

RENEWS SPEZIAL

NR. 86 / JANUAR 2019

VERKNÜPFUNG VON STROM, WÄRME UND VERKEHR IM ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT DIE ROLLE DER BIOENERGIE IN DEN SEKTOREN



AGENTUR FÜR
ERNEUERBARE
ENERGIEN
unendlich-viel-energie.de

AUTORIN

Christina Hülsken
Redaktionsschluss: Januar 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:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

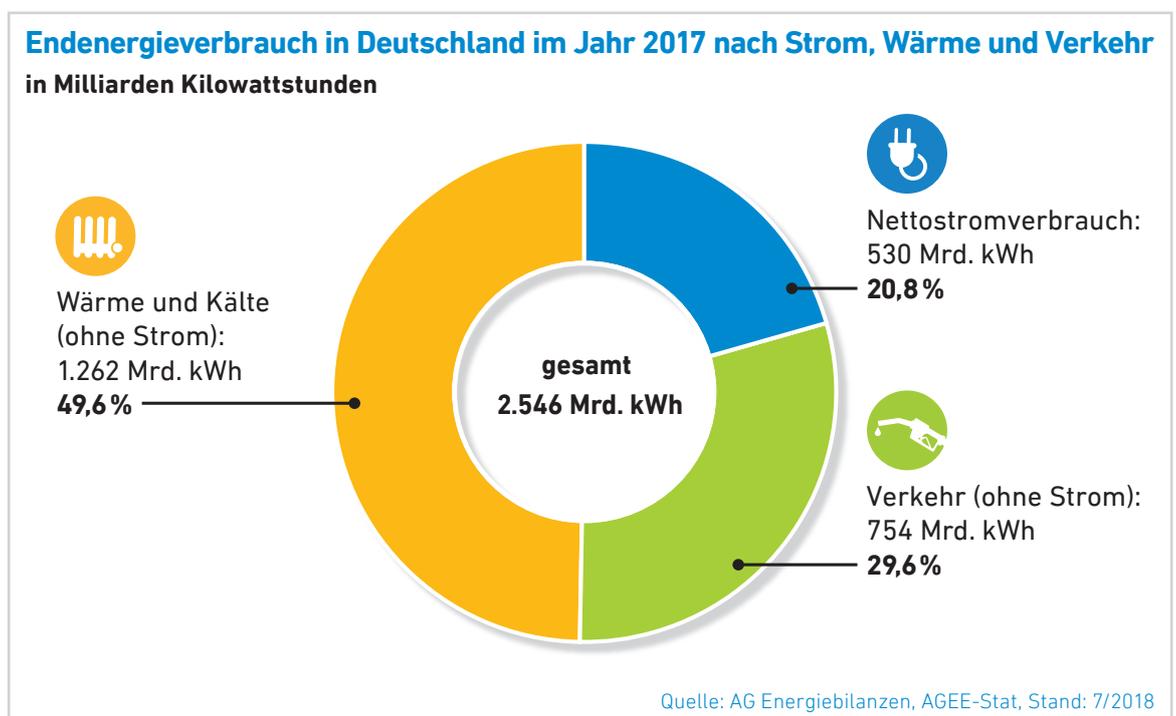
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALT

1 Die Verknüpfung von Strom, Wärme und Verkehr im Energiesystem der Zukunft	4
1.1 Der Stromsektor als Basis für die Verknüpfung der Sektoren	6
1.2 Auswirkungen auf Stromerzeugung und -verbrauch	7
1.3 Die Kopplung mit Wärme und Verkehr schafft Flexibilität im Stromsektor	8
2 Der Wärmesektor im Energiesystem der Zukunft	10
2.1 Kraft-Wärme-Kopplung	11
2.2 Wärmepumpen	12
2.3 Power-to-Heat	13
2.4 Power-to-Gas	14
3 Der Verkehrssektor im Energiesystem der Zukunft	17
3.1 Power-to-Mobility	19
3.2 Power-to-Gas	21
3.3 Power-to-Liquid	22
4 Die Rolle der Bioenergie im Energiesystem der Zukunft	23
4.1 Flexible Biogasanlagen für Markt- und Netzintegration	25
4.2 Die Rolle biogener Gase bei der Verknüpfung von Strom, Wärme und Verkehr	27
5 Rahmenbedingungen für eine Verknüpfung der Sektoren	30
5.1 Finanzielle Anreize	30
5.2 Energieeffizienz als Grundlage für die Senkung des Energieverbrauchs	31
5.3 Netze und Speicher	32
5.4 Digitalisierung: Lastmanagement und Smart Grids	34
6 Quellen	38

1 DIE VERKNÜPFUNG VON STROM, WÄRME UND VERKEHR IM ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT

Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, den Ausstoß an Treibhausgasen im Vergleich zu 1990 mindestens um 40 Prozent bis 2020 und um 80–95 Prozent bis 2050 zu senken. Zwischen dem erstgenannten Ziel und dem bisher Erreichten (-27,7 Prozent im Jahr 2017) gibt es eine deutliche Minderungs-lücke. Die Kluft zwischen den politischen Klimaschutzzielen und der realen Entwicklung wird weiter wachsen, wenn sich der aktuelle Trend fortsetzt. Zusätzliche Anstrengungen beim Ausbau der Erneuerbaren Energien, zur Verringerung der Nutzung fossiler Energiequellen, zur Steigerung der Energieeffizienz und zum Energiesparen sind dringend notwendig, um diesem entgegenzuwirken.



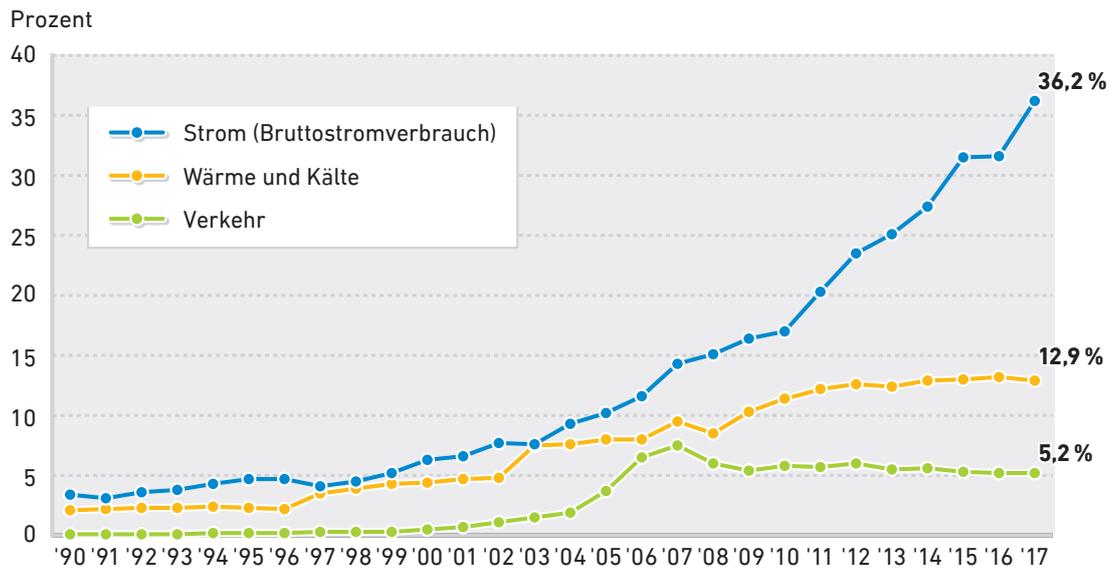
Auch wenn bei der medialen Diskussion der Energiewende der Stromsektor bislang im Fokus stand, zeigt ein Blick auf die Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs die Bedeutung von Wärme und Verkehr: Insgesamt weist der Wärmeverbrauch den größten Anteil des Endenergieverbrauchs (49,6 Prozent) vor Verkehr (29,6 Prozent) und Strom (20,8 Prozent) auf¹. Die geringen Erneuerbaren-Anteile bei einem gleichzeitig großen Energiebedarf erhöhen den Handlungsbedarf bei der Dekarbonisierung des Verkehrs- und Wärmesektors somit immens.

Die nachfolgende Grafik zeigt, wie unterschiedlich groß der Anteil der Erneuerbaren Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr ist: Die Erneuerbaren Energien deckten im Jahr 2017 mehr als ein Drittel des deutschen Bruttostromverbrauchs (36,2 Prozent), während im Wärmesektor (12,9 Prozent) sowie im Verkehrsbereich (5,2 Prozent) die fossilen Energieträger noch deutlich dominieren². Bei der Stromerzeugung wächst der Anteil dynamisch und wird durch einen stetigen Ausbau der Kapazitäten schon bald über fünfzig Prozent liegen.

¹ BMWi, AGEE-Stat: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland

² BMWi, AGEE-Stat: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland

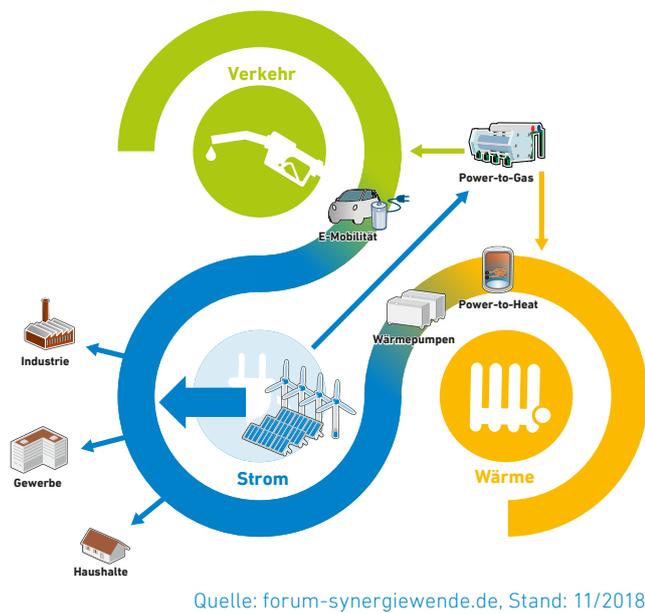
Anteile Erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch in Deutschland 1990–2017



Um alle fossilen Brennstoffe in diesen Sektoren zu ersetzen, muss erneuerbarer Strom für diese nutzbar gemacht werden, denn die vorhandenen Technologien im Verkehrs- und Wärmebereich reichen nicht aus, um eine hundertprozentige erneuerbare Energieversorgung zu erreichen. Ein solches intelligentes Zusammenspiel von Strom, Wärme und Verkehr wird unter dem Begriff Sektorenkopplung viel diskutiert. Sie ermöglicht neben der Dekarbonisierung von Wärme und Verkehr zeitgleich eine Flexibilität für den Stromsektor, die dringend benötigt wird: Einige Erneuerbare Energien unterliegen wetterbedingt Schwankungen, manchmal produzieren sie mehr und ein anderes Mal weniger Strom, als gerade verbraucht wird. Trotzdem muss auch bei den weiter ansteigenden Anteilen von erneuerbarem Strom die Balance von Erzeugung und Verbrauch im Netz gewahrt werden. Dies führt dazu, dass teilweise sogar Strom aus Wind- und Solaranlagen abgeregelt wird und diese Klimaschutzpotenziale verschenkt werden. Daher ist es sinnvoll, in Zeiten mit viel Wind und Sonne den regional nicht nutzbaren bzw. nicht

abtransportierbaren sauberen Strom mit Hilfe der Sektorenkopplung für Verkehr und Wärme zu nutzen. Sektorenkopplung bringt eine hohe technische, rechtliche und wirtschaftliche Komplexität mit sich und die lokalen Akteure sehen sich bei der praktischen Umsetzung noch mit vielen offenen Fragen konfrontiert. Das vorliegende RENEWS SPEZIAL zeigt auf, welche Möglichkeiten es zur Verknüpfung von Strom mit Wärme und Verkehr gibt und welche Rahmenbedingungen für die Etablierung eines nachhaltigen Energiesystems auf Basis von Sektorenkopplung erfüllt sein müssen. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die Rolle der Bioenergie gelegt.

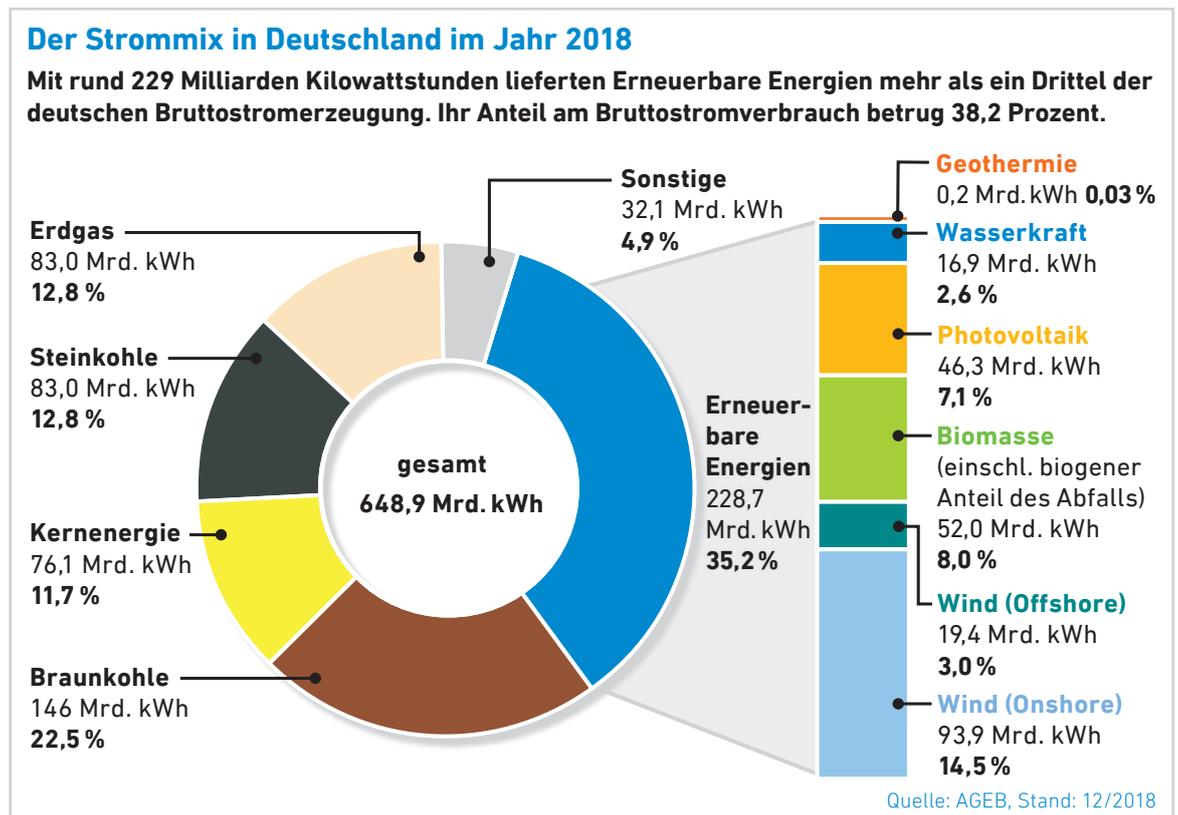
Sektorenkopplung



Definition: Sektorenkopplung fasst Ansätze zusammen, bei denen die bisher stark getrennten Sektoren Strom, Wärme und Mobilität stärker vernetzt werden. Ziel ist eine vereinfachte und beschleunigte Umstellung auf erneuerbare Energiequellen in allen drei Sektoren. Viele erneuerbare Energieträger sollen im Rahmen einer Sektorenkoppelung sowohl für die Stromerzeugung als auch die Wärmeversorgung und Mobilität eingesetzt werden, z.B. durch Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge oder Power-to-Heat-Anlagen. Die im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor flexibel einsetzbaren Bioenergieträger sowie Strom- und Wärmespeicher, synthetisches Methan und Wasserstoff tragen ebenfalls dazu bei, die Sektoren zu überbrücken.

1.1 DER STROMSEKTOR ALS BASIS FÜR DIE VERKNÜPFUNG DER SEKTOREN

Der Stromsektor weist im Vergleich zu Wärme und Verkehr den größten Anteil an Erneuerbaren Energien auf. Mit 228,7 Milliarden Kilowattstunden (Mrd. kWh) lag dieser im Jahr 2018 bei 35,2 Prozent. Die im März 2018 angetretene Große Koalition hat sich das Ziel gesetzt, im Jahr 2030 einen Anteil von 65 Prozent erneuerbaren Stroms am Endverbrauch zu erreichen.

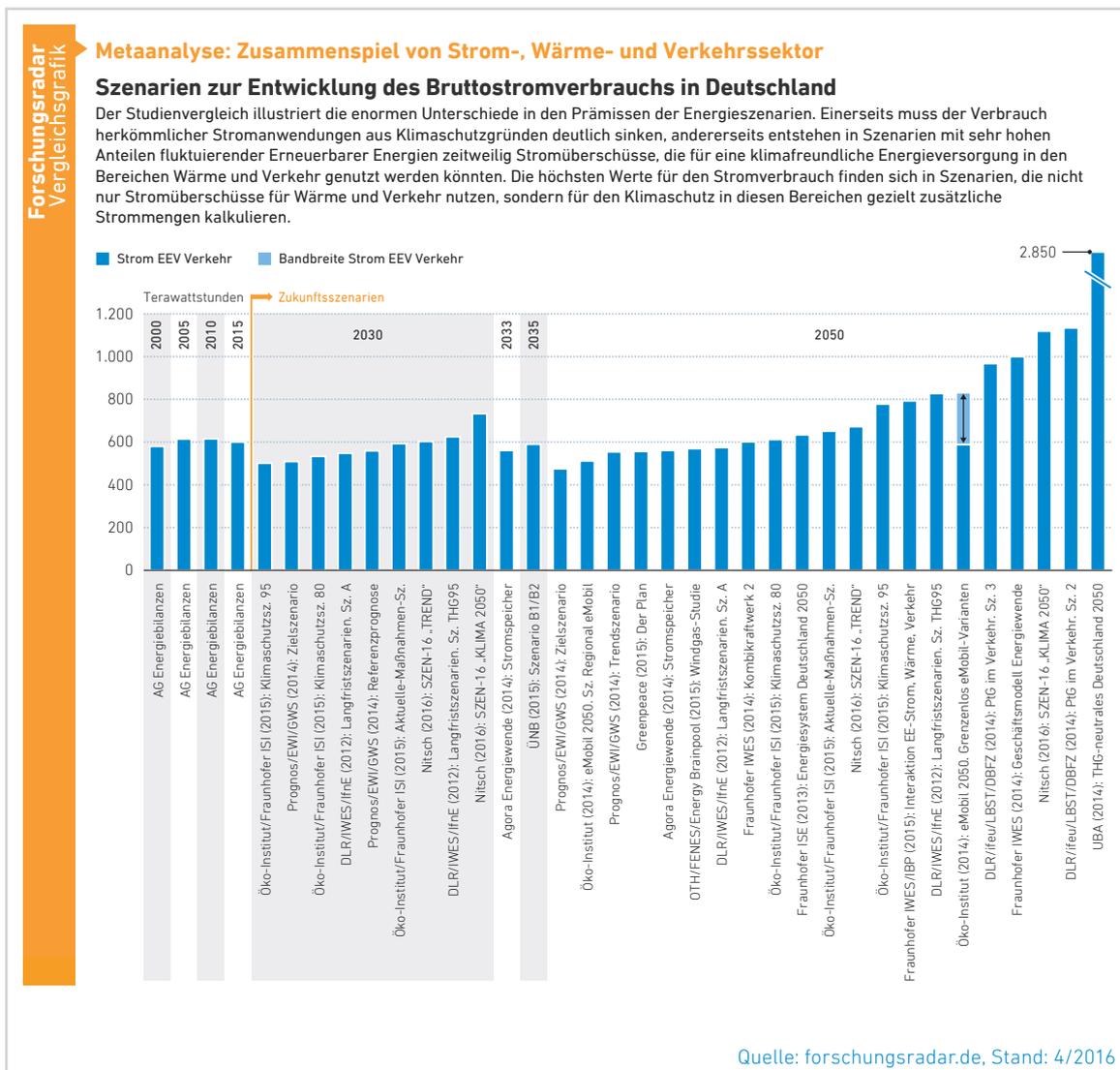


Der Stromsektor darf im Energiesystem der Zukunft nicht isoliert betrachtet werden. Nur die gleichzeitige Dekarbonisierung im Wärme- und Verkehrssektor ermöglicht das Erreichen der Klimaschutzziele. Die Vernetzung von Strom, Wärme und Verkehr zielt darauf ab, Synergien für die vereinfachte und beschleunigte Umstellung auf erneuerbare Energiequellen in allen drei Sektoren zu nutzen.

Auch wenn in der Vergangenheit die einzelnen Sektoren der Energieversorgung überwiegend getrennt waren (Braunkohle erzeugte Strom, Erdgas wurde zum Heizen verfeuert und Erdöl trieb Fahrzeuge an oder heizte Gebäude), ist die Sektorenkopplung keine vollkommen neue Idee: Während der Schienenverkehr im vergangenen Jahrhundert überwiegend von der Dampflokomotive auf strombetriebene Züge umgestellt wurde, sorgten im Wärmesektor strombasierte Nachtspeicherheizungen für eine stetigere Auslastung von Kohle- und Atomkraftwerken, und die Kraft-Wärme-Kopplung ist eine heute weit verbreitete Technologie, die auch weiterhin relevant für den Umbau der Energieversorgung ist. Doch das Energiesystem der Zukunft verlangt eine noch viel weitergehende Verknüpfung von Strom, Wärme und Verkehr: Erneuerbarer Strom muss zunehmend zur wichtigsten Energiequelle für den Wärme- und Verkehrssektor werden.

1.2 AUSWIRKUNGEN AUF STROMERZEUGUNG UND -VERBRAUCH

Die Bundesregierung setzt sich für den Stromverbrauch das Ziel, diesen bis zum Jahr 2020 um zehn Prozent gegenüber dem Wert von 2008 zu senken. In absoluten Zahlen bedeutet dies einen Rückgang beim Bruttostromverbrauch von 618 Mrd. kWh auf 556 Mrd. kWh pro Jahr. Im Jahr 2017 lag der Wert bei 602,6 Mrd. kWh³. Die Verknüpfung der drei Sektoren hat einen großen Einfluss auf Stromerzeugung und Stromverbrauch, denn langfristig wird dadurch der Energiebedarf im Stromsektor den größten Anteil des gesamten Verbrauchs ausmachen.



3 BMWi, AGEE-Stat: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland

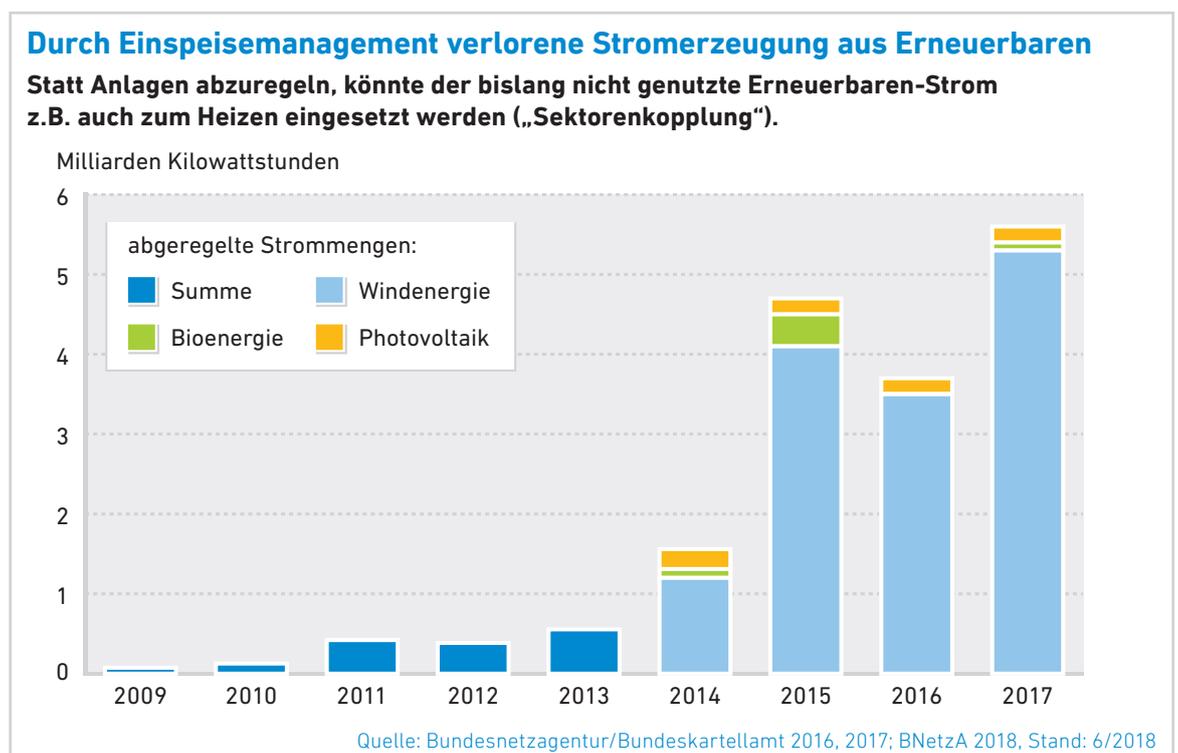
Während einerseits Effizienzmaßnahmen die Einspareffekte im Stromsektor vergrößern können, wird andererseits die zunehmende Nutzung von Strom in den anderen Sektoren eine Reduzierung des Verbrauchs relativieren. Unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung geht das Umweltbundesamt⁴ von einem Endenergieverbrauch an Strom von 465,8 Mrd. kWh im Jahr 2050 aus.

Auch der Vergleich unterschiedlicher Szenarien in der AEE-Metaanalyse „Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr“ spiegelt diesen gegenläufigen Trend wider: Auf der einen Seite bewirken Effizienzsteigerungen Einspareffekte bei den bisherigen Stromanwendungen, auf der anderen Seite entsteht durch neue Verbraucher bei der Nutzung von Strom im Wärme- und Stromsektor eine zusätzliche Stromnachfrage. Der Großteil der Studien geht davon aus, dass der Stromverbrauch sich auch unter der Annahme erheblicher Effizienzsteigerungen langfristig nicht reduzieren, sondern eher sogar noch steigern wird.

Die Studie „Wärmewende 2030“⁵ kommt zu dem Ergebnis, dass der zusätzliche Stromverbrauch aus dem Wärme- und Verkehrssektor CO₂-frei gedeckt werden muss, um das 2030-Klimaziel zu erreichen. Da die zunehmende Nutzung von Strom in anderen Sektoren mit Rückkopplungseffekten verbunden ist, besteht die Herausforderung somit darin, die Technologien zur Umwandlung von Strom in Wärme und Mobilität effizient zu verknüpfen und zu steuern.

1.3 DIE KOPPLUNG MIT WÄRME UND VERKEHR SCHAFFT FLEXIBILITÄT IM STROMSEKTOR

Die Verknüpfung von Strom mit Wärme und Verkehr wird als wichtige Flexibilitätsoption zur Stabilisierung des Stromsystems der Zukunft angesehen. Wind und Sonnenenergie sind volatil. Das bedeutet, dass sie zu verschiedenen Zeiten unterschiedlich viel Energie erzeugen. Im Energiesystem der Zukunft wird ein wachsender Anteil an fluktuierenden Erneuerbaren Energien erwartet⁶ und somit eine flexible Nachfrage nach Strom benötigt.



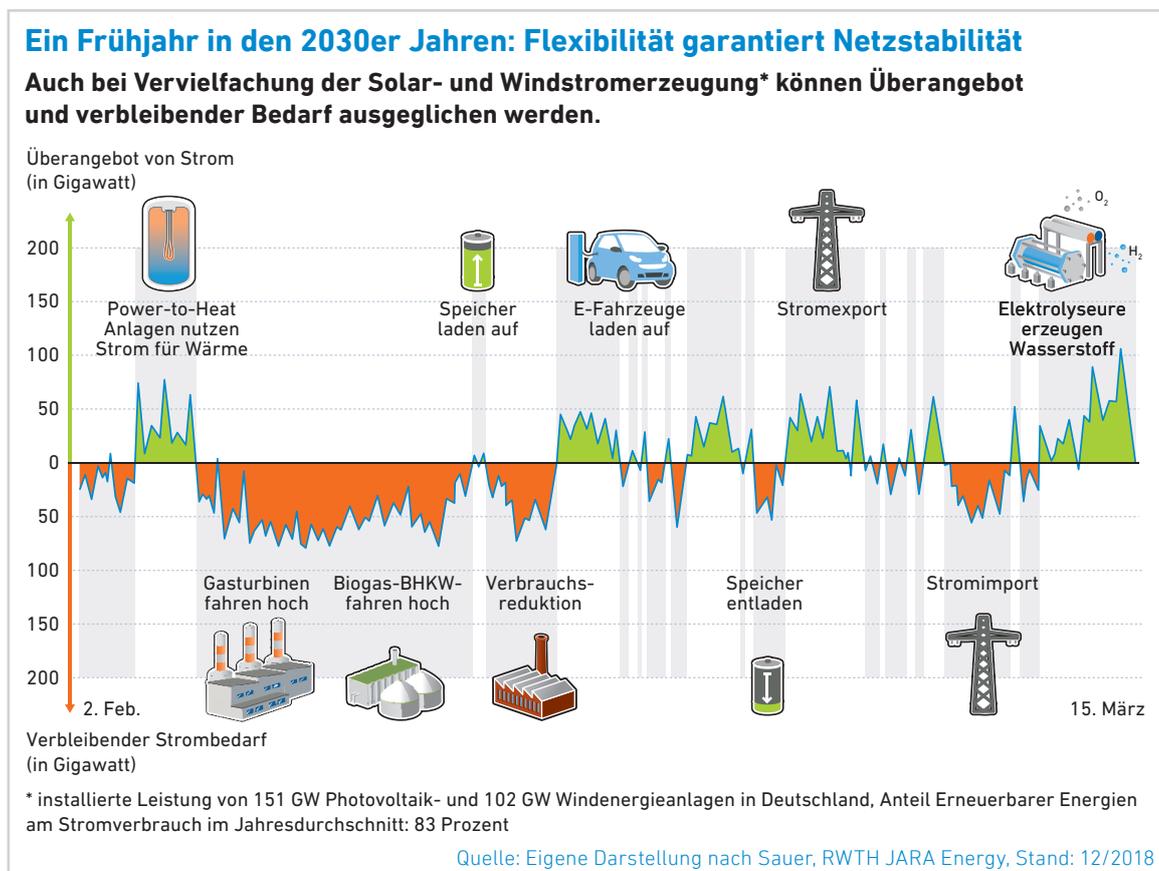
⁴ UBA: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050

⁵ Agora Energiewende: Wärmewende 2030

⁶ AEE: Metaanalyse Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr

Wenn die erzeugte Energie in Spitzenlastzeiten nicht verwendet und nicht gespeichert werden kann, kommt es zeitweise zu Überangeboten, wodurch die Erzeugungsanlagen bislang abgeregelt werden mussten. Allein 2017 konnten so mehr als 5 Mrd. kWh erneuerbarer Strom nicht genutzt werden⁷. Die Grafik verdeutlicht: Die durch Drosselung Erneuerbarer-Energien-Anlagen nicht erzeugte Strommenge hat sich in den vergangenen Jahren stark erhöht. Pumpspeicher und Batterien können für ein kurzfristiges Überangebot genutzt werden, eignen sich jedoch aufgrund der geringen Speicherkapazität nicht für große Überschüsse bzw. für den Ausgleich von mehreren Wochen mit geringem Angebot von Sonne und Wind.

Statt die Anlagen abzuregeln, kann der Strom im Wärme- und Verkehrssektor eingesetzt werden, womit gleichzeitig fossile Energieträger substituiert und die Netzstabilität gesichert wird. Wie groß der Flexibilitätsbedarf im Stromsystem ist, kann man an der Residuallast erkennen (Differenz zwischen dem aktuellen Stromverbrauch und der Einspeisung aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien). Wenn die Stromerzeugung die nachgefragte Leistung übersteigt, ergibt sich eine negative Residuallast. Durch Stromexport, Netzausbau, Speicher oder eben durch die gezielte Steigerung der Nachfrage mithilfe der Sektorenkopplung, kann die negative Residuallast verringert werden. Ab 2030 werden diese Überangebote häufiger und über längere Zeiträume auftreten. Sektorale Flexibilität kann dazu beitragen, die erneuerbar erzeugte Energie besser zu nutzen, das System damit effizienter zu machen und den Ausstoß von Treibhausgasen zu begrenzen. Die Sektorenkopplung kann aber auch als Speicher für das Stromsystem in Situationen dienen, in denen die erneuerbare Erzeugung geringer als der Verbrauch ist.

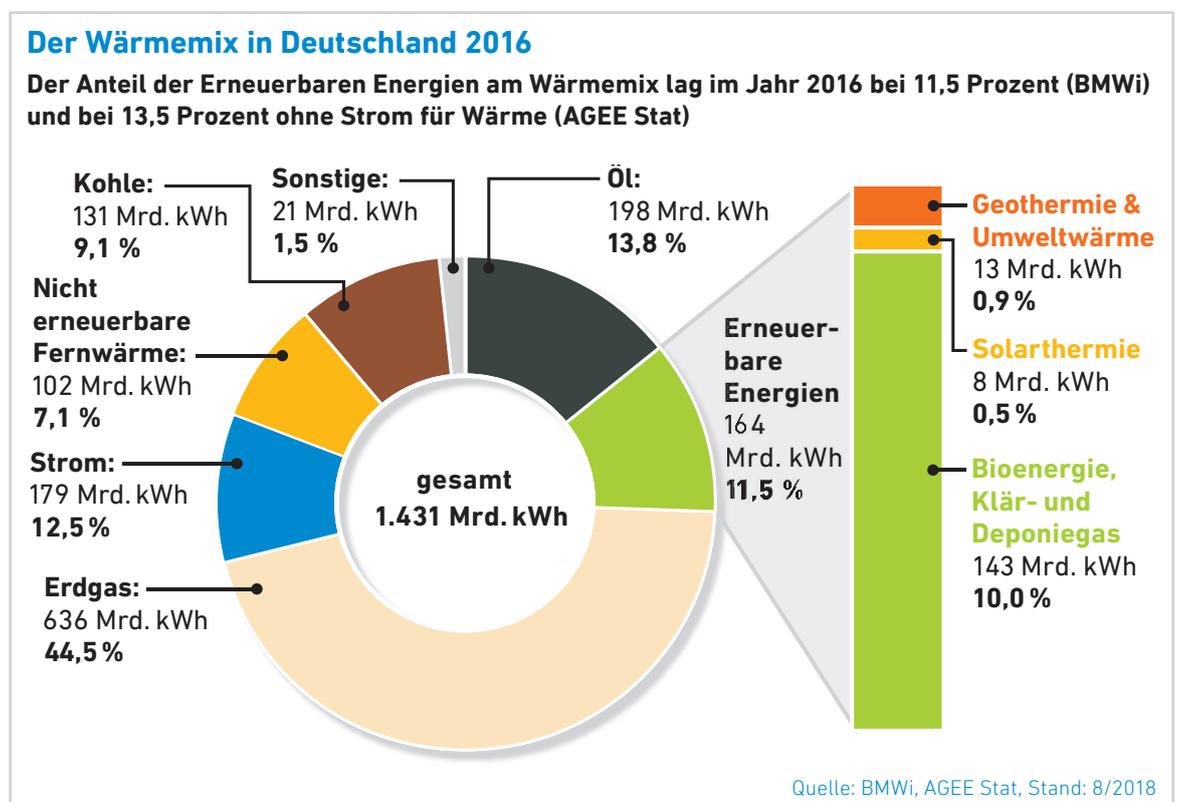


Die obenstehende Grafik zeigt, inwiefern auch bei Vervielfachung der Solar- und Windstromerzeugung Überangebot und verbleibender Bedarf ausgeglichen werden können.

⁷ Bundesnetzagentur: Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Gesamtjahr und Viertes Quartal 2017, Bundesnetzagentur / Bundeskartellamt: Monitoringbericht 2017

2 DER WÄRMESEKTOR IM ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT

Die Versorgung von Gebäuden mit Raumwärme und Warmwasser sowie die Bereitstellung von Prozesswärme für die Industrie machten 2017 rund 49,6 Prozent des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland aus. Somit muss der Dekarbonisierung dieses Sektors eine bedeutende Rolle zugeschrieben werden. Der hohe Anteil der Wärme an der Endenergiebilanz liegt nicht zuletzt an häufigen Defiziten bei der Gebäudedämmung sowie dem verbreiteten Einsatz veralteter, ineffizienter Heizungsanlagen. Die benötigte Wärme wird weitgehend aus fossilen Brennstoffen gewonnen, was mit einem hohen Treibhausgasausstoß und einer starken Abhängigkeit von Erdöl- und Erdgasimporten verbunden ist, während der Anteil der Erneuerbaren Energien bei rund 11,5 Prozent stagniert. Hier macht die Bioenergie mehr als 80 Prozent aus⁸. Im Wärmesektor setzt sich die Bundesregierung das Ziel, den Anteil der Erneuerbaren Energien bis 2020 auf 14 Prozent zu erhöhen.



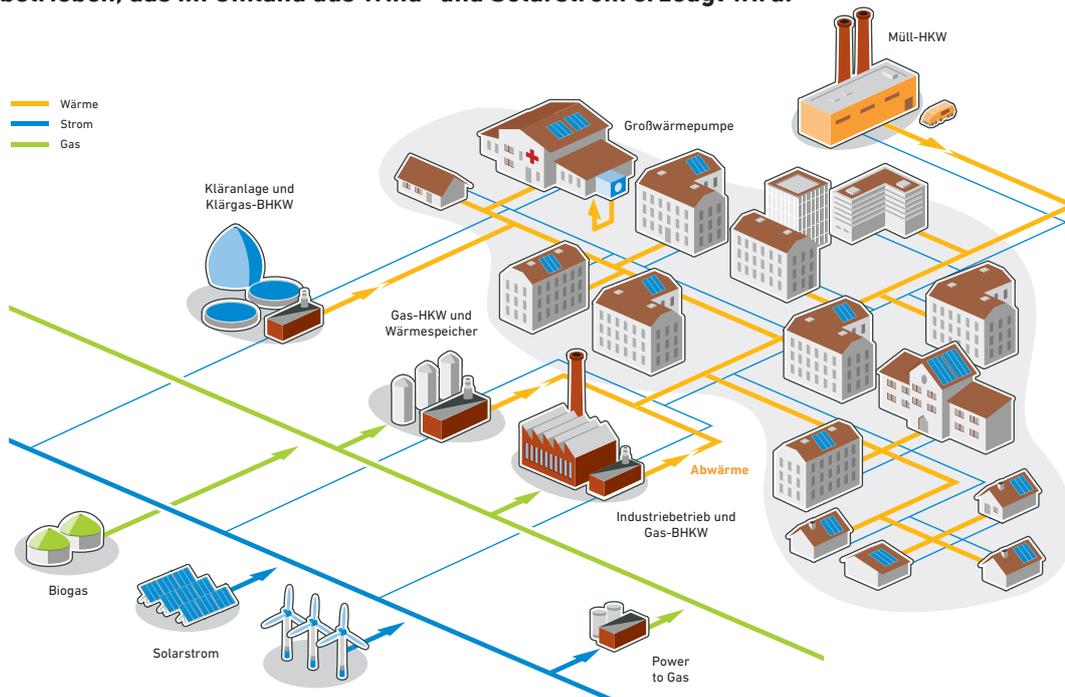
Eine schnelle Entwicklung hin zu erneuerbaren Wärmetechnologien ist insofern äußerst wichtig, da Heizungsanlagen langlebig sind und eine Entscheidung für fossile Energieträger 20–30 Jahre nachhält. Die Umstellung auf eine hundertprozentige erneuerbare Versorgung kann neben Maßnahmen zur Senkung des Wärmebedarfs auch durch die Nutzung von erneuerbarem Strom gelingen. Heizen mit Strom galt in Deutschland lange als ineffizient. Doch wenn künftig immer öfter ein Überangebot an Strom aus Solar- und Windenergie herrscht, kann dieser in klimafreundliche Wärme umgewandelt werden. Die AEE-Metaanalyse „Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr“⁹ vergleicht Szenarien zum Stromverbrauch für Wärmeanwendungen in Deutschland: Viele Studien rechnen mit einer deutlichen Zunahme der Nutzung von Strom für Wärmezwecke, im Jahr 2050 sogar bis knapp über 300 Mrd. kWh. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Technologieoptionen bei der Nutzung von Strom im Wärmesektor aufgezeigt.

⁸ BMWi, AGEE-Stat: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland

⁹ AEE: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr

Wärmeversorgung der Zukunft – in der Stadt

Der auch zukünftig in der Stadt noch vorhandene hohe Wärmebedarf wird effizient über ein Wärmenetz gedeckt, in das verschiedene Anlagen wie Müll-Heizkraftwerke (HKW) oder Klärgas-Blockheizkraftwerke (BHKW) einspeisen. Großwärmepumpen machen beispielsweise Abwasserwärme nutzbar und auch die Abwärme aus Industriebetrieben wird über das Wärmenetz verteilt. Gasheizkraftwerke werden mit Biomethan oder synthetischem Gas betrieben, das im Umland aus Wind- und Solarstrom erzeugt wird.



Quelle: Eigene Darstellung, Stand: 10/2016

2.1 KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

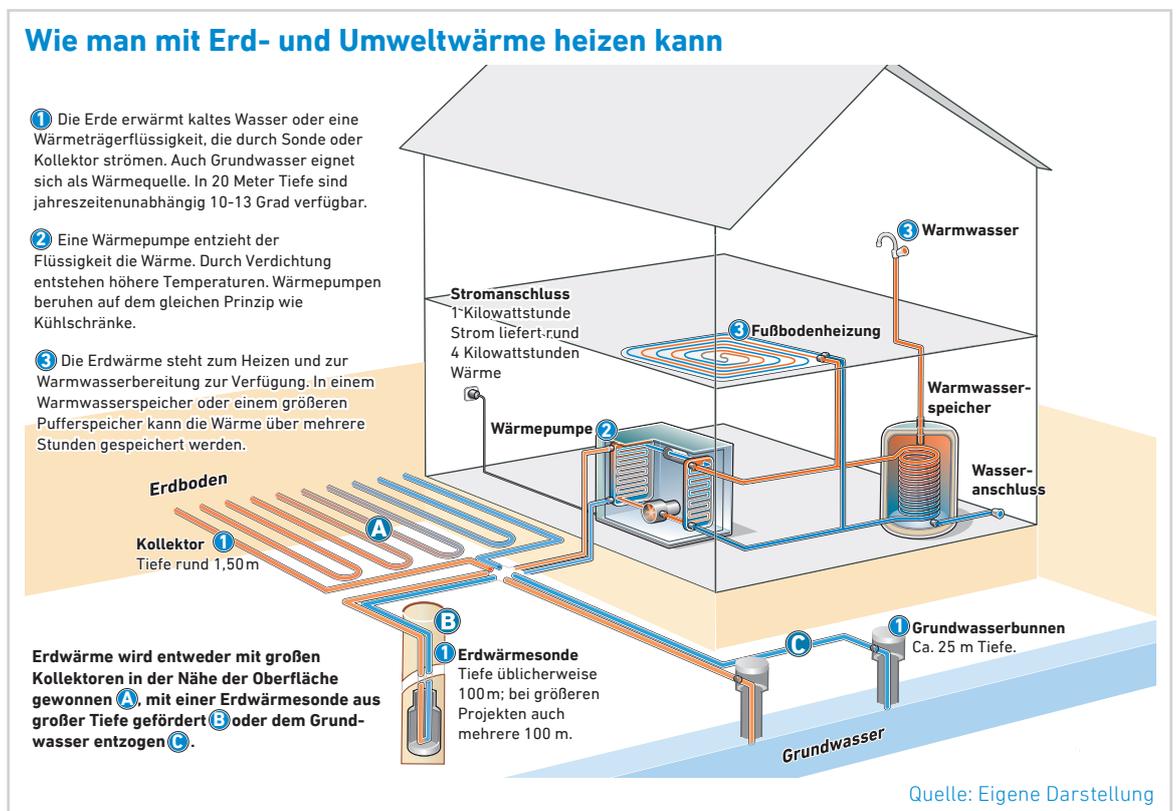
Bei der Stromerzeugung durch Verbrennung eines Energieträgers in thermischen Kraftwerken entsteht immer auch Wärme. Bei herkömmlichen Kraftwerken wird diese Abwärme ungenutzt über Kühltürme an die Umwelt abgegeben, wohingegen sie bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ausgekoppelt und über ein Wärmenetz als Nah- oder Fernwärme nutzbar gemacht werden kann. Das steigert den Wirkungsgrad und bedeutet somit eine wesentlich höhere Energieeffizienz. So wandelt diese bereits etablierte Sektorkopplungstechnologie bis zu 95 Prozent der eingesetzten Energie in Strom und nutzbare Wärme um, während konventionelle Kraftwerke bei reiner Stromerzeugung auf maximal 65 Prozent kommen¹⁰. Gerade große Kohlekraftwerke erreichen oft nur deutlich geringere Werte. KWK-Anlagen stellen damit eine wichtige und effiziente Verknüpfung zwischen Strom- und Wärmemarkt dar und müssen im Rahmen der Systemtransformation auf Bioenergie oder auf erneuerbare Gase umgestellt werden¹¹. Es gilt zudem, die bisher oft wärmegeführten Anlagen zu flexibilisieren und künftig mithilfe von Wärmespeichern den Strom nach Bedarf einzuspeisen.

¹⁰ Stephanos: Optionen für die nächste Phase der Energiewende

¹¹ BEE: Kursbuch Energiewende

2.2 WÄRMEPUMPEN

Die Wärmepumpe ist eine wichtige Technologie im Rahmen der Sektorenkopplung, insbesondere bei der Integration von erneuerbarem Strom im Niedertemperaturbereich von Wohngebäuden. Wärmepumpen nutzen erneuerbare Energiequellen wie oberflächennahe Geothermie, die natürliche Umweltwärme der Außenluft oder die Abwärme z.B. von Industrieprozessen und übertragen diese auf einen Wärmeträger. Wasser oder eine Wärmeträgerflüssigkeit in der Wärmepumpe nimmt diese Wärme auf und verdampft schnell. Der elektrische Kompressor der Wärmepumpe verdichtet den Dampf, wodurch dessen Temperatur weiter ansteigt. Die entstehende Wärme kann dann zum Heizen und für die Warmwasserbereitung genutzt werden. Die Funktionsweise der Wärmepumpe ist vergleichbar mit der des Kühlschranks. Während der Kühlschrank allerdings seinem Innenraum die Wärme entzieht und nach außen abgibt, entzieht die Wärmepumpe dem Außenbereich die Wärme und gibt sie als Heizenergie ab. Die Grafik zeigt, wie oberflächennahe Geothermie mit Erdwärmesonden oder -kollektoren sowie Grundwasserbrunnen zum Heizen genutzt werden kann.



Wärmepumpen arbeiten effizienter als Heizstäbe und Elektrodenkessel, da sie mittels einer Kilowattstunde Strom gleich mehrere Kilowattstunden Wärme generieren. Eine Wärmepumpe kann für die Wärmebereitstellung für Privathäuser als Einzelheizung sowie für Wärmenetze bis zu einem Temperaturniveau von 100 Grad Celsius eingesetzt werden. Im Vergleich zu Power-to-Gas Technologien sind Wärmepumpen mit dem aktuellen Strommix derzeit effizienter. Jedoch müssten bis 2030 vier bis acht Millionen Wärmepumpen installiert werden, um die Klimaschutzziele von 2050 erreichen zu können. Im Jahr 2017 lag die Wärmepumpenanzahl bei knapp 800.000¹². Der Austausch von Wärmepumpen gegen Ölheizungen und Gaskessel kann schon mit dem heutigen Strommix viele Tausend Tonnen CO₂ einsparen. Die Nutzung von Wärmepumpen hat damit sehr großes Potenzial, jedoch gibt es in der Praxis häufig Restriktionen durch Bebauungsdichte, hydrologische Gegebenheiten und bereits bestehende unterirdische Infrastrukturen, die einen Einsatz dieser Technologie erschweren.

2.3 POWER-TO-HEAT

Mit Hilfe von Power-to-Heat-Technologien (PtH) wird der erzeugte regenerative Strom über eine einfache elektrische Heizung (Heizstab, Elektrodenkessel) in Wärme umgewandelt und diese in einem großen Wassertank gespeichert. Bei Bedarf wird die Wärme dann beispielsweise für Brauchwasser und Heizungen in einer Wohnsiedlung genutzt. Neben der Nutzung in Wärmnetzen ist auch eine Ergänzung von Einzelheizungen durch diese Technologie machbar. In einem überwiegend auf Erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystem kommt dieser Kopplung der Strom- und Wärmesektoren größere Bedeutung zu. Durch PtH-Anwendungen stehen zusätzliche Verbraucher für Phasen bereit, in denen die Stromerzeugung höher ist als der Stromverbrauch: Durch die Kombination mit Wärmespeichern werden die Flexibilität der Wärmeerzeugung mittels erneuerbarem Strom und damit auch die Möglichkeiten zum Ausgleich weiter erhöht. Im Vergleich zu Wärmepumpen weisen PtH-Anwendungen eine schlechtere Effizienz auf.

Praxisbeispiel: In Lupburg versorgen eine Heizzentrale und ein vier Kilometer langes Nahwärmenetz 85 Haushalte, einige öffentliche Gebäude und den hiesigen Bauhof mit regenerativer Wärme. Neben einem Holzvergaser-Blockheizkraftwerk, das mit einer thermischen Leistung von 270 kW und einer elektrischen Leistung von 180 kW für die Grundlast sorgt, sind noch drei, in Reihe geschaltete Biomassekessel installiert (je mit einer thermischen Leistung von 160 kW), die entweder mit Pellets oder Hackschnitzeln betrieben werden können. Die Erzeugungsanlagen sind mit zwei Pufferspeichern mit je 20.000 Litern kombiniert. Weiterhin ist eine Power-to-Heat-Anlage mit elektrischem Heizstab vor Ort installiert. Die Anlage kann als Regelenergie eingesetzt werden, indem sie genau in jenen Stunden zum Einsatz kommt, in denen z.B. Windräder sehr viel Strom produzieren. Aus dem überschüssigen Strom kann in Spitzenzeiten Wärme erzeugt werden. Aufgrund des aktuellen politischen Rahmens im Bundesland Bayern, in dem die 10H-Abstandregel den Neubau von Windenergieanlagen stark einschränkt, ist diese Anlage allerdings selten in Betrieb.

Elektroheizstäbe: Mithilfe von Elektroheizstäben kann elektrischer Strom fast vollständig in Wärme umgewandelt werden. Sie erhitzen sich und somit das Speichermedium Wasser bei Stromdurchfluss. Der Elektroheizstab funktioniert dabei nach dem Prinzip des Tauchsieders. Die Technologie gehört in der Anschaffung zu den preisgünstigsten Wärmeerzeugern für niedrige Temperaturen. Elektroheizstäbe lassen sich leicht dem Wärmebedarf anpassen und können in Wärmespeichern günstig nachgerüstet werden. In kleinen und mittleren Anwendungen erwärmen die Elektroheizstäbe Wasser, um damit beispielsweise einzelne Gebäude oder Schwimmbäder zu beheizen.

Elektrodenkessel: Im Gegensatz zu Heizstäben fließt der elektrische Strom in Elektrodenkesseln direkt durch das Wasser. Es können deutlich höhere Spannungen angelegt und eine höhere Leistung erreicht werden, wodurch sie effizienter als Heizstäbe sind. Durch Elektrodenkessel sind hohe Temperaturen von mehreren Hundert Grad und auch die Herstellung von Wasserdampf möglich. Daher bieten sich Elektrodenkessel im gewerblichen Bereich an. Besonders geeignet sind Elektrodenkessel auch für Fernwärmenetze. Der Elektrodenkessel dient der zentralen Dekarbonisierung von Fernwärme durch die Umwandlung von überschüssigem erneuerbarem Strom in erneuerbare Wärme und der Einspeisung ins Wärmenetz. Diese hing bislang stark von fossilen Energieträgern wie Erdgas oder Kohle ab¹³. Nur mithilfe von einem steigenden Anteil an Erneuerbaren Energien im Stromsektor können Elektrodenkessel gegenüber fossilen Energien klimafreundlich werden, was mit dem derzeitigen Strommix noch nicht der Fall ist. Doch in der Nutzung andernfalls abgeregeltem erneuerbarem Strom liegt bereits jetzt ein großes Potenzial¹⁴.

13 Bundesverband Wärmepumpe e.V.: Absatzzahlen und Marktanteile

14 DUH: Sektorenkopplung – Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr

2.4 POWER-TO-GAS

Auch die Umwandlung von Strom in synthetisches Methan kann die Verwendung von erneuerbarem Strom im Wärmesektor und somit eine schnellere Dekarbonisierung voranbringen. Denn sobald in Zukunft der Anteil an Erneuerbaren Energien im Stromnetz auf 60 Prozent und mehr zunimmt, werden neben schon heute verfügbaren Speichertechnologien wie Batterien oder Pumpspeicherkraftwerken Speicher benötigt, die sehr große Energiemengen über lange Zeiträume aufnehmen und wieder abgeben können. Power-to-Gas (PtG) gilt als der vielversprechendste Ansatz für diesen Zweck: PtG ist die Umwandlung von häufig vorkommenden chemischen Stoffen in synthetische Energieträger wie Wasserstoff oder Methan unter der Verwendung von erneuerbarem Strom. Dabei wird zunächst Strom für die Gewinnung von Wasserstoff per Elektrolyse eingesetzt, wo Wasser mit elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird. Auf diese Weise wird ein Teil der elektrischen Energie chemisch im Wasserstoffgas gespeichert. Der Wasserstoff kann direkt verwendet werden, beispielsweise für Anwendungen in der chemischen Industrie oder in BHKWs für den Wärmesektor oder bis zu einem Anteil von fünf Prozent direkt in das Erdgasnetz eingespeist werden. Alternativ kann der gewonnene Wasserstoff unter Zugabe von CO₂ anschließend in synthetisches Methan umgewandelt werden, das identisch ist mit fossilem Erdgas und erneuerbarem Biomethan. Methan kann in den bestehenden Gasinfrastrukturen gespeichert und transportiert werden und ist damit einfacher handhabbar als Wasserstoff: Die Methanisierung soll in Zukunft die mittel- und langfristige Speicherung von Energie ermöglichen. Für dieses synthetische Gas kann nämlich die Transport- und Speicherkapazität des Erdgasnetzes genutzt werden. Einerseits kann das Methan BHKWs zur Strom- und Wärmeerzeugung antreiben. Andererseits könnten diese klimaneutral erzeugten Energieträger auch im Wärme- und Mobilitätssektor eingesetzt werden, wo die direkte Stromnutzung nicht möglich ist – etwa zur Produktion von Hochtemperatur-Prozesswärme. Bei Bedarf kann das erneuerbare Gas auch in Gasturbinen rückverstromt werden: Falls zu wenig erneuerbarer Strom zur Verfügung steht, können mit diesem regenerativ erzeugten Gas die positiven Residuallasten gefüllt werden. PtG ermöglicht eine hohe zeitliche und örtliche Flexibilität zwischen den einzelnen Sektoren. Allerdings ist das Verfahren durch die Umwandlungsverluste bei den chemischen Prozessen weniger effizient als die direkte Nutzung des erneuerbaren Stroms für Wärme.

Die Technologie befindet sich noch im Forschungs- Entwicklungs- und Demonstrationsstadium. In Deutschland gibt es derzeit mehr als 20 Forschungs-, Demonstrations- und Pilotprojekte, die unterschiedliche Schwerpunkte haben, aber das gleiche Ziel: PtG zu erproben, Standardisierung und Kostensenkung zu erreichen und zukünftige Herausforderungen wie die Steigerung der Wirkungsgrade im Umwandlungsprozess oder den flexiblen Betrieb von Elektrolyseanlagen zu identifizieren¹⁵. 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.

Wie funktioniert Power-to-Gas

ÜBERANGEBOT

Mit dem zunehmenden Ausbau von Windkraft und Photovoltaik kann zukünftig an sehr windigen und sonnigen Tagen das Überangebot an Solar- und Windstrom nicht mehr vollständig durch Flexibilitätsoptionen wie intelligente Stromnetze (Smart Grids) oder den überregionalen Stromaustausch ausgeglichen werden.



STROM

ELEKTROLYSE

Der überschüssige Strom aus Erneuerbaren Energien wird der Elektrolyse zugeführt, wo **Wasser mit elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird**. Auf diese Weise wird ein Teil der **elektrischen Energie chemisch im Wasserstoffgas gespeichert**.

WASSERSTOFF

METHANISIERUNG

Bei der Methanisierung wird der elektrolytisch **hergestellte Wasserstoff zusätzlich „veredelt“**. Dabei **wird er mit Kohlenstoffdioxid (CO₂) zur Reaktion gebracht**, wobei Methan entsteht: der Hauptbestandteil von fossilem Erdgas. Methan kann **im Verhältnis zu Wasserstoff einfacher gespeichert** und transportiert werden.

STROMÜBERSCHUSS

POWER-TO-GAS

WASSERSTOFF

METHAN

WASSERSTOFFSPEICHER

Wasserstoffgas muss unter **hohem Druck, flüssiger Wasserstoff bei sehr niedriger Temperatur** (-253 °C) gespeichert werden, was einen relativ hohen Material- und Energieaufwand bedeutet.

GASNETZ

Wasserstoff kann bis zu einem gewissen Anteil (ca. 5 Prozent) ins bestehende **Erdgasnetz eingespeist** werden, Methan sogar uneingeschränkt. So besteht Anschluss an den größten heute verfügbaren Energiespeicher. Denn das Speichervermögen des deutschen Erdgasnetzes mit seinen Rohrleitungen, Tanks und unterirdischen Kavernen wird auf etwa 200 Milliarden Kilowattstunden geschätzt, was etwa dem deutschlandweiten Stromverbrauch von vier Monaten entspricht.



SPEICHERUNG

WASSERSTOFF/METHAN

STROM UND WÄRME

Sowohl Wasserstoff als auch Methan können in **Blockheizkraftwerken (BHKW)** verbrannt werden, ans Gasnetz sind außerdem hochflexible Gas(heiz-)kraftwerke angeschlossen. So kann der gespeicherte Strom bei Bedarf sowohl in Strom zurückverwandelt als auch für die Wärmeversorgung genutzt werden.



KRAFTSTOFF

Wasserstoff und Methan können in **Wasserstoff- oder Gastankstellen** verteilt und als Kraftstoff für entsprechend ausgestattete Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen eingesetzt werden. Außerdem dient Wasserstoff als Energiequelle für Elektroautos mit **Brennstoffzelle**.



GASNUTZUNG

STROM

WÄRME

MOBILITÄT

INDUSTRIE

Der Industriesektor ist mit 33 Prozent (2015) der größte CO₂-Emittent 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 des Projektpartners sunfire GmbH (s. S. 75). Zum einen können Industriebetriebe mit diesem Verfahren durch Wärmerückgewinnung ihre Effizienz steigern. Zum anderen kann der für Industrieprozesse wichtige Rohstoff „Wasser-



stoff“ mit Erneuerbaren Energien klimaschonend bereitgestellt werden, zum Beispiel für den:

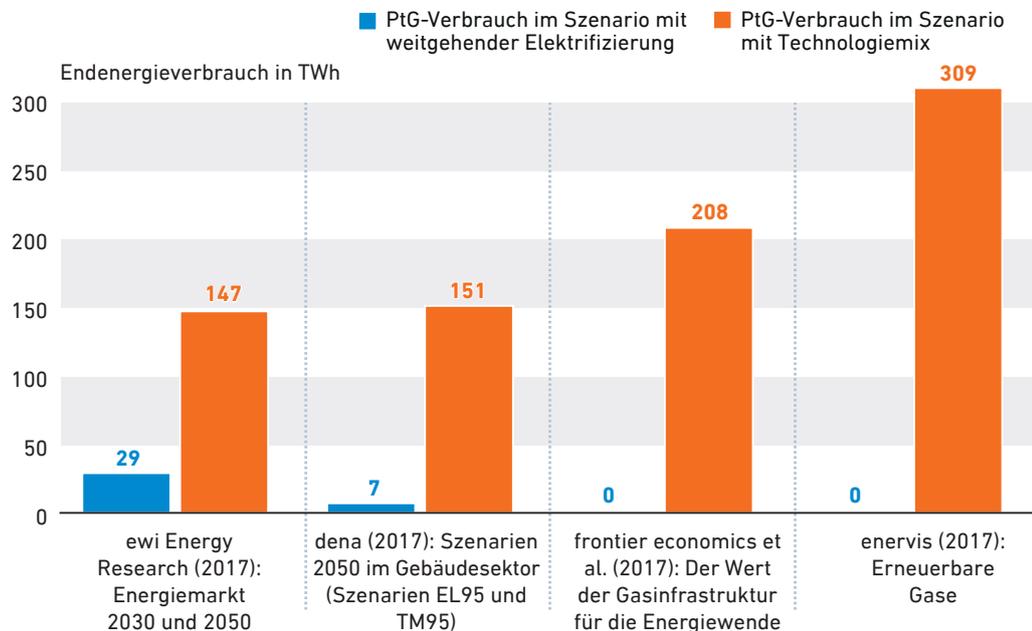
- **Chemiesektor:** Wasserstoff bildet das wichtigste Molekül bei der Produktion von Ammoniak, Methanol und Produkten auf Basis von Petroleum
- **Stahlsektor:** Wasserstoff stellt im Prozess eine sichere Atmosphäre her, schließt Sauerstoff aus und verhindert so eine Oxidation des Stahls während des Glühprozesses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

Quelle: Eigene Darstellung

Wie viel Wasserstoff und synthetisches Methan im Jahr 2050 bei der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser genutzt werden kann, wird in verschiedenen Studien unterschiedlich eingeschätzt. Alle in der Grafik aufgeführten Veröffentlichungen streben eine Treibhausgasreduktion von mindestens 95 Prozent bzw. Treibhausgasneutralität an. Der Vergleich zeigt, dass in zwei Szenarien, in denen die Dekarbonisierung des Wärmesektors durch eine maximale Elektrifizierung erfolgt, PtG gar nicht zum Einsatz kommt. Das wichtigste Argument für diesen Entwicklungspfad ist die deutlich höhere Effizienz der direkten Stromnutzung gegenüber der Umwandlung von Strom in Wasserstoff oder Methan.

Einsatz von Power-to-Gas im Wärmesektor im Jahr 2050

Die zukünftige Rolle von Power-to-Gas (PtG) zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser wird in aktuellen Klimaschutzszenarien (-95 % CO₂-Reduktion bzw. Treibhausgasneutralität bis 2050) unterschiedlich eingeschätzt. In den Szenarien mit einem offenen Technologiemix wird PtG in erheblichen Mengen eingesetzt. Wenn die Dekarbonisierung des Wärmemarkts durch eine weitgehende Elektrifizierung erfolgt, spielt PtG eine geringe bis gar keine Rolle.



Quelle: forschungsradar.de, Stand: 12/2017

Der Wasserstoff- und Methanverbrauch in den Szenarien, in denen kein Elektrifizierungspfad vorgegeben wird und ein Technologiemix offengehalten werden soll, liegt zwischen 208 Mrd. kWh und 309 Mrd. kWh. Diese Szenarien gehen davon aus, dass im Wärmebereich – neben den strombasierten Anwendungen – auch erhebliche Mengen erneuerbarer Gase eingesetzt werden. Die wichtigsten Argumente für diese Szenarien sind die technischen und ökonomischen Restriktionen der Elektrifizierung (z.B. der erforderliche Aufbau einer komplett neuen Infrastruktur für strombasierte Anwendungen), eine höhere Versorgungssicherheit durch die Nutzung der Gasspeicher sowie ein geringerer Stromnetzausbaubedarf. Die Notwendigkeit von großvolumigen chemischen Speichern wie Methan und Wasserstoff ist stark vom Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung abhängig. Ab wann diese Speicher unabdingbar bzw. wirtschaftlich gegenüber anderen Flexibilitätsoptionen werden, ist derzeit umstritten. Der Einsatz von chemischen Langfristspeichern wird entscheidend von technologischen Fortschritten und damit der Kostenentwicklung abhängen¹⁶.

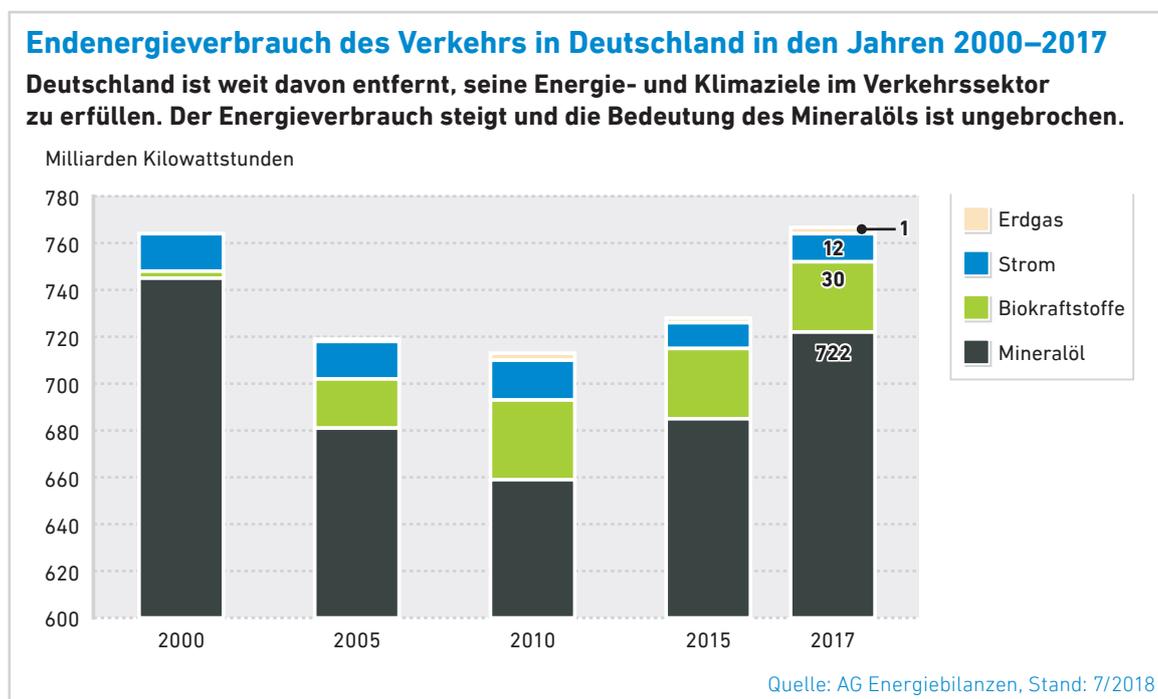
Praxisbeispiel: Das fränkische Haßfurt setzt auf Sektorenkopplung: Eine containergroße Power-to-Gas-Anlage steht seit Oktober 2016 auf dem Gelände des Haßfurter Mainhafens. Die Anlage, für die es keine Förderung gab, hat circa zwei Millionen Euro gekostet. Mittels Elektrolyse wird in Zeiten



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 Millionen kWh Wasserstoff erzeugt werden. Mittels firmeneigenem BHKW nutzen sie das Gas, um damit Strom und Wärme für den Mälzvorgang von Getreide zu erzeugen.

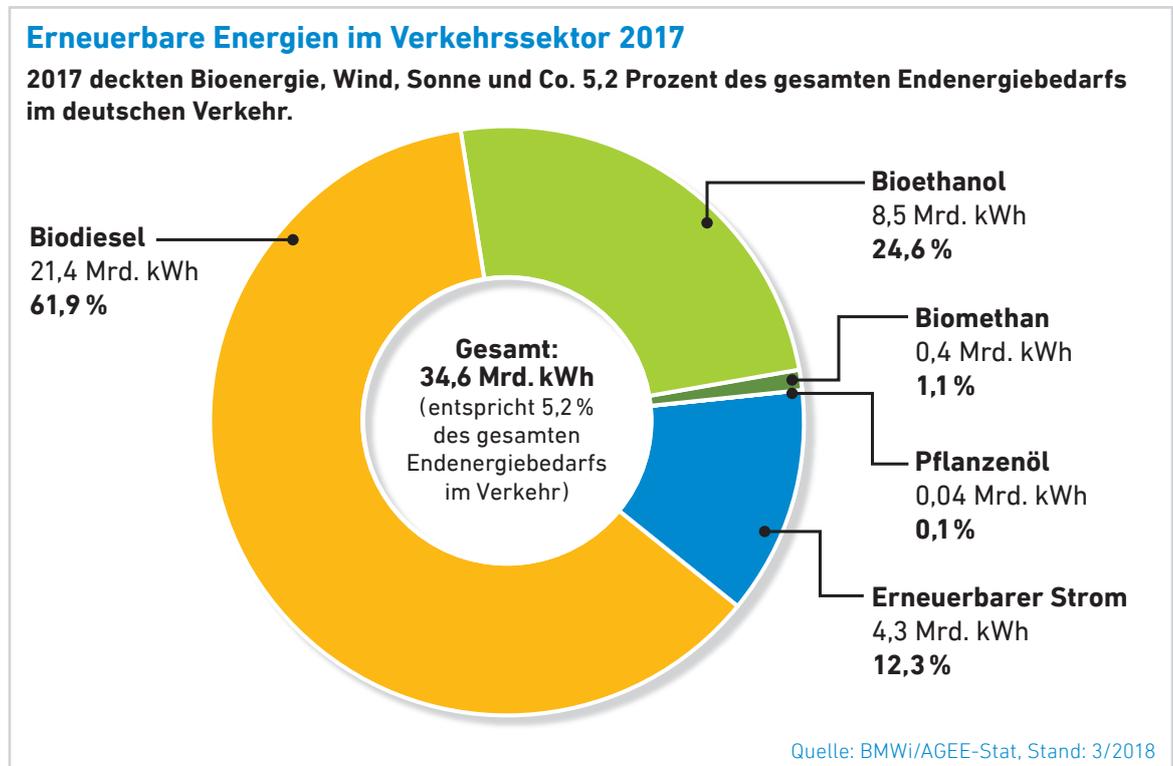
3 DER VERKEHRSEKTOR IM ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT

Deutschland ist derzeit weit vom eigenen Ziel entfernt, den Energieverbrauch im Verkehrssektor bis 2050 um 40 Prozent gegenüber 2005 zu senken. Der Verkehrssektor konnte seinen Treibhausgasausstoß gegenüber 1990, im Gegensatz zum Strom- und Wärmesektor, nicht senken¹⁷. Die Entwicklung seit 2000 zeigt, dass die Bedeutung des Mineralöls ungebrochen ist. Lediglich fünf Prozent des Endenergieverbrauches im deutschen Verkehrssektor sind erneuerbar, überwiegend mittels den Benzin und Diesel beigemischten Biokraftstoffen. Biokraftstoffe übernehmen zwar eine wichtige Rolle beim Ersatz fossiler Kraftstoffe, diese können aber selbst unter Annahme einer deutlichen Effizienzsteigerung im Verkehr nicht den gesamten künftigen Kraftstoffbedarf abdecken. Im Energiesystem der Zukunft wird es daher zwischen Strom- und Verkehrssektor eine stärkere Verknüpfung geben.



Der Skandal um manipulierte Abgaswerte der Autohersteller hat die Dringlichkeit einer Energiewende im Verkehrssektor verstärkt ins öffentliche Bewusstsein gerückt. Diese Dynamik gilt es im Sinne von klimaschonender und hochwertiger Mobilität zu nutzen. Technologien für die Energiewende auf der Straße stehen bereit, es fehlt ihnen aber aus unterschiedlichen Gründen noch an Akzeptanz. Zwar sollten Verkehrsverlagerung (von Autos hin zu öffentlichen Verkehrsmitteln) und -vermeidung (u.a. Stärkung des Fuß- und Radverkehrs, Carsharing) verstärkt angegangen werden, für einen klimafreundlichen Verkehrssektor ist die stärkere Nutzung von erneuerbarem Strom im Straßenverkehr jedoch unerlässlich. Dieser kann in unterschiedlicher Weise eingesetzt werden: Eine direkte Nutzung ist vor allem im Schienenverkehr sowie in batteriebetriebenen Fahrzeugen möglich. In Frage kommen dafür zum Beispiel reine Elektroautos, Plug-in-Hybride, e-Scooter oder Pedelecs. Elektrofahrräder erfreuen sich bereits großer Beliebtheit und ermöglichen nicht nur die Nutzung von erneuerbarem Strom für Mobilitätsbedürfnisse, sondern reizen auch eine Verkehrsverlagerung an. Für den Güterverkehr und Langstrecken sind auch Oberleitungssysteme oder in den Fahrbahnen versenkte Induktionssysteme denkbar. Diese befinden sich allerdings noch im Erprobungsstadium.

Indirekt kann Strom im Verkehr in Form von synthetischem Wasserstoff, Methan oder flüssigen Kraftstoffen eingesetzt werden. Alternativ ist auch die Rückumwandlung des Energieträgers Wasserstoff in Strom mittels Brennstoffzellen möglich. Der Antrieb von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist wie bei batteriebetriebenen Fahrzeugen elektrisch und damit zudem leiser und lokal emissionsfrei.

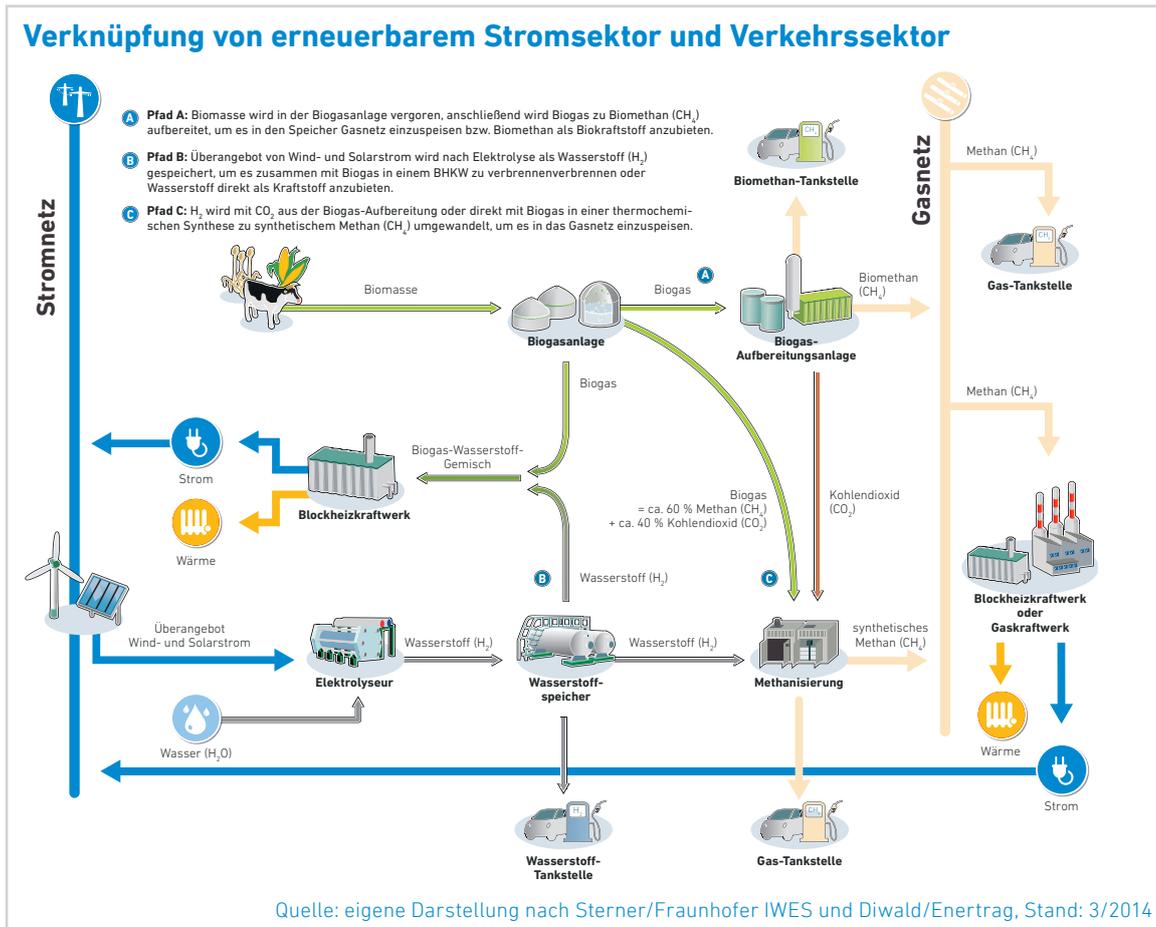


Obwohl direkte Elektrifizierung im Verkehr mit höheren Wirkungsgraden effizienter und kostengünstiger ist als den Strom in Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe umzuwandeln, prognostizieren viele Szenarien, dass Letztere die dominierende Rolle im Verkehrssystem der Zukunft um 2050 spielen werden. Die direkte Nutzung von Strom im Flug- und Schiffsverkehr ist nur begrenzt möglich, sodass Biokraftstoffe und Biomethan sowie synthetische Gase und Kraftstoffe einspringen. Der große Anteil an synthetischen Kraftstoffen in der nebenstehenden Grafik ist auf den hohen Energiebedarf von Güter- und Flugverkehr zurückzuführen. 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 volumetrische Energiedichte aufweisen muss¹⁸.

Batteriefahrzeuge sind derzeit in der Anschaffung für die Verbraucher noch meist teurer als ein konventionelles Gegenstück, auch wenn die Betriebskosten geringer sind und die Preise für Batterien stark fallen. Abschreckend wirken aber auch ein Mangel an Ladeinfrastruktur und ein zeitintensives Aufladen der Fahrzeuge. Die Herstellungsverfahren für strombasierte Kraftstoffe befinden sich aktuell noch in einer frühen Phase der Erforschung und Entwicklung. Die Deutsche Umwelthilfe e.V. betont, dass der Einsatz dieser eine überproportionale Steigerung der Stromerzeugung mit sich bringt, so würde der Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung bei ausschließlicher Nutzung stromgenerierter Kraftstoffe aufgrund ihrer energieintensiven Herstellung bis 2050 bei ca. 917 Mrd. kWh bis 1070 Mrd. kWh liegen. Sie tragen zudem nur bei einer nahezu vollständig erneuerbaren Stromerzeugung zum Klimaschutz bei¹⁹. Die Grafik zeigt schematisch die vielen Verbindungen, die durch die Nutzung Erneuerbarer Energien zwischen den Sektoren Strom und Verkehr etabliert werden können.

¹⁸ Stephanos: Optionen für die nächste Phase der Energiewende

¹⁹ DUH: Sektorenkopplung – Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr



Die meisten Szenarien sehen den Einsatz von Elektrolyseuren und Methanisierungsanlagen daher nicht vor dem Jahr 2030²⁰, während die Elektromobilität selbst mit dem aktuellen deutschen Strommix heute einen leichten Klimavorteil gegenüber Verbrennungsmotoren hat.

3.1 POWER-TO-MOBILITY

Power-to-Mobility-Lösungen (Elektromobilität) umfassen die direkte Nutzung von Strom und stehen für viele Anwendungen zur Verfügung. Sie bieten Speicheroptionen und können in ein intelligentes Lastmanagement integriert werden. Elektromobilität bezeichnet alle Fahrzeuge, die mit elektrischem Strom betrieben werden, sowohl im Schienenverkehr (Elektroloks, Straßenbahnen, U-Bahnen) als auch im Straßenverkehr (Elektrofahrräder, Elektroautos). Der Strom wird über Leitungen, Batterien oder Brennstoffzellen bereitgestellt.

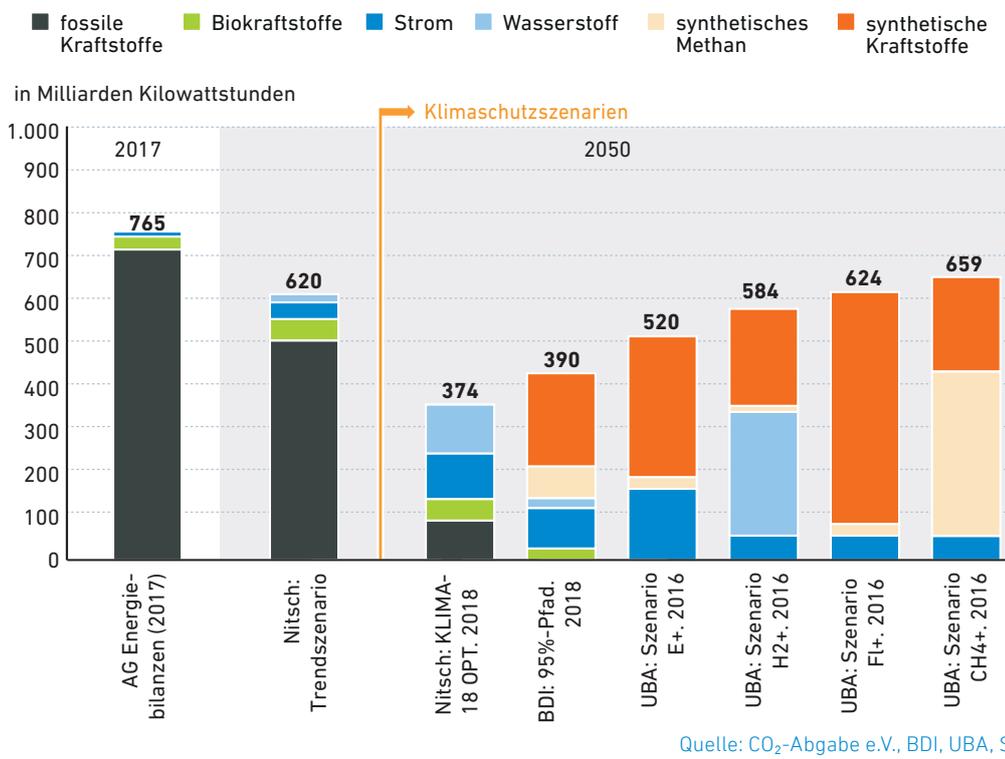
Batteriebetriebene Mobilität: Für die Verkehrswende ist der Aufbau neuer Infrastruktur notwendig. Seit Ende 2011 hat sich die Zahl der Ladepunkte für Elektromobilität in Deutschland mehr als vervierfacht, Mitte 2018 gab es in Deutschland bereits 13.500 Ladepunkte für Elektrofahrzeuge²¹. Sinkende Kosten von Batterien, größere Reichweiten und der Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur begünstigen die Markteinführung von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr. Um Strecken unabhängig von Leitungen zurücklegen zu können, können Batterien als Energielieferanten für einen Elektroantrieb genutzt werden. Hier haben sich insbesondere Lithium-Ionen-Akkumulatoren etabliert. In den letzten Jahren gab es bedeutende Fortschritte bei der Wirtschaftlichkeit und Reichweite der Batteriefahrzeuge. Batterien können in Pkws, Zweirädern und Bussen, aber auch Bahnen und Lkws eingesetzt werden.

²⁰ Metaanalyse Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr

²¹ BDEW: Elektromobilität

Deutschland 2050: Szenarien zum Endenergieverbrauch im Verkehr

Um die Pariser Klimaschutzziele zu erreichen, muss der Energieverbrauch im Verkehr deutlich sinken und schneller auf klimaschonende Energieträger umgestellt werden.



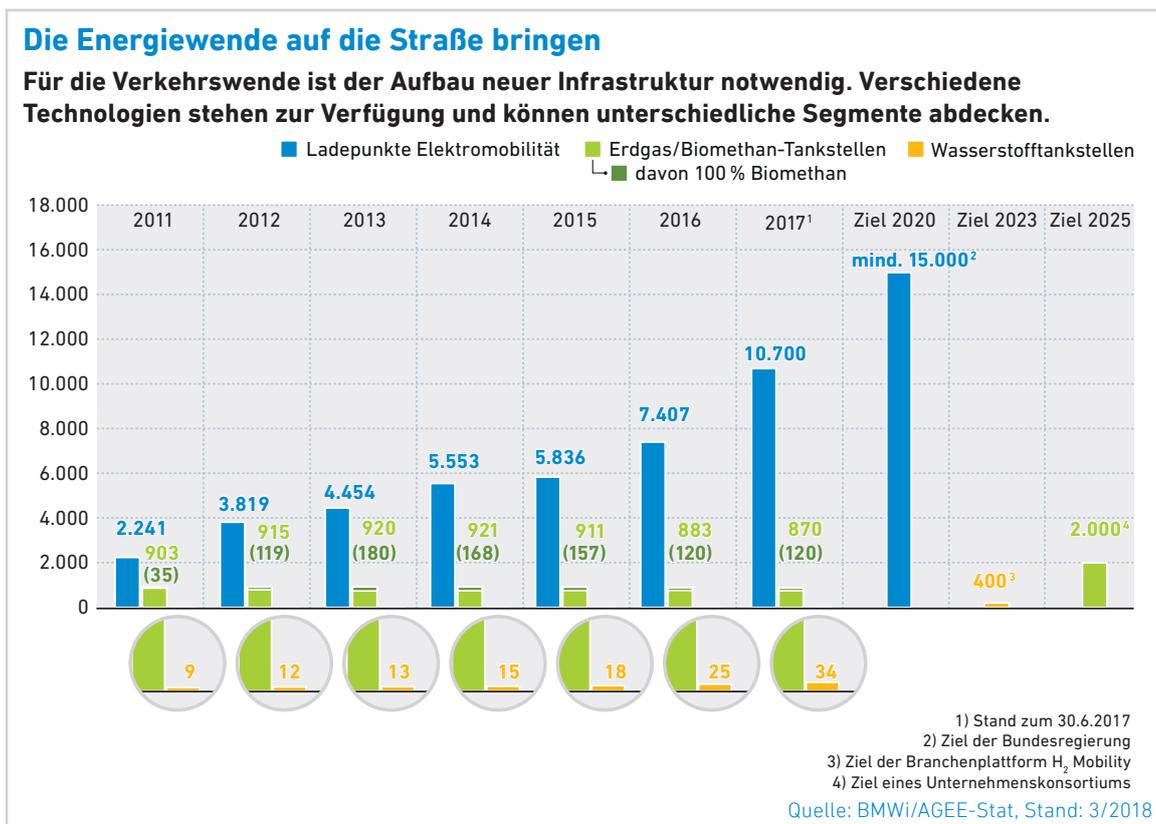
Praxisbeispiel: Rund 40 Prozent aller Stromtankstellen Schleswig-Holsteins steht im Kreis Nordfriesland. Im Jahr 2016 waren dies rund 70. Mehr als 200 elektrisch betriebene Kraftfahrzeuge waren in diesem Jahr im Kreisgebiet angemeldet, während die Stromproduktion aus Biomasse, Sonnen- und Windenergie im Kreisgebiet bereits mehr als das Fünffache des Verbrauchs betrug. Nach dem Motto „Strom vom Deich statt Öl vom Scheich“ setzt sich die Kreisverwaltung in Kooperation mit der Genossenschaft eE4mobile für Elektromobilität ein. Unterstützt mit Mitteln der EU und des Landes, sollen mehr Nutzer für die Elektromobilität in der Region begeistert werden. Den Leitsatz der Genossenschaft erklärt Projektmanager Stephan Wiese: „Nordfriesland produziert so viel Strom, dass wir ihn nicht loswerden können. Also gehört der Strom in den Tank – das ist preiswert und von hier.“ Dabei ist es Wiese auch klar, dass es sich derzeit um ein bilanzielles Gegenrechnen von Stromerzeugung und Verbrauch durch Elektromobilität handelt. Für ihn ist der Aufbau einer E-Mobilflotte aber der erste, wichtige Schritt. Dass alle Fahrzeuge Ökostrom beziehen, ist der zweite¹.

Leitungsbetriebene Mobilität: Die Versorgung mit elektrischem Strom aus einer Fahrleitung ist bereits etabliert. Bahnen und Busse werden schon heute vielerorts über eine Oberleitung mit Strom versorgt. Auch für den Lastverkehr auf den Autobahnen gibt es Pilotprojekte mit Oberleitungen, um einen elektrifizierten Langstreckenverkehr zu ermöglichen. Aus ästhetischen Gründen können die Leitungen auch auf oder an der Strecke liegen, etwa zwischen den Schienen. Leitungsbetriebene Mobilität kann die vergleichsweise geringe Reichweite von 100 bis 250 Kilometern von Batteriefahrzeugen ergänzen. Die Lkws können mit einem zusätzlichen Antrieb ausgestattet werden, damit in Zwischenstücken auch das Fahren ohne Oberleitung möglich ist. Diese Technologie kann in Zukunft jedoch nur sinnvoll genutzt werden, wenn eine weitreichende Infrastruktur von Oberleitungen angestrebt wird²².

22 Stephanos: Optionen für die nächste Phase der Energiewende

3.2 POWER-TO-GAS

Auch im Verkehrssektor können synthetische Gase aus dem PtG-Verfahren genutzt werden. Der mittels Strom aus Erneuerbaren Energien erzeugte Wasserstoff kann entweder direkt genutzt oder zu Methan weiterverarbeitet werden. In Methanform kann die bestehende Erdgasinfrastruktur mit den vorhandenen Pipelines und Tankstellen genutzt werden, bei der Verwendung von Wasserstoff im Verkehr müssten jedoch neue Verteil- und Tankmöglichkeiten aufgebaut werden. Wasserstoff dient zudem als Energiequelle für Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle. Brennstoffzellen-Fahrzeuge haben einen Elektroantrieb, der mit Strom aus einer mit Ethanol oder Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle versorgt wird. Sie können auf eine höhere Reichweite sowie schnelle Betankung im Vergleich zu rein batteriebetriebenen Autos zurückgreifen, sind jedoch derzeit im Vergleich noch kostenintensiver.



Aufgrund ihrer energieintensiven Herstellung sind stromgenerierte synthetische Kraftstoffe nur bei (nahezu) vollständiger Strombereitstellung aus Erneuerbaren Energien treibhausgasneutral. Aufgrund des geringen energetischen Wirkungsgrades sollten PtG-Technologien gezielt eingesetzt werden, vor allem etwa im Güterverkehr über weite Strecken. In allen Klimaschutzszenarien, in denen eine Dekarbonisierung der Energieversorgung angestrebt wird, spielen synthetische, erneuerbare Gase eine wichtige Rolle. Die Höhe der in den Szenarien unterstellten Anlagenleistung zur Umwandlung von erneuerbarem Strom in synthetische Gase hängt vor allem von zwei Fragen ab: Wird Deutschland seinen Bedarf an synthetischen Gasen aus heimischer Produktion decken, oder werden die Gase größtenteils importiert? Und: Werden die Sektoren Wärme- und Verkehr weitestgehend elektrifiziert oder kommen hier auch erhebliche Mengen Wasserstoff und Methan zum Einsatz²³?

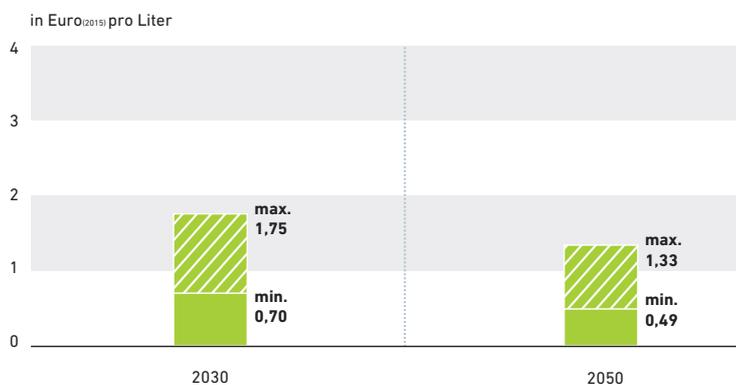
3.3 POWER-TO-LIQUID

Power-to-Liquid (PtL) bezeichnet das Verfahren zur Umwandlung von Strom in flüssige Kraftstoffe. Es basiert auf der Nutzung von Strom zur Gewinnung von Wasserstoff per Elektrolyse. Dieser dient dann als Grundlage für die Produktion eines Synthesegases, aus dem schließlich z.B. per Fischer-Tropsch-Synthese unterschiedliche Kohlenwasserstoffe hergestellt werden. Durch die Verflüssigung von Synthesegasen entstehen Kraftstoffe mit den gleichen chemischen Zusammensetzungen wie Benzin oder Diesel. PtL koppelt den Strom- mit dem Verkehrssektor und bietet neben Biokraftstoffen eine Alternative mit hoher Energiedichte für Verbrennungsmotoren z.B. für den Schwerlast-, Flug- oder Schiffsverkehr. Die Herstellungsverfahren für strombasierte Kraftstoffe sind derzeit noch mit einem hohen technischen Aufwand, einem erheblichen Energieeinsatz und hohen Kosten verbunden. In den zusammengefassten Studien der Metaanalyse „Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr“²⁴ zeigen sich manche Autoren skeptisch gegenüber den langfristigen Nutzungspotenzialen von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen. Andere sehen hier hingegen erhebliche Möglichkeiten zur Dekarbonisierung des Verkehrs. Die Mehrheit setzt dabei vorrangig auf Wasserstoff, andere auch auf Methan oder Flüssigkraftstoff. Wasserstoff wird meist bevorzugt, da bei der weiteren Umwandlung dieses Gases in Methan oder Flüssigkraftstoffe zusätzlicher Energieaufwand entsteht. Die PtL-Technik hat demgegenüber den Vorteil, dass bestehende Fahrzeugtechniken

und -flotten und Tankstelleninfrastrukturen weiter genutzt werden können. Außerdem stehen für die Lagerung bewährte Techniken und Speicher zur Verfügung. Zudem kann die Energiebilanz verbessert werden, wenn die beim PtL-Prozess entstehende Wärme für Industrieanlagen oder die Wärmeversorgung in Quartieren genutzt wird. Die Grafik zeigt, dass strombasierte flüssige Kraftstoffe auf Basis von Wind- und Solarenergie langfristig mit fossilen Kraftstoffen preislich konkurrieren können.

Bandbreite der zukünftigen Erzeugungskosten strombasierter synthetischer Kraftstoffe (Power-to-Liquid)

Flüssige Energieträger auf Basis von Strom aus Wind- und Solarenergie können für die Energiewende – vor allem im Straßenverkehr – eine wichtige Rolle spielen. Je nach Standortbedingungen können sie bereits im Jahr 2030 zu Kosten von 0,70 bis 1,75 Euro pro Liter erzeugt werden. Langfristig können die Kosten auf unter 50 Cent pro Liter sinken.



Quelle: Prognos/DBFZ/Fraunhofer UMSICHT, Stand: 10/2017

Praxisbeispiel: 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.

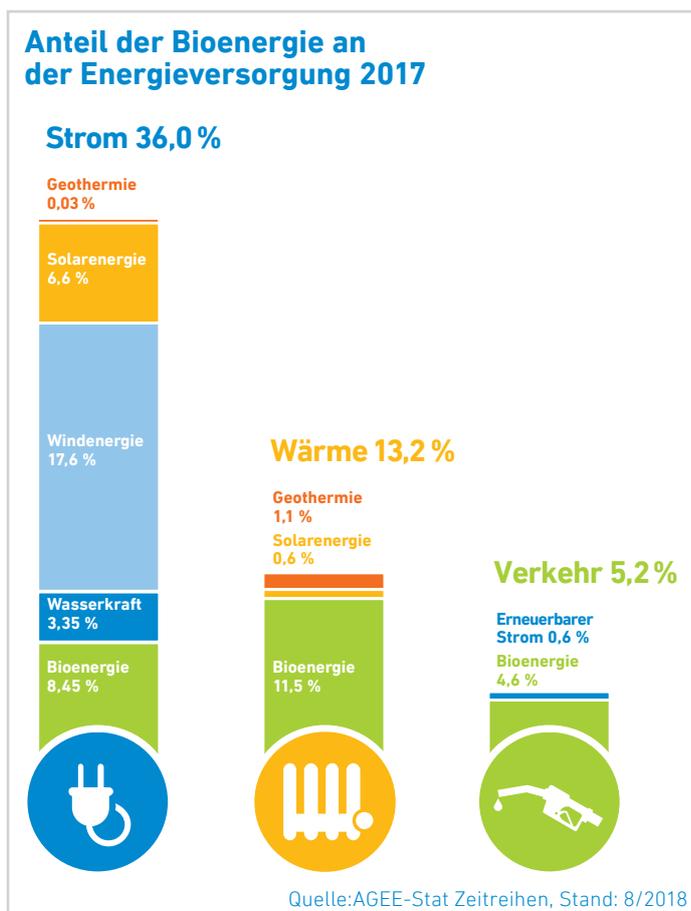
4 DIE ROLLE DER BIOENERGIE IM ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT

Heimische Bioenergieträger lieferten im Jahr 2017 den mit Abstand größten Beitrag zur erneuerbaren Energieversorgung in Deutschland. Während Wind- und Solarenergie häufig im Fokus der Diskussion um ein Energiesystem der Zukunft stehen, ist es die Bioenergie, deren Nutzung sich bereits über alle drei Sektoren erstreckt und sektorübergreifend einen Anteil von etwa 55 Prozent der Erneuerbaren Energien in Deutschland einnimmt. Bioenergie umfasst neben der Nutzung von Holzenergie die Nutzung von Energiepflanzen, also Pflanzen, die sich dafür eignen, zur Erzeugung von Strom, Wärme oder Kraftstoffe zu dienen, sowie Reststoffe, die bei einer anderen, vorherigen Nutzung von Biomasse anfallen (z.B. in der Landwirtschaft bei der Pflege von Parks und Gärten oder bei der Produktion von Nahrungsmitteln).

Politische Entscheidungen beeinflussten den Ausbau der Bioenergie. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ließ den Anteil an der Stromerzeugung aus Biomasse enorm ansteigen, bis die EEG-Novelle 2014 den Zubau wiederum bremste. 2017 wurden aus fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse insgesamt 50,9 Mrd. kWh Strom, 149,3 Mrd. kWh Wärme sowie 3,3 Mio. Tonnen Biokraftstoffe erzeugt²⁵. Häufig sieht sich die Bioenergie kontroversen Debatten ausgesetzt: Während sich ihre Rolle im Stromsektor von der Grundlast zum flexiblen Ausgleich des fluktuierenden Wind- und Solarstroms verschiebt, schwankt das Ansehen im Wärme- und Verkehrssektor von Vorurteilen bezüglich Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen bis hin zu der Einschätzung, dass die Bioenergie der Hoffnungsträger für die Energiewende sei. Dabei bringt die Nutzung von Bioenergie viele Vorteile mit sich, wie beispielsweise die Entsorgung von Reststoffen, die Bereicherung der Fruchtfolge durch Energiepflanzen und die Aufwertung der Forstflächen sowie die Stärkung des ländlichen Raums.

Ein Blick auf die Potenziale und Nutzungsmöglichkeiten von Bioenergie in den Sektoren zeigt, in welchem Umfang diese künftig eingesetzt werden kann. Denn die Bioenergie springt ein, wenn Alternativen für eine direkte Elektrifizierung fehlen, wie bei der

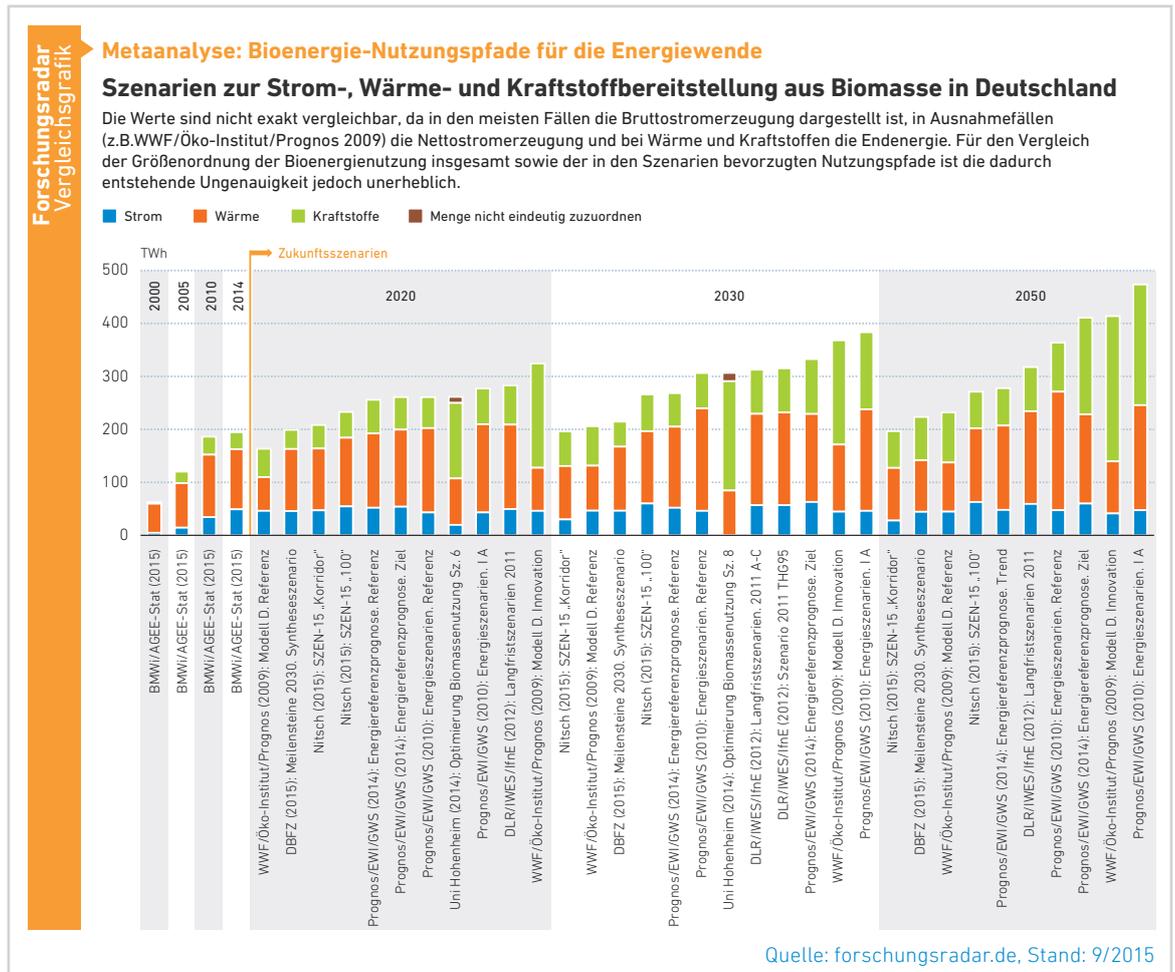
Prozesswärmeerzeugung in der Industrie und zur Herstellung von Biokraftstoffen²⁶. Ohne die Nutzung der Bioenergie werden die Kosten der Energiewende in Zukunft wesentlich in die Höhe schnellen²⁷.



25 BMWi, AGEE-Stat: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland

26 Erlach et al: Sektorkopplung und ihre Bedeutung für die Bioenergienutzung

27 Stephanos: Optionen für die nächste Phase der Energiewende

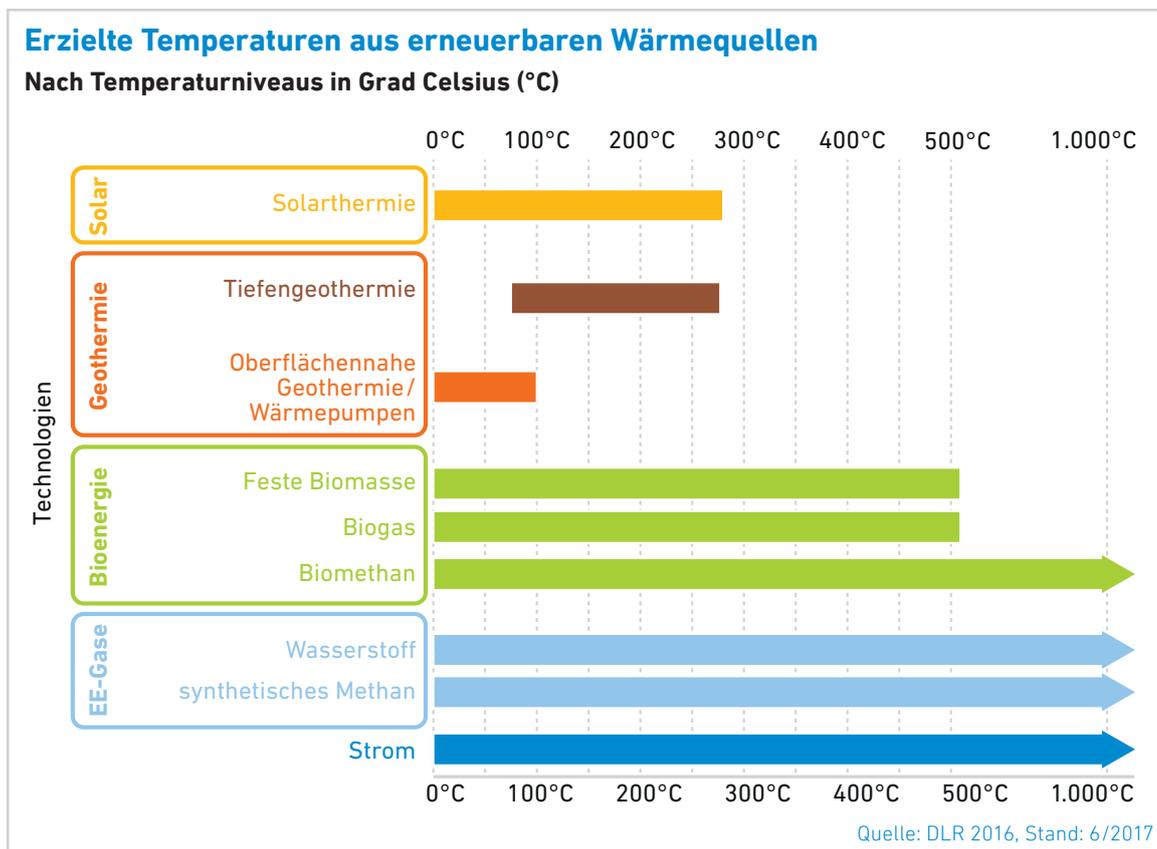


Die AEE Metaanalyse „Nutzungspfade der Bioenergie für die Energiewende“²⁸ stellt dar, dass die Verwendung von Bioenergie in den meisten untersuchten Langfristszenarien bis 2050 steigt, auch wenn die Schwankungsbreite erheblich ist. Zusammenfassend wird deutlich, dass alle Prognosen Bioenergie – wenn 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. Bis auf ein Szenario in der AEE-Metaanalyse gehen alle Prognosen von einer Stromproduktion auf Basis von Biomasse im Jahr 2030 von 30 bis 83 Mrd. kWh aus. Vorwiegend wird hier die Nutzung in der flexiblen Kraft-Wärme-Kopplung 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 ein sehr großes Potenzial in 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 Fernwärmenet-

28 AEE: Metaanalyse Nutzungspfade der Bioenergie für die Energiewende

zen, beispielsweise mittels Biogas-KWK-Anlagen²⁹. Insbesondere im Prozesswärmebereich kann die Bioenergie als Joker auftreten. Die Prozesswärme 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 ausmachen³⁰. 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 dieser Wärme ein Temperaturniveau



von unter 500 Grad Celsius benötigt. Der Großteil des Prozesswärmebedarfs fällt hingegen auf den Temperaturbereich über 500 Grad Celsius³¹. Aufgrund der Temperaturbegrenzung der genannten Technologien empfiehlt sich der Einsatz von Bioenergie bei der Prozesswärme insbesondere im Hochtemperaturbereich. So werden bei Verbrennung von fester Biomasse und Biogas leicht über 500 Grad Celsius erreicht, während mit Biomethan (aufbereitetes und gereinigtes Biogas) auch weit über 500 Grad Celsius zu realisieren sind.

4.1 FLEXIBLE BIOGASANLAGEN FÜR MARKT- UND NETZINTEGRATION

Für die Vollversorgung mit Erneuerbaren Energien ist eine höhere Flexibilität aller Erzeuger und Verbraucher notwendig. Vor allem Bioenergie und Wasserstoff bzw. erneuerbares Methan springen in Zukunft als speicherbare Energieträger genau dann ein, wenn fluktuierender Solar- und Windstrom dies erfordert. Diese flexiblen Technologien können durch zuschaltbare Speicher oder steuerbare Verbraucher unterstützt werden. Da in naher Zukunft die zwanzigjährige EEG-Förderperiode für viele Bioenergieanlagen endet und diese ohne faire Marktbedingungen bisher nicht wirt-

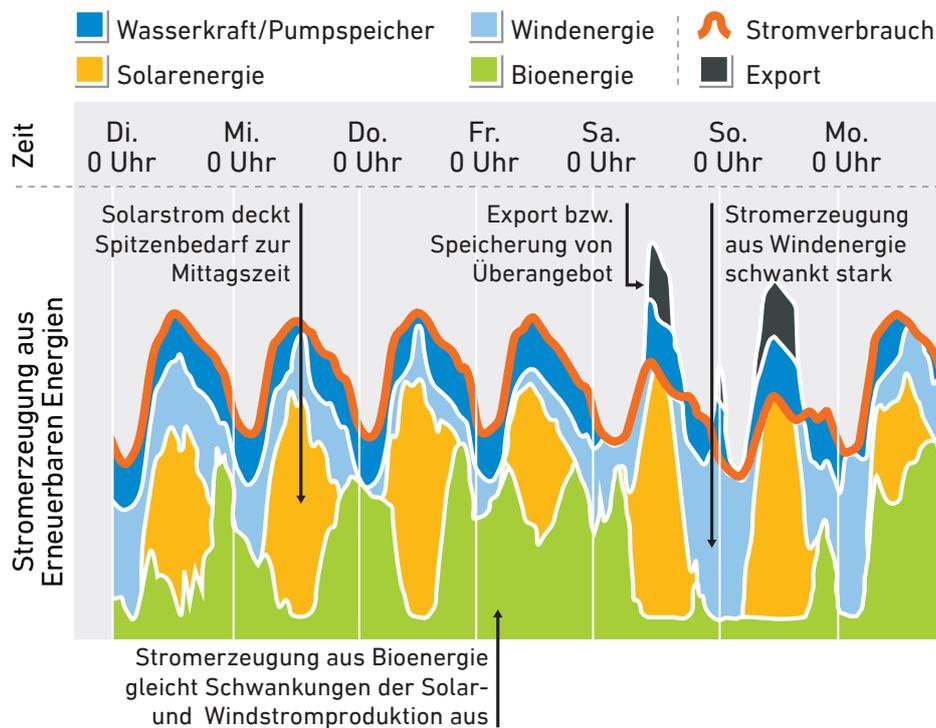
²⁹ BEE: Kursbuch Energiewende

³⁰ BMWi: Energiedaten: Gesamtausgabe

³¹ AEE: Erneuerbare Energie für die Industrie

Erneuerbare Stromversorgung benötigt die flexibel einsetzbare Bioenergie

Deckung des Verbrauchs durch ...

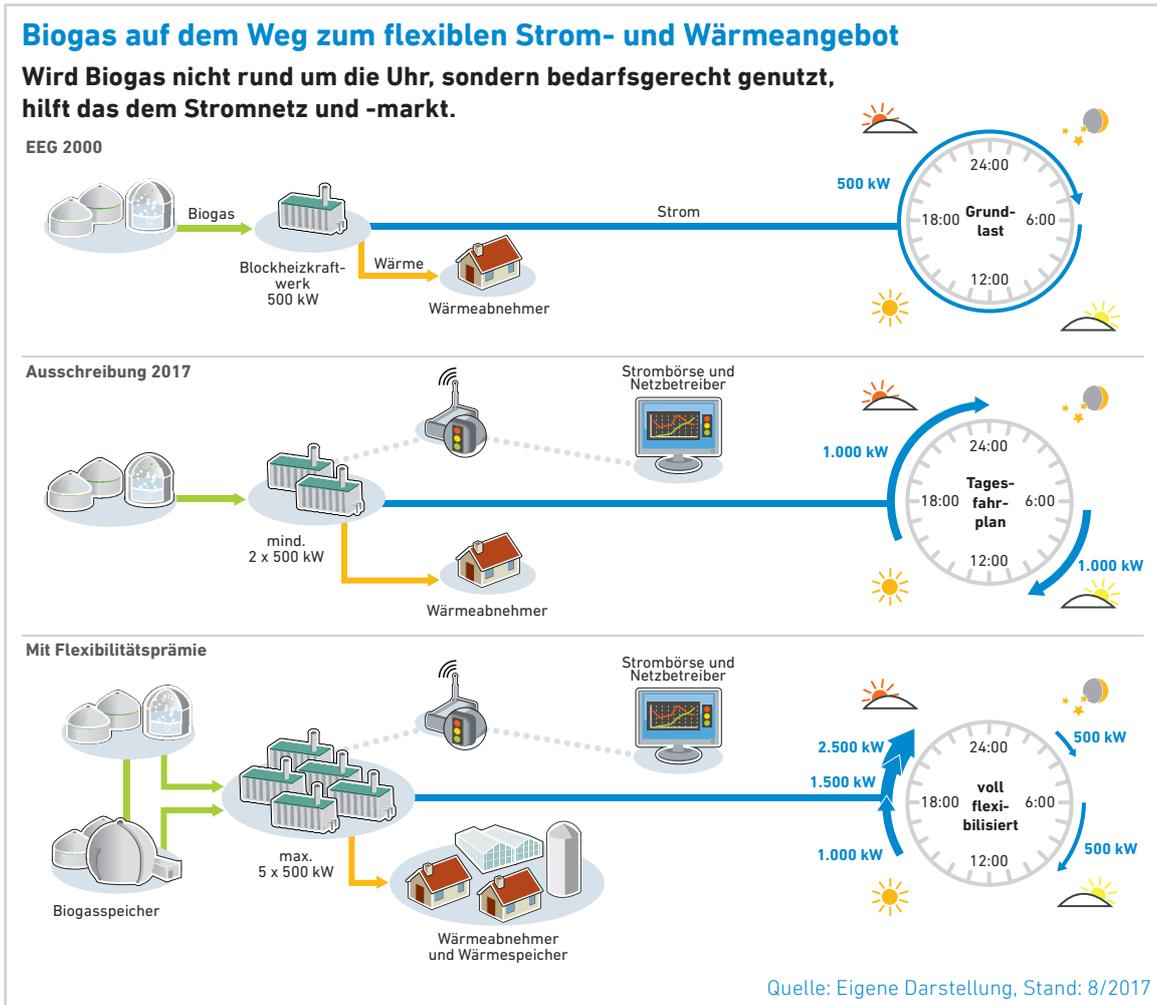


Quelle: kombikraftwerk.de, Stand: 8/2013

schaftlich sind, suchen Anlagenbetreiber nach zukunftsfähigen Optionen. In früheren Fassungen des EEG wurde ein „Grundlast“-Betrieb angereizt, also eine konstante Fahrweise mit gleichmäßiger Stromerzeugung. Stattdessen sollen Biogas-BHKW künftig verstärkt bedarfsgerecht laufen. Dieselbe Menge Biogas wird nicht mehr rund um die Uhr verstromt, sondern kann dank größerer Speicher- und Erzeugungskapazitäten an den einzelnen Anlagen gezielt zu den Zeiten hoher Nachfrage und geringer Einspeisung aus Sonne und Wind in Elektrizität umgewandelt werden. Gefragt ist jetzt das schnelle Hoch- und Herunterfahren in Abhängigkeit von Preissignalen des Strommarkts. Anreize dafür bieten die Bioenergie-Ausschreibungen ab 2017.

Im Rahmen des EEGs 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 zu lassen, wenn das BHKW über mehrere Tage heruntergefahren wird, kommen auch größere Wärmespeicher zum Einsatz. Durch die flexible Fahrweise von Biogas-BHKWs können Erzeuger und Verbraucher auf Preisschwankungen an der Strombörse oder Steuersignale der Netzbetreiber reagieren³².

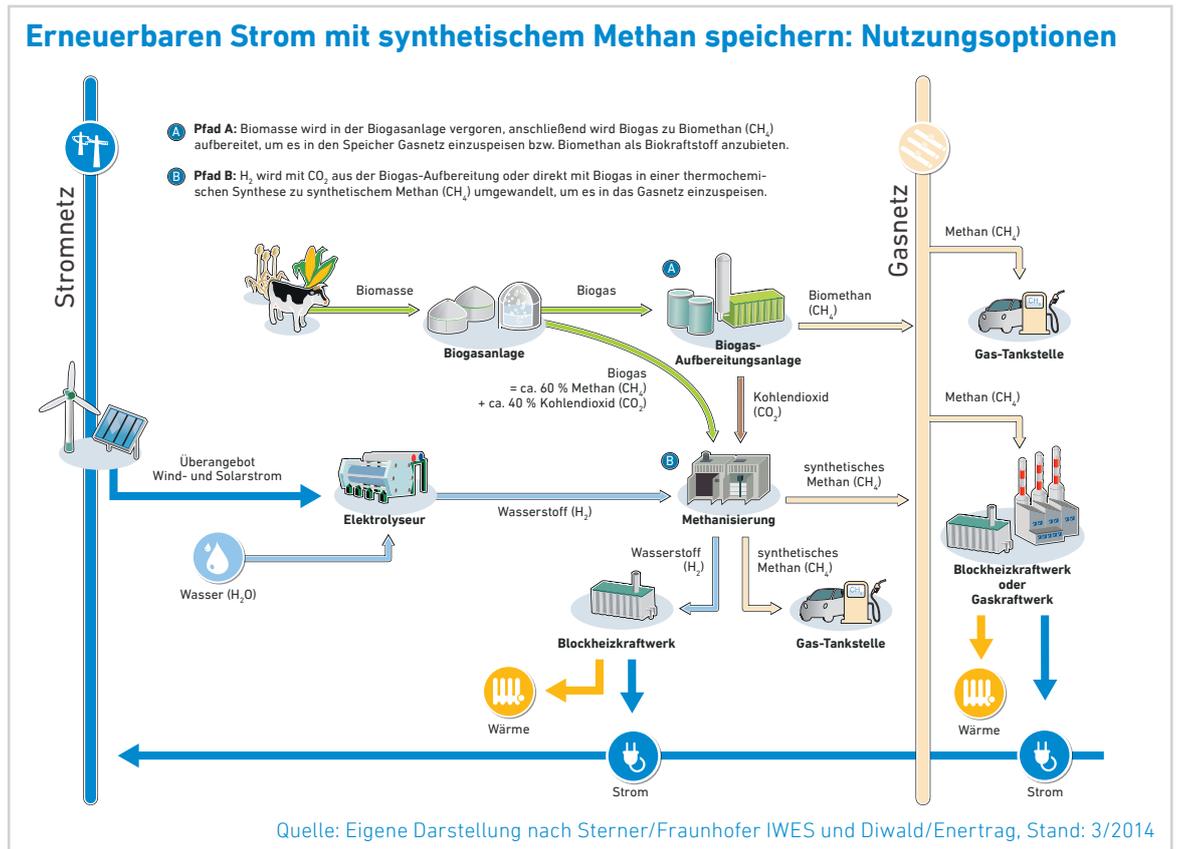
Während die Flexibilität im Stromsektor häufig eine Reaktionsgeschwindigkeit von Sekunden benötigt, ist diese im Wärmesektor naturgemäß niedriger, da die Speicherzyklen länger sind. Ein Überangebot von Solarwärme im Sommer kann mit Hilfe von Wärmespeichern für den Winter nutzbar gemacht werden, während ein Biogas-BHKW, ein Holzheizkraftwerk oder eine Wärmepumpe die jahreszeitlichen Schwankungen von Solarwärme gut ausgleichen können, wenn sie alle an ein Wärmenetz angeschlossen sind. Eine höhere Flexibilität macht das erneuerbare Energiesystem der Zukunft effizienter, da Strom-,



Wärme- und Gasnetze besser ausgelastet werden und gut aufeinander abgestimmte Erzeuger und Verbraucher kostengünstiger als das bisher relativ starr getrennte System sein können. Schließlich entfällt das teure Bereithalten von Erzeugungskapazitäten und Infrastrukturen, die kaum genutzt werden. Über KWK auf Basis von Biogas und Biomethan werden schon heute im Energiesystem die Sektoren Strom und Wärme verknüpft. Auch hier besteht ein großes Potenzial für die Zukunft.

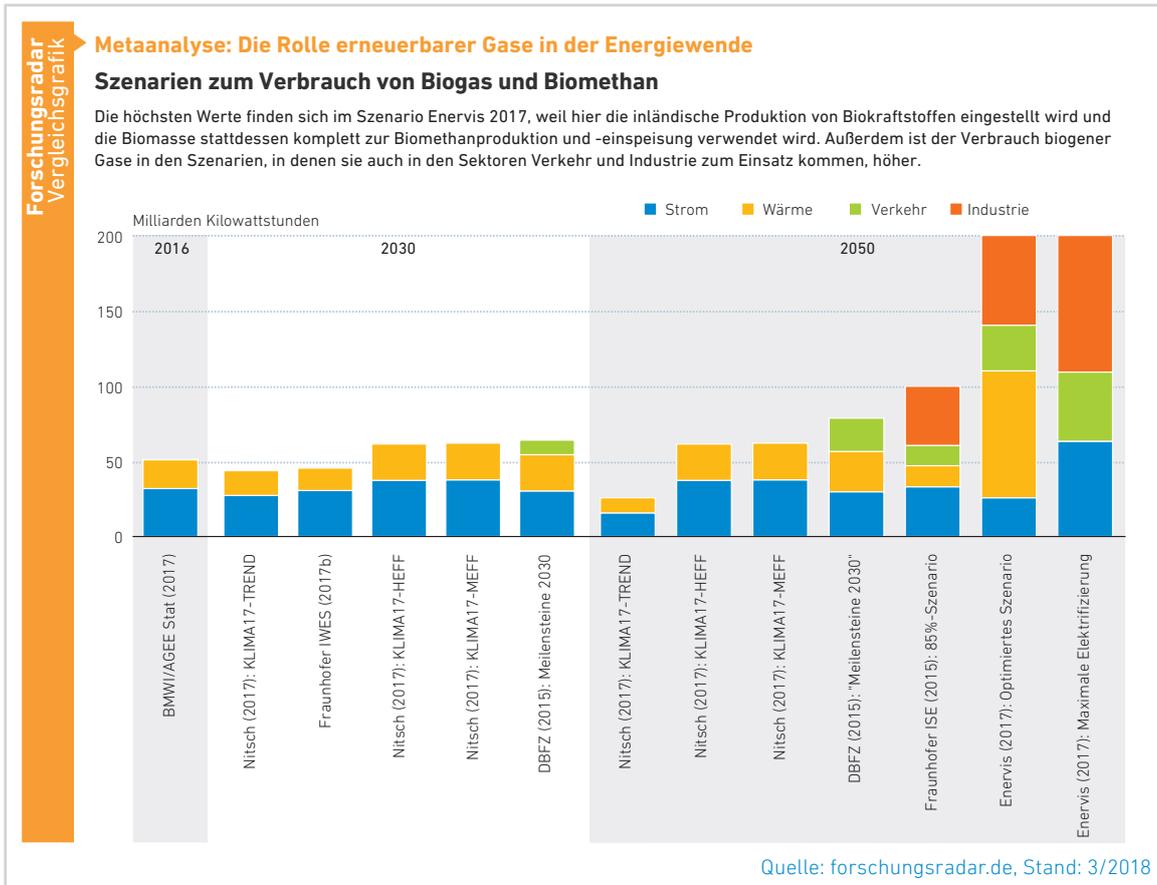
4.2 DIE ROLLE BIOGENER GASE BEI DER VERKNÜPFUNG VON STROM, WÄRME UND VERKEHR

Auch feste Biomasse kann zur Sektorenkopplung beitragen: Holz(heiz-)kraftwerke sind eher auf den wärmegeführten Grundlastbetrieb ausgelegt, können prinzipiell aber dieselben Funktionen übernehmen, die im folgenden Kapitel für flexible Biogas-BHKW beschrieben werden. Biogene Gase sind Biogas, Klärgas und Holzgas. Werden diese zu Biomethan aufbereitet, sind sie mit fossilem Erdgas und synthetischem Methan identisch. Während Biogas, Klärgas und Holzgas bereits seit den 1990er Jahren für die kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung in BHKW etabliert sind, steht Biomethan auch der Weg ins bestehende Erdgasnetz offen. Auch der Einsatz in Fahrzeugen mit Gasmotor wird möglich. Damit sind biogene Gase ein zentrales Element der Sektorenkopplung. Im Energiesystem der Zukunft werden sich die Einsatzgebiete der Bioenergie voraussichtlich verschieben, hin zu einer flexiblen, planbaren Stromerzeugung. Biogene Gase sind dafür ideal geeignet. In Zeiten, in denen der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint, springen mit biogenen Gasen betriebene BHKW schnell und bedarfsgerecht ein.



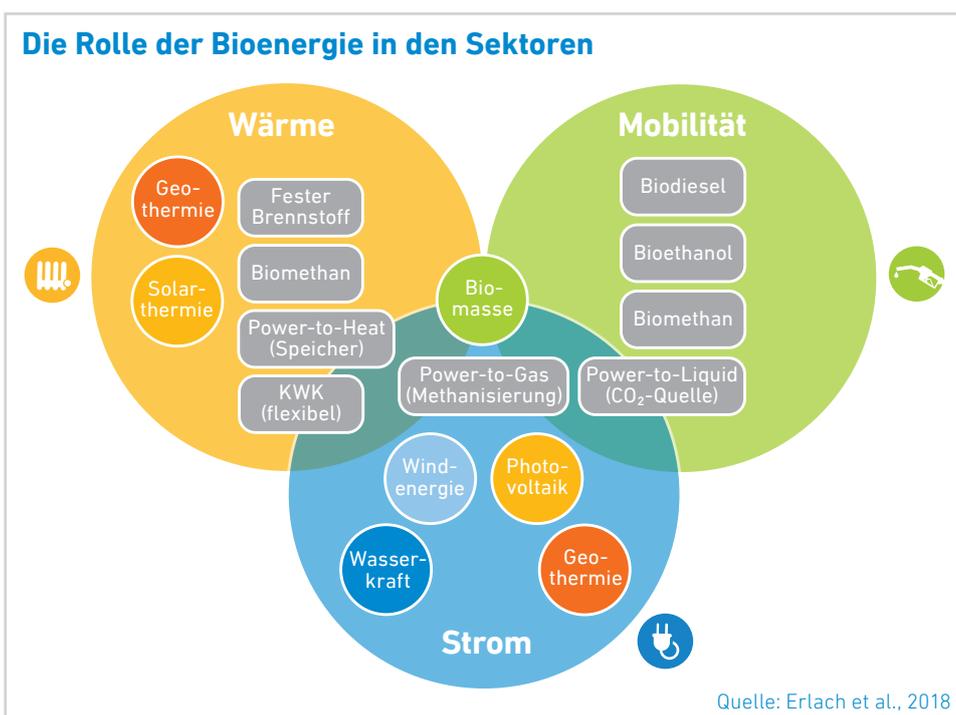
Auch für das oben skizzierte PtG-Verfahren sind biogene Gase wichtig. Für die Produktion von synthetischem Methan wird CO_2 benötigt, welches bei der Aufbereitung von biogenen Gasen zu Biomethan sowieso anfällt. Die Grafik veranschaulicht zwei mögliche Pfade für das Speichern bzw. Rückverstromen von erneuerbarem Strom mit Hilfe von Biogasanlagen. Im ersten Pfad (A) wird Biogas zu Biomethan (CH_4) aufbereitet und dann im Gasnetz gespeichert. Des Weiteren kann die Bioenergie als CO_2 -Quelle in der Methanisierung des PtG-Verfahrens dienen: 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 angefallen ist. Das im PtG-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.

In allen verglichenen Studien der Metaanalyse „Die Rolle erneuerbarer Gase in der Energiewende“ wird biogenen Gasen eine relevante Rolle bei der Energieversorgung der Zukunft zugesprochen. Für das Jahr 2050 liegt das Potenzial in den Szenarien insgesamt zwischen 26 Mrd. kWh und 200 Mrd. kWh. Im Verkehr kann Biomethan als Kraftstoff für Fahrzeuge mit Gasmotor bereits relativ kurzfristig dazu beitragen, die Treibhausgase zu senken, sein CO_2 -Ausstoß unter der 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 ist die Bioenergie der Alleskönner unter den Erneuerbaren Energien Technologien und wird auch weiterhin wichtiger Teil eines Energiesystems der Zukunft sein.



5 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EINE VERKNÜPFUNG DER SEKTOREN

Sektorenkopplung schafft bei einem steigenden Anteil Erneuerbarer Energien im System Flexibilität und Versorgungssicherheit. Stimmen aus der Wissenschaft sprechen von drei Phasen bei der Realisierung der Sektorenkopplung. In der aktuellen ersten Phase (bis ca. 2025) müssen bereits verfügbare Optionen in die Umsetzung gebracht werden und Demonstrationsmaßnahmen durchgeführt werden. Die zweite Phase (bis etwa 2030) verfolgt das Ziel, die notwendige Energieinfrastruktur mithilfe der Weiterentwicklung von Strom- und Gasnetzen sowie Speichern bereitzustellen, während die dritte Phase (ab 2050) eine flächendeckende Umsetzung der Technologien zur Aufrechterhaltung eines hohen Maßes an Flexibilität für die weitergehende Systemstabilität sicherstellt³³.

Eine flexible Verknüpfung der Sektoren ist zwar bereits heute technisch möglich, wegen fossiler Überkapazitäten, günstigen fossilen Weltmarktpreisen und eines mangelhaften gesetzlichen Rahmens aber ökonomisch weitgehend unattraktiv. Es gilt, für die erheblichen Koordinationserfordernisse Lösungsansätze zu finden und passende Rahmenbedingungen sowie eine grundlegende Infrastruktur für das Energiesystem der Zukunft aufzubauen. Die bereits technisch verfügbaren Optionen der Sektorenkopplung bedürfen regional unterschiedlicher Ansätze, welche bestehende Infrastrukturen vor Ort berücksichtigen. Generelle rechtliche Veränderungen wie beispielsweise eine Nutzungspflicht für Erneuerbare Energien in Bestandsgebäuden und Wärmenetzen könnten einen ersten Anreiz schaffen.

5.1 FINANZIELLE ANREIZE

Sehr deutlicher Handlungsbedarf zeigt sich bei der Anpassung von ökonomischen Rahmenbedingungen, um relevanten Akteuren Planungssicherheit für entsprechende Investitionen zu bieten und damit sich vor allem Akteure auf der kommunalen Ebene intensiver mit den Optionen der Sektorenkopplung auseinandersetzen und diese als lohnend ansehen. So bremst das bisherige Abgabensystem, das Strom im Vergleich zur Nutzung fossiler Energieträger relativ teuer macht, die Nutzung von klimaschonender Elektrizität aus Erneuerbaren Energien in anderen Sektoren³⁴. Vertreter aus Wissenschaft und Energiewirtschaft fordern, dass der Gesetzgeber ermöglichen sollte, dass überschüssiger Strom, der im Rahmen des EEG-Einspeisemanagements bislang abgeregelt wird, ohne Netznutzungsentgelte und Umlagen direkt für die Deckung von Wärme- und Mobilitätsbedarfe verwendet werden kann. 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. Einige Betreiber von Biogas-BHKWs haben zwar bereits in eine Flexibilisierung investiert, indem sie von Grundlastbetrieb rund um die Uhr auf einen flexibleren Fahrplanbetrieb umgestellt haben. Trotz Förderung für die notwendigen zusätzlichen BHKW schrecken viele andere Landwirte und Banken allerdings noch vor den notwendigen hohen Investitionssummen zurück. Die Preisschwankungen an der Strombörse sind aufgrund des Überangebots so gering, dass sich eine flexible Fahrweise für viele Anlagen aktuell kaum rechnet. Kürzere Handelsfristen und eine stärkere Rolle für den untertägigen, kurzfristigen Stromhandel, sowie volumenabhängige Entgelte für die Netznutzung könnten in Zukunft

33 EnergieAgentur.NRW: Sektorenkopplung – Herausforderung für das Energie- und Industrieland NRW

34 AEE, DUH: Forum Synergiewende

die notwendigen Preissignale bringen³⁵. Um die Flexibilität der Bioenergie voll ausnutzen zu können, gilt es, die Flexibilitätsprämie für Bioenergieanlagen weiterzuentwickeln und zu stärken. Die Flexibilitätsprämie ist eine im EEG 2012 eingeführte finanzielle Unterstützung für die Betreiber von Biogas- bzw. Biomethan-BHKW, die die installierte Leistung ihrer BHKW steigern, um nicht mehr in Grundlast rund um die Uhr Strom zu erzeugen. Die Flexibilitätsprämie gibt damit einen Anreiz, die Stromerzeugung von Biogas-BHKW stärker an der Stromnachfrage auszurichten. Die derzeitige Deckelung der Flexibilitätsprämie verhindert jedoch, dass das Potenzial der Bioenergie für ein Energiesystem der Zukunft voll ausgeschöpft wird.

Ein weiteres wichtiges Instrument als Grundlage für das Gelingen der Sektorenkopplung ist ein einheitliches Preissignal für alle CO₂-Emissionen, beispielsweise durch die Ausweitung des Europäischen Emissionshandelssystems auf alle Sektoren bei gleichzeitiger Preissteigerung der Emissionszertifikate oder alternativ durch einen nationalen oder europäischen CO₂ Preis³⁶. Eine CO₂-Bepreisung würde die Folgekosten fossiler Energieträger internalisieren und damit die Nutzung fossiler Brennstoff verteuern. Dies würde die Konkurrenzfähigkeit der Erneuerbaren Energien sowohl direkt am Strommarkt als auch die Attraktivität von Ökostrom als Ressource für Wärme und Verkehr weiter erhöhen. Es gilt darüber hinaus, die Förderungen für fossile Energieträger einzustellen.

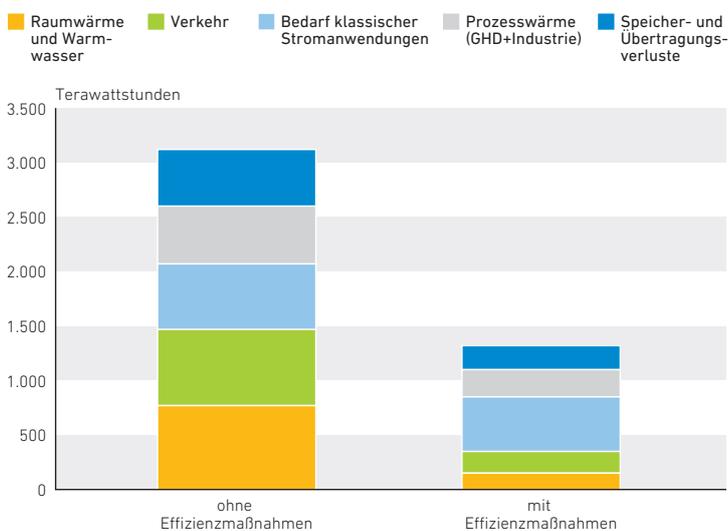
5.2 ENERGIEEFFIZIENZ ALS GRUNDLAGE FÜR DIE SENKUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS

Energieeffizienz bedeutet, einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung bzw. beim geringen Energieverbrauch von Gebäuden, Geräten und Maschinen zu erreichen. Die Steigerung der Energieeffizienz impliziert, dass die gleiche (oder mehr) Leistung mit einem geringeren Energieaufwand bereitgestellt wird. Effizienz spielt angesichts der angestrebten Sektorenkopplung eine zentrale, unverzichtbare Rolle. Es gilt im ersten Schritt, den Energieverbrauch zu reduzieren, denn

energieeffiziente Gebäude und sparsame Fahrzeuge reduzieren wiederum den Bedarf an Erneuerbare-Energien-Anlagen zur Stromerzeugung. In einem zweiten Schritt sollten die Erneuerbaren Energien direkt genutzt werden, während erst im letzten Schritt die Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien in den Sektoren Wärme und Verkehr das Mittel der Wahl wäre. Die nebenstehende Grafik zeigt den deutlichen Unterschied zwischen dem Strombedarf eines Versorgungssystems mit und ohne Effizienzmaßnahmen auf. Ohne Effizienzmaßnahmen wird sich der Strombedarf deutlich erhöhen und eine

Strombedarf für eine klimaneutrale Energieversorgung im Jahr 2040 ohne und mit Effizienzmaßnahmen

Die Abbildung verdeutlicht die Dringlichkeit von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, zum Beispiel durch die energetische Sanierung von Gebäuden.



Quelle: HTW Berlin (2016), forschungsradar.de, Stand: 6/2016

³⁵ AEE: Energie-Update

³⁶ Stephanos: Optionen für die nächste Phase der Energiewende

klimaneutrale Versorgung kaum zu erreichen sein. Doch nur Effizienz allein reicht nicht aus, nur in der Kombination mit Erneuerbaren Energien wird eine nahezu vollständig umweltschonende Energieversorgung ermöglicht. So liegt beispielsweise der Schlüssel zur Wärmewende vor allem in der energetischen Sanierung des deutschen Gebäudebestandes sowie einer Modernisierung der Heizungstechnik. Darüber hinaus helfen Energieeinsparmaßnahmen im Nutzerverhalten, den Energieverbrauch zu senken, z.B. durch die Reduktion der Fahrtgeschwindigkeit beim Autofahren oder mithilfe des Umstiegs auf öffentliche Verkehrsmittel.

5.3 NETZE UND SPEICHER

Sektorenkopplungstechnologien wie PtG können zur langfristigen Speicherung von Strom für mehrere Tage oder Wochen einspringen. Der Erfolg beim Netzausbau, die Kostenentwicklung von Speichertechnologien sowie das Zusammenspiel der verschiedenen Flexibilitätsoptionen werden die Einsatzreihenfolge und die Kosten der einzelnen Sektorenkopplungstechnologien beeinflussen. Die Verknüpfung und Modernisierung der verschiedenen Netze ist eine Grundlage für die notwendige Flexibilität des Energiesystems der Zukunft.

Stromsektor

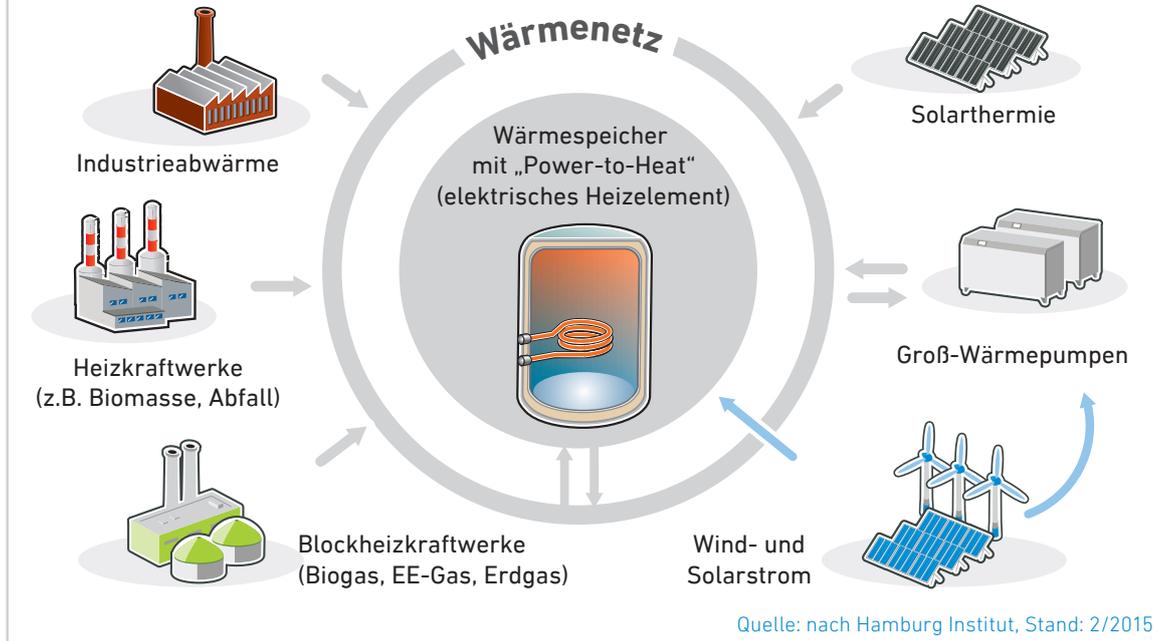
Der Bau neuer Infrastruktur, insbesondere bei Stromleitungen, ist jedoch mit umfangreichen Planungsverfahren verbunden. Neue Strommasten stoßen immer wieder auf Ablehnung von Anwohnern. Bei bestimmten Netzabschnitten und -technologien haben daher nun Erdkabel Vorrang. Um die wetterbedingt und jahreszeitlich fluktuierenden Erneuerbaren Energien auszugleichen, springen neben anderen steuerbaren Energiequellen wie Bioenergie auch Speicher ein. Als Speicher im Strombereich stehen bislang vor allem Pumpspeicherkraftwerke zur Verfügung. Die ursprünglich zur Speicherung nächtlicher Stromüberschüsse aus Grundlastkraftwerken errichteten Wasserspeicher gewinnen im Zuge der Energiewende wieder an Bedeutung. Sie sind technisch ausgereift und gehören zu den kostengünstigsten Speichermöglichkeiten, weisen jedoch ein begrenztes Ausbaupotenzial auf. Darüber hinaus werden Batterien das Speicherpotenzial im Stromnetz ergänzen. Diese sind schon heute sowohl als Solarspeicher in Einzel- und Mehrfamilienhäusern, als Quartierspeicher für ganze Stadtviertel oder als Großspeicher zur Pufferung größerer Einspeiser oder Verbraucher bzw. zur Erbringung von Regelleistung im Einsatz. Die Nutzung von Batterien wird jedoch noch stark zunehmen und entscheidend zur kurzfristigen Systemstabilisierung und Energiespeicherung beitragen.

Wärmesektor

Wärmenetze sind entscheidend, wenn es darum geht, mit Erneuerbaren Energien zu heizen. Sie ermöglichen, dass unterschiedliche Erzeugungsarten zusammen für eine klimafreundliche Wärmeversorgung kleinerer Siedlungen oder ganzer Stadtviertel genutzt werden können. Im Gegensatz zur Stromversorgung steht jedoch meist kein flächendeckendes Wärmenetz zur Verfügung. Darum muss die Wärme, wenn sie nicht unmittelbar verbraucht wird, meistens nahe ihres Entstehungsortes gespeichert. Dabei ist die Kurzzeitspeicherung von Wärme als Warmwasser in Pufferspeichern von Heizungsanlagen weit verbreitet, hinsichtlich der Reichweite sind diese aber begrenzt. Wärmenetze können dagegen sinnvoll voluminöse Kies-Wasser-Speicher, Erdsonden-Wärmespeicher und wasserführende Schichten im Erdreich einbinden. Sie ermöglichen dadurch auch eine Wärmespeicherung über Wochen und Monate für die flexible Nutzung von KWK oder PtH. Bei Erneuerbaren-Anteilen am Strommix von mehr als 60 Prozent muss jedoch überregional noch stärker ausgeglichen werden. Hierfür wie auch als Langzeitspeicher ist das deutsche Gasnetz gut geeignet, es ist mit

Wärmespeicher: Ein zentraler Baustein einer flexiblen Strom- und Wärmeversorgung

Mit Wärmenetzen und Wärmespeichern lassen sich KWK-Anlagen flexibilisieren und Erneuerbare Energien effizient ins Energiesystem integrieren.



500.000 Kilometer zwar deutlich kürzer als das Stromnetz, transportiert aber jährlich rund doppelt so viel Energie³⁷. So können in diesem und seinen Gasspeichern 250 Mrd. kWh Biomethan oder synthetisches Methan gespeichert werden³⁸. Neben dem Wärmesektor unterstützt das Gasnetz auch den Strom- und Verkehrssektor.

Praxisbeispiel: In der Energie-Kommune Lathen in Niedersachsen wurde ein Wärmenetz verlegt, welches sich aus lokalen Biogasanlagen und einem Biomasseheizkraftwerk speist. Die Blockheizkraftwerke nutzen die Abwärme, welche bei der Verstromung sowieso anfällt. Die Vermeidung von THG-Emissionen erfolgt also sowohl im Wärme- als auch im Stromsektor. Im Falle von Lathen konnten die drei Millionen Kilowattstunden an jährlichem Wärmeverbrauch in den öffentlichen Liegenschaften genauso über das Wärmenetz versorgt werden, wie der Wärmeverbrauch von zusätzlich 700 Haushalten.

Verkehrssektor

Auch die Kopplung mit dem Verkehrssektor gelingt nur mit angepasster Netzinfrastruktur. So muss das Stromnetz um Ladestationen für Elektrofahrzeuge ergänzt und dazu auch punktuell verstärkt werden. Die bisher nur beschränkte Zahl von Gastankstellen, an denen auch Biomethan bzw. synthetisches Methan entnommen werden kann, muss erweitert werden. Je nach Technologieentwicklung können auch ganz neue Infrastrukturen, etwa für Wasserstoff, die bestehenden Energieleitungen ergänzen.

³⁷ AEE: Energie-Update

³⁸ Ausfelder et. al: Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems

5.4 DIGITALISIERUNG: LASTMANAGEMENT UND SMART GRIDS

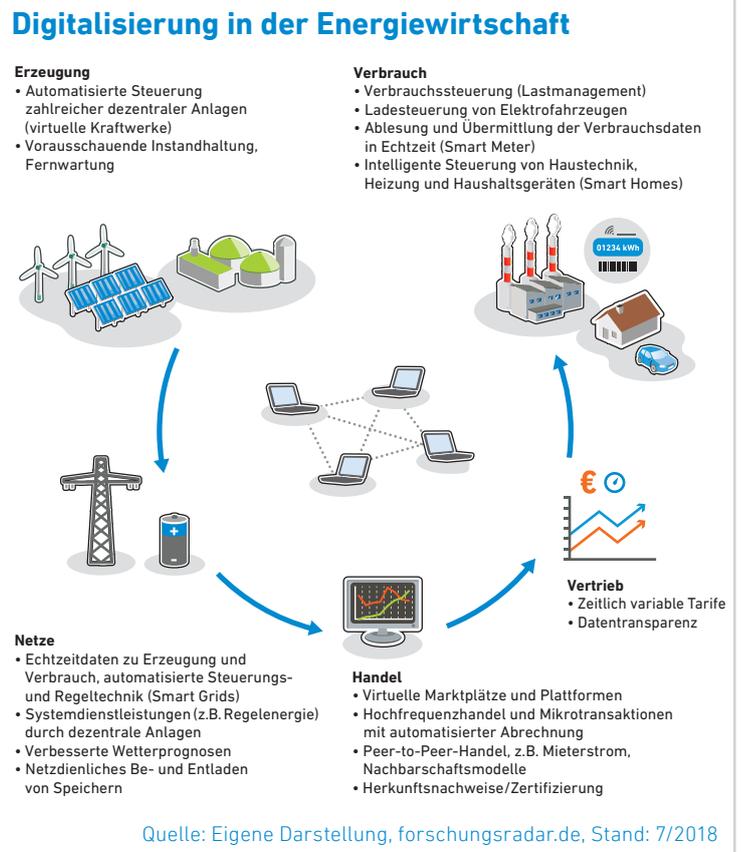
Eine nachhaltige Verknüpfung der Sektoren erfordert einen hohen Bedarf an Digitalisierung, da digitale Anwendungen sehr stark zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung aus Wind und Sonne und zur Verknüpfung der Verbrauchssektoren beitragen können. Nur mit digitaler Technik können die vorhandenen Lösungen effizient und intelligent zusammenspielen. Auch die Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien kann durch die Zusammenschaltung unterschiedlicher Anlagen so gebündelt werden, dass sie als „virtuelles Kraftwerk“ genauso verlässlich Strom liefert wie ein konventionelles Kraftwerk. Die Digitalisierung ist der Kitt, der diese Bausteine zusammenhält und zu einem funktionierenden System vernetzt.

Virtuelle Kraftwerke und Smart Grids sind dabei auf eine hohe Quantität und Qualität von Daten angewiesen. Eine zentrale Herausforderung wird deshalb sein, den Zielkonflikt zwischen Datenschutz und dem notwendigen Datenaufkommen eines intelligenten Energiesystems zu moderieren.

Virtuelle Kraftwerke

Virtuelle Kraftwerke sind ein Verbund aus verschiedenen dezentralen Stromerzeugungsanlagen und gegebenenfalls Verbrauchern, die zusammengeschaltet werden. Gesteuert wird ein solches dezentrales Netzwerk kleinerer Anlagen zentral über eine Leitwarte. Durch die enge Vernetzung der Einzelanlagen bekommen die vielen dezentralen Erzeuger und Verbraucher den Charakter eines Großkraftwerks. Bausteine eines virtuellen Kraftwerks können z.B. Photovoltaikanlagen, Windräder, Biogasanlagen, BHKW oder Wasserkraftanlagen aber auch Energiespeicher oder flexible Strom- und Wärmeabnehmer wie etwa Kühllhäuser sein, die zusammengekoppelt betrieben werden.

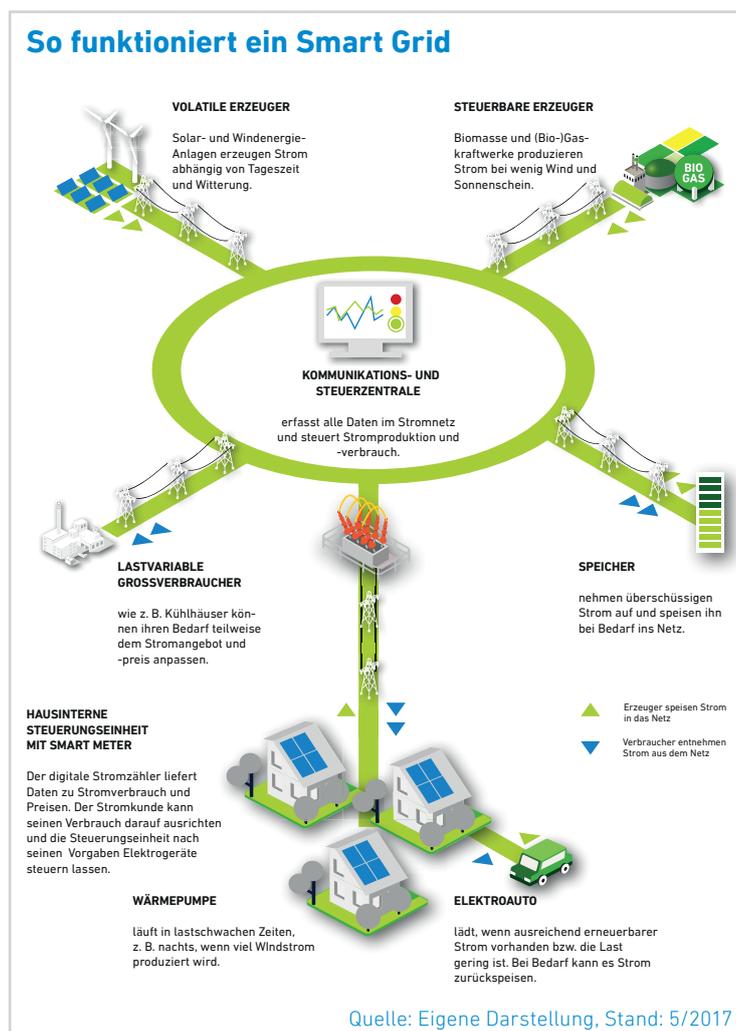
Praxisbeispiel: Die ARGE Netz GmbH & Co. KG, ein Zusammenschluss von 250 mittelständischen Gesellschaften, stellt sich der Herausforderung von Markt- und Systemintegration der Erneuerbaren Energien. Das „Erneuerbare Kraftwerk“ – ein System aus Servern und modularen Rechnern – empfängt die Erzeugerdaten via Internet, dekodiert und verarbeitet die digitalen Informationen und sendet dann die entsprechenden Steuer- und Regelbefehle an die einzelnen Betreiber zurück. Durch diese zentrale Leitstelle kann fluktuierender erneuerbarer Strom in voraussagbaren Mengen erzeugt und auf dem Markt angeboten werden. So wird eine zuverlässige Energieversorgung gewährleistet.



Die Vorteile und Schwachstellen der einzelnen Technologien lassen sich durch die Zusammenschaltung insgesamt ausgleichen. Ein virtuelles Kraftwerk kann z.B. Lastspitzen glätten oder Regelenergie bereitstellen. Die Bezeichnung „virtuell“ rührt daher, dass der Erzeugungsverbund nach außen hin wie ein einzelnes großes Kraftwerk erscheint, aber eigentlich kein einzelnes Kraftwerk existiert, sondern mehrere, über verschiedene Standorte verteilte Anlagen.

Smart Grids

Eine Verknüpfung und intelligente Steuerung der Netze kann auch deren jeweiligen Ausbaubedarf verringern. Denn neben dem quantitativen Zubau von Stromleitungen ist eine qualitative Netzverbesserung erforderlich, damit Erzeuger und Verbraucher sich besser abstimmen können: Wird beispielsweise kurzfristig mehr Strom aus einem Biogas-BHKW zum Ausgleich einer Windflaute benötigt, fällt gleichzeitig mehr Wärme an. Diese sollte dann von einem ausreichend dimensionierten Wärmenetz aufgenommen werden können. Soll ein zeitlich begrenztes Überangebot von Windstrom dagegen per Elektrolyse in Wasserstoff bzw. synthetisches Methan umgewandelt werden, muss auch ein aufnahmefähiges Gasnetz bereitstehen. Im Energiesystem der Zukunft müssen viel mehr Informationen ausgetauscht werden. 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. 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 aber auch stärker durch entsprechende Steuerungsalgorithmen bestimmt werden.

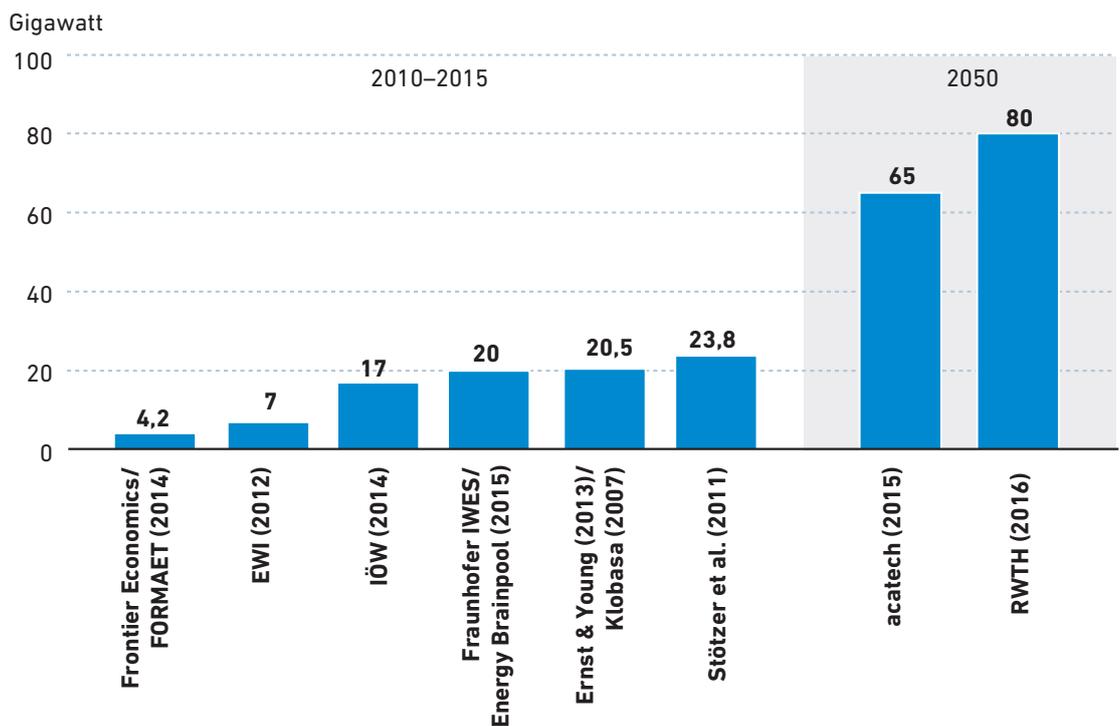


Lastmanagement

Im bisherigen Stromversorgungssystem bestimmt in der Regel die Stromnachfrage den Betrieb von Kraftwerken. Das Stromangebot passt sich durch die Betriebsweise der Kraftwerke den Nachfrageschwankungen an. Insbesondere ab einem Anteil von mehr als 60 Prozent Erneuerbarer Energien wird es verstärkt nötig werden, neben Speichern auch die Steuerung von Verbrauchern zur Ausregelung von Angebot und Nachfrage einzusetzen und somit eine zeitliche Flexibilität erreichen. Wenn Verbraucher verstärkt zum Zeitpunkt der Wind- und Solarstromerzeugung Strom nachfragen, können möglicherweise Kosten eingespart werden, z.B. für Stromspeicher und für den Netzausbau, die ohne diese Flexibilität erforderlich wären, um Angebot und Nachfrage in Einklang zu bringen. Lastmanagement oder Demand-Side-Management (DSM) setzt Anreize voraus, welche die Verbraucher zu Verhaltensänderungen bewegt, z.B. durch zeitabhängige, sich im Tagesverlauf verändernde Strompreise³⁹.

Technisches Lastmanagementpotenzial privater Haushalte

Die Möglichkeit der Privathaushalte ihren Stromverbrauch an die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien anzupassen wird durch die Sektorenkopplung deutlich zunehmen. So könnten im Jahr 2050 – v.a. durch den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen – bis zu 80 Gigawatt zeitlich verschoben werden.



Quelle: BMWi, EWI, IÖW, BEE, CIRED, acatech, RWTH, Stand: 8/2018

Die Nutzung der aufgezeigten Flexibilitätsoptionen setzt ein intelligentes Netz voraus. Künftig tragen also nicht nur steuerbare Erzeuger und die Übertragungsnetzbetreiber zur Versorgungssicherheit bei, sondern auch die Nachfrageseite. Ein solches Lastmanagement setzt allerdings eine entsprechende Infrastruktur voraus: Dabei sollen intelligente Stromzähler, sogenannte Smart Meter als Teil des oben skizzierten Smart Grids helfen. Sie messen und informieren nicht nur über den aktuellen Stromverbrauch, sondern versorgen die Verbraucher möglicherweise auch mit Informationen zum aktuellen Stromangebot und -preis. Zudem müssen sich industrielle Verbraucher bis hin zu Haushaltsgeräten entsprechend steuern bzw. programmieren lassen.

³⁹ AEE: Energie-Update

Das Zuschalten eines Stromverbrauchers wirkt wie das Aufladen eines Speichers oder das Abschalten eines Stromgenerators. Üblicherweise werden die DSM-Potenziale nach Verbrauchssektoren unterschieden. Bei privaten Haushalten eignen sich zum Beispiel batterieelektrische Fahrzeuge, PV-Systeme mit Batteriespeichern, Wärmepumpen, Speicherheizungen, elektrische Warmwasserspeicher sowie weiße Ware (Geschirrspüler, Waschmaschinen, Trockner, Kühl- und Gefriergeräte). Im Gewerbesektor kann Lastmanagement mit steuerbaren Stromverbrauchern wie Kälteanlagen und Raumheizung erfolgen. Im Sektor Industrie werden üblicherweise steuerbare Prozesse der Aluminium-, Chlor-, Papier-, Stahl und Zementindustrie für das Lastmanagement berücksichtigt. Die Lastmanagementpotenziale werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Das technische Lastmanagementpotential liegt sehr hoch und beträgt mehrere Gigawatt. Praktisch und wirtschaftlich realisierbare Potenzial gilt jedoch als deutlich geringer. Das technisch mögliche Lastmanagementpotential in privaten Haushalten beziffern die untersuchten Studien der AEE-Metaanalyse „Die Digitalisierung der Energiewende“ aktuell auf 4,2 bis 23,8 Mio. kWh. Bis 2050 könnte es auf bis zu 80 Mio. kWh ansteigen, v.a. durch Wärmepumpen und Elektromobilität.

Batterien von Elektrofahrzeugen können als mobile Stromspeicher eine wichtige Rolle beim Lastmanagement und für die Netzstabilität übernehmen. Neben der Möglichkeit, zusätzliche Verbrauchsoptionen bereitzustellen, werden Batterien von Elektrofahrzeugen den Strom künftig auch wieder einspeisen können und in den regionalen Verteilnetzen so dabei helfen, die schwankenden Angebote von Wind- und Solarstrom auszugleichen. Auf Grundlage von Wetter- und Einspeiseprognosen erhalten sie Signale, wann sie ihre Batterien in den Fahrzeugen idealerweise aufladen. Batterieelektrische Fahrzeuge eröffnen für Stromanbieter ein neues Geschäftsfeld. Neben der Abnahme des Stroms kann die Batterie zu Standzeiten als Speicher dienen, um ein Überangebot an Strom aus Wind oder Sonne aufzunehmen. Dieses flexible Ladeverhalten kann finanziell belohnt werden. Mit Regelenergie wird eher weniger Geld verdient, das gezielte Laden zu Zeiten mit niedrigen Börsenstrompreisen kann aber ökonomisch Sinn machen. Inwiefern Elektroautos zur Flexibilisierung beitragen können, hängt davon ab, ob die Besitzerinnen und Besitzer bereit sind, die Batterien dem System zur Verfügung zu stellen. Bei einem zeitgleichen Laden einer Vielzahl an Autos wird das Stromnetz belastet⁴⁰. So sollten die Fahrzeuge im besten Fall nur Strom tanken, wenn dieser über die Netzinfrastruktur ausreichend verfügbar ist.

40 Stephanos: Optionen für die nächste Phase der Energiewende

6 QUELLEN

AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (AEE): Energie-Update. Berlin, 2018: <https://energie-update.de/>
Abruf am 14.12.2018.

AEE: Energiewendeatlas Deutschland 2030. Berlin, 2016: https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/971.EWAtlas2017_Mai17_web.pdf

AEE: Erneuerbare Energie für die Industrie: Prozesswärme aus Bioenergie sorgt für Unabhängigkeit und Klimaschutz. Berlin, 2017: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/hintergrundpapiere/erneuerbare-energie-fuer-die-industrie-prozesswaerme-aus-bioenergie-sorgt-fuer-unabhaengigkeit-und-klimaschutz>

AEE: Intelligente Verknüpfung von Strom- und Wärmemarkt – Die Wärmepumpe als Schlüsseltechnologie für Lastmanagement im Haushalt. Berlin, 2012: https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/162.59_Renews_Spezial_Waermepumpe_online.pdf

AEE: Metaanalyse Die Digitalisierung der Energiewende. Berlin, 2018: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_digitalisierung_aug18/AEE_Metaanalyse_Digitalisierung_aug18.pdf

AEE: Metaanalyse Die Rolle erneuerbarer Gase in der Energiewende. Berlin, 2018: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/metaanalyse_ee-gase_mrz18/Metaanalyse_Erneuerbare_Gase_Langfassung_mrz18.pdf

AEE: Metaanalyse Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr. Berlin, 2016: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_sektorkopplung_042016/AEE_Metaanalyse_Flexibilitaet_Sektorkopplung_apr16_fixed.pdf

AEE: Metaanalyse Nutzungspfade der Bioenergie für die Energiewende. Berlin, 2015 http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_nutzungspfade_bioenergie/AEE_Metaanalyse_Bioenergie_Nutzungspfade_final_okt15_fixed.pdf

AEE, DUH: Forum Synergiewende. Berlin, 2018: <https://www.forum-synergiewende.de/>. Abruf am 06.11.2018.

AGORA ENERGIEWENDE: Wärmewende 2030. Berlin, 2017: https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf

AUSFELDER, FLORIAN ET AL.: Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). München, 2017: http://www.akademienunion.de/fileadmin/redaktion/user_upload/Publikationen/Stellungnahmen/ESYS_Analyse_Sektorkopplung.pdf

BDEW: Elektromobilität: Neues BDEW-Ladesäulenregister geht an den Start. Berlin, 2018: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/rund-13500-oeffentliche-ladepunkte-deutschland/>

BMWI: Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin, 2018 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>

BMWI/AGEE-STAT: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin, 2018: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=15

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin, 2016: http://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf

BUNDESNETZAGENTUR: Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Gesamtjahr und Viertes Quartal. Bonn, 2018: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2018/Quartalsbericht_Q4_Gesamt_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3

BUNDESNETZAGENTUR/BUNDESKARTELLAMT: Monitoringbericht 2017. Bonn, 2017: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/Monitoringbericht_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3

BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE E.V. (BEE): Kursbuch Energiewende. Berlin, 2016: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/PrProzentC3ProzentA4sentationen/Kursbuch_Energiewende_-_Ein_Leitbild_fProzentC3ProzentBCr_100__Erneuerbare_Energie_in_Strom__WProzentC3ProzentA4rme_und_MobilitProzentC3ProzentA4t.pdf

BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE: Absatzzahlen und Marktanteile. Berlin, 2018: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/>

DEUTSCHE UMWELT HILFE (DUH): Sektorenkopplung – Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr. Berlin, 2017: https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/170110_Hintergrundpapier_Sektorenkopplung_web.pdf

ENERGIEAGENTUR.NRW: Sektorenkopplung – Herausforderung für das Energie- und Industrieland NRW. Steinfurt, 2018

ERLACH, BERIT, STEPHANOS, CYRIL, KOST, CHRISTOPH, PALZER, ANDREAS: Sektorkopplung und ihre Bedeutung für die Bioenergienutzung im Tagungsband zum 12. Rostocker Bioenergieforum. Universität Rostock, 2018

STEPHANOS, DR. CYRIL: Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. Berlin, 2017: https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_11_14_ESYS_Sektorkopplung.pdf

UMWELTBUNDESAMT (UBA): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf

Fotorechte

S. 16 (Power-to-Gas-Anlage) Stadtwerk Haßfurt, S. 22 (PtL-Demonstrationsanlage) Sunfire

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
www.unendlich-viel-energie.de

Aktuelle Informationsangebote finden Sie im Internet:

www.kommunal-erneuerbar.de
www.foederal-erneuerbar.de
www.forschungsradar.de
www.kombikraftwerk.de
www.waermewechsel.de
www.energie-update.de
www.forum-synergiewende.de

