

RENEWS SPEZIAL

NR. 88 / NOVEMBER 2019

ENERGIESPEICHER: TECHNOLOGIEN UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DIE ENERGIEWENDE



AGENTUR FÜR
ERNEUERBARE
ENERGIEN
unendlich-viel-energie.de

AUTORIN

Claudia Kunz
Stand: November 2019

ISSN 2190-3581

HERAUSGEGEBEN VON

Agentur für Erneuerbare Energien e. V.
Invalidenstraße 91
10115 Berlin
Tel.: 030 200535 30
Fax: 030 200535 51
E-Mail: kontakt@unendlich-viel-energie.de

Gefördert durch:



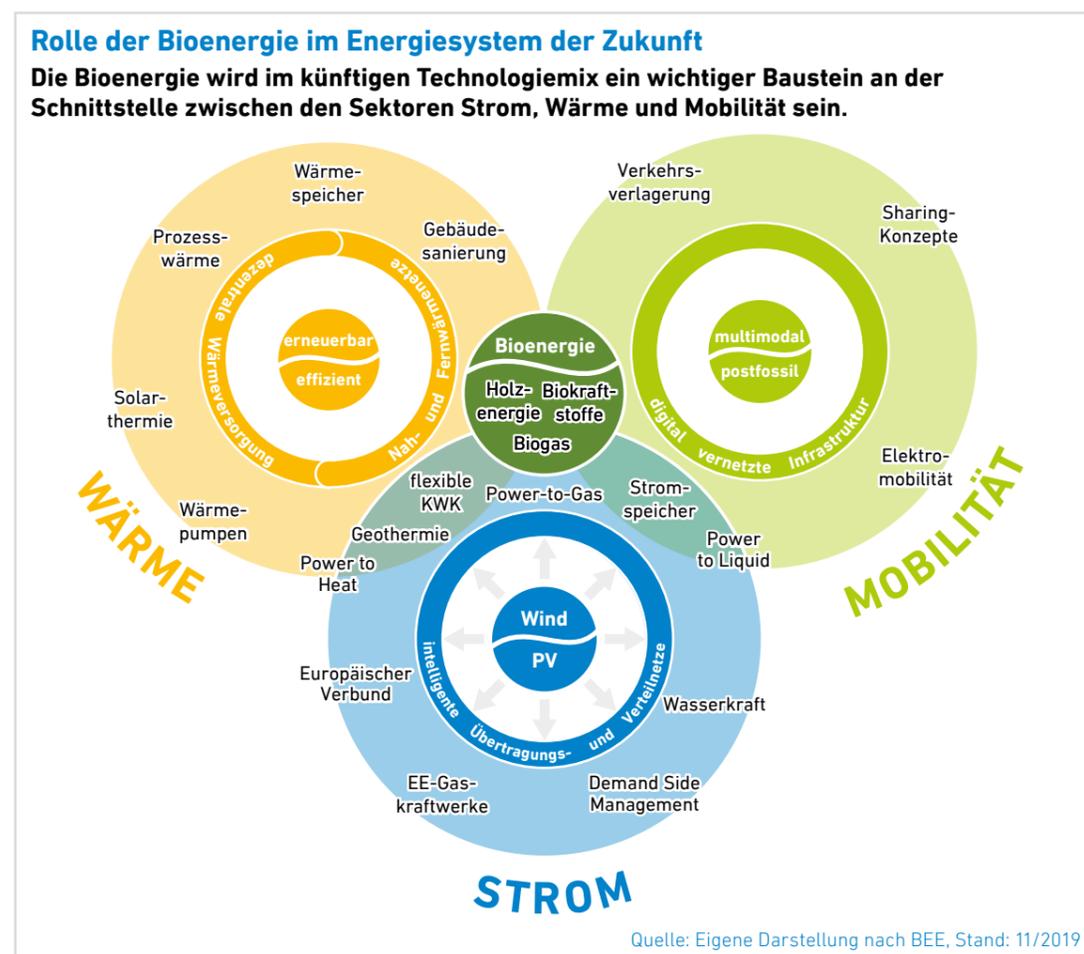
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALT

| | |
|--|-----------|
| 1 Die Bedeutung von Speichern im Energiesystem | 4 |
| 1.1 Speichertechnologien im Überblick | 5 |
| 1.2 Stromspeicher | 6 |
| 1.3 Thermische Speicher (Wärme) | 7 |
| 1.4 Hochtemperatur-Wärmespeicher (Strom und Wärme) | 8 |
| 1.5 Chemische Energiespeicher (Power-to-X) | 9 |
| 2 Speicher als Baustein für die Energiewende | 12 |
| 2.1 Energiespeicher für das Stromsystem | 12 |
| 2.2 Bedeutung von Speichern für die Wärmeversorgung | 14 |
| 2.3 Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung | 15 |
| 2.4 Die Bedeutung von Speichern im Verkehr | 16 |
| 2.5 Power-to-X als sektorenübergreifende Speichertechnologien | 17 |
| 3 Speicher in der Praxis | 19 |
| 3.1 Pumpspeicherkraftwerke | 19 |
| 3.2 Photovoltaik-Batteriespeicher | 21 |
| 3.3 Batterien im Verkehrssektor (Elektromobilität) | 22 |
| 3.4 Elektrothermischer Speicher (ETES) | 23 |
| 3.5 Power-to-Gas | 23 |
| 3.6 Power-to-Liquids | 24 |
| 4 Wirtschaftlichkeit und politische Rahmenbedingungen | 25 |
| 4.1 Pumpspeicherkraftwerke | 25 |
| 4.2 Power-to-X | 26 |
| 4.3 Intelligente Verknüpfung und Steuerung von Speichern | 26 |
| 5 Rolle der Bioenergie als Speicher bzw. im Zusammenspiel mit Speichern | 28 |
| 5.1 Nutzungspotenziale | 28 |
| 5.2 Stromsektor: Flexible Biogasanlagen | 30 |
| 5.3 Biogas zur Herstellung von Power-to-Gas | 32 |
| 6 Quellen | 33 |

1 DIE BEDEUTUNG VON SPEICHERN IM ENERGIESYSTEM

Keine Energieversorgung kommt ohne Speicher aus. Im weiteren Sinne stellen alle kohlenstoffhaltigen Energieträger Speicher dar. Dazu zählen sowohl die fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas, als auch feste, flüssige und gasförmige Bioenergie. Der wesentliche Unterschied zwischen fossilen Energieträgern und Bioenergie ist dabei die Zeitspanne, in der sich der Speicher wieder auflädt. Während es bei ersteren Millionen von Jahren sind, handelt es sich je nach Art der Bioenergie um Tage, Monate oder wenige Jahre, weshalb Bioenergie zu den Erneuerbaren Energien zählt. Biomasse und Biogas bzw. Biomethan lassen sich gut speichern und genau zum Zeitpunkt des Bedarfs einsetzen, ob für die Wärmeversorgung, zur Stromerzeugung oder als Biokraftstoff im Verkehr. Die Bioenergie nimmt somit eine zentrale Rolle im Energiesystem ein.



Neben den kohlenstoffhaltigen Energieträgern sind Strom- und Wärmespeicher ein wichtiger Bestandteil der Versorgungssicherheit, denn sie gleichen Schwankungen von Energieangebot und -nachfrage aus. Sie sorgen dafür, dass Energie genau dann zur Verfügung steht, wenn sie benötigt wird. So sind die ältesten, heute noch in Betrieb befindlichen Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland und Europa rund 100 Jahre alt und Heißwasserspeicher kennen die meisten vom heimischen Heizungssystem. Im Zuge der Energiewende wächst die Bedeutung von Speichern, denn wenn die wetterabhängigen Quellen Sonne und Wind einen Großteil der Versorgung übernehmen, übersteigt das Angebot häufiger die momentane Nachfrage und umgekehrt. Um Wetter und Jahreszeiten auszugleichen, springen neben anderen steuerbaren Energiequellen wie Bioenergie auch Speicher ein. Neue Speichertechnologien tragen außerdem dazu bei, die notwendige Brücke zwischen erneuerbarer Stromerzeugung, Wärmeversorgung, Mobilität und Industrie zu bauen.

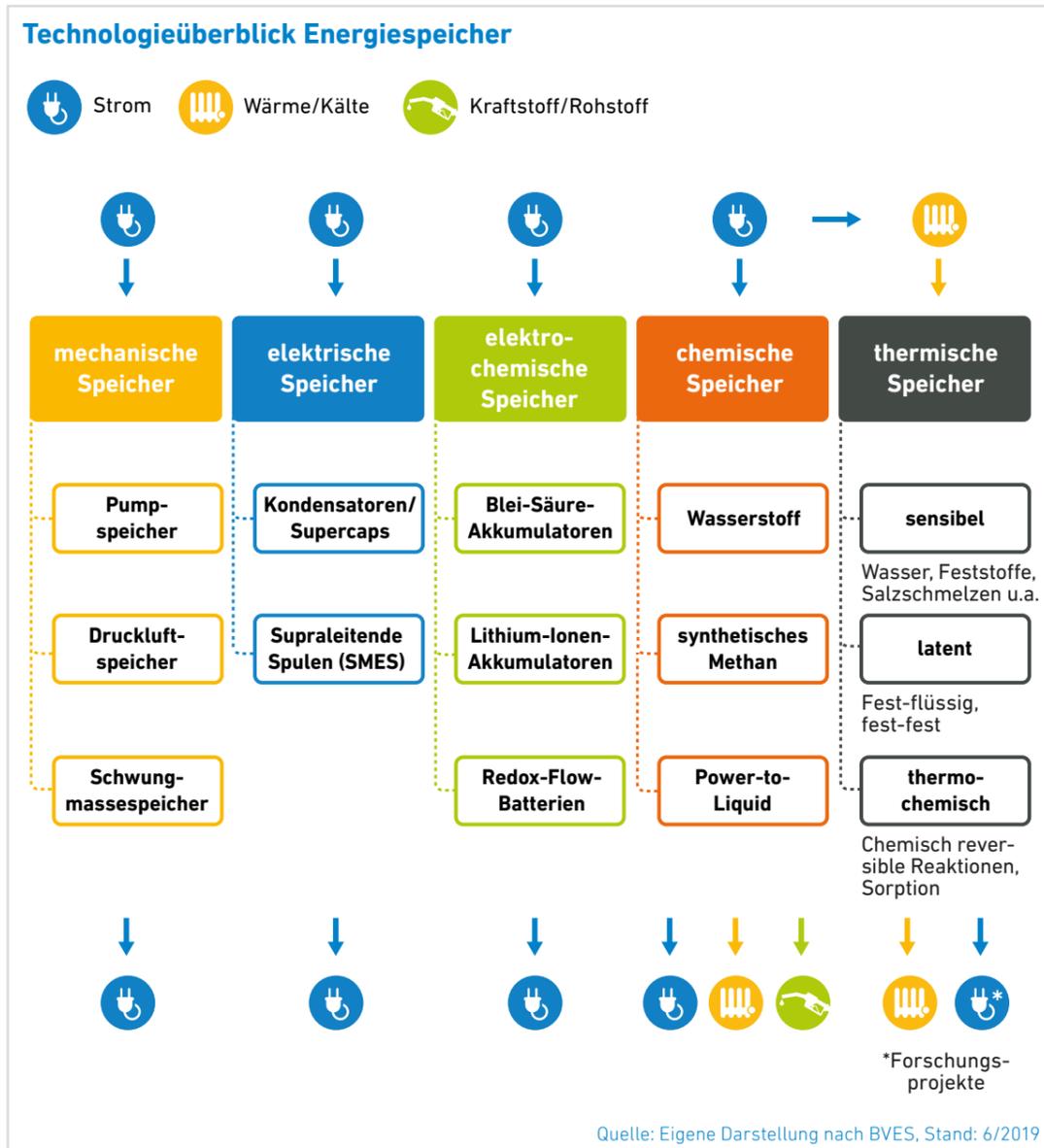
1.1 SPEICHERTECHNOLOGIEN IM ÜBERBLICK¹

Es gibt eine Vielzahl an Speichertechnologien, die sich nach verschiedenen Gesichtspunkten unterscheiden lassen:

- Welche Primärenergie eingespeichert wird (Strom, Wärme, Biogas oder andere Brennstoffe);
- In welcher Form die Energie gespeichert wird (elektrisch, elektro-chemisch; mechanisch, thermisch oder chemisch);
- Wie sich die gespeicherte Energie anschließend wieder nutzen lässt (Strom, Wärme, Kraftstoff, Rohstoff);
- Wie viel Energie gespeichert werden kann (Speicherkapazität);
- Wie groß die Energieverluste zwischen der ein- und ausgespeicherten Energie sind (Wirkungsgrad);
- Nach der Dauer des Be- oder Entladens bzw. des Einsatzes als Kurzzeit- oder Langzeitspeicher.

Wenn vom zunehmenden Bedarf an Speichern im Zuge der Energiewende die Rede ist, dann erfolgt das meist in dem Kontext der schwankenden Verfügbarkeit von Strom aus Wind- und Sonnenenergie. Die Strommengen, die zum Zeitpunkt der Erzeugung nicht anderweitig benötigt werden, sollen durch Speicher zu einem anderen Zeitpunkt verfügbar gemacht werden. Dazu gibt es verschiedene Optionen, wie die Grafik auf der folgenden Seite zeigt.

¹ Ausführlichere Informationen in AEE: Strom speichern. 2014



1.2 STROMSPEICHER

Stromspeicher nehmen beim Beladen elektrischen Strom auf und stellen zeitversetzt beim Entladen wieder elektrischen Strom zur Verfügung. Hierbei unterscheidet man im Wesentlichen drei Systeme:

1. Die **direkte elektrische Energiespeicherung** erfolgt mittels Kondensatoren, Super Caps oder supraleitenden magnetischen Energiespeichern (SMES bzw. Spulen). Sie zeichnen sich durch eine sehr kurze Reaktionszeit aus und werden eingesetzt, um kleine Schwankungen im Stromnetz abzufedern und Spannung und Frequenz stabil zu halten. Der Wirkungsgrad ist mit 90 bis 95 Prozent sehr hoch, die Speicherkapazität hingegen klein (im Kilowattstundenbereich).

2. Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher sowie Schwungradspeicher wandeln elektrische Energie in **mechanische Energie** um und speichern sie somit in indirekter Form. Schwungradspeicher gehören zu den reaktionsschnellen Kurzzeitspeichern, die zur Frequenz- und Spannungsstabilität im Stromsystem beitragen. Pump- und Druckluftspeicher gehören zu den Langzeitspeichern mit einem Speichervolumen im Bereich von Megawattstunden (tausend Kilowattstunden) bis Gigawattstunden (Millionen Kilowattstunden) und einer Entladungszeit von mehreren Stunden. Der Wirkungsgrad von Druckluftspeichern liegt bei 45 bis 55 Prozent, bei Pumpspeichern sind es 65 bis 85 Prozent.

3. Akkumulatoren (Batterien) sind **elektrochemische Speicher**. Je nach Technologie unterscheidet man zum Beispiel Lithium-Ionen-, Natrium-Schwefel-, Blei-Säure- oder Redox-Flow-Batterien. Die Wirkungsgrade liegen zwischen 65 und 95 Prozent, die Speicherkapazitäten im Bereich von Kilowattstunden bis Megawattstunden. Die Einsatzgebiete von Akkus im Rahmen der Energiewende liegen zum Beispiel in Elektrofahrzeugen, Photovoltaik-Heimspeichersystemen oder in der Netzstabilisierung.

Die Herstellung **synthetischer Brennstoffe** mithilfe von elektrischem Strom (Power-to-Gas oder Power-to-Liquid) wird auch oft als Stromspeicher bezeichnet. Wir führen diese Form der Energiespeicherung jedoch als eigene Rubrik auf (1.5), weil die hergestellten chemischen Energieträger nicht unbedingt wieder zur Stromerzeugung, sondern auch als Kraftstoff im Verkehr oder als Rohstoff in der Industrie eingesetzt werden können.

Eine neue Option sind **elektro-thermische Speicher** (siehe 1.4), wo mittels Strom Hochtemperaturwärme erzeugt, diese gespeichert und anschließend wieder zur Stromerzeugung genutzt wird. Die Unterscheidung zwischen Strom- und Wärmespeichern ist also teilweise fließend.

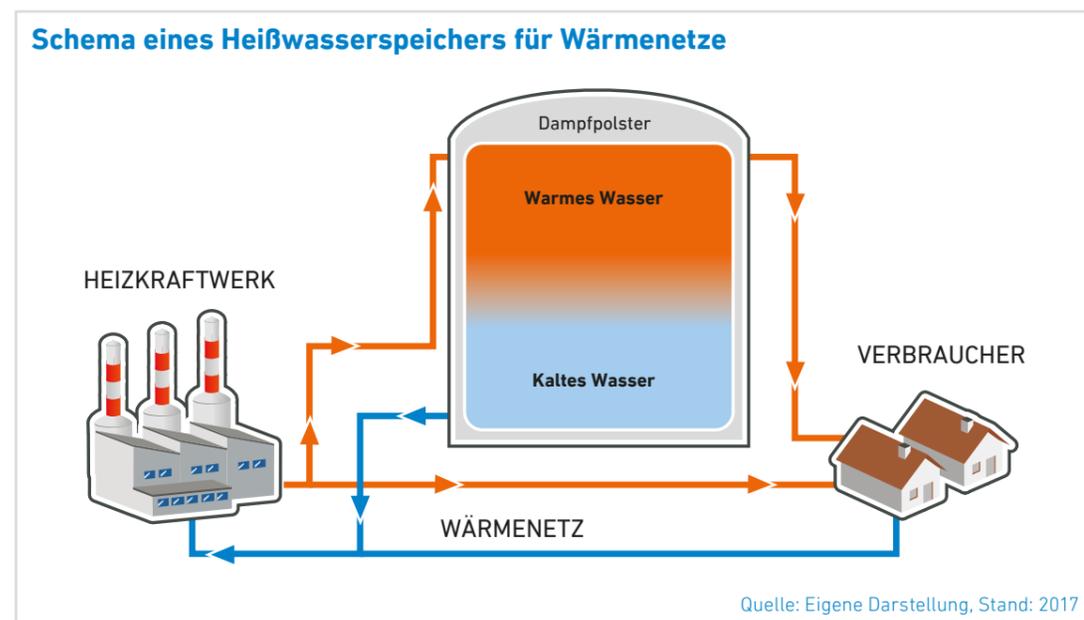
1.3 THERMISCHE SPEICHER (WÄRME)²

Im Allgemeinen werden drei Speicherarten unterschieden: **sensible, latente und thermochemische Speicher**. Nötig ist stets ein Speichermedium. Neben Wasser kommen dabei auch andere flüssige sowie feste Speichermedien zum Einsatz, z.B. Gestein, Beton, Keramik und Salz. Die Speicher-Technologien unterscheiden sich in der Energiedichte und der maximal speicherbaren Temperatur. Wie viel thermische Energie der Speicher aufnehmen kann, hängt von der Wärmekapazität und Masse des Speichermediums sowie der nutzbaren Temperaturdifferenz ab. Thermische Speicher können Strom aufnehmen, indem die Wärmeerzeugung mithilfe von elektrischen Wärmepumpen, Heizstäben oder Elektrodenkesseln erfolgt. Wegen des in der Regel geringen Temperaturniveaus kann aus der eingespeicherten Wärme jedoch nicht wieder Strom erzeugt werden.

In der Praxis am häufigsten sind **sensible Speicher**. Hier verändert das Speichermedium seine Temperatur, wenn der Speicher be- oder entladen wird. Während des Ladevorgangs wird dem Speichermedium direkt oder indirekt über einen Wärmetauscher Wärme zugeführt. Beim Entladen wird die gespeicherte Energie wieder abgegeben und der Speicher kühlt ab. Allgemein bekannt sind Heißwasserspeicher, wie sie im Zusammenhang mit Gebäudeheizungen vorkommen. Ein Kilogramm Wasser hat zwischen Gefrier- und Siedepunkt eine Wärme-Speicherkapazität von 116 Wattstunden (Wh). Sensible Großspeicher mit einem flüssigen Speichermedium lassen sich in verschiedene Bauformen einteilen: Behälter-, Erdbecken-, Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher.

² Ausführlichere Informationen in: AEE: Großwärmespeicher. 2017

In Fern- und Nahwärmenetzen wird Wärme in größerem Maßstab gespeichert. Großspeicher mit mehreren Tausend bis zu mehreren Millionen Litern Fassungsvermögen können in Wärmenetze eingebunden werden und die Versorgung mehrere Tage, Wochen und Monate überbrücken.



Latentwärmespeicher, auch als Phasen-Wechsel-Materialien (PCM) bezeichnet, arbeiten mit verschiedenen Aggregatzuständen von Stoffen (fest, flüssig, gasförmig). Die Wärmezufuhr lässt das Speichermedium schmelzen oder verdampfen, ohne dass sich dabei die Temperatur des Speichermediums erhöht. Deshalb wird von latenter (= verborgener) Wärme gesprochen. Beim Entladen, d.h. der Wärmeabgabe, erstarrt es oder verflüssigt sich wieder. Beispiele aus dem Alltag sind Handwärmer oder Kühlakkus. In Verbindung mit Solarthermieanlagen wird oft Paraffin als Speichermedium eingesetzt.³ Dessen Vorteile gegenüber einem Wasserspeicher liegen im deutlich geringeren Platzbedarf und einer höheren Speicherkapazität. Nachteil sind die höheren Kosten.

Thermochemische Speicher (TCS) arbeiten mit einer umkehrbaren (=reversiblen) chemischen Reaktion. Bei den Speichermitteln Silikagel oder Zeolith wird beim Laden zum Beispiel Wärme von der Solaranlage zugeführt und Wasser in Form von Dampf entzogen („Desorption“). Wenn in umgekehrter Richtung Wasserdampf zugeführt wird, lagert sich dieser an das Speichermedium an („Adsorption“), wobei Wärme frei wird.

1.4 HOCHTEMPERATUR-WÄRMESPEICHER (STROM UND WÄRME)⁴

Hochtemperatur-Wärmespeicher decken einen Temperaturbereich von 400 bis 1.300 Grad Celsius ab. Sie werden zum Beispiel bei solarthermischen Kraftwerken oder im Bereich der industriellen Prozesswärme eingesetzt, dienen der Speicherung von Strom im größeren Maßstab und der Flexibilisierung konventioneller Kraftwerke.

Hochtemperatur-Betonspeicher sind von Stahlrohrleitungen durchzogen, durch die ein spezielles Öl zirkuliert. Dieses überträgt die zuvor aufgenommene Wärme an den Beton, welcher sich auf bis zu 400

³ Vgl. www.energiesparen-im-haushalt.de

⁴ Vgl. AEE: Großwärmespeicher. 2017; DLR: Strömungs-Ungleichverteilung in Hochtemperatur-Wärmespeichern für den Kraftwerkseinsatz. 2008

Grad Celsius erhitzt und diese Wärme mehrere Stunden speichern kann. Soll der Speicher wieder entladen werden, wird erwärmtes Öl abgeleitet und kaltes Öl erneut in den Betonblock geleitet, welches sich dann wieder erwärmt.

PRAXISBEISPIELE

In solarthermischen Kraftwerken wird oftmals **Flüssigsalz** als Speichermedium eingesetzt. Mit der Salzmischung lassen sich 200 Kilowattstunden (kWh) pro Kubikmeter einspeichern. Nach Sonnenuntergang gibt das Salz die gespeicherte Wärme über einen Wärmetauscher wieder als Dampf ab. Der Temperaturbereich ist bei Flüssigsalz mit 180 bis 560 Grad Celsius deutlich höher als bei Wasser. So kann auch ohne Sonneneinstrahlung eine Turbine zur Stromerzeugung angetrieben werden. Der Vorteil gegenüber Wasserdampf ist zudem, dass bei der Salzschnmelze kein Druck entsteht. Die Flüssigkeit ist weder brennbar noch giftig. Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) haben im September 2017 in Köln eine vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Testanlage (TESIS) in Betrieb genommen⁵. Die Forschungsarbeiten sollen helfen, die Kosten der Flüssigsalztechnologie zu senken und die Effizienz zu steigern.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts ist im Juni 2019 in Hamburg ein **elektrothermischer Energiespeicher** (Electro-Thermal Energy Storage, kurz ETES) in Betrieb gegangen⁶. Er wandelt Strom in Wärme um, die ein so hohes Temperaturniveau aufweist, dass am Ende wieder Strom hergestellt werden kann.

Der Energieversorger Vattenfall erprobt in Kooperation mit dem schwedischen Unternehmen SaltX Technology im Heizkraftwerk Reuter in Berlin, inwieweit sich Strom aus Windenergie oder Photovoltaik durch einen reversiblen chemischen Prozess in einem besonderen **nanobeschichteten Salz** speichern lässt⁷. Bei der Umwandlung von Calciumoxid zu Calciumhydroxid entsteht eine Temperatur von 550 Grad Celsius. Diese Energie lässt sich über Wochen oder Monate speichern. Anschließend wird sie mithilfe eines Wärmetauschers in Form von heißem Wasser in das Berliner Fernwärmenetz eingespeist. Alternativ ließe sich die Energie auch zur Stromerzeugung nutzen.

1.5 CHEMISCHE ENERGIESPEICHER (POWER-TO-X)⁸

Generell sind feste, flüssige und gasförmige Biomasse sowie fossile Brennstoffe chemische Energieträger, die sich gut lagern lassen und somit im weiteren Sinne Energiespeicher darstellen. Hier werden als chemische Speicher jedoch synthetische flüssige oder gasförmige Energieträger betrachtet, die mit Hilfe von elektrischem Strom hergestellt werden („Power-to-X“, PtX). Diese chemischen Speicher können sehr **große Energiemengen über lange Zeiträume** aufnehmen und wieder abgeben.

Bei **Power-to-Gas (PtG)** wird zunächst per Elektrolyse mit elektrischem Strom **Wasserstoff (H₂)** produziert. Der Wasserstoff kann direkt verwendet werden, beispielsweise als Rohstoff in der chemischen Industrie oder in Brennstoffzellen. Bis zu einem Anteil von etwa fünf Prozent kann Wasserstoff direkt in das Erdgasnetz eingespeist und so in Gaskraftwerken, Gasheizungen oder Erdgas-Fahrzeugen genutzt werden. Alternativ kann der gewonnene Wasserstoff unter Zugabe von CO₂ in synthetisches Methan (CH₄)

⁵ DLR: Wärmeenergie in Salz speichern. 2017

⁶ BMWi: Energiewende direkt. Newsletter vom 20.8.19

⁷ Vattenfall: SaltX – neuer Salzspeicher in Betrieb. 2019

⁸ Ausführlichere Informationen in AEE: Verknüpfung von Strom, Wärme und Verkehr im Energiesystem der Zukunft. 2019

umgewandelt werden, das chemisch die gleichen Eigenschaften hat wie fossiles Erdgas und Biomethan. Es hat den Vorteil, dass es quasi unbegrenzt in den bestehenden Gasnetzen und -speichern gelagert und transportiert sowie in herkömmlichen Gasheizungen oder Erdgasautos genutzt werden kann. Nachteile sind der bei der Methanisierung anfallende zusätzliche Energieaufwand sowie die damit verbundenen Kosten.

Mit **Power-to-Liquids (PtL)** werden verschiedene chemische Prozesse bezeichnet, die mithilfe von Strom synthetische Flüssigkraftstoffe produzieren. Eine Möglichkeit ist dabei die Produktion verschiedener Kohlenwasserstoffe per Fischer-Tropsch-Synthese. Durch die Verflüssigung von Synthesegasen entstehen Kraftstoffe mit den gleichen chemischen Zusammensetzungen wie Benzin oder Diesel. Der große Vorteil ist, dass bestehende Fahrzeugtechniken, Speicher und Tankstelleninfrastrukturen weiter genutzt werden können.

PRAXISBEISPIEL

Im Projekt SOLETAIR arbeitet eine Ausgründung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit finnischen Partnern zusammen und produziert weltweit erstmalig synthetischen Kraftstoff über den Weg der Fischer-Tropsch-Synthese mithilfe von Strom aus Photovoltaik und Kohlendioxid aus der Luft. Die mobile Pilotanlage hat eine Produktionskapazität von bis zu 80 Liter Benzin am Tag und passt in einen Schiffscontainer⁹.

Gemeinsam ist den per PtG oder PtL gewonnenen chemischen Energieträgern, dass sie sich im Rahmen der vorhandenen Erdgas- und Mineralölinfrastruktur gut speichern und später vielseitig nutzen lassen. Sie können in Kraftwerken wieder zur Stromerzeugung eingesetzt werden oder als Kraftstoff im Verkehr, als Rohstoff in der Industrie oder für die Wärmeversorgung. PtX koppelt den Strom- mit dem Wärme-, Industrie- und Verkehrssektor und bietet mit seiner hohen Energiedichte eine Alternative für Verbrennungsmotoren, z.B. für den Schwerlast-, Flug- oder Schiffsverkehr.

Großer Nachteil ist, dass die Herstellungsverfahren für strombasierte Brennstoffe derzeit alle noch mit einem hohen technischen Aufwand, einem erheblichen Energieeinsatz bzw. hohen Energieverlusten und entsprechend hohen Kosten verbunden sind. Eine direkte Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien ist daher aus der Perspektive der Energieeffizienz vorteilhafter. Dennoch gelten chemische Speicher als für das Energiesystem langfristig notwendige und unter Berücksichtigung der gesamten Infrastruktur kosteneffiziente Ausgleichsmöglichkeit. In Studien mit ehrgeizigen Klimaschutzzielen und entsprechend wenig fossilem Erdgas wird PtG für den Energiesektor ab etwa 2030 unabdingbar¹⁰.

⁹ KIT: Power-to-Liquid: 200 Liter Sprit aus Solarstrom und dem Kohlenstoffdioxid der Umgebungsluft. 2017

¹⁰ Ecofys: Metaanalyse aktueller Studien zum Thema „Sektorenkopplung“. 2018. S. 40/41

Wie Power-to-Gas funktioniert

HOHES STROMANGEBOT

Der zunehmende Ausbau von Windenergie und Photovoltaik sorgt an sonnigen und windigen Tagen für ein hohes Stromangebot, das auch zur Erzeugung synthetischer Gase genutzt werden kann.



STROM

ELEKTROLYSE

Mithilfe von elektrischem Strom wird bei der **Elektrolyse Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff** aufgespalten. So wird ein Teil der elektrischen Energie chemisch in Form von Wasserstoff gespeichert.

WASSERSTOFF

METHANISIERUNG

Bei der Methanisierung wird der elektrolytisch hergestellte **Wasserstoff unter Zugabe von Kohlendioxid (CO₂) zu Methan** weiterverarbeitet. Das so produzierte synthetische Methan entspricht chemisch fossilem Erdgas und lässt sich einfacher speichern, transportieren und nutzen als Wasserstoff.

WASSERSTOFF

METHAN

WASSERSTOFFSPEICHER

Gasförmiger Wasserstoff wird unter **hohem Druck, flüssiger Wasserstoff bei sehr niedriger Temperatur** gespeichert. Das bedeutet einen hohen Material- und Energieaufwand.

GASNETZ

Wasserstoff kann bis zu einem Anteil von ca. 5 Prozent ins bestehende Erdgasnetz eingespeist werden. Für synthetisches Methan steht praktisch die gesamte Speicherkapazität des Erdgasnetzes zur Verfügung. Das sind in Deutschland etwa 200 Milliarden Kilowattstunden und entspricht dem landesweiten Stromverbrauch in vier Monaten.

WASSERSTOFF/METHAN

STROM UND WÄRME

Wasserstoff und Methan können in **Blockheizkraftwerken (BHKW) oder anderen Gas(-heiz)-kraftwerken sowie Brennstoffzellen** bei Bedarf wieder zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden. Die gesamte Wirkungskette ist jedoch mit erheblichen Energieverlusten verbunden.



KRAFTSTOFF

Wasserstoff und Methan können in technisch entsprechend ausgestatteten **Tankstellen und Fahrzeugen als Kraftstoff** eingesetzt werden.



STROM

WÄRME

MOBILITÄT

INDUSTRIE

Industrieprozesse haben einen Anteil von ca. 7 Prozent am gesamten Treibhausgasausstoß in Deutschland. Allein bei der Produktion von Rohstahl werden rund 50 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen: Das EU-geförderte Projekt Green Industrial Hydrogen, bei dem acht Partner aus Deutschland, Italien, Spanien, Finnland und Tschechien mitwirken, will Industrieprozesse klimaschonender gestalten. Der Schlüssel hierfür: ein Hochtemperatur Elektrolyseverfahren. Zum einen können Industriebetriebe mit diesem Verfahren durch Wärmerückgewinnung ihre Effizienz steigern. Zum anderen kann der für Industrieprozesse wichtige Rohstoff „Wasserstoff“ mit



Erneuerbaren Energien klimaschonend bereitgestellt werden, zum Beispiel für den:

- **Chemiesektor:** Wasserstoff bildet das Molekül bei der Produktion von Ammoniak, Methanol und Produkten auf Basis von Petroleum.
- **Stahlsektor:** Wasserstoff stellt im Prozess eine sichere Atmosphäre her, schließt Sauerstoff aus und verhindert so eine Oxidation des Stahls während des Glühprozesses.
- **Stromsektor:** Wasserstoff wird zur Kühlung großer Generatoren eingesetzt.

Quelle: Eigene Darstellung, Stand: 2019

2 SPEICHER ALS BAUSTEIN FÜR DIE ENERGIEWENDE

Auf einen Blick:

- Speicher bedeuten Flexibilität für das Energiesystem und die Energiemärkte.
- Speicher helfen, das Stromnetz stabil zu halten und Versorgungssicherheit zu garantieren.
- Neue Speicher verknüpfen die Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie („Sektorenkopplung“).

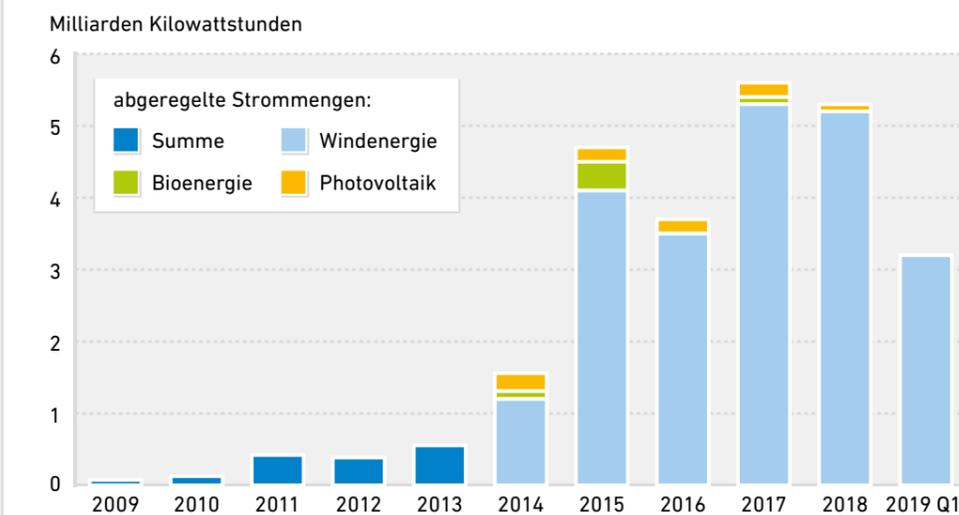
2.1 ENERGIESPEICHER FÜR DAS STROMSYSTEM

Im Jahr 2018 stammte 37,8 Prozent des Stromverbrauchs in Deutschland aus Erneuerbaren Energien, im ersten Halbjahr 2019 waren es sogar 44 Prozent. Schon bald wird in deutschen Netzen überwiegend Strom aus Erneuerbaren Energien fließen. Der aktuelle Koalitionsvertrag der Bundesregierung sieht für 2030 einen Anteil von 65 Prozent vor. Den quantitativ größten Beitrag unter den Erneuerbaren Energien leisten dabei bereits heute Windenergie- und Photovoltaikanlagen. Da sie das größte Wachstumspotenzial haben, wird ein immer größerer Teil der Stromerzeugung von Wetter, Tages- und Jahreszeiten abhängen.

Für eine sichere und stabile Stromversorgung muss in jedem Augenblick genauso viel Strom produziert wie nachgefragt werden. Nur dann bleiben Spannung und Frequenz in den Stromnetzen stabil. Der wachsende Anteil von Wind- und Sonnenenergie macht die Aufgabe anspruchsvoller, Stromerzeugung und -nachfrage jederzeit in Einklang zu bringen. Wenn der erzeugte Strom nicht an Ort und Stelle verwendet oder über die vorhandenen Netze abtransportiert werden kann, müssen Erzeugungsanlagen abgeregelt werden. In den Jahren 2017 und 2018 wurden dadurch jeweils mehr als fünf Milliarden

Durch Einspeisemanagement verlorene Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien

Statt Anlagen abzuregeln, wäre es sinnvoller, den Strom zu speichern oder in anderen Anwendungen, z.B. zum Heizen, einzusetzen („Sektorenkopplung“).



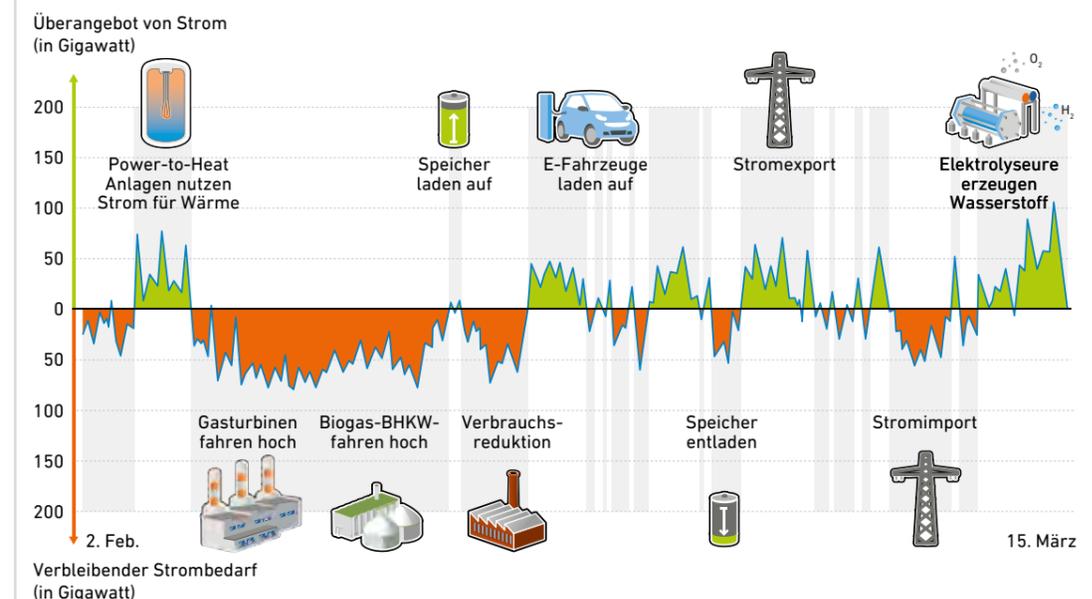
Quellen: Bundesnetzagentur/Bundeskartellamt 2016, 2017, 2018, 2019, Stand: 7/2019

Kilowattstunden Strom aus Erneuerbaren Energien nicht erzeugt und genutzt¹¹. Im windreichen ersten Quartal 2019 lag die ausgefallene Stromerzeugung bei mehr als drei Milliarden Kilowattstunden, im gleichen Quartal des Vorjahres waren es rund zwei Mrd. kWh.¹² Den vorhandenen Wind nicht zur Stromerzeugung zu nutzen, ist ineffizient und teuer. Deswegen muss das Stromsystem flexibler werden und besser auf die Verfügbarkeit von Wind und Sonne reagieren. Statt die Anlagen abzuregeln, wäre es sinnvoller, den Strom zu speichern oder anderweitig zu nutzen, zum Beispiel zur Wärmeerzeugung.

Energiespeicher entkoppeln den Zeitpunkt der Strom- oder Wärmeerzeugung von dem Zeitpunkt, zu dem die Energie vom Verbraucher genutzt wird. In einem Energiesystem, das zu immer größeren Anteilen aus Wind- und Sonnenenergie gespeist wird, sind Speicher ein wichtiger Baustein für Flexibilität. Speicher können je nach Bedarf Energie abnehmen („verbrauchen“) oder abgeben („erzeugen“). Sie bringen damit doppelt Flexibilität ins Energiesystem und tragen dazu bei, die schwankende Verfügbarkeit von Wind und Sonne auszugleichen und Zeiten zu überbrücken, in denen das Angebot knapp ist.

Zusammen mit anderen Flexibilitätsoptionen können Speicher auch bei einer Vervielfachung der Solar- und Windstromerzeugung dazu beitragen Stromangebot und -nachfrage jederzeit im Gleichgewicht zu halten.

Ein Frühjahr in den 2030er Jahren: Flexibilität garantiert Netzstabilität Auch bei Vervielfachung der Solar- und Windstromerzeugung* können Überangebot und verbleibender Bedarf ausgeglichen werden



* installierte Leistung von 151 GW Photovoltaik- und 102 GW Windenergieanlagen in Deutschland, Anteil Erneuerbarer Energien am Stromverbrauch im Jahresdurchschnitt: 83 Prozent

Quellen: Eigene Darstellung nach Sauer, RWTH JARA Energy, Stand: 12/2018

11 Bundesnetzagentur: Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Gesamtjahr und Viertes Quartal 2018, Bundesnetzagentur / Bundeskartellamt: Monitoringbericht 2018

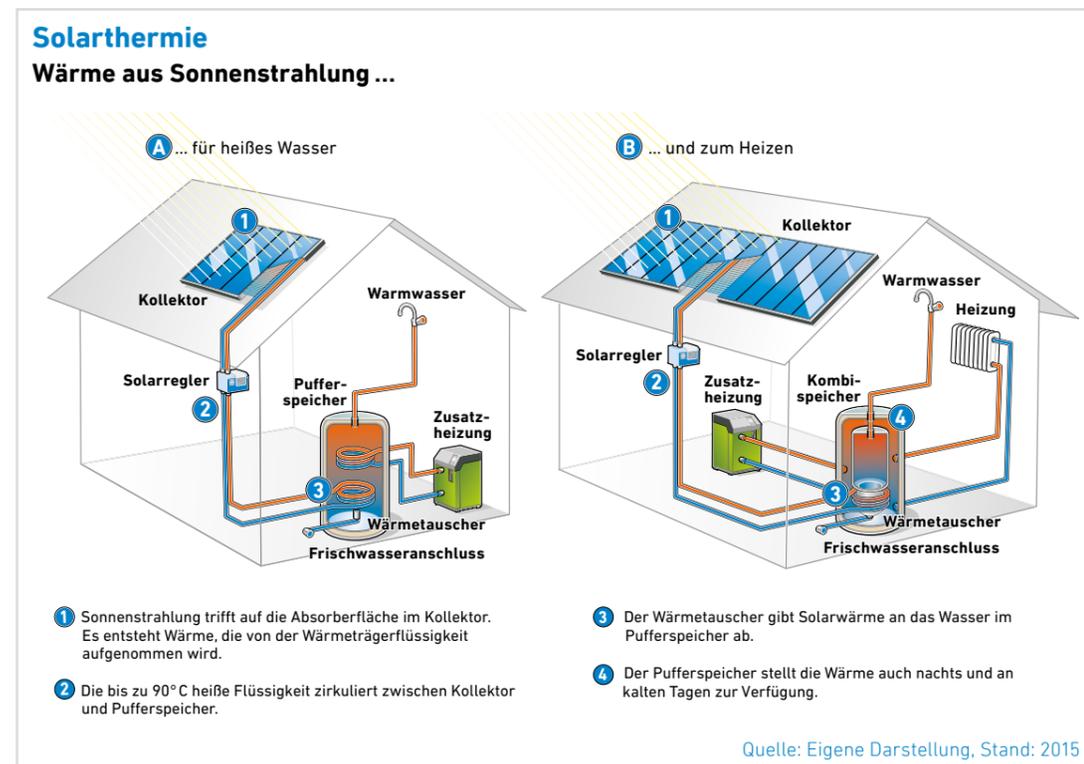
12 Bundesnetzagentur: Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen. Erstes Quartal 2019, S.26, 29

2.2 BEDEUTUNG VON SPEICHERN FÜR DIE WÄRMEVERSORGUNG

Auch wenn im Fokus der öffentlichen Diskussion meist die Energiewende in der Stromversorgung und die hierfür benötigten Speicher stehen, ist die Umstellung der Wärmeerzeugung auf Erneuerbare Energien für den Klimaschutz genauso wichtig. Im Wärmebereich stagniert der Anteil Erneuerbarer Energien seit Jahren bei 13 bis 14 Prozent.

Für hohe Anteile erneuerbarer Wärme werden ebenfalls Speicher benötigt. Wärmespeicher sorgen dafür, dass Wärme, die zum Beispiel bei der Stromerzeugung in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) anfällt und an warmen Tagen nicht benötigt wird, zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden kann. Auch die Nutzung von Wärme aus Industrieprozessen oder Solarthermieanlagen kann durch Speicher in Zeiten mit hohem Wärmebedarf verlagert werden. Langzeit-Wärmespeicher sorgen dafür, dass der Wärmebedarf das ganze Jahr über gedeckt werden kann.

Wärmespeicher sind ein wichtiger Baustein für die Kopplung von Strom- und Wärmesektor. Wind und Sonne werden in Zukunft den größten Teil der Energieerzeugung stellen. Um ihre wetterabhängige Energiebereitstellung bestmöglich zu nutzen, rückt die Nutzung von elektrischem Strom zur Wärmeerzeugung in den Fokus („Power-to-Heat“). Die hierbei erzeugte Wärme (oder auch Kälte) kann gespeichert und dadurch eine zeitversetzte Nutzung ermöglicht werden. Ziel ist es, Strom- und Wärmebedarf zeitlich zu entkoppeln. Strom soll dann zur Wärme- und Kälteerzeugung genutzt werden, wenn gerade reichlich Wind- und Sonnenenergie vorhanden ist. In den Zeiten, wenn Wind und Sonne knapp sind, soll die benötigte Energie hingegen möglichst aus Speichern oder Biomasse bereitgestellt werden. So lässt sich klimafreundlich Raumwärme, Klimakälte, Prozesswärme oder Prozesskälte für Gebäude, Industrie und Gewerbe bereitstellen.



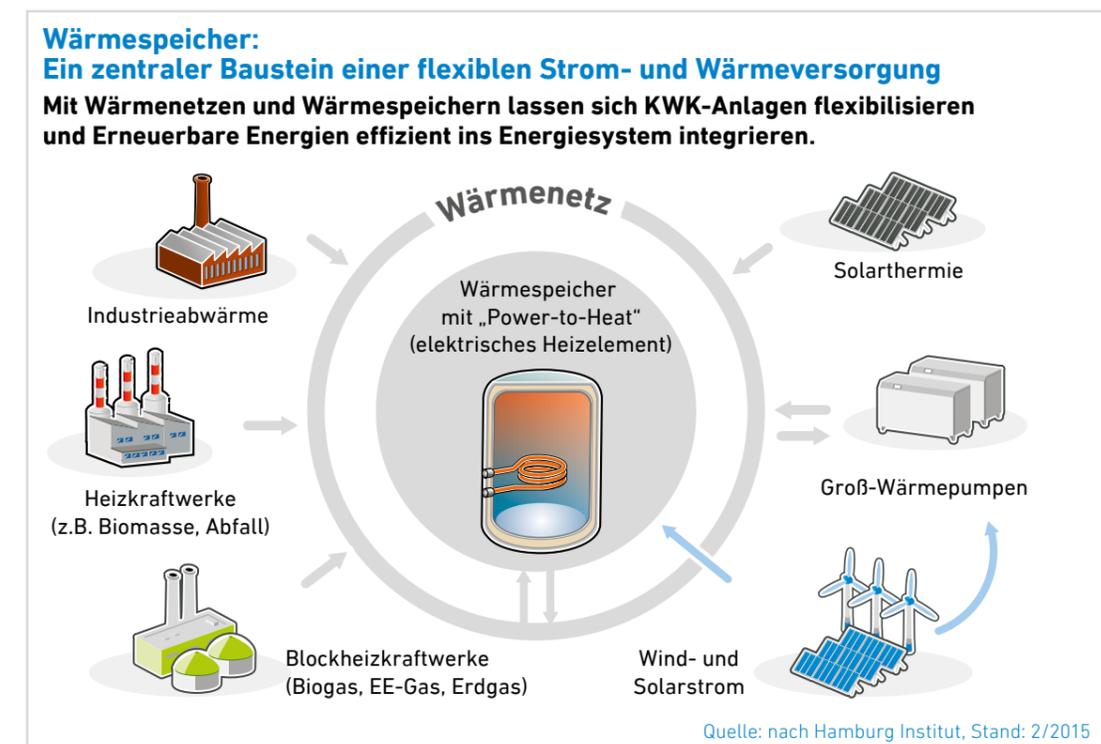
Der Speicher ist ein wesentlicher Bestandteil der Solarthermieanlage, egal, ob die Solarthermie nur zur Trinkwassererwärmung oder auch zur kombinierten Heizungsunterstützung genutzt wird. Er sorgt dafür, dass die Solarwärme auch nachts oder bei schlechtem Wetter genutzt werden kann.

Wärmenetze, die vor allem aus Bioenergie, Solarthermie, Erdwärme und strombasierten Anlagen (z.B. Großwärmepumpen) gespeist werden, sind ein zentraler Baustein der Wärmewende. Das Beispiel Dänemark zeigt, dass es möglich ist, den Anteil der Erneuerbaren Energien mit dem Ausbau von Wärmenetzen und -speichern schnell zu steigern. Auch in deutschen Kommunen gibt es bereits Langzeitwärmespeicher, die ein Überangebot von Wärme im Sommer speichern und bei steigender Nachfrage in den kalten Wintermonaten wieder entnehmen. Wärmenetze müssen diesen neuen Anforderungen entsprechend umgebaut werden.

2.3 FLEXIBILISIERUNG DER KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) leistet einen effektiven Beitrag zum Klimaschutz, da sie gegenüber einer getrennten Erzeugung von Strom und Wärme Brennstoffe einspart und damit den Schadstoffausstoß senkt. Durch die Auskopplung der bei der Stromerzeugung anfallenden Wärme erhöht sich der Wirkungsgrad von etwa 40 Prozent auf 80 Prozent. Deshalb wird die KWK über das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) gefördert. Strom aus KWK-Anlagen genießt ebenso wie Strom aus Erneuerbaren Energien Einspeisevorrang.

Besonders klimafreundlich sind Heizkraftwerke und Blockheizkraftwerke (BHKW), die anstelle von fossilen Ressourcen erneuerbare Quellen wie Holz oder Biogas nutzen. Vor allem Biogas-Blockheizkraftwerke sind prinzipiell gut steuerbar, sie können innerhalb von Minuten von Stillstand auf maximale Leistung hochgefahren werden. Somit sind sie prinzipiell prädestiniert, die Stromerzeugung durch Wind- und Sonnenenergie flexibel und klimaschonend zu ergänzen.



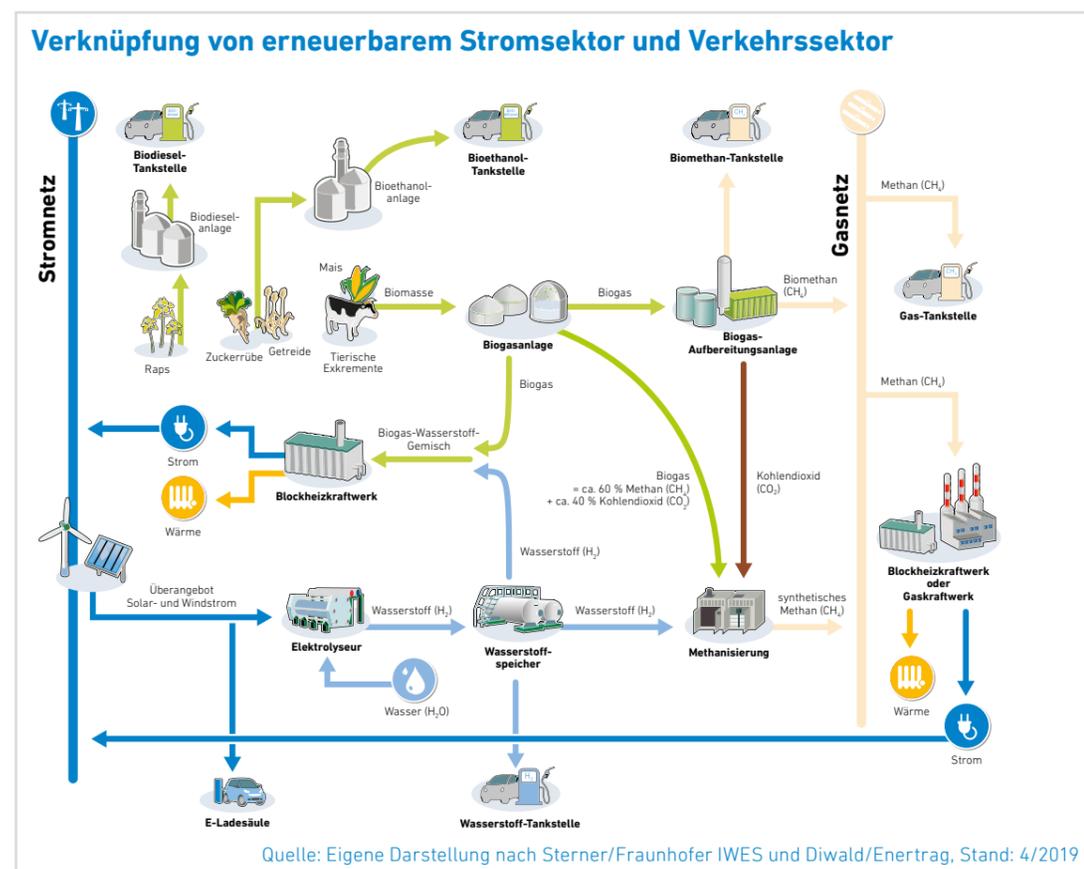
Damit sich die Wirtschaftlichkeit entsprechender Investitionen verbessert, gibt es Fördermittel für Wärme- und Kältespeicher, die durch das BAFA verwaltet werden. Agora Energiewende kommt in der Analyse der Entwicklungen im Strommarkt für das Jahr 2018 zu dem Schluss, dass die Flexibilisierung in der Stromerzeugung in den vergangenen Jahren schon Fortschritte gemacht hat, es jedoch vor allem bei Gas-KWK-Anlagen weiteren Handlungsbedarf gebe¹³.

Um KWK-Anlagen zu flexibilisieren und entsprechend dem Bedarf im Stromsystem (= stromgeführt) zu betreiben, sind Wärmespeicher und im Falle von Biogasanlagen größere Gasspeicher notwendig. KWK-Anlagen mit Wärmespeicher können auch dann Strom erzeugen, wenn die Wärme eigentlich nicht gebraucht wird. Umgekehrt müssen sie keinen Strom erzeugen, um Wärme liefern zu können, da sie den Bedarf für einige Zeit aus dem Speicher decken können.

2.4 DIE BEDEUTUNG VON SPEICHERN IM VERKEHR

Der Verkehrssektor ist das Sorgenkind des Klima- und Umweltschutzes. Vor allem die steigenden Verkehrsleistungen und immer schwerere Fahrzeuge haben dazu geführt, dass trotz Effizienzsteigerungen bisher keine Reduktion des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen erreicht wurde.

Der Umstieg auf Biokraftstoffe ist aus Gründen der begrenzten nachhaltigen Verfügbarkeit nur teilweise möglich. Eine wesentliche Rolle werden Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf umweltverträgliche Verkehrsträger einnehmen müssen, sie stehen im Mittelpunkt der notwendigen Verkehrswende. Für die Energiewende im Verkehr werden Elektromobilität und synthetische Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquids) eine zentrale Rolle spielen und somit Speichertechnologien aus dem Stromsektor. Der Antrieb von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist wie bei batteriebetriebenen Fahrzeugen elektrisch und hat damit den weiteren Vorteil, leiser und lokal emissionsfrei zu sein.



Strombasierte Kraftstoffe sind im Vergleich zur direkten Elektrifizierung mit hohen Umwandlungsverlusten und hohen Kosten verbunden. Die Herstellungsverfahren befinden sich noch in einer frühen Phase der Erforschung und Entwicklung. Dennoch gilt ihre Nutzung insbesondere für Teile des Schwerlast- und Eisenbahnverkehrs sowie für den Luft- und Schiffsverkehr als alternativlos¹⁴. Wie viel direkte Elektrifizierung möglich ist bzw. wie viel PtG oder Power-to-Liquids (PtL) benötigt werden, ist noch unklar¹⁵.

Die Elektromobilität hat selbst mit dem aktuellen deutschen Strommix einen leichten Klimavorteil gegenüber Verbrennungsmotoren. Batterien von Elektrofahrzeugen können zudem als mobile Stromspeicher eine wichtige Rolle für die Netzstabilität übernehmen. Auf Grundlage von Wetter- und Lastprognosen gilt es, den Ladevorgang so zu regeln, dass die Stromnetze möglichst wenig belastet werden („Lastmanagement“). Darüber hinaus sollen Batterien von Elektrofahrzeugen künftig nicht nur Strom aufnehmen, sondern auch wieder Strom ins Netz einspeisen können. Das soll dabei helfen, das schwankende Angebot von Wind- und Solarstrom auf der Ebene der Verteilnetze auszugleichen.

2.5 POWER-TO-X ALS SEKTORENÜBERGREIFENDE SPEICHERTECHNOLOGIEN

Für den Klimaschutz muss mittel- und langfristig auch das fossile Erdgas durch klimafreundliche Alternativen ersetzt werden. Da das Potenzial von Biogas bzw. Biomethan begrenzt ist, kommt hierfür schlussendlich nur erneuerbares Gas (Biomethan und synthetisches Gas) in Frage. Vor allem in ambitionierten Klimaschutzszenarien spielt synthetisches Gas in Form von Wasserstoff und Methan eine große Rolle.

Aus der Perspektive des Stromsektors ist der Bedarf an chemischen Speichern wie Wasserstoff und synthetisches Methan stark vom Anteil (fluktuierender) Erneuerbarer Energien abhängig. Ab wann diese Speicher unabdingbar bzw. wirtschaftlich gegenüber anderen Flexibilitätsoptionen werden, ist umstritten. Meist wird ein Anteil von 60 bis 80 Prozent Strom aus Erneuerbaren Energien¹⁶ oder eine Treibhausgasreduzierung um mindestens 90 Prozent gegenüber 1990 genannt¹⁷, ab dem ein Ausgleich über synthetisches Gas erfolgen muss.

Abgesehen davon, dass Power-to-Gas innerhalb des Stromsektors als Speicher dienen und den Netzausbaubedarf begrenzen kann, kann es vor allem dort eingesetzt werden, wo eine direkte Elektrifizierung nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist. Das ist zumindest in Teilen im Verkehrs-, Wärme- und Industriesektor der Fall, und zwar in Anwendungen, die eine hohe Energiedichte benötigen. Neben Biomasse werden die synthetischen Kohlenwasserstoffe als alternative Rohstoffquelle für die bisher genutzten fossilen Brennstoffe gehandelt.

Für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser sehen manche Energieszenarien eine maximale direkte Elektrifizierung und gar kein Power-to-Gas. Das wichtigste Argument für diesen Entwicklungspfad ist die deutlich höhere Effizienz der direkten Stromnutzung gegenüber der Umwandlung von Strom in Wasserstoff oder Methan. Andere Szenarien sehen hingegen auch bei der Wärmeversorgung erhebliche Mengen (zwischen 208 Mrd. kWh und 309 Mrd. kWh) Power-to-Gas. Argumente hierfür sind die technischen und ökonomischen Restriktionen der direkten Elektrifizierung, eine höhere Versorgungssicherheit durch die Nutzung der Gasspeicher sowie ein geringerer Ausbaubedarf der Stromnetze.

¹⁴ Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“: Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017. 2019. S. Z-21

¹⁵ Ecofys: Metaanalyse aktueller Studien zum Thema „Sektorenkopplung“. 2018. S.2

¹⁶ AEE: Metaanalyse Erneuerbare Gase

¹⁷ Ecofys: Metaanalyse aktueller Studien zum Thema „Sektorenkopplung“. 2018. S.1

Aus der Perspektive eines möglichst effizienten Stromsektors würden Power-to-X-Verfahren im Idealfall ausschließlich mit sogenanntem „Überschussstrom“ betrieben, d.h. Strom aus Wind und Sonne, der zum Zeitpunkt der Erzeugung anderweitig nicht genutzt bzw. transportiert werden kann. Das ist aber aus heutiger Sicht nicht realistisch, denn auch bei einem weiteren Wachstum der Erneuerbaren Energien werden Überschüsse nur in relativ wenigen Stunden des Jahres anfallen. Als energiewirtschaftlich sinnvoll gilt ein Speicherbetrieb mit 2.500 Volllaststunden pro Jahr¹⁸. Bei den derzeitigen Kosten von Elektrolyse-Anlagen werden für einen betriebswirtschaftlich rentablen Betrieb jedoch mehr Vollbenutzungsstunden benötigt. Wenn in Zukunft die Investitions- und fixen Betriebskosten fallen, sinkt die Relevanz der Vollbenutzungsstunden¹⁹ – eine gute Aussicht für das erneuerbare Energiesystem.

In welchem Umfang chemische Langzeitspeicher in Zukunft genutzt werden, wird daher von technologischen Fortschritten bzw. Effizienzsteigerungen und damit der Kostenentwicklung abhängen²⁰. Weiterhin hängt der Bedarf für synthetische Brennstoffe von der Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse ab und von der Höhe der Energienachfrage, also den Konsum- und Verhaltensmustern.

Obwohl direkte Elektrifizierung im Verkehr mit höheren Wirkungsgraden effizienter und kostengünstiger ist als den Strom in Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe umzuwandeln, prognostizieren viele Szenarien, dass Letztere die dominierende Rolle im Verkehrssystem der Zukunft um 2050 spielen werden. Die direkte Nutzung von Strom im Flug- und Schiffsverkehr ist nur begrenzt möglich, sodass Biokraftstoffe und Biomethan sowie synthetische Gase und Kraftstoffe einspringen müssen. Erneuerbare Gase und kohlenwasserstoffbasierte Flüssigkeiten haben im Straßengüterverkehr den Vorteil, gut speicherbar und transportierbar zu sein, da der Energieträger an Bord mitgeführt werden und somit eine hohe Energiedichte aufweisen muss²¹.

Die Deutsche Umwelthilfe betont, dass Power-to-X eine überproportionale Steigerung der Stromerzeugung mit sich bringt. Demnach könnte der Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung aufgrund der energieintensiven Herstellung von stromgenerierten Kraftstoffen im Jahr 2050 bei ca. 917 Mrd. kWh bis 1.070 Mrd. kWh liegen²². Die meisten Szenarien sehen den Einsatz von Elektrolyseuren und Methanisierungsanlagen in Deutschland daher nicht vor dem Jahr 2030. Viele Studien setzen zudem stark auf Importe, um den Bedarf an regenerativen Kraftstoffen zu decken²³. Für eine nachhaltige Energieversorgung wird es daher notwendig sein, eine gute Balance zu finden. Für Power-to-X muss das Motto gelten: „So wenig wie möglich, aber so viel wie nötig“.

18 LBST/BEE: Analyse der Kosten erneuerbarer Gase. 2013

19 Energy Brainpool: Auf dem Weg in die Wettbewerbsfähigkeit. Elektrolysegase erneuerbaren Ursprungs. 2018

20 AEE: Metaanalyse Erneuerbare Gase. 2018

21 acatech/Leopoldina/Akademienunion: Optionen für die nächste Phase der Energiewende. 2017

22 DUH: Sektorenkopplung – Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr. 2017

23 AEE: Metaanalyse Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr. 2016

3 SPEICHER IN DER PRAXIS

Im folgenden wird der Status Quo verschiedener Speichertechnologien beschrieben und einige Praxisbeispiele vorgestellt. Soweit möglich wird dabei auf Herausforderungen, Kostenentwicklung und die politischen Rahmenbedingungen eingegangen.

3.1 PUMPSPEICHERKRAFTWERKE

Technik

Pumpspeicherkraftwerke zeichnen sich durch ihre einfache Funktionsweise, ausgereifte Technik und einen hohen Wirkungsgrad aus. Der weitaus größte Teil der globalen Speicherkapazitäten entfällt auf diese Form der Speicherung. Pumpspeicherkraftwerke gelten als etablierte Langzeitspeicher und sind eine der wichtigsten Säulen für den Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage.

Ihr Funktionsprinzip ist einfach: Dann, wenn kostengünstiger Strom vorhanden ist, werden große Mengen Wasser von einem niedrig gelegenen in ein höher gelegenes Becken gepumpt und dort als potenzielle Energie gespeichert. Als Speicher dienen natürlich vorkommende Seen oder künstliche Reservoirs, die durch Staudämme oder -mauern geschaffen wurden. Wenn bei Verbrauchsspitzen oder bei Erzeugungsempässen zusätzlicher Strom benötigt wird, lassen die Betreiber Wasser herabströmen, das Turbinen antreibt. Die Turbinen wiederum treiben Generatoren an, die Strom erzeugen. Wie viel Energie bereitgestellt werden kann, ist außer von der Leistung und Anzahl der Generatoren abhängig von der Größe der Speicherreservoirs sowie vom Höhenunterschied zwischen dem so genannten Ober- und dem Unterwasser.

Neue Pumpspeicherkraftwerke erreichen einen Wirkungsgrad von 70 bis 80 Prozent. Das heißt, von zehn Kilowattstunden Strom, die zum Hochpumpen des Wassers in den Speicher benötigt werden, stehen bei Bedarf sieben bis acht Kilowattstunden wieder zur Verfügung. Die lange Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten und die unbegrenzte Anzahl an Be- und Entladezyklen erlauben grundsätzlich einen wirtschaftlichen Betrieb (vgl. Kap. 4). Pumpspeicher dienen vor allem zur Bereitstellung von Spitzenlaststrom und für den Ausgleich von unerwarteten Schwankungen im Stromverbrauch. Da sie aus dem Stillstand innerhalb von wenigen Minuten Strom erzeugen können (Schwarzstartfähigkeit), haben sie eine besondere Bedeutung für die Versorgungssicherheit.

Installierte Kapazitäten

Global waren Ende 2018 Pumpspeicherkraftwerke mit einer Kapazität von 160 Gigawatt (GW) installiert, davon sind 1,9 GW im Laufe des Jahres 2018 hinzugebaut worden²⁴. Im deutschen Stromnetz waren Ende 2018 Pumpspeicherkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 9,8 GW²⁵ in Betrieb. Dazu zählen auch Anlagen im Ausland (Luxemburg, Schweiz, Österreich), die in das deutsche Stromnetz einspeisen.

Im Jahr 2018 betrug der Stromverbrauch von Pumpspeichern im deutschen Netz 8,3 Milliarden Kilowattstunden (Mrd. kWh) und die Erzeugung in Pumpspeicherkraftwerken 6,2 Mrd. kWh²⁶. Die Erzeugung aus Pumpspeicherkraftwerken hat somit im Jahr 2018 einen Einbruch verzeichnet, während sie in den Jahren zuvor eine leicht zunehmende Tendenz hatte.

24 REN21: Global Status Report 2019, S.22

25 Agora Energiewende: Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2018. 2019, S.18

26 AG Energiebilanzen: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018. 2019, S.31; Bundesnetzagentur / Bundeskartellamt: Monitoringbericht 2018, S. 31, 51, 54

Pumpspeicherkraftwerke im deutschen Stromnetz

| Jahr | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Stromverbrauch (Mrd. kWh) | | | | | 12,5 | 12,9 | 8,3 |
| Stromerzeugung (Mrd. kWh) | 8,9 | 9,7 | 9,5 | 10,1 | 9,9 | 10,2 | 6,2 |
| Installierte Leistung (Megawatt) | 9.200 | 9.200 | 9.200 | 9.400 | 9.500 | 9.500 | 9.800 |

Quellen: Bundesnetzagentur/Bundeskartellamt 2017, 2018; Agora Energiewende 2019, AG Energiebilanzen 2019

PRAXISBEISPIEL

Eines der leistungsstärksten Pumpspeicherkraftwerke Europas befindet sich in Deutschland, im thüringischen **Goldisthal**. Es ist 2003 in Betrieb gegangen. Mit 1.060 Megawatt (MW) entspricht seine Leistung derjenigen eines typischen Atomreaktors. Mit Hilfe seines 12 Millionen Kubikmeter Wasser fassenden Stausees ist es in der Lage, diese Leistung für acht Stunden zur Verfügung zu stellen. Dies entspricht somit einer Speicherkapazität von 8,48 Mio. kWh. Damit könnte das Bundesland Thüringen acht Stunden lang komplett mit Strom ausschließlich aus dem Pumpspeicherkraftwerk versorgt werden. Der Großteil der deutschen Pumpspeicherkraftwerke verfügt jedoch über eine Leistung von weniger als 300 MW.

Ausbaupotenzial

Ausbaupotenzial für Pumpspeicherkraftwerke besteht sowohl in Deutschland als auch im Ausland. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Projekte für neue Pumpspeicherkraftwerke oder den Ausbau von existierenden Anlagen reaktiviert oder neu entwickelt²⁷. Bis 2030 rechnen Bundesnetzagentur und Übertragungsnetzbetreiber mit einer weiteren Steigerung der Pumpspeicherkapazität auf 11,6 GW.²⁸

Die Schluchseewerk AG plante seit 2008 zusammen mit den Energieversorgern RWE und EnBW im Schwarzwald ein großes Pumpspeicherkraftwerk zu bauen. Das Projekt „**Atdorf**“ war von Anfang an sehr umstritten aufgrund der erwarteten nachteiligen Umweltauswirkungen durch den Bau von Staumauern und künstlichen Seen. Mit bis zu 1,4 GW Leistung und neun Millionen Kubikmetern Speicherkapazität wäre es das größte in Europa geworden. Aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit haben zuerst RWE (2014) und schließlich auch EnBW (2017)²⁹ das Projekt „Atdorf“ aufgegeben.

Aktuelle Planungen für neue Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland betreffen zum Beispiel den Standort „**Franzosenkopf**“ (**PSW Heimbach**) am Mittelrhein. Nach einer Meldung vom April 2017 treiben die Stadtwerke Mainz die Planung und Umsetzung jedoch aus wirtschaftlichen Gründen nur langsam voran³⁰.

27 Heimerl, Stephan/ Kohler, Beate: Aktueller Stand der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland. 2017

28 50 Hertz Transmission/Amprion/TenneT TSO/TransnetBW: Netzentwicklungsplan 2019, S.30

29 EnBW: Pressemitteilung vom 11.10.17

30 www.psw-heimbach.de; Meldung vom 6.4.2017

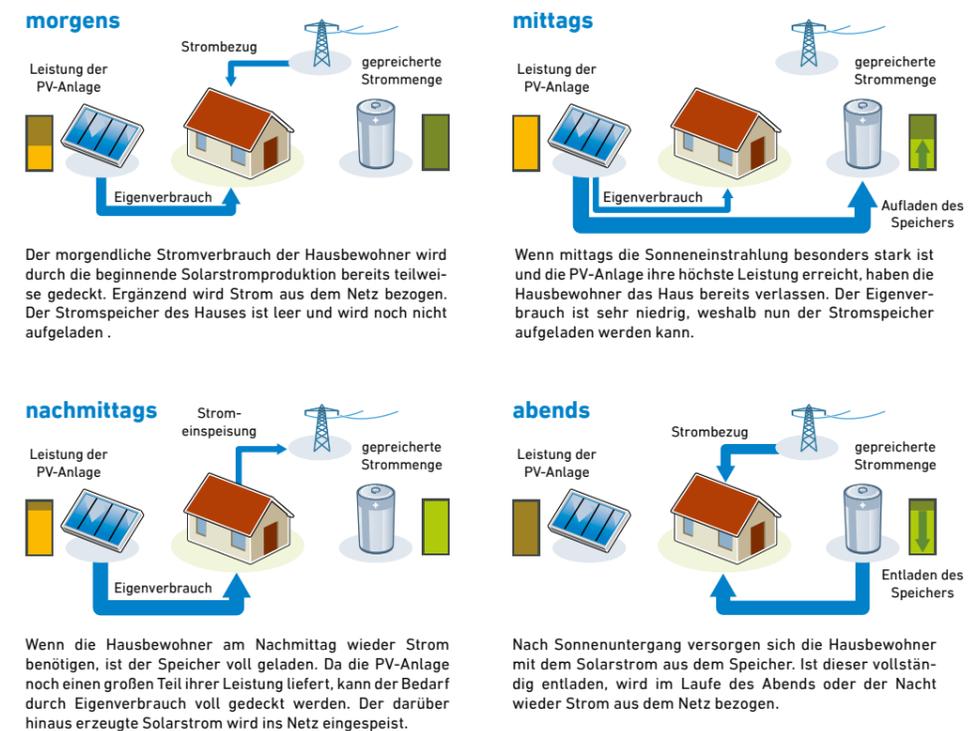
In den letzten Jahren sind auch Forschungsansätze wie die Verlegung einzelner oder mehrerer Unterbecken unter die Erde oder die Errichtung von Pumpspeicherkraftwerken in stillgelegten Bergwerken diskutiert worden. Insbesondere im Hinblick auf alte Bergwerke im Ruhrgebiet, welches zugleich eine der verbrauchsstarken Regionen in Deutschland ist, erscheint eine solche Lösung attraktiv. Erste Studien belegen die technische Machbarkeit. Inwieweit eine Umsetzung auch wirtschaftlich ist, muss hingegen noch ermittelt werden.

3.2 PHOTOVOLTAIK-BATTERIESPEICHER

Batteriesysteme sind vor allem für den Ausgleich der tageszeitlichen Unterschiede zwischen der Solarstromerzeugung und dem Stromverbrauch von Gebäuden geeignet³¹. Ende 2018 waren in Deutschland etwa 120.000 Solarstrom-Batteriespeicher installiert. Mehr als jede zweite neu installierte Photovoltaikanlage verfügt inzwischen über einen Speicher. Batteriespeicher sind attraktiv geworden, da ihr Preis sich im Vergleich zu Anfang 2013 ungefähr halbiert hat³². Zudem ist die Vergütung für den ins Netz eingespeisten Solarstrom kontinuierlich gesunken, während der Haushaltsstrompreis gestiegen ist.

Ende 2018 waren in Deutschland 45.300 Megawatt Photovoltaik-Leistung installiert, die insgesamt 46,2 Milliarden Kilowattstunden Strom erzeugten. Je nach Studie und den zugrunde gelegten Berechnungsgrundlagen könnten allein auf Dachflächen in Deutschland zukünftig Photovoltaik-Anlagen mit einer Gesamtleistung von etwa 150.000 bis 300.000 Megawatt stehen³³. Bedingt durch das Einspeiseprofil der Sonnenenergie ergibt sich ein hoher Ausgleichs- und damit auch Speicherbedarf.

So helfen Speicher, den Eigenverbrauch von Solarstrom zu steigern



Quelle: Eigene Darstellung nach HTW und BSW, Stand: 12/2014

31 HTW Berlin: Stromspeicher-Inspektion 2018. S.6

32 Bundesverband Solarwirtschaft: Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik). 2019

33 ZSW / Bosch & Partner: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Er-neuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. 2019. S.6, 135

Nach Angaben des EEG-Erfahrungsberichts verfügt eine typische Photovoltaikanlage im Haushaltssegment über eine Leistung von fünf Kilowatt. Ohne Speicher könne ein Anteil von 25 Prozent des erzeugten Solarstroms selbst verbraucht werden. Durch Kombination mit einem Lithium-Ionen-Batteriespeicher mit einer nutzbaren Kapazität von fünf Kilowattstunden und einem Systemwirkungsgrad von 90 Prozent könne der Selbstverbrauch auf 55 Prozent gesteigert und der übrige Strom ins Netz eingespeist werden³⁴. Die spezifischen Investitionskosten (ohne MwSt.) eines solchen Speichers werden für Anfang 2019 mit 950 Euro pro nutzbarer Kilowattstunde angegeben. Modellrechnungen zeigten jedoch, dass PV-Anlagen ohne Batteriespeicher heute noch wirtschaftlicher seien. Dass es trotzdem eine relativ große Nachfrage nach Batteriespeichern gebe, sei zum großen Teil auf Autarkiebestrebungen und ideelle Motivation zurückzuführen³⁵. Die Berechnungsergebnisse verändern sich zudem mit der Preisentwicklung für die Batterien, den durch Eigenverbrauch vermiedenen Stromkosten und eventuellen nachgelagerten steuerlichen Effekten.

Die künftige Marktentwicklung wird unter anderem von der Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Technologie und der Realisierung von Skaleneffekten abhängen. Weitere Faktoren werden Wechselwirkungen mit der Elektromobilität sein, die Entwicklung neuer Batterietechnologien, die Entwicklung der Rohstoffpreise sowie die Produktionskapazitäten für Batteriezellen.

3.3 BATTERIEN IM VERKEHRSSSEKTOR (ELEKTROMOBILITÄT)

Für einen klimafreundlichen Verkehrssektor ist die stärkere Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien unerlässlich. Auch wenn der Begriff „Elektromobilität“ in der öffentlichen Diskussion oftmals gleichgesetzt wird mit Elektroautos, lässt sich Strom im Verkehr auf vielfältigere Weise nutzen: Neben reinen Elektroautos oder Plug-in-Hybriden zählen auch E-Scooter, E-Bikes oder Pedelecs dazu. Elektrofahrräder erfreuen sich bereits großer Beliebtheit. Sie sind nach Angaben des ADFC mittlerweile millionenfach in Deutschland verkauft worden³⁶, mit weiter steigender Tendenz. Elektroräder ermöglichen dabei nicht nur die Nutzung von erneuerbarem Strom für Mobilitätsbedürfnisse, sondern können auch eine Verkehrsverlagerung vom Auto auf das Rad anreizen.

Bei den Elektroautos herrscht bisher mehr Kaufzurückhaltung. Laut ADAC sind von 2010 bis Oktober 2019 erst 284.000 Elektroautos zugelassen worden, das Kraftfahrtbundesamt verzeichnet demnach einen Bestand von 126.000 Plug-in-Hybriden und 158.000 rein batterieelektrischen Pkw³⁷. Batteriefahrzeuge sind derzeit in der Anschaffung für die Verbraucher noch meist teurer als ein konventionelles Gegenstück. Laut ADAC sind Elektrominis für 12.000 bis 20.000 Euro zu haben³⁸. Obwohl es seit Juli 2017 eine staatliche Förderung in Form einer Kaufprämie („Umweltbonus“) von 3.000 Euro für neue Plug-In-Hybride bzw. 4.000 Euro für reine Elektroautos gibt, ist der Marktdurchbruch für Elektroautos bisher ausgeblieben. Da die Fördermittel nicht ausgeschöpft wurden, verlängert das Bundeswirtschaftsministerium das Förderprogramm bis Ende 2020, die Antragstellung erfolgt über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)³⁹.

Abschreckend wirken bisher auch ein wahrgenommener Mangel an Ladeinfrastruktur, eine geringe Reichweite und ein zeitintensives Aufladen der Batterien. Dabei würde die öffentliche Ladeinfrastruktur mit rund 20.700 Ladepunkten (Stand September 2019) in Deutschland laut Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) bereits für über 430.000 Elektroautos reichen und die Stromnetze

34 ebd. S.42, 46f

35 ebd. S.49, 137

36 ADFC: Elektrofahrräder. 2019

37 ADAC: Elektroautos in Deutschland. Wo stehen wir heute? 2019

38 ebd.

39 BAFA: Elektroautos. Umweltbonus. 2019

könnten sogar bis zu 13 Millionen Elektroautos versorgen⁴⁰. Um zehn Millionen E-Autos zu versorgen, würden nach BDEW Einschätzung 350.000 öffentliche Ladepunkte ausreichen⁴¹.

Wichtig für die Stabilität der Stromnetze wird eine intelligente Steuerung des Ladevorgangs sein, wenn der Markt eine gewisse Durchdringung mit Elektrofahrzeugen erreicht hat. Bei einem zeitgleichen Laden einer Vielzahl an Autos würde das Stromnetz stark belastet⁴². So sollten die Fahrzeuge im Idealfall nur Strom tanken, wenn dieser ausreichend verfügbar ist. Um die Netzkapazitäten optimal zu nutzen, werden Konzepte zum „intelligenten“, netzverträglichen Lademanagement notwendig. Inwiefern Elektroautos als Flexibilitätsoption für das Stromnetz dienen können, hängt davon ab, ob die Besitzerinnen und Besitzer bereit sind, die Batterien dem System zur Verfügung zu stellen. Dabei sollen intelligente Stromzähler, sogenannte Smart Meter helfen. Sie messen und informieren nicht nur über den aktuellen Stromverbrauch, sondern versorgen die Verbraucher möglichst auch mit Informationen zum aktuellen Stromangebot und -preis. Ein netzentlastendes Ladeverhalten könnte damit finanziell belohnt werden. Insbesondere für Flottenbetreiber und Fuhrparks könnte die Elektromobilität somit auch ein neues Geschäftsfeld eröffnen.

3.4 ELEKTROTHERMISCHER SPEICHER (ETES)

Im Rahmen eines Forschungsprojekts ist in Hamburg im Juni 2019 ein elektrothermischer Energiespeicher (Electro-Thermal Energy Storage, kurz ETES) in Betrieb gegangen⁴³. Er wandelt Strom in Wärme um, die ein so hohes Temperaturniveau aufweist, dass am Ende wieder Strom hergestellt werden kann. Strom wird hier in Wärme umgewandelt, die so ein hohes Temperaturniveau aufweist, dass wieder Strom erzeugt werden kann. Die Unterscheidung zwischen Strom- und Wärmespeichern ist hier jedoch nicht trennscharf.

Dabei handelt es sich um einen 22 Meter langen, elf Meter breiten und elf Meter hohen Betonbau, der mit rund 1.000 Tonnen Vulkangestein gefüllt ist. Wenn im Norden viel Windstrom erzeugt wird, den das Stromnetz nicht abtransportieren kann, soll der neue Speicher geladen werden. Dabei werden die Lavaeithilfen mithilfe einer strombetriebenen Widerstandsheizung und eines Gebläses auf bis zu 800 Grad Celsius erhitzt. Das Temperaturniveau ist so hoch, dass bei Bedarf wieder Strom erzeugt werden kann.

Nach etwa 24 Stunden ist der Speicher „voll aufgeladen“. Er kann die thermische Energie über einen Zeitraum von einer Woche und mehr speichern. Bei Bedarf kann ähnlich wie in einem konventionellen thermischen Kraftwerk wieder Strom erzeugt werden. Eine volle Speicherladung reicht, um den Bedarf von bis zu 3.000 Haushalten einen Tag lang zu decken. Ein wichtiger Vorteil ist, dass das Gesteinsmaterial vergleichsweise günstig und einfach verfügbar ist.

3.5 POWER-TO-GAS

Die Diskussion um die Herstellung von PtX-Stoffen ist nicht mehr rein theoretisch, sondern es gibt in Deutschland mehr als 20 Forschungs-, Demonstrations- und Pilotprojekte, die unterschiedliche Schwerpunkte haben, aber das gleiche Ziel: PtX zu erproben, Standardisierung und Kostensenkung zu erreichen und zukünftige Herausforderungen wie die Steigerung der Wirkungsgrade im Umwandlungsprozess oder den flexiblen Betrieb von Elektrolyseanlagen zu identifizieren.

40 BDEW: Zahl der Woche / Fast 25 Prozent der Deutschen können sich vorstellen, innerhalb der nächsten fünf Jahre ein Elektroauto zu kaufen. Pressemitteilung vom 12.9.2019

41 BDEW: Kapferer zum Eine-Million-Ladesäulenprogramm. Presseinformation vom 16.9.19

42 Acatech/Leopoldina/Akademienunion: Sektorkopplung. Optionen für die nächste Phase der Energiewende. 2017

43 BMWi: Energiewende direkt. Newsletter vom 20.8.19

So steht zum Beispiel seit Oktober 2016 im fränkischen Haßfurt eine containergroße Power-to-Gas-Anlage auf dem Gelände des Haßfurter Mainhafens. Die Anlage, für die es keine Förderung gab, hat circa zwei Millionen Euro gekostet. Mittels Elektrolyse wird in Zeiten großen Stromangebots aus Erneuerbaren Energien Wasserstoff erzeugt. Der für den Wasserstoff benötigte Strom stammt aus einem nahegelegenen Bürgerwindpark und weiteren Windenergie- sowie Photovoltaikanlagen. In 1,5 Jahren konnte so eine Million Kilowattstunden Wasserstoff erzeugt werden.

Auch wenn das Verfahren sich unter den aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen kaum wirtschaftlich gestalten lässt, gilt es, die Infrastruktur für diese Technologie schon heute vorzubereiten, da sie im Energiesystem der Zukunft dringend benötigt wird. Gerade für Stadt- und Gemeindewerke, die nicht nur Strom aus Erneuerbaren Energien bereitstellen, sondern auch Gas- und Wärmenetze betreiben, könnte die Speicherung von Strom als Gas eine wirtschaftlich attraktive Option für eine sichere, flexible und dabei klimafreundliche Energieversorgung sein.

3.6 POWER-TO-LIQUIDS

Das Dresdner Energietechnikunternehmen sunfire GmbH hat in seiner PtL-Demonstrationsanlage im März 2015 erstmals synthetischen Kraftstoff produziert. Für die Produktion des flüssigen Energieträgers setzt sunfire Ökostrom, Wasser und Kohlendioxid ein, das unmittelbar aus der Umgebungsluft gewonnen wird. Herzstück der Demonstrationsanlage ist die Hochtemperatur-Elektrolyse, in der das zu Dampf erhitzte Wasser in seine Bestandteile gespalten wird: Sauerstoff und Wasserstoff. Letzterer reagiert anschließend mit CO₂ zu einem Synthesegas, das in Kohlenwasserstoffe umgewandelt wird. Aus dem dabei entstehenden Rohprodukt kann mittels einer Standard-Raffination Kerosin, Diesel, Benzin und andere petrochemische Produkte gewonnen werden.

4 WIRTSCHAFTLICHKEIT UND POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Für den wirtschaftlichen Betrieb von Energiespeichern ist grundsätzlich das Verhältnis zwischen den Kosten für die Einspeicherung und Erlösen für die Ausspeicherung relevant. Für den Klimaschutz ist es daher ungünstig, dass die Kosten der Energiewende bisher einseitig auf dem Stromsektor lasten. Strom unterliegt einer hohen Belastung mit Abgaben, Umlagen und Entgelten und ist deswegen gegenwärtig teurer als die Nutzung fossiler Energieträger.

Investitionen in Stromanwendungen und Speicher sind daher vielfach unwirtschaftlich. Vertreter aus Wissenschaft und Energiewirtschaft fordern deshalb, dass der Gesetzgeber es zumindest ermöglichen sollte, Strom, der im Rahmen des EEG-Einspeisemanagements abgeregelt werden müsste, stattdessen ohne Netznutzungsentgelte und Umlagen für die Speicherung oder Wärmeerzeugung zu verwenden. Bisher müssen Betreiber jeglicher flexibler Verbrauchsanlagen auch in Zeiten von Abregelungen von erneuerbarem Strom Abgaben und Umlagen auf Strom in voller Höhe zahlen: Unabhängig davon, ob ein Erzeuger oder Verbraucher die Netzstabilität unterstützt, verändern sich die Netzentgelte nicht. Verzichtende Betreiber von Photovoltaik-Anlagen beispielsweise auf die Einspeisung von Solarstrom ins Stromnetz, müssen sie dennoch Abgaben auf ihren Eigenverbrauch von Solarstrom vor Ort leisten – unabhängig davon, ob das Netz gerade noch Kapazitäten braucht oder nicht.

4.1 PUMPSPEICHERKRAFTWERKE

Das Betriebskonzept von Pumpspeicherkraftwerken beruhte in der Vergangenheit darauf, nachts mit preisgünstigem Strom aus Braunkohle- und Atomkraftwerken Wasser hochzupumpen und mittags zur Spitzenlastzeit Strom zu erzeugen und teuer zu verkaufen. Durch einen hohen Preisunterschied („Spread“) zwischen Spitzen- und Grundlastpreisen ergab sich ein rentabler Betrieb.

In den vergangenen Jahren hat die Wirtschaftlichkeit von Pumpspeichern jedoch stark abgenommen. Vor allem durch die zunehmende Einspeisung von Strom aus Photovoltaik-Anlagen ist der Strompreis am Spotmarkt in der Mittagszeit deutlich gesunken. Der herkömmliche Tag-Nacht-Betrieb ist somit unwirtschaftlich geworden.

Betreiber klagen zudem über ungünstige regulatorische Rahmenbedingungen. Dazu gehört, dass der Pumpstromverbrauch als Letztverbrauch gilt, womit sowohl EEG-Umlage als auch Netzentgelte anfallen. Die Regelung zur Zahlung von Netznutzungsentgelten ist für Pumpspeicherkraftwerke erst seit 2008 eingeführt worden. Bei Betreibern stößt das auf Unverständnis angesichts der Bedeutung von Speichern für die Versorgungssicherheit⁴⁴. Pumpspeicher seien nicht als Letztverbraucher, sondern als Systemdienstleister zu betrachten⁴⁵. Auf der anderen Seite ist der Standort von Pumpspeichern aufgrund der geographischen Gegebenheiten überwiegend im Süden, so dass sie zum Beispiel den von Windenergieanlagen im Norden erzeugten Strom nur aufnehmen können, wenn der Strom über die Netze transportiert werden kann. Das spricht für eine Belegung mit Netzentgelten.

Die wirtschaftlichen Schwierigkeiten haben jedenfalls dazu geführt, dass zahlreiche Aus- und Neubauprojekte in Deutschland nur verhalten vorangetrieben oder inzwischen gar zurückgestellt worden sind. Ob eine flexiblere, am veränderten Bedarf im Stromnetz orientierte Fahrweise sich zukünftig rechnet, wird sich zeigen. Immerhin sendet der Strommarkt Preissignale in Form negativer Börsenstrompreise bei hohem Stromaufkommen aus Erneuerbaren Energien und einzelner Preisspitzen bei geringer Erzeugung.

⁴⁴ Vgl. z.B. FAZ vom 18.8.2014 und WELT vom 12.8.15

⁴⁵ Heimerl, Stephan/ Kohler, Beate: Aktueller Stand der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland. 2017

4.2 POWER-TO-X

PtX-Stoffe sind teuer in ihrer Herstellung. Nach Angaben von des Energieberatungsunternehmens Energy Brainpool betragen die Produktionskosten von Elektrolysegas bei ökologisch sinnvollem, netzdienlichem Anlagenbetrieb heute etwa 18 ct/kWh, mit EEG-Umlage und Netzentgelten ergeben sich bis zu 38 ct/kWh⁴⁶. Dabei spielen die hohen Fixkosten eine bedeutsame Rolle. Aus der Perspektive der Wirtschaftlichkeit wäre demnach eine hohe Zahl an Volllaststunden anzustreben, aus der Perspektive eines möglichst nachhaltigen Betriebs ist jedoch eine hohe Flexibilität gefragt, um vor allem Zeiten mit einem hohen Angebot an Wind- und Solarstrom zu nutzen. Ein sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoller Betrieb ist nach Einschätzung von Energy Brainpool gegenwärtig bereits an Standorten in Regionen möglich, wo aufgrund des stockenden Netzausbaus erneuerbarer Strom häufig abgeregelt wird. Elektrolyseure mit einer Leistung von 300 MW könnten hier mit etwa 3.000 Vollbenutzungsstunden ökologisch sinnvoll die Stromüberschüsse verwenden⁴⁷.

Optimistische Studien rechnen in Zukunft mit deutlich fallenden Investitions- und fixen Betriebskosten. Andere gehen davon aus, dass sich an den hohen Kosten von PtX auch langfristig nichts ändert, weil die Investitionskosten in die notwendigen Stromerzeugungs- und verfahrenstechnischen Anlagen sowie die Umwandlungsverluste des Stroms in den verschiedenen Prozessschritten (Elektrolyse und gegebenenfalls Syntheseprozesse) hoch bleiben⁴⁸.

Die Wirtschaftlichkeit von Power-to-X hängt neben den Gesteuerungskosten natürlich auch von den Kosten für fossile Energieträger ab. So lag der Erdgaspreis für die Industrie im Jahr 2017 bei lediglich 2,4 ct/kWh, während es im Jahr 2013 noch 3,4 ct/kWh waren⁴⁹. Das ist keine günstige Entwicklung für die Einführung alternativer Brennstoffe. Positiver war zuletzt die Entwicklung des Preises von CO₂-Emissionszertifikaten. Hierfür waren im Jahr 2018 pro Tonne CO₂ 14,8 Euro zu zahlen, während es im Vorjahr nur 5,8 Euro waren⁵⁰. Die Bepreisung fossiler Brennstoffe bzw. ihrer Emissionen sind Faktoren, die politisch gesteuert werden können. Um einen Absatzmarkt für Wasserstoff und andere grüne Gase zu erschließen, können auch andere Anreize gesetzt werden. So nennt der BDEW die Anerkennung als Erneuerbare Energie im Gebäudeenergiegesetz⁵¹.

4.3 INTELLIGENTE VERKNÜPFUNG UND STEUERUNG VON SPEICHERN

Eine Verknüpfung und intelligente Steuerung von Verbrauchern und Erzeugern im Stromnetz kann den Ausbaubedarf sowohl auf der Seite der Stromerzeugung als auch im Bereich der Stromnetze verringern. Damit die verschiedenen Energieproduzenten und Verbraucher sich optimal abstimmen können, müssen im Energiesystem der Zukunft viel mehr Informationen ausgetauscht werden als im „alten“ Energiesystem, das nur wenige Akteure umfasste.

Das Stromnetz muss deshalb „intelligenter“ werden, als es heute ist. Um einen Informationsfluss zwischen Energieerzeugern und -verbrauchern zu ermöglichen, wird das Energieversorgungssystem durch moderne Informations- und Kommunikationstechnik ergänzt. Der Begriff „Smart Grid“ oder „intelligentes Stromnetz“ umfasst die rechnergestützte Vernetzung aller Bestandteile des Energieversorgungssystems (Erzeugungsanlagen, Netze, Speicher und Verbraucher). Versorger und Verbraucher erhalten so mehr Informationen über die aktuelle Versorgungssituation und Einflussmöglichkeiten.

⁴⁶ Energy Brainpool: Auf dem Weg in die Wettbewerbsfähigkeit: Elektrolysegas erneuerbaren Ursprungs. 2018, S.1

⁴⁷ ebd.

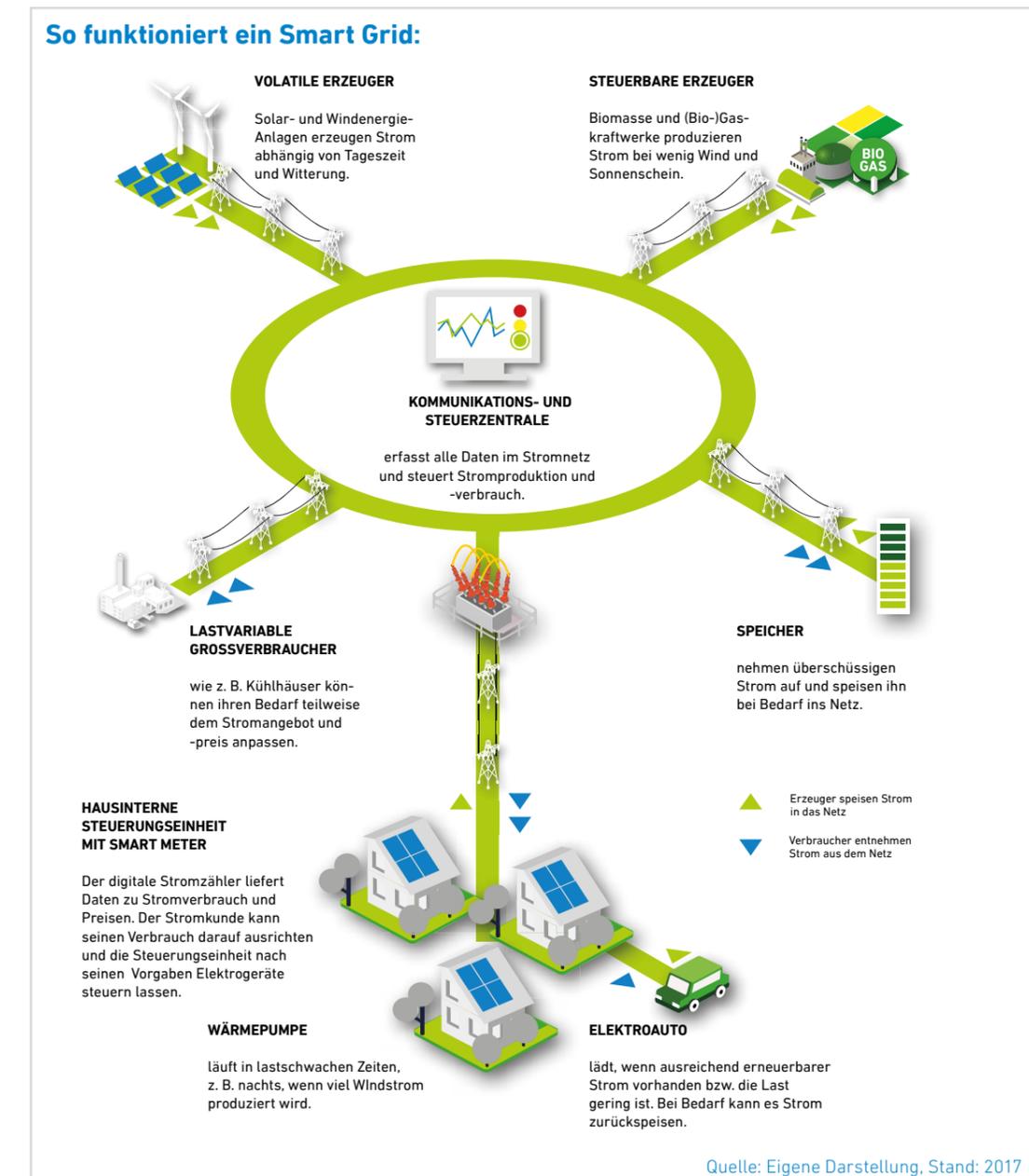
⁴⁸ Öko-Institut: Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX. 2019, S.26

⁴⁹ BMWi: Energiedaten. 2019

⁵⁰ Agora Energiewende: Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2018. 2019, S.37

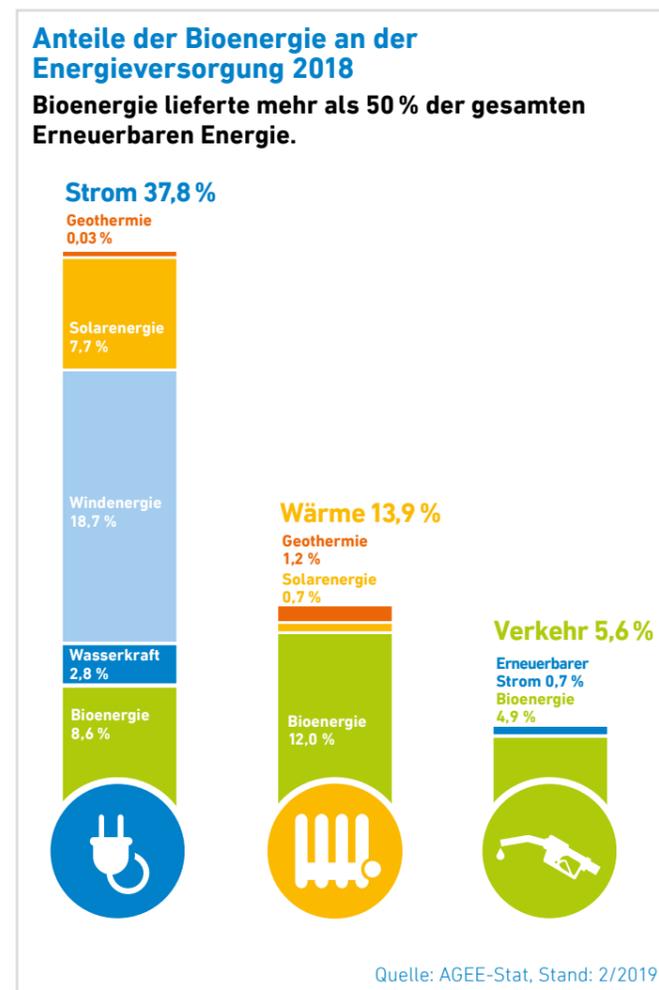
⁵¹ BDEW: Allround-Talent Wasserstoff: Politik muss Anreize für Praxisanwendungen schaffen. 2019

Über neue Plattformen werden die Akteure zusammengeführt und können entsprechend der Preis- und Netzsignale Flexibilitäten anbieten und abrufen. Ziel ist es, Stromangebot und -nachfrage optimal aufeinander abzustimmen, den Kraftwerkspark dadurch effizient auszulasten und die Dargebote insbesondere von Wind- und Sonnenergie bestmöglich zu nutzen. Im intelligenten Stromnetz gibt es damit mehr verantwortliche Akteure als bisher. Durch die zunehmende Komplexität und die damit einhergehende Automatisierung des Systems werden viele Prozesse auch stärker durch entsprechende Steuerungsalgorithmen bestimmt werden.



5 ROLLE DER BIOENERGIE ALS SPEICHER BZW. IM ZUSAMMENSPIEL MIT SPEICHERN

Während die Wind- und Solarenergie häufig im Fokus der Diskussion um das Energiesystem der Zukunft stehen, liefern Bioenergieträger bisher den größten Beitrag zur erneuerbaren Energieversorgung in Deutschland. Rund 53 Prozent der erneuerbaren Energie in den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr beruht auf Bioenergieträgern. Dazu zählen neben Holz auch Energiepflanzen wie Raps oder Mais sowie Reststoffe, die bei einer anderen, vorherigen Nutzung von Biomasse anfallen, zum Beispiel in der Landwirtschaft, bei der Pflege von Parks und Gärten oder bei der Produktion von Nahrungsmitteln.



Im Jahr 2018 wurden aus fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse insgesamt 51,3 Mrd. kWh Strom, 147,3 Mrd. kWh Wärme sowie 3,4 Mio. Tonnen Biokraftstoffe erzeugt⁵². Wie die Bioenergie genutzt wird, wird wesentlich durch politische Entscheidungen gesteuert.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ließ den Biomasse-Anteil an der Stromerzeugung enorm ansteigen, bis die EEG-Novelle 2014 den Zubau bremste.

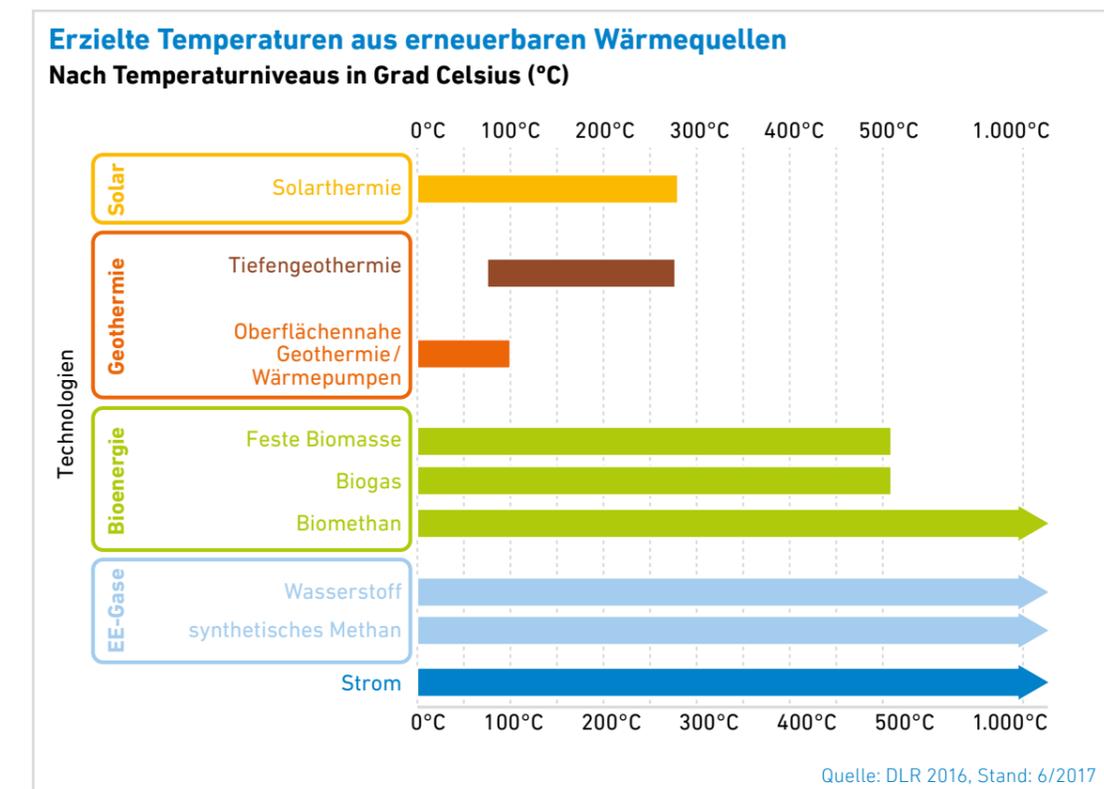
Im Vergleich zu Wind und Sonne hat die Bioenergie den großen Vorteil, nicht vom Wetter abzuhängen. Feste und flüssige Biomasse lässt sich gut lagern, Biogas kann zu Biomethan aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist werden oder es kann in lokalen Biogasspeichern vorgehalten werden. Biogas-Blockheizkraftwerke stellen durch die Kraft-Wärme-Kopplung eine wichtige und effiziente Verknüpfung zwischen Strom- und Wärmemarkt dar.

5.1 NUTZUNGSPOTENZIALE

Ein Blick auf die Potenziale und Nutzungsmöglichkeiten von Bioenergie zeigt, dass die Bioenergie einspringen kann, wenn Alternativen für eine direkte Elektrifizierung fehlen. Dazu gehören zum Beispiel die Prozesswärmeerzeugung in der Industrie und die Herstellung von Biokraftstoffen. Bioenergie ist ein starkes Bindungsglied zwischen den Energiesektoren Strom, Wärme, Kraftstoffe, Industrie.

52 BMWi/ AGEE-Stat: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. 2019

Ohne Bioenergie werden die Kosten der Energiewende in Zukunft wesentlich höher ausfallen⁵³. Die AEE Metaanalyse „Nutzungspfade der Bioenergie für die Energiewende“⁵⁴ zeigt, dass die Verwendung von Bioenergie in den meisten untersuchten Langfristszenarien bis 2050 steigt, auch wenn die Schwankungsbreite erheblich ist. Zusammenfassend wird deutlich, dass alle Studien die Bioenergie – wenn auch aus teilweise unterschiedlichen Gründen und in unterschiedlichem Umfang – als unverzichtbar für den Erfolg der Energiewende ansehen. Die Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Biomasse können dabei optimiert werden, wenn das Energiesystem in seiner Gesamtheit betrachtet und die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr stärker miteinander verzahnt werden. Prognosen und Szenarien zur Entwicklung der Bioenergie hängen zudem von der Entwicklung anderer erneuerbarer Energieträger ab. Mit einer Ausnahme gehen alle in der AEE-Metaanalyse betrachteten Szenarien für das Jahr 2030 von einer Stromproduktion auf Basis von Biomasse von 30 bis 83 Mrd. kWh aus. Vorwiegend wird hier die Nutzung in flexiblen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gesehen. In den Studien angeführte Gründe für den allenfalls nur noch geringen Ausbau der Bioenergie im Stromsektor sind etwa eine begrenzte Flächenverfügbarkeit, die EEG-Deckelung von 2014 oder die bevorzugte Nutzung von Bioenergie im Verkehr und in der Industrie, da hier weniger klimafreundliche Alternativen bereit stehen. Viele Autoren erkennen eine große Bedeutung von Biokraftstoffen für den Güter-, Schiffs- und Flugverkehr, wo die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom nach heutigem Stand nur schwer möglich sein wird. Diesbezüglich wird die weitere Entwicklung des Ölpreises ein entscheidender Einflussfaktor sein.



Im Wärmebereich wird die Bioenergie nach allen Prognosen weiterhin eine wichtige Rolle spielen, sowohl im Hinblick auf dezentrale Anlagen als auch für die Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen⁵⁵. Insbesondere im Prozesswärmebereich kann die Bioenergie als Joker auftreten. Die Prozesswärme

53 Acatech/ Leopoldina/ Akademienunion: „Sektorkopplung“. Optionen für die nächste Phase der Energiewende. 2017

54 AEE: Metaanalyse Nutzungspfade der Bioenergie für die Energiewende. 2015

55 BEE: Kursbuch Energiewende. 2016

stellt den größten Anteil am Energiebedarf der Industrie: Von den 718 Mrd. kWh des industriellen Energieverbrauchs im Jahr 2016 sind circa 66 Prozent (476 Mrd. kWh) auf die Prozesswärme zurückzuführen, wovon die Erneuerbaren Energien lediglich fünf Prozent ausmachen⁵⁶. Temperaturen unter 300 Grad Celsius sind gut erschließbar für Solarthermie, Tiefengeothermie und Wärmepumpen. Bei der Betrachtung des Prozesswärmebedarfs aller Wirtschaftszweige wird deutlich, dass lediglich ein Viertel davon ein Temperaturniveau von unter 500 Grad Celsius benötigt. Der Großteil des Prozesswärmebedarfs fällt hingegen auf den Temperaturbereich über 500 Grad Celsius⁵⁷. Aufgrund der Temperaturbegrenzung der genannten Technologien empfiehlt sich der Einsatz von Bioenergie bei der Prozesswärme insbesondere im Hochtemperaturbereich.

Vor allem biogene Gase (Biogas, Biomethan) haben eine relevante Rolle bei der Energieversorgung der Zukunft. Für das Jahr 2050 liegt das in den Szenarien beschriebene Potenzial zwischen 26 Mrd. kWh und 200 Mrd. kWh. Im Verkehr kann Biomethan als Kraftstoff für Fahrzeuge mit Gasmotor bereits relativ kurzfristig dazu beitragen, den Ausstoß an Treibhausgasen zu senken, da sein CO₂-Ausstoß unter dem von Diesel oder Benzin liegt. Hinzu kommt, dass Gasfahrzeuge auch die Schadstoffbelastung (Stickoxide, Feinstaub, Kohlenmonoxid) gegenüber Flüssigkraftstoffen reduzieren. Im Wärmebereich wird 2030 ein Wärmeverbrauch aus Biogas und Biomethan zwischen 15 Mrd. kWh und 25 Mrd. kWh angenommen. Im Jahr 2050 gehen die Werte noch deutlicher auseinander. Im Stromsektor wird in den meisten Studien der Fokus auf eine qualitative Optimierung gelegt, das heißt, Strom aus Biogas oder Biomethan wird flexibel am Strombedarf und auf die Bereitstellung von Systemdienstleistungen für eine stabile Stromversorgung ausgerichtet. Die Rolle von biogenen Gasen für die Energiewende wird sich somit fundamental ändern. Hinsichtlich der eingesetzten Biomasse für biogene Gase erwarten die meisten Studien mengenmäßig keine großen Zuwächse.

Zusammenfassend wird die Bioenergie ein wichtiger Teil eines Energiesystems der Zukunft sein.

5.2 STROMSEKTOR: FLEXIBLE BIOGASANLAGEN

Aufgrund ihrer Speicherbarkeit ist die Rolle der Bioenergie vor allem im Stromsektor im Wandel begriffen. Früher reizten die Rahmenbedingungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes einen rund um die Uhr konstanten Betrieb mit gleichmäßiger Stromerzeugung an. Nun sollen insbesondere Biogasanlagen für den flexiblen Ausgleich der fluktuierenden Wind- und Solarstromerzeugung sorgen statt wie bisher im Grundlastbetrieb zu laufen. Gefragt ist ein flexibler und bedarfsgerechter Betrieb zu Zeiten hoher Stromnachfrage und geringer Einspeisung aus Sonne und Wind, gelenkt durch die Preissignale am Strommarkt.

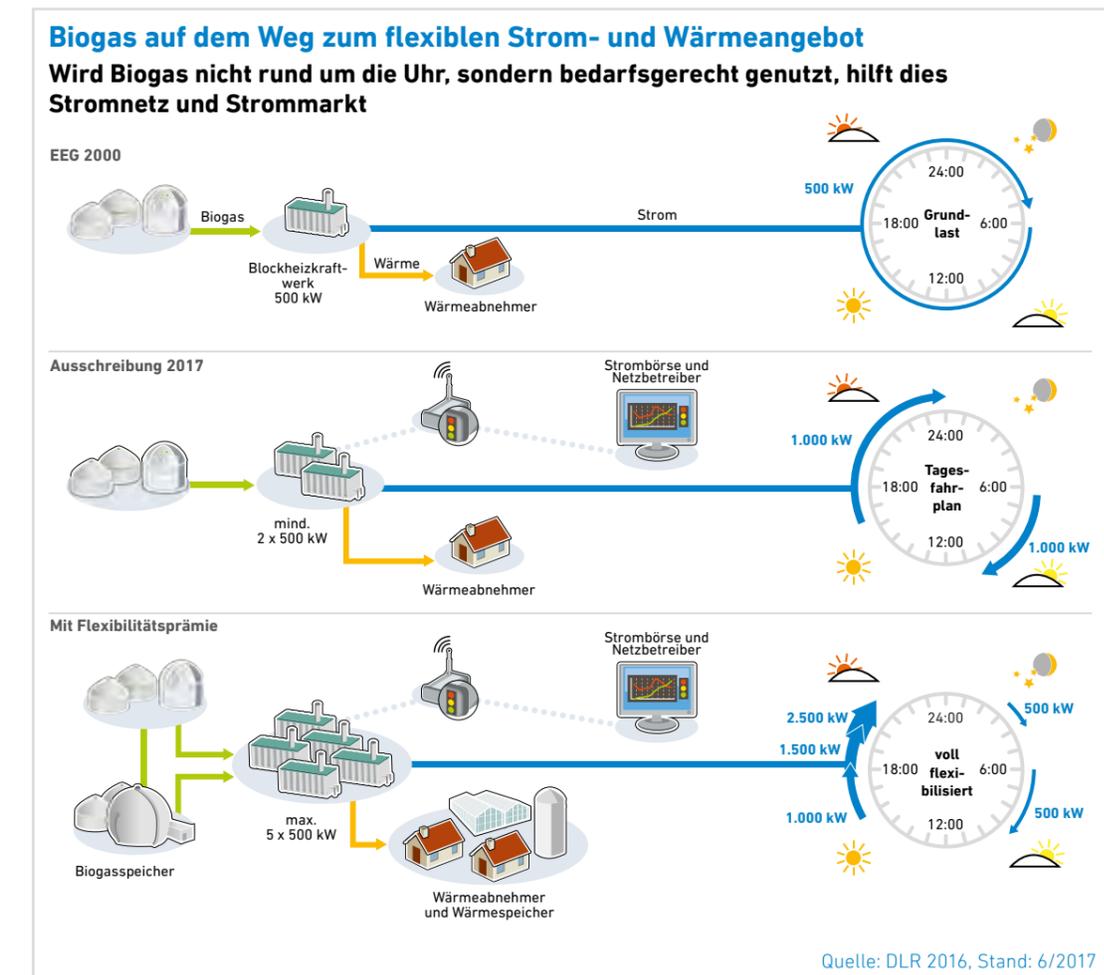
Die bisher oft wärmegeführt betriebenen Anlagen müssen hierfür jedoch mit größeren Gasspeichern und Wärmespeichern ausgestattet werden. Erste Anreize dafür lieferte seit 2012 die Flexibilitätsprämie im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Die Flexibilitätsprämie stellt eine finanzielle Unterstützung für die Betreiber von Biogas- bzw. Biomethan-BHKW, die die installierte Leistung ihrer BHKW steigern, um die Stromerzeugung von Biogas-BHKW stärker an der Stromnachfrage auszurichten. Voll flexibilisierte Biogasanlagen verfügen über eine gegenüber dem Grundlastbetrieb bis zu fünfmal so hohe installierte Leistung zur Stromerzeugung. Um die gleichbleibende Menge Biogas über mehrere Tage speichern zu können, nutzen sie vor Ort Biogasspeicher. Damit die vom BHKW versorgten Wärmenutzer nicht frieren, wenn das BHKW heruntergefahren wird, kommen auch größere Wärmespeicher

⁵⁶ BMWi: Energiedaten: Gesamtausgabe. 2019

⁵⁷ AEE: Erneuerbare Energie für die Industrie. 2017

zum Einsatz. Bei einer flexiblen Fahrweise von Biogas-BHKWs reagieren Anlagenbetreiber auf Preisschwankungen an der Strombörse oder Steuersignale der Netzbetreiber⁵⁸. Ende August 2019 hat die Bundesnetzagentur jedoch gemeldet, dass der festgelegte Deckel von 1.000 Megawatt (MW) für den Erhalt der Flexibilitätsprämie bei Biogas ausgeschöpft ist. Damit sinkt der wirtschaftliche Anreiz für Biogasanlagen-Betreiber, auf eine flexible Fahrweise umzustellen.

Laut Fachverband Biogas stellen die aktuell in Deutschland installierten Biogasanlagen eine gesicherte Leistung von rund 5.000 MW bereit. 1.000 MW davon seien flexible Pufferleistung, um die Stromerzeugung systemdienlich an den Bedarf anzupassen. Bei einer konsequenten Flexibilisierung könne die Biogasbranche die Leistung auf mindestens 10.000 MW steigern, ohne den Substratinput zu erhöhen. Damit dieses zusätzliche Potenzial der weiteren Anlagenflexibilisierung erschlossen werden könne, müsse der Förderdeckel im EEG weg oder zumindest deutlich erhöht werden.⁵⁹



Einige Betreiber von Biogas-BHKWs haben bereits in eine Flexibilisierung investiert. Viele andere Landwirte und Banken schrecken allerdings noch vor den notwendigen Investitionen zurück. Insgesamt wird das Potenzial der KWK zur Flexibilisierung des Stromsektors noch zu wenig genutzt. Die Preisschwankungen an der Strombörse sind aufgrund des Überangebots so gering, dass sich eine

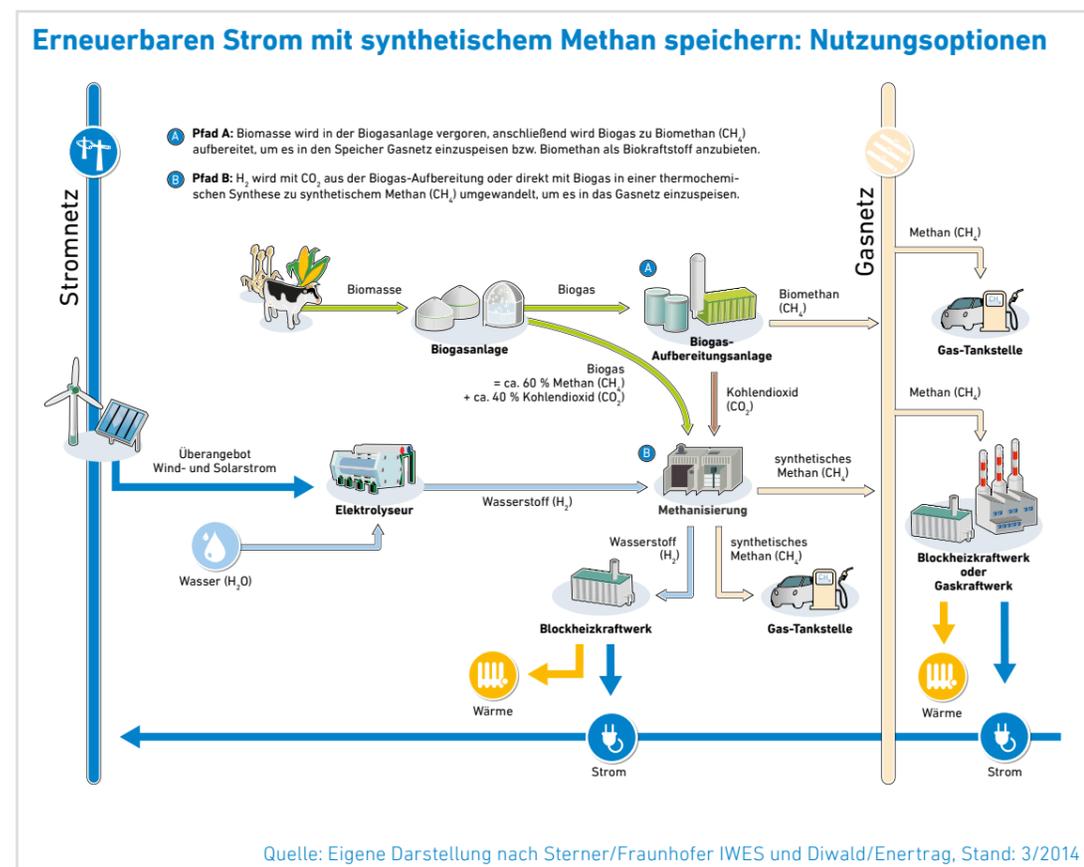
⁵⁸ AEE: Energie-Update

⁵⁹ Fachverband Biogas: „Flexdeckel“ voll: Biogasbranche ausgebremst. 2019

flexible Fahrweise für viele Anlagen aktuell kaum rechnet⁶⁰. Kürzere Handelsfristen und eine stärkere Rolle für den untertägigen, kurzfristigen Stromhandel, sowie volumenabhängige Entgelte für die Netznutzung könnten in Zukunft die notwendigen Preissignale bringen⁶¹. Um die Flexibilität der Bioenergie voll ausnutzen zu können, gilt es, die Flexibilitätsprämie für Bioenergieanlagen weiterzuentwickeln und zu stärken. Die derzeitige Deckelung der Flexibilitätsprämie verhindert jedoch, dass das Potenzial der Bioenergie für ein Energiesystem der Zukunft voll ausgeschöpft wird.

5.3 BIOGAS ZUR HERSTELLUNG VON POWER-TO-GAS

Auch für das oben beschriebene PtG-Verfahren können biogene Gase eine wichtige Rolle spielen. Für die Produktion von synthetischem Methan wird CO_2 benötigt. Dieses fällt der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan ohnehin an und kann im Rahmen von PtG dann sinnvoll verwertet werden. Die Grafik veranschaulicht zwei mögliche Pfade für das Speichern bzw. Rückverstromen von erneuerbarem Strom mit Hilfe von Biogasanlagen. Im ersten Pfad (A) wird Biogas zu Biomethan (CH_4) aufbereitet und dann im Gasnetz gespeichert. Im zweiten Pfad (B) wird ein Überangebot von erneuerbarem Strom durch Elektrolyse zu Wasserstoff und anschließend in synthetisches Methan (CH_4) umgewandelt. Dabei wird Kohlendioxid hinzugeführt, das bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan anfällt. Bioenergie dient hier also als CO_2 -Quelle in der Methanisierung. Das im Power-to-Gas-Verfahren erzeugte synthetische Methan kann wiederum im Gasnetz gespeichert werden. Die Nutzbarkeit von CO_2 aus Biogasanlagen, biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken oder Biomethananlagen stellt ein hohes Potenzial als Ressource für PtG-Verfahren oder zur Methanol-Herstellung dar.



60 AEE: Energie-Update

61 AEE: Energie-Update

6 QUELLEN

ACATECH/ LEOPOLDINA/ AKADEMIENUNION: „Sektorkopplung“. Optionen für die nächste Phase der Energiewende. Berlin, 2017

ADAC: Elektroautos in Deutschland. Wo stehen wir heute? (Abruf am 13.11.2019)

ALLGEMEINDER DEUTSCHER FAHRRAD-CLUB (ADFC): Elektrofahrräder. (Abruf am 16.9.19)

AG ENERGIEBILANZEN (AGEB): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2018. Berlin, 2019

AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (AEE): Strom speichern. Renew's Spezial Nr. 75. Berlin, 2014

AEE: Metaanalyse „Nutzungspfade der Bioenergie für die Energiewende“. Berlin, 2015

AEE: Großwärmespeicher – Zentraler Baustein einer flexiblen Strom- und Wärmeversorgung. Renew's Spezial Nr. 80. Berlin, 2017

AEE: Erneuerbare Energie für die Industrie: Prozesswärme aus Bioenergie sorgt für Unabhängigkeit und Klimaschutz. Berlin, 2017

AEE: Metaanalyse „Die Rolle erneuerbarer Gase in der Energiewende“. Berlin, 2018

AEE: Verknüpfung von Strom, Wärme und Verkehr im Energiesystem der Zukunft. Die Rolle der Bioenergie in den Sektoren. Renew's Spezial Nr. 86. Berlin, 2019

AEE: Mehr Speicher. Überbrücken wird leichter mit speichern. 2018

AGORA ENERGIEWENDE: Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2018. Berlin, 2019

BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (BAFA): Elektromobilität. Umweltbonus. (Abruf am 16.9.2019)

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWI)/AGEE-STAT: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin, 2019

BMWI: Energiedaten. Gesamtausgabe. (Stand: 22.1.2019)

BMWI: Energiwende direkt. (Newsletter vom 20.8.19)

BUNDESNETZAGENTUR: Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Erstes Quartal 2019. Bonn, 2019

BUNDESNETZAGENTUR: Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Gesamtjahr und Viertes Quartal 2018. Bonn, 2019

BUNDESNETZAGENTUR/ BUNDESKARTELLAMT: Monitoringbericht 2018. Bonn, 2018

BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT (BDEW): Allround-Talent Wasserstoff: Politik muss Anreize für Praxisanwendungen schaffen. Berlin, 27.8.2019

BDEW: Zahl der Woche / Fast 25 Prozent der Deutschen können sich vorstellen, innerhalb der nächsten fünf Jahre ein Elektroauto zu kaufen. (Pressemitteilung vom 12.9.2019)

BDEW: Kapferer zum Eine-Million-Ladesäulenprogramm. (Presseinformation vom 16.9.19)

BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE (BEE): Kursbuch Energiewende. Ein Leitbild für 100% Erneuerbare Energie in Strom, Wärme und Mobilität. Berlin, 2016

BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT (BSW): Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik). Berlin, 2019

DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR): Wärmeenergie in Salz speichern. Stuttgart, 2017

DEUTSCHE UMWELTHILFE (DUH): Sektorenkopplung. Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr. 2017

ECOFYS: Metaanalyse aktueller Studien zum Thema „Sektorenkopplung“. Welchen Beitrag kann Power-to-Gas für die Erreichung der Klimaziele leisten? Köln, 2018

ENBW: EnBW ordnet Priorität bei Speicherprojekten neu: Das Pumpspeicherprojekt Atdorf wird nicht weiterverfolgt. (Pressemitteilung vom 11.10.17)

ENERGY BRAINPOOL: Auf dem Weg in die Wettbewerbsfähigkeit: Elektrolysegase erneuerbaren Ursprungs. Berlin, 2018

EXPERTENKOMMISSION ZUM MONITORING-PROZESS „ENERGIE DER ZUKUNFT“: Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017. Berlin, Münster, Stuttgart, 2019

FACHVERBAND BIOGAS: „Flexdeckel“ voll: Biogasbranche ausgebremst. Freising, 2019 (Abruf am 18.9.2019)

HEIMERL, STEPHAN/ KOHLER, BEATE: Aktueller Stand der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland. In: Wasserwirtschaft 10/2017

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT (HTW) BERLIN: Stromspeicher-Inspektion 2018.

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT): Power-to-Liquid: 200 Liter Sprit aus Solarstrom und dem Kohlenstoffdioxid der Umgebungsluft. Presseinformation 103/2017. (Abruf am 5.11.2019)

LUDWIG-BÖLKOW-SYSTEMTECHNIK (LBST)/ BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE (BEE): Analyse der Kosten erneuerbarer Gase. Berlin, 2013

MAINZER STADTWERKE AG: Pumpspeicherwerk: Stadtwerke treten auf die Bremse. Planungen für das Projekt „PSW Heimbach“ bei Bingen werden bewusst verlangsamt. (Meldung vom 6.4.2017)

ÖKO-INSTITUT: Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX. Diskussion der Anforderungen und erste Ansätze für Nachweiskriterien für eine klimafreundliche und nachhaltige Produktion von PtX-Stoffen. Freiburg, Berlin, Darmstadt. 2019

REN21: Renewables 2019. Global Status Report. 2019

VATTENFALL: SaltX – neuer Salzspeicher in Betrieb. 2019

VPRESS. GMBH: Paraffin-Wärmespeicher. Revolution auf dem Sonnenwärme-Markt.

ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFFFORSCHUNG (ZSW) / BOSCH & PARTNER: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. 2019.

50 HERTZ TRANSMISSION/AMPRION/TENNET TSO/TRANSNETBW: Netzentwicklungsplan 2019.

IMPRESSUM

Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
Invalidenstraße 91
10115 Berlin

Tel.: 030 200535 30
Fax: 030 200535 51

E-Mail: kontakt@unendlich-viel-energie.de

Aktuelle Informationsangebote finden Sie im Internet:

www.unendlich-viel-energie.de

www.energie-update.de

www.forum-synergiewende.de

www.kommunal-erneuerbar.de

www.foederal-erneuerbar.de

www.forschungsradar.de

www.waermewende.de

