



A photograph of a wind farm in a green field under a clear blue sky. Several white wind turbines are visible, with one in the foreground on the left and another on the right. A green blade is visible in the lower-left foreground. A semi-transparent blue rectangle is overlaid on the right side of the image, containing white text.

// Schwerpunktbericht 2009
Focus Report 2009
Speicherung erneuerbarer Energien
Renewable Energy Storage



// Schwerpunktbericht 2009
Focus Report 2009
Speicherung erneuerbarer Energien
Renewable Energy Storage



// FOCUS

// Warum ist die Energiespeicherung eine Schlüsselkomponente in einem nachhaltigen Energiesystem?

Ziel eines zukünftigen Energiesystems ist eine nachhaltige Vollversorgung aus erneuerbaren Ressourcen. Viele erneuerbare Energien (EE) wie die Windkraft fallen jedoch fluktuierend an. Trotzdem sollen die Endenergien Strom, Wärme und Kraftstoff jederzeit ohne Nutzungsbeschränkungen zur Verfügung stehen. Das Kernproblem ist die Energiespeicherung. Auch zu Zeiten mit einem geringen Angebot an EE soll die Nachfrage gedeckt werden können.

// Why is energy storage a key component in a sustainable energy system?

The goal of future energy systems is a sustainable complete supply based on renewable resources. However, many renewable energy sources, such as wind power, provide energy in a fluctuating manner. Nevertheless, the final energy sources electricity, heat and fuel should be available at all times without usage restrictions. The core problem is energy storage. It should be possible to cover demand, even during periods when the supply of renewable energy sources is low.



// Quelle: RWE

Im heutigen Energiesystem wird die Vorhaltung von Energie durch die Lagerung fossiler Brennstoffe gelöst (Kohle, Erdöl und Erdgas). Die Bevorratung liegt hier typischerweise in einem Bereich, der dem Verbrauch von mehreren Monaten entspricht. Dies gilt jedoch nicht für Strom. Angebot und Nachfrage müssen sich stets genau die Waage halten. Bei einer überwiegenden Versorgung mit EE stellt sich die prinzipielle Frage, welche Speicher an die Stelle der Bevorratung fossiler Brennstoffe treten können.

Von den EE lässt sich Biomasse am einfachsten speichern, da diese als Brennstoff materiell vorliegt. Sie ist saisonal lagerfähig und steht bei Bedarf zur Wärme-, Strom- und Kraftstoffproduktion zur Verfügung. Biomasse eignet sich damit ideal für die Grundlastsicherung. Der Beitrag am (momentanen) Weltenergieverbrauch kann jedoch maximal ca. 20 % betragen. Ebenfalls grundlastfähig sind die Geothermie und Laufwasserkraft, die aber nur begrenzt zur Verfügung stehen. Die großen Potenziale der EE bilden die nicht limitierte Solarstrahlung sowie die Windenergie, die jedoch beide stark fluktuierend anfallen und nur begrenzt regelbar sind.

Ohne ausreichende Energiespeicherung wird eine gesicherte Vollversorgung mit EE nicht gelingen. Die Potenziale und die möglichen Einsatzbereiche der verschiedenen Speicher werden insbesondere durch die erforderliche Speicherkapazität und Speicherdauer sowie durch die Umwandlungsverluste und die Kosten bestimmt. Erst durch den Zusammenschluss verschiedener Stromerzeuger im Verbund mit Verbrauchern und neuen Speicherkonzepten sowie durch geschicktes Erzeugungs-, Last- und Speichermanagement entsteht ein Energiesystem, das die Vollversorgung mit EE jederzeit gewährleisten kann.

Die Thematik „Speicherung erneuerbarer Energie“ wird am ZSW interdisziplinär bearbeitet. Aktuelle FuE-Projekte und Schwerpunktthemen zur Stromspeicherung durch elektrochemische Systeme, zur Stromnetzintegration der Elektromobilität, zur bedarfsgerechten Nutzung und Einspeisung von Photovoltaikstrom und zur saisonalen Speicherung durch chemische Sekundärenergieträger wie beispielsweise Wasserstoff oder Erdgassubstitut befinden sich beim ZSW in der anwendungsnahen Entwicklung und werden im Folgenden vorgestellt.

In today's energy system, energy reserves are provided via the storage of fossil fuels (coal, crude oil and natural gas). The amount of energy thus stored is typically enough to cover several months' consumption. However, this does not apply to electricity. Supply and demand must always be precisely balanced. If supply is largely realised by means of renewable energy sources, the principal question is: Which storage systems can take the place of fossil fuel reserves?

Of all the renewable energy sources, biomass is the easiest to store, as this exists in material form as fuel. It can be stored seasonally and is available when needed for the production of heat, electricity and fuel. Biomass is thus ideal for base load coverage. However, it can only cover a maximum of around 20 % of the world's (current) energy consumption. Also suitable for covering the base load are geothermal energy and run-of-river hydroelectricity, which are also only available to a limited extent. The great potential of renewable energy sources resides in unlimited solar radiation and in wind energy, although both occur in a highly fluctuating manner and can only be partially controlled.

Without sufficient energy storage, a secure complete supply based on renewable energy sources will not be possible. The potential and the possible fields of application of the various storage systems depend, in particular, on the required storage capacity and storage duration, as well as the conversion losses and the costs. Only by bundling different electricity generators together with consumers and new storage concepts, along with clever management of generation, loads and storage, can an energy system be realised which can guarantee complete supply at all times, based on renewable energy sources.

At ZSW, the topic of storage of renewable energy is addressed in an interdisciplinary way. Current R&D projects and key topics regarding electricity storage by means of electrochemical systems, regarding the integration of electromobility into power grids, regarding demand-oriented usage and feeding of photovoltaic power and regarding seasonal storage by means of chemical secondary energy carriers such as hydrogen or substitute natural gas are being developed at ZSW in an application-oriented manner and shall be described in the following.



// Focus

// Was sind die Optionen zur Speicherung von erneuerbaren Energien?

Um Energie bedarfsgerecht bereitzustellen, steht eine ganze Reihe von verschiedenen Speicheroptionen zur Verfügung. Strom lässt sich nur bedingt direkt speichern (z.B. Kondensator). Stromspeichertechnologien nutzen deshalb potenzielle (Wasserkraft), mechanische (Druckluftspeicher), elektrochemische (Batterien) oder chemische Energie (Brennstoffe). Gängige Stromspeichertechnologien sind:

- > Pumpspeicherkraftwerke
- > Druckluftspeicher
- > Schwungradspeicher
- > Superkondensatoren
- > Elektrochemische Speicher
- > Chemische Energieträger

Das Einsatzgebiet von Pumpspeicherkraftwerken ist in der Regel die Stromspeicherung über mehrere Stunden bis hin zu Tagen. Solche Wasserkraftwerke dienen in der Energiewirtschaft seit Jahrzehnten als bevorzugtes Speichermedium, um Überschüsse zwischenzulagern und bei Bedarf (Spitzenlastabdeckung) wieder ins Stromnetz einzuspeisen. Da deren Ausbaupotenzial durch die geografischen Gegebenheiten und ökologischen Randbedingungen in Deutschland sehr stark eingeschränkt ist, werden sie nicht wesentlich zur zukünftigen Integration der EE ins Stromnetz beitragen können. Druckluftspeicher arbeiten in mit Pumpspeicherkraftwerken vergleichbaren Leistungsbereichen. Weltweit sind jedoch erst zwei Anlagen in Betrieb.

Die Speicherung in Schwungradspeichern oder Superkondensatoren ist insbesondere hinsichtlich Dauer und Kapazität begrenzt. Daher besteht deren primäre Aufgabe in der kurzfristigen (<< 1 Stunde) Bereitstellung von Leistung zum Ausgleich von Schwankungen. Eine mittelfristige (< 1 Tag) Leistungsreserve stellen stationäre Batterien dar, deren Anwendung durch die stark eingeschränkte Energie- und Leistungsdichte sowie durch die Lebensdauer begrenzt wird.

What are the options for the storage of renewable energy?

A wide range of different storage options are available for demand-oriented provision of energy. Electricity can only be stored directly to a limited extent (e.g. capacitor). Electricity storage technologies therefore use potential (hydropower), mechanical (compressed air reservoirs), electrochemical (batteries) or chemical (fuels) energy. Common electricity storage technologies include the following:

- > Pumped hydro storage
- > Compressed air energy storage
- > Fly wheels
- > Supercapacitors
- > Electrochemical storage systems
- > Chemical energy carriers

Pumped hydro storage power plants are generally used for storing electricity for periods ranging from several hours to several days. In the energy industry, such hydroelectric power plants have for decades been the storage medium of choice for intermediate storage of excess capacities and for feeding these capacities back into the power grid when needed (peak load coverage). As their potential for expansion is very limited in Germany due to the geographical conditions and the ecological constraints, they will not be able to make a substantial contribution to the future integration of renewable energy sources into the power grid. Compressed air reservoirs operate with output ranges similar to those of pumped hydro storage power plants. However, there are as yet only two systems in operation worldwide.

Storage in fly wheel energy storage systems or supercapacitors is limited, particularly with regard to duration and capacity. Therefore, they are primarily used for short-term (<< 1 hour) provision of power to compensate for fluctuations. Stationary batteries represent a medium-term (< 1 day) power reserve, although their use is limited by their low energy and power density and lifetime.

Die Verwendung stationärer Batteriespeicher kann aber im Zusammenhang mit der Steigerung des Selbstverbrauchs von Strom aus netzgekoppelten Photovoltaikanlagen von zunehmendem Interesse sein. Nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz wird seit 2009 die Selbstnutzung von photovoltaisch erzeugtem Strom gefördert. Für hohe Selbstnutzungsgrade ist eine Zwischenspeicherung der elektrischen Energie notwendig. Ein in einem Haus installierter Energiespeicher steht dann auch für weitere Funktionen wie eine Notstromversorgung zur Verfügung.

Die Integration mobiler Batterien zukünftiger Elektrofahrzeuge in das Stromnetz ermöglicht als sogenanntes „Vehicle-to-Grid“-Konzept sowohl das Laden der Batterien der Fahrzeuge (Energiespeicherung) als auch die gezielte Rückspeisung der Energie in das Stromnetz. Dadurch entsteht ein sehr großer „virtueller Batteriespeicher“. Die Nutzung wird jedoch durch die zeitliche Verfügbarkeit der Fahrzeuge und die vom Fahrzeughalter bereitgestellte Kapazität beschränkt und muss mit einem intelligenten und gesteuerten Lade-/Entladevorgang gekoppelt werden („Smart Grid“).

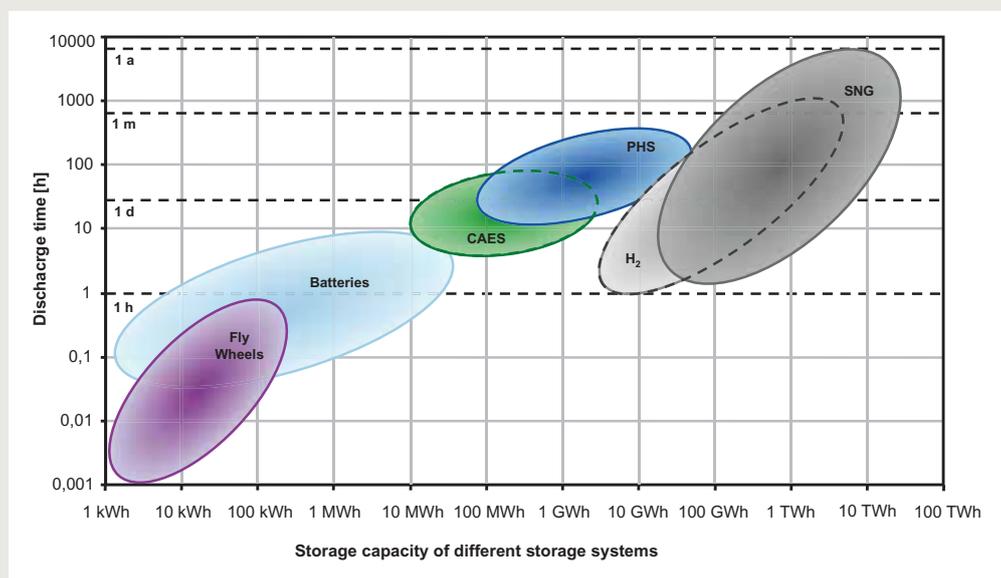
Als chemische Sekundärenergieträger kommen Wasserstoff und kohlenstoffbasierte Brennstoffe (z.B. Erdgassubstitut) in Betracht, die sich aus verschiedenen EE herstellen lassen. Die Ausspeicherleistungen bei der Untertage-Gasspeicherung inklusive der Verstromung reichen bis in den 10-GW-Bereich bei Zykluszeiten von Tagen bis Monaten. Sie stellen somit die einzige absehbare Option dar, EE mit einer Kapazität im Bereich von TWh saisonal zu speichern und bei Bedarf zurückzuverstromen (s. Abb. 1). Darüber hinaus können die definierten Sekundärenergieträger in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, etwa im Verkehr.

The use of stationary battery banks could be interesting in terms of producers using more of their own power produced from their own grid-connected photovoltaic systems. Since 2009, the producer's use of their own photovoltaically generated electricity has been promoted by the German Renewable Energy Sources Act (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG). Intermediate storage of the electrical energy produced is required if it is to be used to a large extent by the producer. Any energy storage system installed in a building would also be available for other functions, such as use as an emergency power supply.

The integration of future electric vehicles' mobile batteries into the power grid as part of a so-called "vehicle-to-grid" concept makes it possible to charge vehicles' batteries (energy storage) and systematically feed the energy back into the power grid. This creates a very large "virtual battery bank". However, usage is limited by the vehicles' availability times as well as by the capacity provided by the vehicle owners and must be coupled with an intelligent, controlled charge/discharge process ("smart grid").

Hydrogen and carbon-based fuels (e.g. substitute natural gas) that can be produced from various renewable energy sources are suitable as chemical secondary energy carriers. The withdrawal capacities of underground gas storage including conversion to electricity extend into the 10-GW range, with cycle times ranging from days to months. They therefore represent the only conceivable option for seasonally storing renewable energy with a capacity in the TWh range and converting it back into electricity when required (see fig. 1). In addition, the defined secondary energy carriers can be used in other application areas, such as in transport.

// Abb. 1: Entladungszeit und Speicherkapazität verschiedener Stromspeichersysteme
 // Fig. 1: Renewable energy storage systems capacity and discharge time



// Welche Speicherkapazitäten stehen im Energiesystem zur Verfügung?

Die aufgeführten Zahlen in Tab. 1 verdeutlichen die Problematik bei der Stromspeicherung: Erzeugung und Verbrauch müssen zeitgleich erfolgen. Die heute vorhandene Stromspeicherkapazität beläuft sich auf nur 0,04 TWh, d.h. die Speicher könnten rein rechnerisch den kompletten Strombedarf Deutschlands für weniger als 1 Stunde decken.

Unter der Annahme, dass 40 Mio. Fahrzeuge alle gleichzeitig am Stromnetz angeschlossen sind und jedes Fahrzeug 10 kWh einspeist, beträgt die Speicherreichweite ca. 6 Stunden und übertrifft damit die bisher in Form von Pumpspeicherkraftwerken installierte Kapazität um ein Mehrfaches (Tab. 2). Durch die Einbindung von Traktionsbatterien kann die Elektromobilität damit wesentlich zur Stromspeicherung und Stromnetzstabilisierung beitragen.

Eine mehrtägige oder sogar saisonale Stromspeicherung ist jedoch im bestehenden System selbst unter der Annahme einer vollständigen Umstellung des Pkw-Bestands auf Elektrofahrzeuge nicht möglich. Nach heutigem Kenntnisstand ist für die saisonale Speicherung von Energie die Erzeugung von Sekundärenergieträgern eine notwendige Voraussetzung.

Flüssige und gasförmige Brennstoffe lassen sich im Gegensatz zu Strom direkt speichern. Im Kraftstoffmarkt werden Benzin und Diesel über Monate bevorratet. Die Gasspeicherkapazitäten in Deutschland sind um den Faktor 5000 höher als die Kapazitäten der Pumpspeicherkraftwerke (Tab. 1). Da sich Erdgas in modernen Kraftwerken mit einem Wirkungsgrad von nahezu 60 % verstromen lässt, liegt die Frage nahe, wie die Gasspeicherkapazität für die Speicherung von EE genutzt werden kann.

// Tab. 1: Energieverbrauch und -speicherkapazitäten in Deutschland (2008)
// Table 1: Energy consumption and storage capacity in Germany (2008)

		Electricity	Natural gas	Liquid fuels ¹⁾
Consumption	[TWh/a]	619	930	707
Average power	[GW]	70	106 ²⁾	81
Storage capacity	[TWh]	0,04 ³⁾	217 ⁴⁾	250 ⁵⁾
Calculated operating range of installed storage capacity ⁶⁾	[h]	0,6	2000	3100

1) Petrol, diesel, kerosene

2) Seasonally fluctuating

3) Pumped hydro storage

4) 46 underground gas storage facilities (LBEG, Hannover)

5) Provisioning of petrol, diesel, kerosene and heating oil

6) Related to average power

// What storage capacities are available in the energy system?

The figures in table 1 clarify the problematic aspects of electricity storage: Generation and consumption must occur simultaneously. The available electricity storage capacity adds up to just 0.04 TWh, i.e. the available storage facilities could theoretically cover Germany's entire electricity demand for less than 1 hour.

Assuming that 40 million vehicles are all simultaneously connected to the power grid and that each vehicle feeds in 10 kWh, the storage coverage amounts to around 6 hours and is thus many times higher than the capacity installed to date in the form of pumped hydro storage power plants (table 2). By incorporating traction batteries, electromobility can thus make a major contribution to electricity storage and power grid stabilisation.

However, even if all existing passenger cars were to be converted into electric vehicles, the existing system does not even enable electricity to be stored for several days, let alone seasonally. Current knowledge suggests that the production of secondary energy carriers is a necessary prerequisite for seasonal energy storage.

Liquid and gaseous fuels, unlike electricity, can be stored directly. In the fuel market, petrol and diesel are stored for months at a time. The gas storage capacities in Germany are around 5000 times higher than the capacities of pumped hydro storage power plants (table 1). As natural gas can be converted into electricity in modern power plants with an efficiency of almost 60 %, the obvious question is how the gas storage capacity can be used for the storage of renewable energy.

// Tab. 2: Energieverbrauch und -speicherkapazitäten durch Elektrofahrzeuge in Deutschland¹⁾
// Table 2: Energy consumption and storage capacity of electric vehicles in Germany¹⁾

		1 Million Electric Vehicles	40 Million Electric Vehicles
Consumption ²⁾	[TWh/a]	1,9	76
Percentage of electricity consumption	[%]	0,3	12
Storage capacity ³⁾	[TWh]	0,01	0,4
Calculated operating range of installed storage capacity ⁴⁾	[h]	0,15	6

1) Base year 2008

2) 0,16 kWh/km; 12 000 km/a

3) Storage capacity per vehicle: 10 kWh

4) Related to average power of 71 GW (compare table 1)



// Kurzzeitspeicherung: Welche Vorteile bietet die Elektromobilität für die Stromnetzstabilisierung?

Die Bundesregierung verfolgt mit dem 2009 verabschiedeten Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität das Ziel, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutsche Straßen zu bringen. Dies entspricht einem Anteil von ca. 2 % der 2009 in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge. Tägliche Ladevorgänge bedingen eine erhöhte Netzlast, die in absehbarer Zeit und bei geeigneter Steuerung bisher nicht als netzkritisch angesehen wird.

Werden die Batterien der Fahrzeuge bidirektional in das Netz integriert und mit einem intelligenten Energiemanagement verknüpft, ist sowohl das Laden als auch das Entnehmen von Energie möglich (Vehicle-to-Grid). Batterien haben dabei den Vorteil einer sehr schnellen Ansprechzeit und können somit sehr flexibel zu- und abgeschaltet werden. Dadurch bieten diese mobilen Energiespeicher die Möglichkeit, Systemdienstleistungen zur Stabilisierung der Netze zu übernehmen, wie z.B. die Bereitstellung von Regelleistung oder den Lastausgleich. Tagsüber – bei hoher Netzlast – steht diese Energie durch Entladung zur Verfügung, während sie nachts in der Zeit niedriger Energienachfrage wieder aufgeladen werden. Dies führt zu einer Glättung der Lastkurve und entlastet die Stromerzeugung sowie – bedingt durch die räumliche Verteilung der Speicher – auch die Netze.

Die Bereitstellung von Netzdiensten durch das Vehicle-to-Grid-Konzept eröffnet Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle und bietet sowohl den Fahrzeugeigentümern als auch den Netzbe-

// Short-term storage: What benefits does electromobility offer for power grid stabilisation?

With its National Development Plan for Electromobility, passed in 2009, the German Federal Government is pursuing the goal of bringing a million electric vehicles onto German roads by 2020. This corresponds to around 2 % of the approved vehicles in Germany in 2009. Daily charging processes entail an increased grid load which in the foreseeable future, according to current opinion, will not be grid-critical if controlled properly.

If the vehicles' batteries are bidirectionally integrated into the grid and coupled with intelligent energy management, both the loading and the withdrawal of energy are possible (vehicle-to-grid). Here, batteries have the advantage of a very rapid response time and can thus be activated and deactivated very flexibly. Therefore, these mobile energy storage systems offer the possibility of taking over system services for grid stabilisation, e.g. the provision of balancing energy or load balancing. During the day, when the grid load is high, this energy is available by means of discharging; at night, when energy demand is low, they can be recharged. This smoothens the load curve and reduces the load on the power generation, as well as on the grid, depending on the spatial distribution of the storage systems.

The provision of grid services by means of the vehicle-to-grid concept opens up possibilities for new business models and offers financial advantages for vehicle owners and for grid opera-



// Zum größten Erdgasspeicher Westeuropas hat die WINGAS ihren Erdgasspeicher in Rehden ausgebaut. 4,2 Milliarden Kubikmeter Erdgas können hier gespeichert werden. Das ist rund ein Fünftel der in Deutschland verfügbaren Speicherkapazität.
 // WINGAS has expanded its natural gas storage facility in Rehden to make it the largest in Western Europe. 4.2 billion cubic metres of natural gas can be stored here. That is around a fifth of the available storage capacity in Germany.

// Quelle: WINGAS GmbH & Co. KG

treibern finanzielle Vorteile. Vehicle-to-Grid-Konzepte setzen ausreichende Möglichkeiten zum Netzanschluss voraus, einerseits für das Leitungsnetz, andererseits aber auch für den Informationsaustausch. Ferner werden die Batterien in den Fahrzeugen – heute die teuerste Komponente in einem Elektroauto – durch die Netz-Zusatzdienste zusätzlich belastet. Dementsprechend werden Batterien mit noch höheren Lebensdauern benötigt, und der Betriebsführung und Zustandsbestimmung der Batterien wird eine zentrale Bedeutung zukommen.

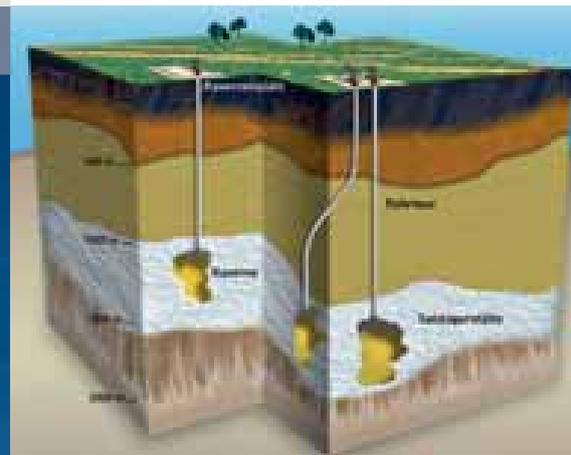
// Langzeitspeicherung: Welche Speicher bieten ausreichende Kapazität für die saisonale Energiespeicherung?

Eine prinzipielle Frage ist, welche Speicherleistung und welche Speicherkapazität des deutschen Stromnetzes bei 100%-Vollversorgung durch EE erforderlich sind, um beispielsweise längere Windflauten zu überbrücken. Grundlastfähige EE zur Stromerzeugung mit einer prognostizierten Leistung von ca. 20 GW sind Bioenergie, Geothermie, Laufwasserkraftwerke und ca. 10 % der installierten Windkraftleistung. Bei einer durchschnittlichen Last von 70 GW verbleibt eine Speicherleistung in der Größenordnung von ca. 50 GW mit einer Speicherkapazität von nahezu 20 TWh, wenn die Leistung über einen Zeitraum von ca. 2 Wochen abgerufen wird. Zur Stromspeicherung stehen in Deutschland z.Zt. jedoch nur 0,04 TWh in Form von Pumpspeicherkraftwerken zur Verfügung. Bei einer Vollversorgung durch erneuerbaren Strom ist ein Ausbau der Speicherkapazitäten um das ca. 500-Fache notwendig!

tors. Vehicle-to-grid concepts require sufficient grid connection opportunities, not only for the power grid, but also for the exchange of information. Furthermore, the additional grid services mean that the vehicles' batteries, currently the most expensive components in electric cars, are subjected to additional strain. Accordingly, batteries with longer lifetimes are needed and the management and status-checking of batteries will be of key importance.

// Long-term storage: Which storage systems offer sufficient capacity for seasonal energy storage?

One key question in the event of 100-% supply based entirely on renewable energy sources is: How much storage output and storage capacity is required in the German power grid, e.g. in order to bridge longer wind lulls? For electricity generation, the renewable energy sources suitable for base load coverage, with a predicted capacity of around 20 GW, are: bioenergy, geothermal energy, run-of-river power plants and around 10 % of the installed wind power capacity. With an average load of 70 GW remains a storage output on the scale of around 50 GW with a storage capacity of almost 20 TWh, if the output is used over a period of about 2 weeks. However, for electricity storage in Germany, only 0.04 TWh are currently available in the form of pumped hydro storage power plants. For complete supply based on renewable electricity, storage capacities would have to be increased by a factor of around 500!



// Quelle: KGE – Kommunale Gasspeicher-Gesellschaft Epe mbH & Co. KG

Für die erforderlichen Kapazitäten von ca. 20 TWh in Deutschland kommen nur chemische Energieträger infrage, die z.B. in Kavernen als Gas gespeichert werden können. Beim Vergleich eines Kavernenspeichers mit Wasserstoff als chemischem Speichermedium ergibt sich die ca. 10- bis 100-fache, bei regenerativ erzeugtem Erdgassubstitut sogar die ca. 30- bis 300-fache Speicherkapazität gegenüber der Druckluftvariante (abhängig vom Speicherdruck). Ein Vergleich mit den existierenden und den in Planung befindlichen Erdgasspeichern zeigt, dass diese Speicherkapazitäten heute in der bestehenden Infrastruktur bereits Realität sind (vgl. Tab. 1, Seite 20). Rein rechnerisch lassen sich 217 TWh von in Kavernen lagerndem Erdgas mit Gas- und Dampf-Kraftwerken in 130 TWh Strom konvertieren. Andere Speichertechnologien mit einer Kapazität in einer Größenordnung von > 10 TWh sind nicht in Sicht.

Bei der Speicherung von EE in Untertagespeichern bahnt sich jedoch ein Konflikt an: Die Technologien Druckluftspeicher und Gasspeicher (Erdgas, Erdgassubstitut oder Wasserstoff) können zumindest regional mit der sogenannten „Speicher“-Technologie CCS (Carbon Capture and Storage) konkurrieren, bei der es sich jedoch um eine Entsorgung von CO₂ handelt und nicht um eine Speicherung im eigentlichen Sinne. Sollte es bei der Verstromung fossiler Energieträger in erheblichem Umfang zu einer Deponierung von CO₂ in ausgeförderten unterirdischen Erdgaslagerstätten kommen, so stehen entsprechende Reservoirs zur saisonalen Speicherung von EE zumindest im Inland nicht mehr zur Verfügung.

In Germany, for the required capacities of around 20 TWh, the only viable option would be chemical energy carriers, which can be stored in caverns as gas, for example. In comparison, a reservoir cavern with hydrogen as the chemical storage medium has around 10 to 100 times the storage capacity of the compressed air variant; with renewably generated substitute natural gas, the storage capacity is even around 30 to 300 times as high (depending on the storage pressure). A comparison with existing and planned natural gas storage facilities shows that these storage capacities are already in place in the existing infrastructure (see table 1, page 20). From a purely theoretical point of view, 217 TWh of natural gas stored in caverns can be converted into 130 TWh of electricity with gas and steam power plants. Other storage technologies with a capacity on the scale of > 10 TWh are not on the horizon.

Nevertheless, a conflict is arising with regard to the storage of renewable energy in underground storage facilities: The technologies of compressed air reservoirs and gas storage facilities (natural gas, substitute natural gas or hydrogen) are competing with the so-called “storage” technology CCS (carbon capture and storage), which actually constitutes disposal of CO₂ and not storage as such. If the large-scale conversion of fossil fuels into electricity were to involve the dumping of CO₂ in depleted, natural gas underground storage facilities, at least inland the corresponding reservoirs would thus no longer be available for seasonally storing renewable energy.



// Quelle: MENNEKES Elektrotechnik GmbH & Co. KG

// Aktuelle Forschungsprojekte des ZSW zur Energiespeicherung

Bei der Energiespeicherung liegt der Fokus des ZSW auf den Schwerpunktthemen „Elektrochemische Speicher“ und „Sekundärenergieträger“. Beide Themen sind eng mit dem Themenfeld Mobilität verknüpft, einerseits durch Batterien für die Elektromobilität und andererseits durch die Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe (Wasserstoff, Erdgassubstitut) für konventionelle und hybridisierte Fahrzeugantriebe. Darüber hinaus werden systemanalytische Aspekte zur Speicherung EE interdisziplinär am ZSW bearbeitet und Fortbildungsangebote in Kooperation mit dem Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V. (WBZU) erstellt. Gemeinsames Ziel der Aktivitäten ist es, dass Stromnetz, Gasnetz und Verkehrssektor unter effizienter Nutzung EE zusammenwachsen. Die Schwerpunktthemen sind:

Fokus Elektrochemische Speicher

- > Vehicle-to-Grid
- > Photovoltaics/Battery-to-Grid
- > Batterie-Testzentrum

Fokus Sekundärenergieträger

- > Biomass-to-Gas
- > Power-to-Gas
- > Power-to-Liquid/Biomass-to-Liquid

Fokus Systemanalyse und Fortbildung

- > Systemanalytische Betrachtung verschiedener Optionen zur optimierten Integration erneuerbarer Energien in das deutsche Stromnetz
- > Technikfolgenabschätzung und Markteinführungsstrategien Elektromobilität
- > WBZU-Fachseminar „Energiespeicherung – Zukunftskonzepte im Zeitalter Erneuerbarer Energien“

// ZSW's current energy storage research projects

In energy storage, ZSW focuses on the key topics of electrochemical storage systems and secondary energy carriers. Both topics are closely related to the subject of mobility, firstly via batteries for electric traction and secondly via the provision of renewable fuels (hydrogen, substitute natural gas) for conventional and hybrid vehicle drives. In addition, systems-analysis-related aspects of renewable energy storage are addressed in an interdisciplinary way at ZSW and advanced training programmes are set up in cooperation with the Fuel Cell Education and Training Centre Ulm (Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V., WBZU). The common goal of the activities is that the power grid, the gas network and the transport sector grow together with efficient use of renewable energy sources. The key topics are:

Focus on electrochemical storage systems

- > Vehicle-to-grid
- > Photovoltaics/Battery-to-grid
- > Battery test centre

Focus on secondary energy carriers

- > Biomass-to-gas
- > Power-to-gas
- > Power-to-liquid/Biomass-to-liquid

Focus on systems analysis and advanced training

- > Systems-analysis-based investigation of various options for optimised integration of renewable energy sources into the German power grid
- > Technological impact assessment and market introduction strategies for electromobility
- > WBZU specialist seminar "Energy storage – future concepts in the era of renewable energy"



// Quelle Brennstoffzellenfahrzeug: Daimler AG



// Vehicle-to-Grid

Eine ganz entscheidende Frage beim Vehicle-to-Grid-Konzept ist die Beeinflussung der Lebensdauer des Energiespeichers. Durch die Netz-Zusatzdienstleistungen kommt es zu einer zusätzlichen Belastung der Batterie, was prinzipiell zu einer kürzeren Lebensdauer des Speichers führt. Heutige Speicher haben aber quasi keine oder nur eine sehr geringe Reserve neben der eigentlichen Hauptaufgabe, dem Fahrzeugantrieb. Daher können die Netz-Zusatzdienste nicht ohne Weiteres von jedem Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden, sondern es ist ein vielfältiges und komplexes Energiemanagement notwendig, das die Lebensdauer des Speichers mitberücksichtigt. Heutige am ZSW entwickelte Ansätze zielen auf ein Energiehandelssystem. Als Basis dient ein Kostenmodell, welches die durch eine vorgegebene Dienstleistung verursachte Batteriealterung kalkulierbar macht. Ein derartiges Kostenmodell berücksichtigt neben der Belastung durch die Dienstleistung auch weitere Fakten wie eventuell vorhandene Reserven in der Batterielebensdauer oder spezielle Anforderungen des Fahrers.

Weitere wichtige Fragestellungen wie die Beeinflussung des elektrischen Netzes, der Einfluss von neuen Konzepten wie Schnellladung und induktive Nachladung, die generelle Veränderung der Mobilität sowohl gesellschaftlich als auch technologisch sowie Fragen zur Marktentwicklung werden in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und Industriepartnern bearbeitet.

// Photovoltaics/Battery-to-Grid

Das deutsch-französische Forschungs- und Entwicklungsprojekt Sol-ion entwickelt und erprobt in Haushalten installierte netzgekoppelte Photovoltaik (PV)-Systeme in Verbindung mit Lithium-Ionen-basierten Speichern zur Verbesserung der Integration von Solarstrom in das öffentliche Stromnetz. Das Gesamtsystem besteht aus einem Wechselrichter, einem Batterieladegerät und einer Lithium-Ionen-Batterie sowie dem System- und Energiemanage-

// Vehicle-to-grid

One very decisive aspect in the vehicle-to-grid concept is the influence on the lifetime of the energy storage system. The additional grid services entail additional strain on the battery, which in principle leads to a shorter lifetime for the storage system. However, today's storage systems have virtually no energy in reserve, or very little, besides that required for the actual main task, which is to power the vehicle. Therefore, the additional grid services cannot be provided by every vehicle; instead, multifaceted and complex energy management, which takes the storage system's lifetime into account, is needed. Current approaches developed at ZSW are geared toward an energy trading system based on a cost model which enables calculation of the battery aging caused by a specified service. This type of cost model takes into account not only the strain caused by the service, but also other factors, such as any reserve battery lifetime or the driver's special requirements.

Other important issues, such as the influence on the power grid, the influence of new concepts such as quick charging and inductive recharging, the general change in mobility both societally and technologically as well as market development issues, are addressed in cooperation with other research institutes and industrial partners.

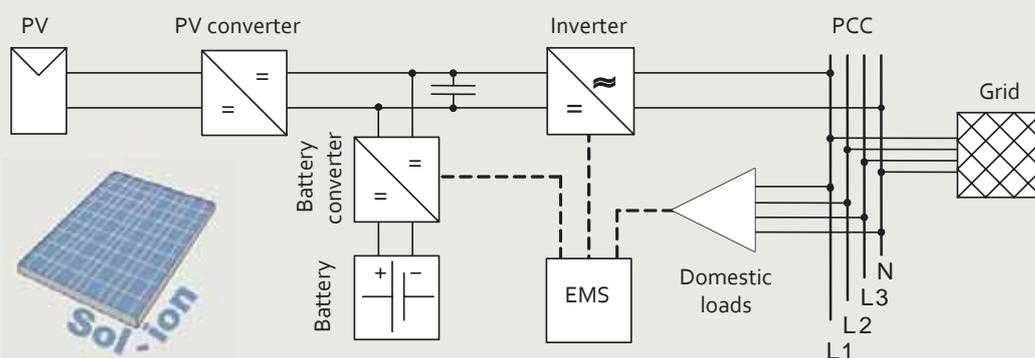
// Photovoltaics/Battery-to-grid

The Franco-German research and development project Sol-ion develops and tests grid-connected photovoltaic (PV) systems installed in households, in conjunction with lithium-ion-based storage systems for improved integration of solar power into the public power grid. The overall system consists of an inverter, a battery charger and a lithium-ion battery, as well as system and energy management (EMS). The storage capacity is 10 to 12 kWh

ment (EMS). Die Speicherkapazität beträgt 10-12 kWh bei einer Spannung von 250/400 V, die PV-Leistung beträgt 2-5 kW_p und die Wechselrichterleistung 3-8 kW. Die Parallelschaltung mehrerer Batteriesysteme ist möglich (Abb. 2).

with a voltage of 250/400 V. The PV output is 2 to 5 kW_p and the inverter power is 3 to 8 kW. Several battery systems can be connected in parallel (fig. 2).

// Abb. 2: Schematische Darstellung des Sol-ion PV-Batterie-Systems
// Fig. 2: Schematic diagram of the Sol-ion PV-battery system



Das aktuelle Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) enthält eine besondere Vergütungsregelung für Strom aus PV-Anlagen, wenn Anlagenbetreiber oder Dritte den Strom in unmittelbarer räumlicher Nähe zur Anlage selbst verbrauchen und dies nachweisen. Zur Optimierung des Eigenverbrauchs kann daher die aktuell im Haushalt benötigte Energie bevorzugt direkt aus der PV-Anlage, dem Speicher oder auch aus einer Kombination beider Quellen bereitgestellt werden. Nur wenn aus diesen Quellen nicht genug Energie zur Verfügung gestellt werden kann, wird auf Netzstrom zurückgegriffen.

The current German Renewable Energy Sources Act (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) includes a special remuneration regulation for electricity from PV systems if the system operator or a third party uses the electricity themselves in the immediate vicinity of the system and provides evidence to this effect. Thus, for optimisation of one's own consumption, it is preferable to supply the energy currently needed in the household directly from the PV system, the storage system, or a combination of both sources. The power grid is only resorted to when it is impossible to supply enough energy from these sources.

Neben einer optimierten Wirkleistungseinspeisung kann das System zur Netzunterstützung, als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) bei Netzausfällen und zur Abdeckung von Spitzenlasten genutzt werden.

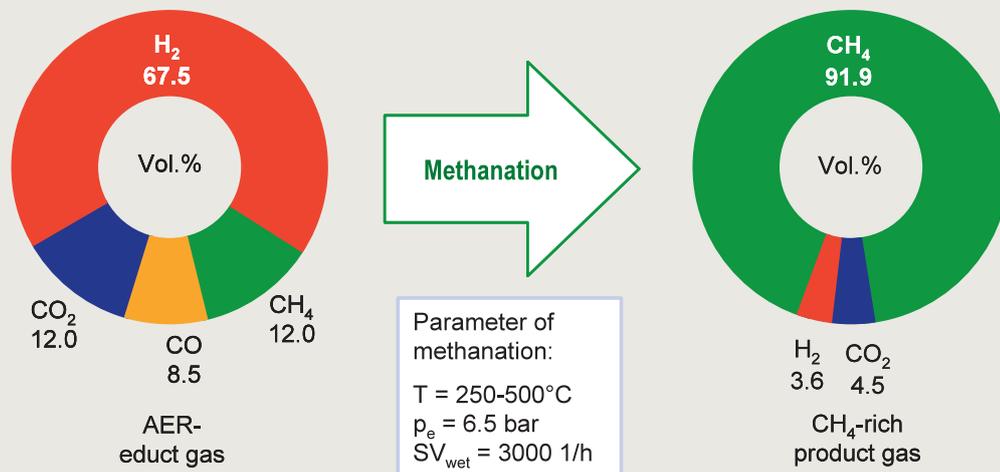
In addition to optimised feeding of active power, the system can be used for grid support, as an uninterruptible power supply (UPS) in the event of grid failures and for peak load coverage.

// Batterie-Testzentrum

// Battery test centre

Batteriespeicher spielen für mittelfristige Speicherzeiten (< 1 Tag) eine ganz entscheidende Rolle im Bereich der Elektromobilität und bei netzgekoppelten photovoltaischen Anlagen mit optimiertem Selbstverbrauch. Besonders im Bereich der Elektromobilität ist die spezifische Energiedichte einer der Schlüsselparameter. Moderne Lithium-Ionen-Batterien, wie sie für Laptops verwendet werden, erreichen heute weit über 200 Wh/kg, während Zellen für Elektrofahrzeuge mit bis zu 150 Wh/kg etwas geringere Werte aufweisen. Dem gegenüber steht aber eine deutlich höhere Lebensdauer im Vergleich zur Laptop-Zelle. Die Lebensdauer ist in Kombination mit den Kosten der zweite Schlüsselparameter. Aufgrund

For medium-term storage periods (< 1 day), battery banks play a very important role in the field of electromobility and in grid-connected photovoltaic systems with optimised operating consumption. Particularly in the field of electromobility, the specific energy density is one of the key parameters. Today, modern lithium-ion batteries, such as those used in laptops, provide far more than 200 Wh/kg, whereas cells for electric vehicles provide somewhat less: up to 150 Wh/kg, although their lifetimes are significantly longer than those of laptop cells. The lifetime, together with the costs, constitutes the second key parameter. Due to the materials used, lithium-ion batteries in particular can (under exceptional



// Abb. 3: Zusammensetzung des Gases aus dem AER-Prozess vor und nach Methanisierung
 // Fig. 3: Gas composition out of AER process before and after methanation

der eingesetzten Materialien können insbesondere Lithium-Ionen-Batterien unter außergewöhnlichen Betriebszuständen brennen oder sogar explodieren. Die Untersuchung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien ist daher eine zentrale Aufgabe des Batterie-Testzentrums am ZSW. Weitere Aufgaben bestehen in der messtechnischen Parametrierung neuartiger Batterien sowie in der Durchführung von Lebensdaueruntersuchungen. Letztere sind sehr aufwändig, da die erzielbare Lebensdauer von zahlreichen Parametern abhängt und die Durchführung sehr zeit- und kostenintensiv ist. Soll z.B. das Lebensdauerverhalten einer Zelle vollständig bestimmt werden, so müssen etwa 10 bis 50 Zellen für eine Dauer von 3 bis 24 Monaten kontinuierlich unter verschiedenen Bedingungen zyklisiert werden. Diese Messergebnisse dienen nicht nur zur Überprüfung der Eignung eines Zelltyps, sondern auch zur Optimierung der Betriebsstrategie in Fahrzeugen oder stationären Systemen.

// Biomass-to-Gas

Für die energetische Nutzung von Biomasse zur Herstellung von gasförmigen Energieträgern eignen sich je nach biogenem Einsatzstoff fermentative oder thermochemische Konversionsprozesse. Während bei der Fermentation ein Biogas mit den Hauptbestandteilen Methan und Kohlendioxid gewonnen wird, enthält ein Rohgas aus der Biomassevergasung vor allem Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Die erzeugten Brenngase können direkt für die Strom- und Wärmeerzeugung genutzt oder zu gasförmigen Energieträgern wie Erdgassubstitut (SNG, Substitute Natural Gas), Wasserstoff oder Synthesegas konvertiert bzw. aufbereitet werden. Folgende Lösungsansätze werden schwerpunktmäßig untersucht:

- > Biomassevergasung nach dem AER-Verfahren
- > SNG-Herstellung aus Vergasungsgas, insbesondere aus AER-Produktgas
- > H_2 -Abtrennung aus Vergasungsgas, insbesondere aus AER-Produktgas

Besonderes Merkmal der AER-Vergasung ist die vergaserintegrierte Abtrennung von CO_2 . Das Produktgas weist dadurch einen deutlich größeren Wasserstoffanteil auf. Aufgrund dieser Gasstöchiometrie kann das AER-Produktgas mittels eines Syntheseschrittes (Methanisierung) in einspeisefähiges SNG konvertiert

(operating conditions) burn or even explode. Therefore, testing the safety of lithium-ion batteries is a key task of the battery test centre at ZSW. Other tasks involve configuring new types of batteries by means of technical measurements, as well as conducting lifetime determination tests. The latter are very laborious, as the achievable lifetime depends on many parameters and conducting the tests is very time-intensive and cost-intensive. If, for example, the lifetime behaviour of a cell is to be determined completely, around 10 to 50 cells must be cycled continually for 3 to 24 months under various conditions. These measurement results serve not only to test the suitability of a cell type, but also for optimisation of the operating strategy in vehicles or stationary systems.

// Biomass-to-gas

For the production of gaseous fuels via the use of biomass for energy, fermentative or thermochemical conversion processes can be used, depending on the biogenic feedstock. With fermentation, the main components of the biogas produced are methane and carbon dioxide, whereas raw gas from biomass gasification primarily contains hydrogen and carbon monoxide. The fuel gases produced can be used directly for generation of electricity and heat, or can be converted or treated to produce gaseous energy sources, such as substitute natural gas (SNG), hydrogen or synthesis gas.

At ZSW, investigations focus on the following possible solutions:

- > Biomass gasification using the AER (absorption-enhanced reforming) process
- > SNG production from gasification gas, particularly from AER product gas
- > H_2 separation from gasification gas, particularly from AER product gas

One special characteristic of AER gasification is that CO_2 separation is integrated into the gasification unit. Therefore, the product gas contains a significantly higher proportion of hydrogen. Due to this gas stoichiometry, the AER product gas can be converted into

werden. Bei optimaler Prozessführung entfallen weitere Gas-trennverfahren, was die Gesamtprozesskette stark vereinfacht und die Effizienz deutlich verbessert. Ein typisches Beispiel für die Gaszusammensetzung nach dem AER-Vergasungs- sowie dem nachfolgenden Methanisierungsschritt zeigt Abb. 3.

Das so erzeugte SNG kann problemlos in das weit verzweigte Erdgasverteilnetz eingespeist werden. Somit können regionale Biomasseaufkommen vom Ort der energetischen Nutzung entkoppelt werden, wobei das Erdgasnetz als Speicher- und Verteilungsmedium dient. Die Nutzungsmöglichkeiten von SNG sind vielseitig: Neben der Gewinnung von Strom und Wärme in zentralen bzw. dezentralen Kraftwerken kann SNG auch als Kraftstoff im mobilen Sektor für Erdgasfahrzeuge oder für die dezentrale Wasserstoffherzeugung an Tankstellen eingesetzt werden.

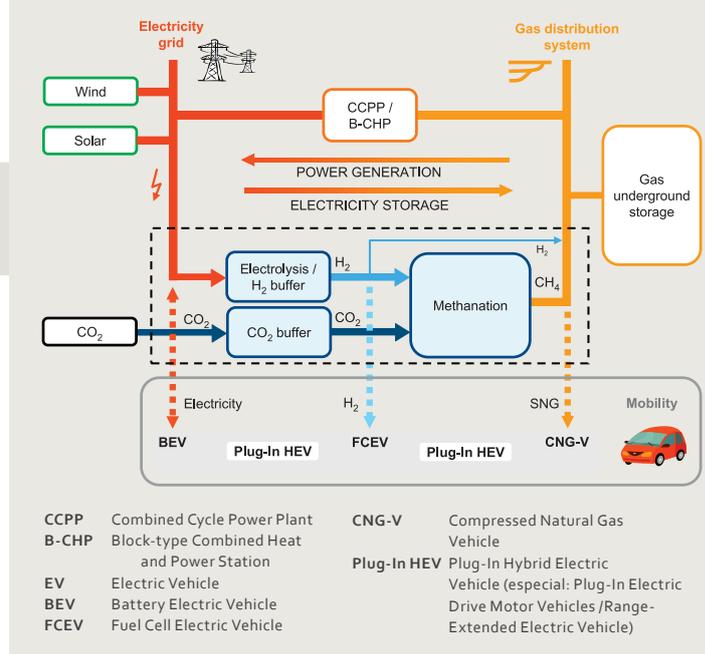
Aufgrund seines hohen Wasserstoffgehaltes bietet das AER-Produktgas ideale Voraussetzungen für die Herstellung von Reinstwasserstoff. Dabei wird das Rohgas nach der Abreinigung verschiedener Minorkomponenten einer Druckwechseladsorptionseinheit (PSA: Pressure Swing Adsorption) zugeführt, welche den im Vergasungsgas enthaltenen Wasserstoff von weiteren Gasbestandteilen separiert. Der biogene Wasserstoff bietet sich insbesondere zur Versorgung von Wasserstoff-Tankstellen an.

Die Umwandlung von Biomasse in gasförmige Energieträger wird in Zukunft einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung leisten. Daher wurde vom ZSW im Jahr 2009 die FuE-Plattform BtG (Biomass-to-Gas) initiiert. Hier werden FuE-Aktivitäten von Forschungseinrichtungen und Industrie zu den Themenkomplexen Biomassebereitstellung und -konversion sowie Produktgasnutzung gebündelt. Die BtG-Plattform ist eng verknüpft mit der AER-Vergasungsanlage der Betreibergesellschaft TBM (Technologieplattform Bioenergie und Methan) in Geislingen-Türkheim (Baden-Württemberg), die voraussichtlich 2011 in Betrieb gehen wird.

// Power-to-Gas

Bei der Entwicklung des Power-to-Gas-Konzeptes hat sich das ZSW von zwei Kernfragen leiten lassen: Welche Speicher bieten eine ausreichende Kapazität für einen saisonalen Ausgleich? Und welche Speicher lassen sich am einfachsten in die bestehende Infrastruktur integrieren?

Das Grundprinzip des Power-to-Gas-Konzeptes ist die bidirektionale Verknüpfung der existierenden Infrastruktureinheiten Stromnetz und Gasnetz mit dem Ziel, ein neuartiges Last- und Erzeugungsmanagement zu etablieren, das die Aufnahme hoher Anteile fluktuierender Stromerzeugung aus EE ins Energiesystem ermöglicht. Bislang besteht die Verknüpfung nur durch Stromerzeugung aus Erdgas (Gas-to-Power), nicht jedoch in umgekehrter Richtung (Power-to-Gas). Grundlagedes neuen Konzeptes ist, aus Gründen



// Abb. 4: Wind-to-SNG-Konzept zur bidirektionalen Kopplung von Strom- und Gasnetz mit Anbindung an den Verbrauchssektor Mobilität
 // Fig. 4: Wind-to-SNG concept for bidirectional coupling of the electricity and gas grid and interconnection to consumer sector mobility

feed-in SNG by means of a synthesis step (methanation). With optimal process management, other gas separation processes can be avoided, which greatly simplifies the overall process chain and significantly improves efficiency. A typical example of the gas composition after AER gasification and the subsequent methanation step can be seen in fig. 3.

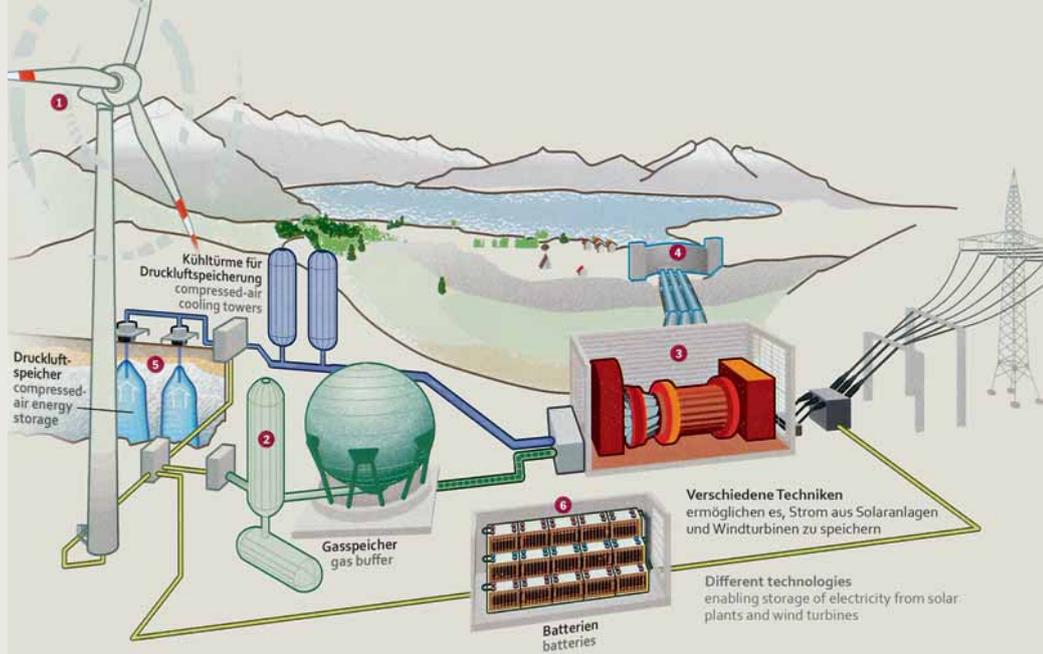
The SNG thus produced can be fed into the large and complex natural gas distribution network without any problems. This allows regional occurrence of biomass to be decoupled from the location of the energy usage, whereupon the natural gas network serves as the storage and distribution medium. The possible uses of SNG are diverse: Alongside the generation of electricity and heat in centralised or decentralised power plants, SNG can also be used as a fuel in the mobile sector for natural gas vehicles or for decentralised hydrogen production at filling stations.

Due to its high hydrogen content, AER product gas is ideal for the production of ultrapure hydrogen. Here, after being cleansed of various minor components, the raw gas is put through a pressure swing adsorption (PSA) unit, which separates the hydrogen in the gasification gas from other gas components. Biogenic hydrogen is particularly suitable for supplying hydrogen filling stations.

The conversion of biomass into gaseous energy sources will make a key contribution to a sustainable energy supply in the future. For this reason, ZSW initiated the R&D platform BtG (biomass-to-gas) in 2009. Here, R&D activities of research institutes and industrial players are bundled under the subject headings of "biomass provision and conversion" and "use of product gas". The BtG platform is closely linked to the AER gasification plant owned by the operating company TBM (Technology Platform Bioenergy and Methane) in Geislingen-Türkheim (Federal State of Baden-Württemberg), Germany, which is expected to be commissioned in 2011.

// Power-to-gas

In the development of the power-to-gas concept, ZSW has oriented itself toward two core questions: Which storage systems provide sufficient capacity for seasonal balancing? And which storage



- // Regenerativen Strom besser speichern**
- 1 Windkraft- oder Solaranlagen liefern mal zu viel, mal gar keinen Strom.
 - 2 Mit dem Ökostrom wird Wasserstoff oder Methan hergestellt. Beide Gase sind lagerfähig.
 - 3 Bei Strombedarf im Netz nutzt eine Turbine den Gasvorrat.
 - 4 Pumpspeicher-Kraftwerke sind die meistgenutzten Strompuffer.
 - 5 Auch unter hohem Druck in den Untergrund gepresste Luft ist ein Energiespeicher.
 - 6 Batterien stabilisieren das Netz.

- // Improved storage of renewable energy**
- 1 Wind turbines and solar power systems sometimes supply too much electricity, and sometimes no electricity at all.
 - 2 With eco-electricity, hydrogen or methane are produced. Both gases can be stored.
 - 3 If electricity is required by the grid, a turbine utilises the gas reserves.
 - 4 Pumped hydro storage power plants are the most used electricity buffers.
 - 5 Compressed air, which is kept under pressure underground, can also be used as an energy storage medium.
 - 6 Batteries stabilise the grid.

// Quelle: Focus 11/2010

der Netzstabilität nicht einspeisbare bzw. preiswert verfügbare Elektrizität (z.B. bei hohem Windstromaufkommen) in Form von Erdgassubstitut zu speichern. Ein wesentliches Ziel ist es, die Energielieferung von Windparks plan- und regelbar zu gestalten. Das Prinzip ist in Abb. 4 dargestellt.

Das Konzept sieht vor, „überschüssigen“ Strom aus fluktuierenden Quellen mittels Elektrolyse zunächst zu Wasserstoff und in einer anschließenden Synthesestufe (Methanisierung) mit CO_2 zu einem Erdgassubstitut umzusetzen. Wegen der stark schwankenden Erzeugung in Verbindung mit Prognoseungenauigkeiten ist primär die Verbindung mit Windenergieanlagen vorgesehen (interne Bezeichnung: „Wind-to-SNG“). Potenziell kann aber auch Solarstrom eingesetzt werden bzw. jede andere erneuerbare Stromquelle.

Mit einer Power-to-Gas-Anlage kann durch gezieltes Drosseln oder Abschalten der Elektrolyse in Zeiten schwächeren Windstromangebots bzw. höherer Stromnachfrage die Gesamtlast gesenkt werden. Um zu jeder Zeit – auch bei Windflaute – eine konstante Last zur Verfügung stellen zu können, ist eine Kombination der Power-to-Gas-Anlage mit GuD- oder Blockheizkraftwerken ein sinnvolles Konzept, wobei die Verstromung nicht notwendigerweise am Standort der Power-to-Gas-Anlage erfolgen muss.

Das Power-to-Gas-Konzept passt hervorragend in das bestehende Energiesystem, insbesondere vor dem Hintergrund des zukünftig stark steigenden Anteils EE im Stromnetz. Ein besonderer Vorteil des Konzepts gegenüber anderen Optionen, die die bessere Integration fluktuierender Stromquellen über Speichermedien gewährleisten, ist die Nutzung des Erdgasnetzes mit seiner quasi unbegrenzten Speicherkapazität. Hervorzuheben ist zudem die besondere Flexibilität hinsichtlich der Weiterverwendung der gespeicherten Energie, denn SNG kann nicht nur rückverstromt, sondern auch im Wärme- oder Kraftstoffmarkt eingesetzt werden. Letzteres ist vor dem Hintergrund des geplanten steigenden Anteils von regenerativen Kraftstoffen von besonderem Interesse.

systems can be integrated into the existing infrastructure most easily?

The basic principle of the power-to-gas concept is the bidirectional linking of the existing infrastructure units (the power grid and the gas network) with the goal of establishing a new way of managing loads and generation, which enables high proportions of fluctuating electricity generation from renewable energy sources to be accommodated in the energy system. To date, this link only exists in terms of electricity generation from natural gas (gas-to-power), but not in the other direction (power-to-gas). The new concept is based on storing electricity which cannot be fed into the grid for reasons of grid stability, or cheaply available electricity (e.g. at times when a large amount of wind power is available), in the form of substitute natural gas. One key goal is to enable the planning and control of the energy supply from wind farms. The principle is shown in fig. 4.

The concept envisages firstly using electrolysis to convert “excess” electricity from fluctuating sources into hydrogen, then into substitute natural gas (SNG) in a subsequent synthesis step (methanation) with CO_2 . Due to the highly fluctuating generation, in combination with the imprecision of forecasts, it is primarily envisaged for use in combination with wind turbines (internally referred to as “wind-to-SNG”). However, solar power could potentially also be used, or any other source of renewable electricity.

During periods when less wind power is available, or when there is greater electricity demand, the overall load can be reduced by systematically reducing or deactivating the electrolysis with a power-to-gas system. In order to be able to provide a constant load at all times, even during wind lulls, a combination of a power-to-gas system with gas and steam or combined heat and power plants is a concept which makes sense; here, the conversion to electricity does not necessarily have to take place on the site of the power-to-gas system.

The power-to-gas concept suits the existing energy system extremely well, particularly with regard to the fact that the proportion of renewable energy sources in the power grid is set to increase

// Focus

// Tab. 3: Reaktionsbedingungen für die Brennstoffherzeugung aus Synthesegas
 // Table 3: Reaction conditions for fuel synthesis via synthesis gas

	Product	Pressure	Temperature	Catalyst	H ₂ :CO ¹⁾
Methanol	CH ₃ OH	50–100 bar	250–280 °C	Cu/ZnO	2:1
Fischer-Tropsch (Low Temp.)	–CH ₂ –, long (Waxes)	10–30 bar	190–240 °C	Co Fe	2:1
Fischer-Tropsch (High Temp.)	–CH ₂ –, short (Olefines)	3–40 bar	250–350 °C	Fe	2:1
Methane	CH ₄	< 10 bar	250–550 °C	Ni	3:1
Direct DME	CH ₃ -O-CH ₃	50 bar	260 °C	special	1:1

1) Optimal synthesis gas ratio H₂/CO used in technical application can differ from stoichiometric value depending on reactor type, process conditions, and catalyst

// Power-to-Liquid/Biomass-to-Liquid

Nach dem gleichen Grundprinzip wie bei den Biomass-to-Gas- und Power-to-Gas-Konzepten können anstelle von Gasen auch flüssige, leicht speicherbare Brennstoffe wie Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzin oder Diesel), Alkohole (z.B. Methanol) oder Ether (z.B. Dimethylether, DME) synthetisiert werden. Die Herstellung ist sowohl aus H₂ und CO₂ (Power-to-Liquid) als auch aus biomassestämmigen Synthesegasen (H₂/CO/CO₂) (Biomass-to-Liquid) möglich (siehe Tab. 3).

// Systemanalytische Betrachtung verschiedener Optionen zur optimierten Integration erneuerbarer Energien in das deutsche Stromnetz

In der aktuellen öffentlichen Diskussion und nicht zuletzt aufgrund des im August 2009 veröffentlichten Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität der Bundesregierung gewinnt das Thema Elektromobilität zunehmend an Bedeutung. Neben der Möglichkeit neuer Konzepte einer postfossilen Mobilität setzt man dabei auch hohe Erwartungen in Elektrofahrzeuge als mobile Speicher zur Netzintegration EE. Darüber hinaus gibt es weitere Speicheroptionen, z.B. das am ZSW entwickelte Wind-to-SNG-Konzept, die neben Netzausbau, „Smart Grids“ und Last-Management diskutiert werden. Ein Vergleich verschiedener Integrationsoptionen, der Vor- und Nachteile unter verschiedenen Blickwinkeln analysiert und Empfehlungen auf Grundlage des aktuellen Kenntnisstands formuliert, wird im ZSW-Fachgebiet Systemanalyse als Gemeinschaftsprojekt mit drei weiteren Fachgebieten des ZSW durchgeführt.

// Technikfolgenabschätzung und Markteinführungsstrategien Elektromobilität

Im Fachgebiet Systemanalyse werden Technologien nie isoliert, sondern insbesondere auch im Zusammenhang mit Aspekten der Technikfolgenabschätzung betrachtet. Im Bereich der Elektromobilität sind dies beispielsweise Fragen zum notwendigen Umbau der Energieversorgungsstruktur, zum resultierenden Strom-

signifikant in der Zukunft. Ein besonderer Vorteil dieses Konzepts gegenüber anderen Optionen, die eine bessere Integration von schwankenden Stromerzeugern über Speichermedien ermöglichen, ist die Nutzung des natürlichen Gasnetzes, mit seiner nahezu unbegrenzten Speicherkapazität. Ein weiterer Aspekt ist die Flexibilität bei der anschließenden Nutzung der gespeicherten Energie, da SNG nicht nur in den Heizungs- oder Kraftstoffmarkt, sondern auch in den Heizungs- oder Kraftstoffmarkt integriert werden kann. Letzteres ist von besonderem Interesse im Kontext der geplanten Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien.

// Power-to-liquid/Biomass-to-liquid

Basierend auf dem gleichen Prinzip wie bei Biomass-to-Gas und Power-to-Gas, können auch flüssige Brennstoffe synthetisiert werden, die leicht speicherbar sind, wie Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzin oder Diesel), Alkohole (z.B. Methanol) oder Ether (z.B. Dimethylether, DME). Diese können aus H₂ und CO₂ (Power-to-Liquid) sowie aus biomassestämmigen Synthesegasen (H₂/CO/CO₂) (Biomass-to-Liquid) hergestellt werden (siehe Tab. 3).

// Systems-analysis-based investigation of various options for optimised integration of renewable energy sources into the German power grid

In der aktuellen öffentlichen Diskussion und, in nicht geringem Maße, aufgrund des im August 2009 veröffentlichten Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität der Bundesregierung gewinnt das Thema Elektromobilität zunehmend an Bedeutung. Neben der Möglichkeit neuer Konzepte einer postfossilen Mobilität setzt man dabei auch hohe Erwartungen in Elektrofahrzeuge als mobile Speicher zur Netzintegration EE. Darüber hinaus gibt es weitere Speicheroptionen, z.B. das am ZSW entwickelte Wind-to-SNG-Konzept, die neben Netzausbau, „Smart Grids“ und Last-Management diskutiert werden. Ein Vergleich verschiedener Integrationsoptionen, der Vor- und Nachteile unter verschiedenen Blickwinkeln analysiert und Empfehlungen auf Grundlage des aktuellen Kenntnisstands formuliert, wird im ZSW-Fachgebiet Systemanalyse als Gemeinschaftsprojekt mit drei weiteren Fachgebieten des ZSW durchgeführt.



// Quelle: Andreas Brinner/DLR

bedarf oder zur direkten Verknüpfung mit EE. Bezüglich der Batterietechnologien werden zudem Fragen zur Verfügbarkeit von Rohstoffen und zu Kostenstrukturen behandelt. Darüber hinaus wird die Beurteilung der Marktchancen von Elektromobilen verknüpft mit der Frage, was für den Markteintritt notwendig ist und wie geeignete Markteinführungsinstrumente aussehen können.

// WBZU-Seminar „Energiespeicherung – Zukunftskonzepte im Zeitalter Erneuerbarer Energien“

Das Thema Energiespeicherung und Integration von EE wird auch in das Fortbildungsprogramm des Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V. (WBZU) aufgenommen, mit dem das ZSW eng kooperiert. Dazu wurde durch Mitarbeit der ZSW-Fachgebiete Systemanalyse und Akkumulatoren ein Fachseminar konzipiert. Der ganzheitliche Ansatz vermittelt ausgehend von der zukünftigen Entwicklung EE und der damit verbundenen Speicherproblematik einen Überblick über bestehende und zukünftige Speichertechnologien in Verbindung mit dem Stromnetz der Zukunft.

Der Schwerpunkt des Seminars liegt auf der Vermittlung der wesentlichen Aspekte, durch die eine nachhaltige Energiewirtschaft gesichert werden kann. Kurz- und Mittelfristspeicher wie Schwungräder und Batterien sowie Optionen zur langfristigen Energiespeicherung wie Wasserstoff oder auch erneuerbar erzeugtes Methan (Wind-to-SNG) stellen dabei nur einen Baustein dar. Die Netze der Zukunft bestimmen aktuell auch Schlagworte wie „Lastmanagement-Konzepte“ und „Smart Grids“, „vernetzte Elektromobilität“ sowie auch „Virtuelle Kraftwerke“ und „Kombikraftwerke“; werden innerhalb des Seminars näher analysiert und eingeordnet.

// Coordinator
Dr. Michael Specht

// Technological impact assessment and market introduction strategies for electromobility

In the Systems Analysis department, technologies are never considered in isolation but particularly in terms of assessing their technological impact. In the electromobility field, for example, this relates to issues concerning the necessary redevelopment of the energy supply structure, the resulting electricity requirement or the direct integration of renewable energies. In terms of battery technologies, the raw material availability and cost structures are also examined. In addition, the assessment of market opportunities for electric vehicles is also concerned with determining what is needed for a market introduction and which would be suitable market introduction instruments.

// WBZU seminar “Energy storage – future concepts in the era of renewable energy”

The topic of energy storage and integration of renewable energy sources is also included in the advanced training programme of the Fuel Cell Education and Training Centre Ulm (Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V., WBZU), with which ZSW cooperates closely. In addition, a specialist seminar was devised on the basis of cooperation between the ZSW departments Systems Analysis and Accumulators. Based on the future development of renewable energy sources and the associated storage problems, the holistic approach provides an overview of existing and future storage technologies in connection with the power grid of the future.

The seminar focuses on conveying essential aspects with which a sustainable energy industry can be secured. Short-term and medium-term storage systems such as flywheels and batteries, as well as options for long-term energy storage such as hydrogen or renewably generated methane (wind-to-SNG) constitute just one component. Currently, networks of the future also entail catch phrases such as “load management concepts”, “smart grids”, “networked electromobility”, “virtual power plants” and “combined power plants” – these are analysed and classified in more detail during the seminar.

// Impressum Imprint

// Herausgeber Publisher
Zentrum für Sonnenenergie-
und Wasserstoff-Forschung
Baden-Württemberg (ZSW)

Industriestraße 6
70565 Stuttgart
Phone: +49 (0)711 78 70-0
Fax: +49 (0)711 78 70-100

E-Mail: info@zsw-bw.de
Internet: www.zsw-bw.de

// Redaktion Editors
Tiziana Bosa
Claudia Brusdeylins
Dr. Theresa Friedlmeier
Gudrun Scherg
Ulrike Zimmer

// Koordination Coordination
Karl-Heinz Frietsch

// Layout & Satz Layout & Setting
Sieber & Wolf Werbeagentur
Hofgut Mauer 1
70825 Korntal-Münchingen
www.sieberundwolf.de



Der Jahresbericht wurde auf
FSC-zertifiziertem Papier gedruckt.
This annual report was printed
on FSC-certified paper.

Stuttgart:

Industriestraße 6
70565 Stuttgart
Fon: +49(0)711 78 70-0
Fax: +49(0)711 78 70-100
www.zsw-bw.de

Solar-Testfeld Widderstall:

Widderstall 14
89188 Merklingen
Fon: +49(0)7337 92 394-0
Fax: +49(0)7337 92 394-20
www.zsw-bw.de

Ulm:

Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
Fon: +49(0)731 95 30-0
Fax: +49(0)731 95 30-666
www.zsw-bw.de

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2008

