoren Strom und Wärme existiert bereits seit Langem durch die etablierten Technologien der konventionellen Kraft-Wärme-Kopplung hauptsächlich auf der Basis fossiler Brennstoffe. Diese nutzen seit jeher den Vorteil, bei vergleichsweise geringem Brennstoffbedarf sowohl Strom als auch Wärme bereitstellen zu können und damit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes zu leisten. Künftig sollen vor allem kleinere Anlagen, sogenannte Blockheizkraftwerke, eine größere Rolle bei der Versorgung von Gewerbe- oder Wohngebieten oder auch von einzelnen Gebäuden spielen. Zusammen

In addition to providing suitable energy converters, the temporal and spatial coordination of the energy flows is also necessary. Since the main energy sources of the future – wind and solar energy – generate intermittent power, the system must have a high degree of flexibility. This will be enabled, on the one hand, by shifting the retrieval of electrical or thermal energy (load shifting) and, on the other, by providing not only suitable buffering in storage systems for electricity, heat and chemical energy carriers but also infrastructure for converting the energy into a storable form. In order to also maximise the shift potential between the sectors, the individual components need to be connected in an accordingly smart manner. This is only possible if the digitisation of the energy transition continues dynamically. This includes, for example, the measurement, recording, processing and provision of data – if possible in real time – and the development of appropriate control signals and their use in practice.

// Coupling electricity and heat

The electricity and heating sectors have already been coupled for a long time through the established use of cogeneration technologies based mainly on fossil fuels. These have always had the advantage of being able to produce both electricity and heat with comparatively low fuel consumption and thereby make an important contribution to reducing CO₂ emissions. In future, in particular smaller-scale combined heat and power plants will play a greater role in the provision of industrial and housing estates, or even individual homes.

// Eigenverbraucher Strom in Abhängigkeit von der Auslegung der PV-Anlage und des Energieinhalts einer lokalen Batterie. Angenommen ist ein gut gedämmtes Haus mit rund 140 m² Wohnfläche sowie einem Strombedarf für Haushaltsgeräte von rund 3.900 kWh/a.
// Self-generated electricity in accordance with the design of the PV system and the energy content of a local battery. This is based on a well-insulated house with around 140 m² of living space and an electricity demand for household appliances of around 3,900 kWh/a.



können sich die Einzelanlagen zu einem sogenannten Schwarm zusammenfügen, der Strom bedarfsgerecht erzeugt und anbietet. Um dieses Flexibilitätspotenzial für den Stromsektor ebenso wie das Treibhausgasreduzierungs-potenzial der gekoppelten Erzeugung optimal nutzen zu können, sind Wärmespeicher und -netze in entsprechender Dimensionierung zwingend erforderlich. Auch elektrische Wärmepumpen und erneuerbare Wärmequellen wie Solarthermie, Umweltwärme, oberflächennahe und Tiefengeothermie sind in derartigen Systemen einsetzbar.

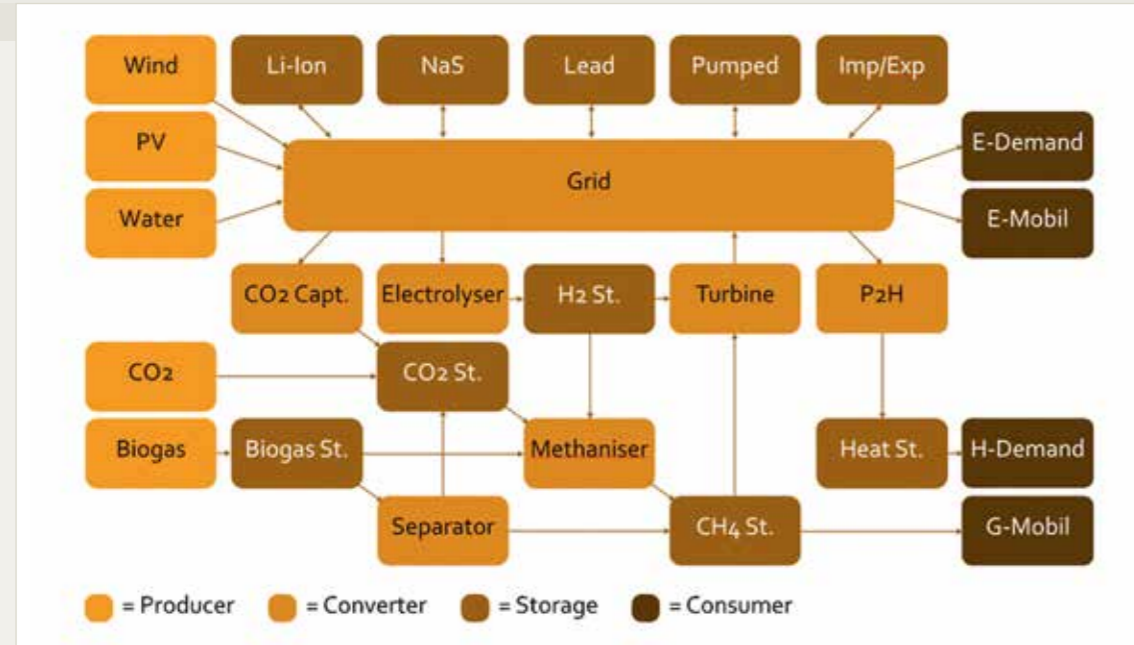
Für Verbraucher mit einer eigenen Photovoltaik(PV)-Anlage ist die Wärmebereitstellung über eine Wärmepumpe besonders effizient. Ein thermischer Speicher hilft, einen möglichst hohen Anteil des eigenen Wärmebedarfs aus Umweltwärme unter Nutzung des selbst erzeugten Stroms aus der PV-Anlage zu decken. Mit einem elektrischen Speicher lässt sich über Tag erzeugte elektrische Energie in den Abendstunden nutzen. Studien des ZSW zeigen, dass sich so in einem modernen Einfamilienhaus über das Jahr verteilt rund 50 % des Wärme- und Strombedarfs durch Solarstrom vom eigenen Dach decken lassen. Im Beispiel aus dem Bild oben ist dieser Wert bei einer PV-Anlage erreicht, die im Jahr rund 9.200 kWh/a erzeugt, bei einem Strombedarf für Haushaltsgeräte und Wärmepumpe von insgesamt 7.100 kWh/a. Dann werden rund 3.550 kWh/a vom eigenen Dach und dieselbe Menge vom Netzbetreiber während Zeiten geringer Sonneneinstrahlung bezogen. Die verbleibenden 5.650 kWh/a an PV-Strom zu Zeiten hoher Sonneneinstrahlung abzüglich der Verluste der Anlagentechnik werden vom Netzbetreiber abgenommen und stehen anderen Kunden als Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung.

Sonne und Wind ergänzen sich in Deutschland sehr gut. Die optimale Deckung des Bedarfs hängt u. a. von der Größe des Betrachtungsraums ab. Daher ist neben der Optimierung der lokalen Installation auch immer das Gesamtsystem im Blick zu behalten. Hierzu hat das ZSW das Software-Tool P²IONEER entwickelt, mit dem die optimale Dimensionierung von regenerativen

Together, the individual systems can combine to form a fleet that produces and offers electricity as required. In order to optimally utilise the potential flexibility for the electricity sector and the potential for reducing greenhouse gases through combined generation, heat storage systems and networks are required with appropriate dimensions. Electric heat pumps and renewable heat sources such as solar thermal energy, environmental heat, shallow and deep geothermal energy can also be used in such systems.

The provision of domestic hot water using a heat pump is especially efficient for consumers with their own photovoltaic (PV) systems. Thermal storage systems help to meet a high proportion of users' own heating requirements by utilising environmental heat using self-generated electricity from the PV system. Electrical storage systems enable the electrical energy generated during the day to be used during the evenings. Studies from ZSW show that in the case of modern single family homes, around 50% of the heating and electricity needs can be met by solar power from the homes' own roofs throughout the year. In the example in the image above, this value is reached with a PV system that produces around 9,200 kWh/p.a., with an electricity requirement for household appliances and heat pumps amounting to 7,100 kWh/p.a. Around 3,550 kWh/p.a. is then drawn from the user's own roof and the same amount from the grid operator during periods with low solar radiation. The remaining 5,650 kWh/p.a. of PV electricity generated at times of high solar radiation minus the losses from the plant technology, are drawn off by the grid operator and made available to other customers as electricity from renewable sources.

The sun and wind complement each other very well in Germany. The optimal coverage of the requirement depends, among other things, on the length of the period under consideration. Therefore, in addition to optimising local installations, the whole system also always needs to be considered. For this purpose, ZSW has developed the P²IONEER software tool with which the optimal



// Focus

Stromerzeugungsanlagen, Speichern und steuerbaren Erzeugern unter Vorgabe eines gewählten Anteils an erneuerbarer Erzeugung für eine Region berechnet werden kann. Die Optimierung berücksichtigt dabei spezifische Investitionskosten ebenso wie lokale Lastprofile. In Kombination mit über mehrere Jahre erhobenen Wetterdaten ergibt sich ein optimaler Erzeugungsmix zu den geringstmöglichen Stromerzeugungskosten. Auf regionaler Ebene können so bis zu 80 % des aus Sonne und Wind erzeugten Stroms direkt zur Deckung des Strombedarfs genutzt werden; lediglich 20 % des Bedarfs müssen zwischengespeichert oder aus steuerbaren Quellen wie Biogasanlagen erzeugt werden.

Darüber hinaus ist das ZSW an den beiden Projekten EnVisaGe und EnSource beteiligt, die diese Erkenntnisse in Fallstudien anwenden, im Labor und Feldtest die Eigenschaften der Anlagentechnik charakterisieren und die notwendige Steuerungstechnik – sowohl lokal als auch zum Energieversorger – beleuchten.

Mit dem Ziel, die verschiedenen Energieformen nicht nur zum richtigen Zeitpunkt, sondern auch am richtigen Ort zur Verfügung zu stellen, kommt der Auslegung der Netze bzw. der Belastung vorhandener Netze Bedeutung zu, ebenso wie der optimalen Platzierung von Speichern bzw. Energiewandlern und deren Betrieb. Bisher waren Verteilnetze auf eine hohe Zahl von Verbrauchern ausgelegt mit im Mittel geringer Gleichzeitigkeit von Verbrauchsspitzen. Auch wenn die transportierte Energie im Jahresmittel nicht höher ist als der lokale Verbrauch, liefern regenerative Erzeugungsanlagen jedoch zeitgleich Leistungsspitzen über mehrere Stunden. Das kann Netze und Betriebsmittel überlasten. Projekte am ZSW wie PVSYS-NS und Grid-Predict zielen darauf ab, Speicher und Energiewandler, die ohnehin zur zeitlichen Verschiebung der Energiebereitstellung benötigt werden, so zu betreiben und im Netz zu platzieren, dass der Bedarf für den Ausbau im Verteilnetz sinkt.

size of renewable energy generation systems, storage systems and controllable generators can be calculated by specifying the proportion of renewable generation for a region. The optimisation takes into account specific investment costs as well as local load profiles. Combined with weather data collected over several years, this provides an optimal production mix at the lowest possible electricity generation costs. At the regional level, this enables up to 80% of the electricity generated from solar and wind power to be directly used for meeting the electricity demand; only 20% of the requirement has to be temporarily stored or generated from controllable sources such as biogas plants.

In addition, ZSW is also involved in the EnVisaGe and EnSource projects that are applying this knowledge in case studies, characterising the properties of the system technology in laboratory and field tests, and are highlighting the necessary control technology – both locally and at energy providers.

With the aim of providing the various forms of energy not only at the right time but also at the right place, this places particular importance both on the design of networks and the loads on existing grids as well as on the optimal placement and operation of storage systems and energy converters. Until now, distribution networks have been designed for a high number of loads with, on average, few peak loads occurring simultaneously. However, even if the average energy transported over the year does not exceed the local consumption, renewable energy generation systems simultaneously provide peak outputs over several hours. This can overload networks and resources. Projects at ZSW, such as PVSYS-NS and Grid-Predict, are aimed at operating and placing storage systems and energy converters in the grid that are anyway required for time displacement of the energy provision so that the need for expanding the distribution network is reduced.

// Kopplung Strom ↔ Mobilität

Elektrizität ist eine sehr hochwertige und vielfältigst wandelbare, aber auch eine sehr flüchtige Form der Energie: Sie setzt die Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch voraus. Sie kann zwar über Netze lokal und regional weit verteilt werden, man kann sie aber nicht ohne Weiteres „mitnehmen“, was wiederum bei der Mobilität definitionsgemäß notwendig ist. Eine direkte Einbindung der Mobilität in den Stromsektor ist im Grunde nur für den elektrifizierten, schienengebundenen Verkehr möglich. Dasselbe gilt für Fahrzeuge wie Trolleybusse, die ihren Strom über Oberleitungen beziehen, oder den sich im Forschungsstadium befindenden, oberleitungsgebundenen elektrischen Betrieb von schweren Nutzfahrzeugen für den Güterverkehr. Für den gesamten Individualverkehr in Pkw, Lkw oder Flugzeug muss der Verbrauch jedoch von der Erzeugung durch den Einsatz von speicherbaren Energieformen zeitlich entkoppelt werden. Geht man von Strom als Primärenergie aus, bieten sich dafür im Wesentlichen zwei Wege an: der elektrochemische Speicher (Batterie) für den elektrischen Antrieb oder ein chemischer Energieträger; gasförmig als Elektrolyse-Wasserstoff für Brennstoffzellen oder als Synthesegas (methanisierter Elektrolyse-Wasserstoff) für verbrennungsmotorische Erdgasantriebe. Gegebenenfalls lassen sich auch flüssige Kraftstoffe wie synthetisches Benzin oder Diesel herstellen, allerdings mit geringer Effizienz und zu höheren Kosten.

Für die Elektromobilität im Bereich der Pkw hält der Markt heute batterieelektrische Fahrzeuge (BEV, battery electric vehicle) und Hybride aus elektro- und verbrennungsmotorischen Antrieben (PHEV, plug-in hybrid electric vehicle) bereit. Die PHEV verfügen über eine elektrische Reichweite von 30 bis 50 km, was für das Gros der täglichen Autofahrten ausreicht. Für das rein elektrische Fahren gänzlich frei von lokalen Emissionen verfügen BEV über deutlich größere Batterien (20 bis 80 kWh) als die PHEV (5 bis 15 kWh) und erreichen damit Reichweiten von 120 bis 450 km. Die Zulassungs-

// Coupling electricity and mobility

Highly convertible, electricity is a high qualitatively but also very volatile form of energy: it presupposes the simultaneity of generation and consumption. Although it can be distributed locally and over large distances regionally, it cannot be simply taken, which by its very definition is necessary with mobility. The direct integration of mobility in the electricity sector is basically only possible for electrified, rail-based transport. The same applies to vehicles that draw their power from overhead lines such as trolleybuses or the overhead line-based electrical operation of heavy goods vehicles for transporting freight, which is currently in the research stage. For all individual transport in cars, lorries or aircraft, however, the consumption has to be temporally decoupled from the generation through the use of storable energy forms. If electricity is the primary energy, there are two main ways of doing this: using electrochemical storage systems (batteries) for the electrical propulsion or, alternatively, using a chemical energy carrier, either in gaseous form as electrolysis hydrogen for fuel cells or as synthesis gas (methanised electrolysis hydrogen) for natural gas-based combustion engines. Optionally liquid fuels (e.g. synthetic gasoline or diesel) can also be prepared but with lower efficiency and higher costs.

In terms of cars, the electromobility market currently provides battery electric vehicles (BEVs) and hybrid cars combining electric motors with combustion engines (PHEVs, plug-in hybrid electric vehicles). The PHEVs have an electrical range of 30 to 50 km, which is sufficient for the majority of daily car trips. For purely electrically powered driving entirely free of local emissions, BEVs have much larger batteries (20 to 80 kWh) than PHEVs (5 to 15 kWh) and thus achieve ranges from 120 to 450 km. The number of registrations in Germany is still low, but internationally the emergence of a substantial and exponentially growing market can be observed. The operating costs of electric vehicles are, however, already



// Focus



zahlen in Deutschland sind noch gering, international lässt sich aber das Entstehen eines substantiellen und exponentiell wachsenden Marktes beobachten. Die Betriebskosten von Elektrofahrzeugen sind bereits heute unschlagbar günstig. Herausforderungen stellen bis dato die eingeschränkte Reichweite, die langen Ladezeiten und die hohen Anschaffungskosten dar. Diesen Herausforderungen für eine erfolgreiche Verbreitung von Elektrofahrzeugen stellt sich das ZSW jedoch mit seiner Forschung und Entwicklung entlang seiner gesamten Wertschöpfungskette. Auf Materialebene forscht man an Batterietechnologien der nächsten Generation, die über eine höhere Energiedichte verfügen und zu niedrigeren energiespezifischen Kosten und höheren Reichweiten der Elektrofahrzeuge führen. Für die Materialsynthese, die Zellentwicklung und die Fertigung werden für alle Prozessschritte entsprechende Anlagen und Untersuchungsmethoden eingesetzt. An der Schnittstelle von Materialwissenschaft und Systemtechnik erarbeitet das ZSW im Rahmen des Projekts LoLiFast Verfahren für die Schnellladung von Lithium-Ionen-Batterien unter Erhalt der Lebensdauer. Auf der Systemseite erforscht das ZSW Algorithmen der Lade- und Alterungszustandserkennung, Methoden der Diagnose von Degradation, Fehlern und Sicherheit von Batterien sowie Strategien für einen alterungsminimalen Betrieb der Batterie. Im Batterietestfeld werden Batterien hinsichtlich ihrer Performance, Lebensdauer und Sicherheit geprüft.

Im Sinne der Kopplung der Sektoren erforscht das ZSW seit mehreren Jahren die Wechselwirkungen von Stromnetz und elektrischen Fahrzeugen. Sind Letztere über die jeweilige Ladeinfrastruktur am Netz angeschlossen, kann man sie wie PV-Speicher als verteilte Speicherressourcen betrachten, die positive und negative (Regel-)Leistung bereitstellen können (vehicle to grid). Die technische Voraussetzung dazu sind die Kommunikation mit dem Smart Grid oder dem Speicheraggregator und ein bidirektionaler Laderegler; aber auch über eine Reduktion der Ladeleistung oder eine Verschiebung des Ladevorgangs lassen sich effektiv positive Leistungen dem Netz zuführen. In den Projekten Net-ELAN, Net-INES und komDRIVE wurden die wirtschaftlichen Potenziale der

unbeatablely cheap. Challenges until now have included the limited range, long charging times and high cost. ZSW faces these challenges with its research and development along the entire value added chain to achieve the successful dissemination of electromobility. At the material level, it is researching next-generation battery technologies that have a higher energy density and result in lower energy costs and longer specific ranges for electric vehicles. For the material synthesis, cell development and production, suitable equipment and testing methods are being used for all process steps. At the interface between materials science and system technology, ZSW is developing methods for fast charging Li-ion batteries while maintaining battery life as part of the LoLi-Fast project. On the system side, ZSW is researching algorithms for identifying charge and ageing states, methods for diagnosing battery degradation, faults and safety, as well as strategies for minimising ageing when operating batteries. In the battery test field, batteries are tested in terms of their performance, durability and safety.

With the aim of coupling sectors, ZSW has been researching the interaction of the electricity grid and electric vehicles for several years. If the latter are connected to the grid via the respective charging infrastructure, they can – in the same manner as PV storage systems – be regarded as distributed storage resources that can provide positive and negative (control) power (vehicle to grid). A technical prerequisite for this is communication with the smart grid or the storage unit and a bidirectional charge controller. However, effective, positive benefits for the grid can also be achieved by reducing the charging capacity or shifting the charging processes. The Net-ELAN, Net-INES and KomDrive projects have investigated the economic potential of grid coupling as well as the impact of the charging behaviour on both the distribution network and the entire energy system of passenger cars and vehicle fleets for urban freight transport. A particular focus was on testing, modelling

Netzkopplung, die Auswirkung des Ladeverhaltens auf das Verteilnetz und das gesamte Energiesystem von Pkw und Fahrzeugflotten für den städtischen Güterverkehr untersucht. Besonderes Augenmerk lag auf den Themen Test, Modellierung und Simulation der Alterung der Fahrzeugbatterie bei zusätzlichem Energiedurchsatz für Netzdienstleistungen.

Der zweite Weg, erneuerbare Energien in den Mobilitätssektor einzuführen, wird über die Kombination von Elektrolyse-Wasserstoff, Druckbetankung und Brennstoffzellenantriebe besprochen. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) können ein Verkehrsegment bedienen, das höhere Anforderungen an die individuelle Mobilität hinsichtlich Reichweite (>450 km) und Tankdauer (<5 min) stellt. Die Technologie, die sich dafür etabliert hat, ist die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEM), deren Herausforderung für eine erfolgreiche Markteinführung in der wechselseitigen Beeinflussung von Leistungsdichte, Lebensdauer und Kosten liegt. Am ZSW wird intensiv an einem Durchbruch dieser Technologie gearbeitet: von den elektrochemischen Grundlagen und Komponenten über die Stackentwicklung und -fertigung, die Systemtechnik und den Performance-, Lebensdauer- und Sicherheitstest bis hin zur Wasserstoff-Infrastruktur und Wasserstoffqualität. Letzteres wird 2016 im Rahmen des Aufbaus einer H₂-Tankstelle am Standort in Ulm vorangetrieben. Bei allen technischen Unterschieden der genannten Fahrzeugtypen und Antriebsarten bleibt letztlich festzuhalten, dass der größte Beitrag der direkten (BEV) und indirekten (FCEV) Elektromobilität zur Erreichung der Klimaziele deren Effizienz ist, also die Reduktion des Primärenergieaufwands für jeden gefahrenen Kilometer.

Der Wirkungsgrad der Wandlung von der Primärenergie Strom zur Fahrleistung (Well-to-Wheel) übersteigt bei BEV (73 %) und

and simulating the ageing of the vehicle batteries with an additional energy throughput for grid services.

The second approach for introducing renewable energies into the mobility sector is being taken by combining electrolytic hydrogen, pressure refuelling and fuel cell drives. Fuel cell electric vehicles (FCEVs) can serve a transport segment that places greater demands on individual mobility in terms of range (>450 km) and fuel duration (<5 min). The technology that has become established in this regard is the polymer electrolyte fuel cell (PEFC), whereby the challenge for its successful launch lies in the mutual influence of the power density, service life and costs. At ZSW, intensive research and work is being conducted to achieve a breakthrough in this technology, ranging from the electrochemical fundamentals and components, as well as the stack development and production, to the system technology and performance, durability and safety testing along with the hydrogen infrastructure and quality. The latter is being progressed in 2016 with the construction of a H₂ filling station at the headquarters in Ulm. With all the technical differences regarding the aforementioned vehicle and engine types, it should ultimately be noted that the greatest contribution made by direct (BEV) and indirect (FCEV) electromobility to achieving the climate goals is their efficiency, i.e. the reduction in the primary energy input for each kilometre driven.

The (well-to-wheel) efficiency in converting primary energy electricity to mileage (73% for BEVs and 32% for FCEVs) far exceeds today's internal combustion engines (18-22%), and at 0 g CO₂/km.



FCEV (32 %) bei Weitem den Wirkungsgrad heutiger Verbrennungsmotoren (18–22 %) und das bei 0 g CO₂/km.

// Strom als Rohstoff

Um in einem künftigen Energiesystem, das zunehmend auf erneuerbaren Quellen beruht, die drei Sektoren Strom, Wärme und Mobilität miteinander zu koppeln, sind flexible und effektive Energiewandler gefragt. Darunter sind vor allem all jene Prozesse und Verfahren zu verstehen, die allgemein mit dem Begriff „Power-to-X“ (PtX) bezeichnet werden und der Erzeugung chemischer Energieträger dienen. Große Beachtung findet etwa die maßgeblich am ZSW entwickelte Power-to-Gas (P2G[®])-Technologie. Dabei wird regenerativ erzeugter Strom in einem Elektrolyseverfahren in Wasserstoff und bei Bedarf in einer Methanisierungsstufe – unter Hinzugabe von CO₂ – in Methan umgewandelt. Weitere Umwandlungsschritte, etwa in flüssige Energieträger, sind ebenfalls möglich. Alle erzeugbaren chemischen Rohstoffe bzw. Energieträger lassen sich direkt nutzen – in der Industrie, zum Heizen oder für die erneuerbare Mobilität als regenerativer Kraftstoff für Brennstoffzellen- bzw. Erdgasfahrzeuge.

Für die künftige Mobilität lassen sich elektrolytisch erzeugter Wasserstoff und Methan überall dort einsetzen, wo batterieelektrische Antriebe an ihre Grenzen stoßen: etwa im Langstrecken- und Schwerlastverkehr. In Anlehnung an P2G[®] können im sogenannten Power-to-Liquid-Verfahren (PtL) auch flüssige Kraftstoffe aus Strom erzeugt werden. So können Schiffe mit CO₂-neutralem LNG (liquefied natural gas) und Flugzeuge mit ebenso klimafreundlichem synthetischem Kerosin betankt werden.

Besteht kein aktueller Bedarf in der Mobilität, können sowohl Wasserstoff als auch das synthetische Methan saisonal und nahezu verlustfrei im Erdgasnetz oder in Erdgasspeichervorrichtungen gespeichert werden. Insbesondere wenn ein Überangebot an Strom besteht, sollen die CO₂-neutralen chemischen Rohstoffe hergestellt werden.

// Electricity as a raw material

In order to couple the three sectors electricity, heat and mobility in a future energy system that is increasingly based on renewable sources, flexible and effective energy converters are required. These in particular include those processes and procedures that are commonly referred to by the term “Power-to-X” and are used to generate chemical energy. For example, the Power-to-Gas (P2G[®]) technology, which has been largely developed at ZSW, has attracted a great deal of attention. Here renewably generated electricity is converted in an electrolysis process into hydrogen and, if required, then into methane in a methanisation stage by adding CO₂. Further conversion steps, such as in liquid energy sources, are also possible. All producible chemical raw materials or fuels can be directly used – in industry, for heating or for renewable mobility as a renewable fuel for fuel cell and natural gas vehicles.

For future mobility, electrolytically generated hydrogen and methane can be deployed everywhere where battery-electric motors reach their limits: such as in long-distance and heavy-load vehicle transport. Based on P2G[®], liquid fuels can also be produced from electricity in so-called Power-to-Liquid (PtL) processes. This makes it possible to fuel ships with CO₂-neutral LNG (liquefied natural gas) and airplanes with climate-friendly synthetic kerosene.

If there is no current need for mobility purposes, both hydrogen and synthetic methane can be seasonally stored with virtually no loss in the natural gas grid or in natural gas storage facilities. In particular the CO₂-neutral, chemical raw materials can be produced when there is an oversupply of electricity.

As an energy carrier, hydrogen can be converted back into electricity again when there is increased demand for electricity, ideally in modern gas and steam power plants or stationary fuel cells. This usage path also makes P2G[®] considerably important for grid



// Focus

In Zeiten erhöhter Stromnachfrage können diese als Energieträger dann wieder verstromt werden, idealerweise in modernen Gas- und Dampfkraftwerken oder stationären Brennstoffzellen. Dieser Verwendungspfad hat auch eine große Bedeutung von P2G[®] für die Netzstabilisierung, das Lastmanagement und die bedarfsgerechte Bereitstellung und Nutzungsmöglichkeiten von Strom sowie Brenn- und Kraftstoffen. Hierdurch kann diese Technologie auch einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit im Energiesystem der Zukunft leisten.

Auch der Wärmebedarf kann Teil der PtX-Kreisläufe sein: Sowohl bei P2G- als auch bei PtL-Prozessen entsteht Wärme, die als Abwärme zum Heizen oder für industrielle Verfahren effektiv genutzt werden kann und dadurch auch die Wirkungsgrade der Technologien erhöht. Zudem können Blockheizkraftwerke auf Basis von erneuerbaren Energien zu flexiblen Erzeugern und Verbrauchern weiterentwickelt werden, die helfen, das Stromsystem in Abstimmung mit dem Wärmebedarf zu stabilisieren. Hierzu zählen auch elektrische Wärmepumpen und die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung aus geothermischen Quellen.

Ausgangsstoff bei sämtlichen PtX-Technologien ist Strom. Im skizzierten vernetzten Energiesystem der Zukunft wird er somit nicht mehr nur Energieform, sondern vielmehr Rohstoff sein. Daher ist der Schlüssel zum System der Zukunft der konsequente Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten ebenso wie der jeweils geeigneten PtX-Technologien auf allen Ebenen. Das ist zugleich die Voraussetzung für einen vielversprechenden Ansatz bei der Biomassennutzung. Das ZSW-Konzept sieht u. a. die Kopplung von Biomasse und Wasserstoff vor. Die im Gegensatz zu Sonne und Wind knappe Ressource Biomasse soll für die Herstellung von nachhaltigen klimafreundlichen Kraftstoffen der

stabilisation, load management and the provision and use of electricity and fuels in accordance with needs. This technology can thereby help secure supplies in future energy systems.

The heating requirement can also be part of PtX circuits: both P2G and PtL processes produce waste heat that can be effectively used for heating or industrial processes and thus effectively increases the efficiency of the technology. In addition, cogeneration plants based on renewable energies can be further developed into flexible producers and consumers that help to stabilise the power system in coordination with the heat demand. These also include electric heat pumps and the combined heat and power supply from geothermal sources.

The starting material for all Power-to-X technologies is electricity. In the outlined networked energy system of the future, it will therefore no longer be just a form of energy but rather a commodity. Thus the key to the system of the future is to consistently expand the capacities for generating renewable electricity along with the respectively suitable Power-to-X technologies at all levels. This is also the prerequisite for a promising approach in the use of biomass. ZSW's concept envisages the coupling of biomass and hydrogen. Biomass, which in contrast to the sun and wind is a scarce resource, should be reserved for producing sustainable, climate-friendly fuels of the latest generation and thus be used in the most ecological and efficient way possible. Since biomass is the only carbon-containing renewable energy source and carbon-based fuels are still required for specific mobility areas, it can play an important role in future mobility. Compared with the currently used method for producing biodiesel and bioethanol, the coupling of hydrogen enables the fuel yield from biomass to be increased six-fold. At the same time, the acreage required is reduced to

neuesten Generation reserviert und so ökologisch sinnvoll sowie so effizient wie möglich genutzt werden. Da Biomasse die einzige kohlenstoffhaltige erneuerbare Energiequelle ist und für bestimmte Bereiche der Mobilität weiterhin kohlenstoffbasierte Kraftstoffe benötigt werden, kann sie in der Mobilität der Zukunft eine wichtige Funktion wahrnehmen. Mit der Einkopplung von Wasserstoff lässt sich der Kraftstofftrag aus Biomasse im Vergleich zu den heute üblichen Verfahren zur Gewinnung von Biodiesel und Bioethanol um das Sechsfache steigern. Umgekehrt bedeutet dies, dass die benötigte Anbaufläche auf ein Sechstel sinkt. Eine unerwünschte Konkurrenz von Energie-Biomasse zum Nahrungsmittelanbau kann somit vermieden werden.

Das Biomassekonzept des ZSW zeigt einmal mehr, dass sich mit Hilfe von Wandlungsverfahren zur Herstellung chemischer Energieträger vielfältige Nutzungsmöglichkeiten ergeben, die die sinnvolle, multidirektionale Verzahnung der drei Sektoren befördern und damit zur sicheren, flexiblen und bedarfsgerechten Bereitstellung von klimafreundlicher Energie beitragen.

// Digitalisierung

Viele Transformationsprozesse auf den unterschiedlichen Ebenen und in den verschiedenen Bereichen des Energiesystems werden erst durch die wachsende Digitalisierung möglich bzw. können sich durch die Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) deutlich dynamischer verbreiten. Prominentes Beispiel ist der Wandlungsprozess vom konventionellen Elektrizitätsnetz zum sogenannten Smart Grid, der nur durch den Einsatz von Kommunikations-, Mess-, Steuer-, Regel- und Automatisierungstechnik sowie IT-Komponenten erfolgen kann. Dabei bedeutet „smart“ die Erfassung der Netzzustände in Echtzeit sowie eine deutlich erhöhte Ausnutzung der vorhandenen Netzkapazität durch die Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten oder – bei gleicher Auslastung – eine Verbesserung der Netzstabilität.

In Bezug auf Verteilernetze wird unter Smart Grid auch die zunehmend bessere Möglichkeit verstanden, Systemzustände im Netz nachzuvollziehen und lokal einzugreifen. Das bedeutet auch, dass verschiedene Parameter, die in einem konventionellen Netz bislang fixierte Größen waren, variabel werden. In smarten Netzen lassen sich z. B. Kapazitäten lokal und temporär erhöhen oder Stromflussrichtungen über einzelne Leitungsabschnitte verändern, wenn es die Einspeisesituation erfordert. Smart-Grid-Strukturen sollen zudem die Grundlage dafür schaffen, dass auch kleine Netznutzer verstärkt Möglichkeiten marktlichen Handelns (Smart Market) wahrnehmen können, ohne Einbußen bei der Netzsicherheit zu riskieren.

Aktuelle Forschungsansätze beispielsweise im Projekt C/sells – das ZSW bringt hier sein Know-how zur Einspeiseprognose von erneuerbaren Energien ein und wird dies um Lastprognosen erweitern – beschäftigen sich u. a. mit einem zellulären Netzinfrastrukturaufbau. Als Zellen können dabei sowohl einzelne Liegen-

one sixth. This therefore avoids the conflict between cultivating crops for energy biomass and food production.

ZSW's biomass concept once again shows that by using conversion processes for producing chemical energy carriers, a diverse range of applications can be created that foster the sensible, multi-directional interlinking of the three sectors and thus contribute to the secure, flexible and needs-based provision of climate-friendly energy.

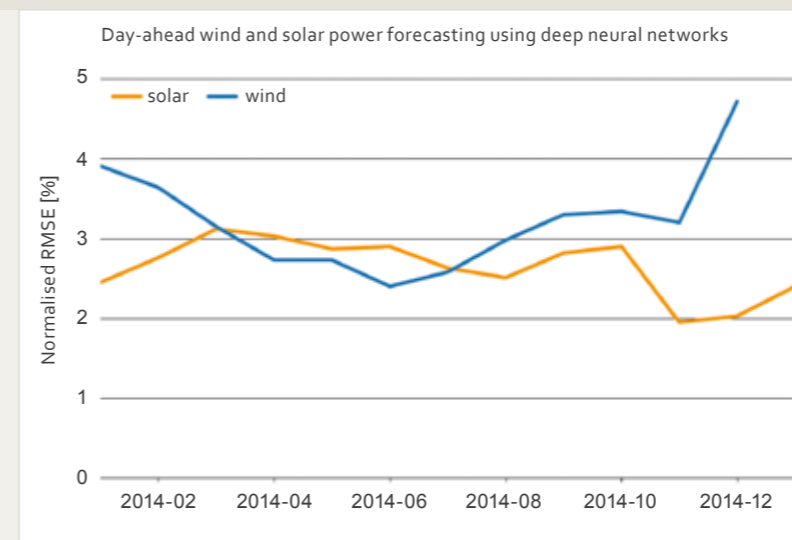
// Digitisation

Many transformation processes at different levels and in different areas of the energy system are either only possible through the digitisation, which is increasing or, on the other hand, are able to spread much more dynamically as a result of developments in the field of information and communication technology (ICT). A prominent example is the conversion of conventional electricity networks into so-called smart grids, which can only be achieved through the use of communications, instrumentation, control and automation technology and IT components. Here, "smart" refers to the detection of grid conditions in "real time" as well as the significantly increased utilisation of existing grid capacities through control and regulation options along with improved network stability for any given load.

In relation to distribution networks, smart grids also refer to the enhanced ability to track system states in the networks and intervene locally. This also means that various parameters, which in conventional grids were previously fixed sizes, are now variable. In smart grids it is possible, for example, to increase capacities locally and temporarily or change the direction of electricity flows across individual line sections if required by the infeed situation. It is also intended that smart grid structures provide small network users with greater possibilities for market-based trading (Smart Market) without compromising grid safety.

Current research approaches such as in the C/sells project, where ZSW is applying its knowledge on renewable energy feed-in forecasts and expanding it to include load forecasts, are concerned with, among other things, cellular development of the grid infrastructure. Cells here can refer to individual properties ("smart homes"), districts, site networks or even entire regions.

These cells act autonomously, but are linked in supra-regional networks and interact with one another. For example, each cell primarily supplies itself in a subsidiary sense, whereby the energy



// Mittlerer quadratischer Fehler normiert auf die installierte Leistung (nRMSE) für Day-ahead-Wind- und -PV-Prognosen für Deutschland im Jahr 2014. Der Vorhersagefehler für die Windleistungsprognose konnte auf 3,4% im Jahresmittel gesenkt werden. Ende des Jahres zeigte sich ein besonders turbulentes Wettergeschehen.
// nRMSE normalised with the installed capacity for day-ahead wind and PV forecasts for Germany in 2014. The forecast error for wind power forecasts was lowered to 3.4% for the annual average. At the end of the year, there were particularly turbulent weather conditions.

schaften („Smart Homes“), Quartiere, Arealnetze oder auch ganze Regionen definiert werden. Diese Zellen handeln jeweils autonom, sind aber im überregionalen Verbund vernetzt und interagieren miteinander. So sorgt jede Zelle im subsidiären Sinne primär für sich, indem Energieerzeugung und Last nach Möglichkeit ausgeglichen werden. Infrastrukturdienstleistungen werden bedarfsbedingt zusätzlich bezogen, um die Zelle individuell zu stabilisieren. Durch den Zellverbund und im gemeinschaftlichen Handeln innerhalb und zwischen den Zellen sowie über deren Grenzen hinweg könnte eine sehr robuste Energieinfrastruktur entstehen.

Die am ZSW in der Forschungsgruppe SimOpt entwickelten Verfahren, die eine genauere Vorhersage des komplexen Zusammenspiels innerhalb des Stromsystems ebenso wie systemübergreifend ermöglichen, sind hier ein wichtiger Erfolgsfaktor. Einbezogen werden Wettermodell-Prognosen, Satellitendaten, Wetterstationsmessungen sowie historische Wind-, Solar- und Laufwassererträge eines Standorts oder einer Region bis hin zur Größe von ganz Deutschland, um die Erzeugungssituation vorherzusagen. Die Verbrauchsseite ebenso umfassend abzubilden, stellt eine der Herausforderungen dar. Das ZSW verwendet aktuellste Algorithmen der künstlichen Intelligenz, besonders aus der Klasse der maschinellen Lernverfahren. Sie haben die Fähigkeit, physikalisch berechnete Wind-, Sonneneinstrahlungs- oder Leistungsvorhersagen nochmals entscheidend zu verbessern, indem sie das Zusammenspiel der zahlreichen Parameter, die sich unterhalb der Auflösung physikalischer Modelle bewegen, aus langjährigen Messzeitreihen erlernen und auf die jeweils aktuelle Wettersituation anwenden. Auch systematische Abweichungen, wie sie sich stets in physikalischen Modellen finden, werden hierbei automatisch korrigiert. Damit bietet sich ein enormes Potenzial im Rahmen der Kopplung der Sektoren, das Gesamtenergiesystem klimaneutral und gleichzeitig kostenoptimal zu gestalten.

generation and loads are balanced as far as possible. Infrastructure services are additionally drawn upon as required to stabilise cells individually. The cell network and the collective action within and between the cells as well as beyond the boundaries could create a very robust energy infrastructure.

The processes developed at ZSW in the SimOpt research group, which enable a more accurate prediction of the complex interactions both within the electricity system as well as across various systems, represent an important success factor in this respect. In order to predict the generation situation, use is made of weather model forecasts, satellite data, weather station measurements as well as historical wind, solar and hydroelectric yields for a given site or region that can be as large as Germany. Depicting the load side just as comprehensively represents one of the challenges here. ZSW uses the latest artificial intelligence algorithms, particularly those used in machine-learning techniques. They can make a further decisive improvement to physically calculated wind, solar irradiance and output forecasts by learning from long-standing measurement time series how the numerous parameters moving below the resolution of physical models interact, and by then applying this to the current weather situation. The systematic deviations always found in physical models are also automatically corrected. Here, coupling the sectors offers enormous potential for shaping the overall energy system in a carbon-neutral and cost-effective manner.