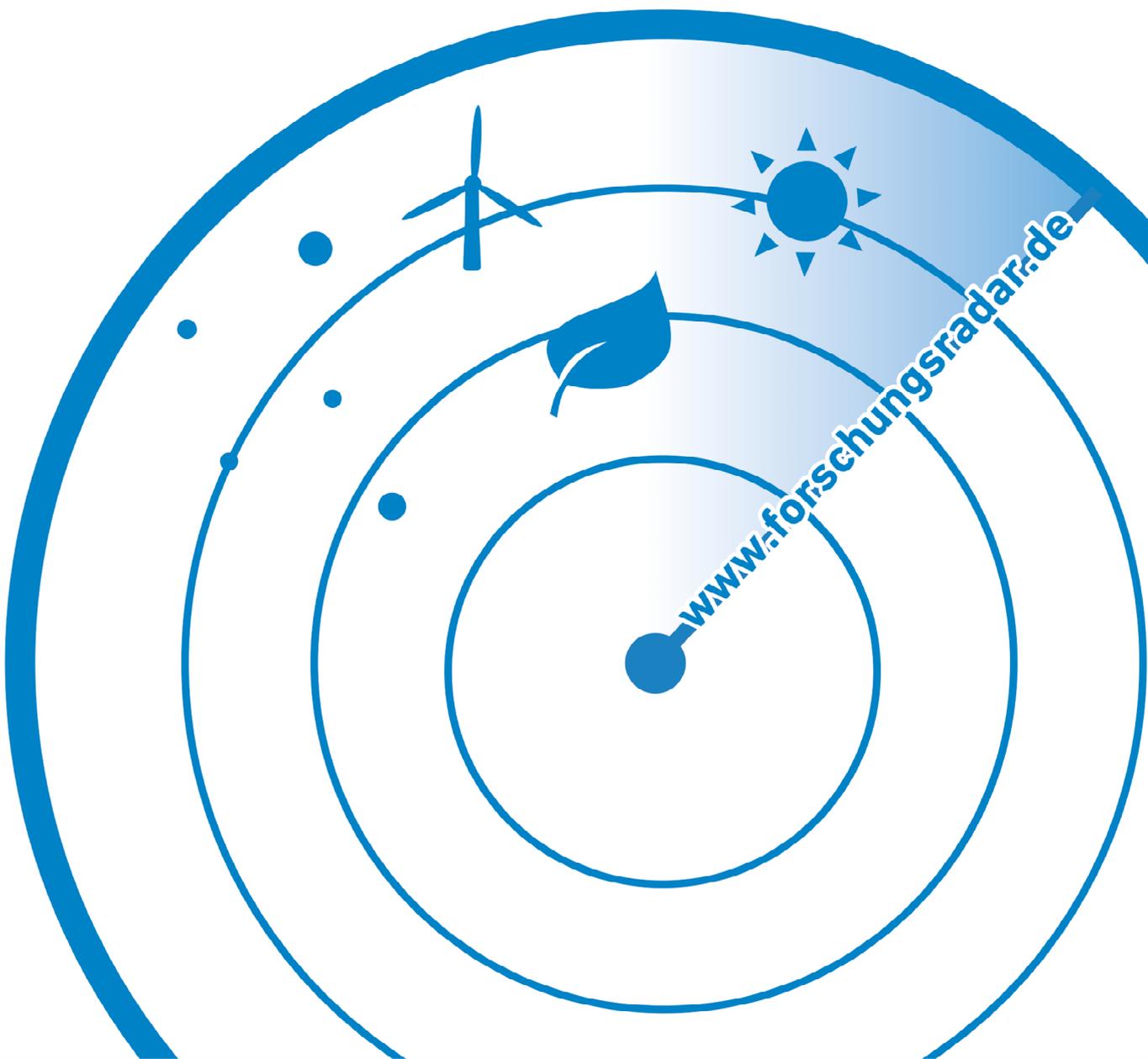


METAANALYSE

April 2016

Flexibilität durch Kopplung
von Strom, Wärme & Verkehr



Flexibilitätsbedarf und -optionen im deutschen Energiesystem

Um mindestens 40 Prozent bis 2020 und 80 bis 95 Prozent bis 2050 soll der Ausstoß an Treibhausgasen in Deutschland laut Klimaschutzziel der Bundesregierung im Vergleich zu 1990 sinken. Erreicht werden soll das Ziel vor allem durch den Ausbau Erneuerbarer Energien und eine Steigerung der Energieeffizienz. Die erneuerbaren Energiequellen mit den größten Potenzialen, nämlich Wind- und Sonnenenergie, entwickeln sich somit zur wesentlichen Säule im Energiesystem. Durch ihre zeitlich schwankende Verfügbarkeit wird es anspruchsvoller, Stromerzeugung und -nachfrage jederzeit in Einklang zu bringen, um das System stabil zu halten. Der Bedarf an Flexibilität im System wächst mit steigendem Anteil fluktuierender Erneuerbarer Energien (FEE) und es müssen gezielt Ausgleichsmöglichkeiten eingesetzt werden.

Wenn die FEE-Erzeugung für die Deckung der Stromnachfrage nicht ausreicht (= positive Residuallast), müssen steuerbare Kraftwerke einspringen oder es müssen verschiebbare Lasten abgeschaltet werden. Umgekehrt gilt es in Überschusssituationen (= negative Residuallast) den Strom aus Wind und Sonne möglichst sinnvoll zu nutzen und erst dann abzuregeln, wenn alle anderen Flexibilitätsoptionen ausgereizt sind.

Es besteht ein breites Spektrum an Flexibilitätsmöglichkeiten im Energiesystem, die bisher sehr unterschiedlich erschlossen sind und eingesetzt werden:

- Stromimport bei positiver und Stromexport bei negativer nationaler Residuallast;
- Netzausbau und -umbau in Deutschland und Europa erhöht die Übertragungskapazitäten und damit die überregionalen Ausgleichseffekte;
- Bedarfsorientierter Betrieb regelbarer Stromerzeugungsanlagen (Flexibilisierung bestehender fossiler Kraftwerke und Biomasse-Anlagen und Einsatz hochflexibler Anlagen, z.B. Gasturbinen für Lastspitzen);
- Zu- oder Abschalten flexibler Stromverbraucher (Demand-Side-Management/Lastmanagement), z.B. Elektrofahrzeuge, elektrische Wärmeerzeuger (Wärmepumpen, Power-to-Heat), bestimmte Industrieprozesse;
- Be- oder Entladen von Energiespeichern: Pumpspeicher, Batterien, Druckluftspeicher, Power-to-Gas (PtG), Power-to-Liquid (PtL);
- Abregelung von regenerativen Stromerzeugungsanlagen bei negativer Residuallast (Einspeisemanagement).

Die vorliegende Metaanalyse untersucht und vergleicht die Aussagen von 25 verschiedenen Studien mit unterschiedlichen Energieszenarien zum Bedarf an Flexibilität im (künftigen) Stromsystem und den Ausgleichsmöglichkeiten durch die Nutzung von Strom in den Bereichen Wärme, Verkehr und durch die Erzeugung strombasierter Brennstoffe (Power-to-Gas/Power-to-Liquid). Dabei geht es einerseits um die Nutzung von zeitweiligen Stromüberschüssen und andererseits um Rückkopplungseffekte auf den Stromverbrauch bzw. die notwendigen Erzeugungskapazitäten, wenn Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) zunehmend fossile Energieträger in den Bereichen Wärme und Verkehr ersetzen soll. Betrachtet werden die Elektromobilität, Wärmepumpen, Power-to-Heat und synthetische Brenn- und Kraftstoffe (PtX, Power-to-Gas/Power-to-Liquid).

Die Analyse aktualisiert frühere Studienvergleiche zur Entwicklung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland, zum Stromverbrauch und zur Jahreshöchstlast. Weiterhin erfasst sie die (in nur wenigen Studien angegebenen) Werte für die erwartete maximale positive und negative Residuallast. Wie die positive Residuallast künftig gedeckt werden soll, wird nicht

näher betrachtet, denn mit dem künftigen [Bedarf an steuerbaren Kraftwerken](#) hat sich bereits eine Forschungsradar-Metaanalyse von Ende 2013 beschäftigt. Die mögliche Entwicklung von [Stromspeichern](#) ist im Rahmen des Forschungsradars im Januar 2015 unter die Lupe genommen worden, hier findet eine Aktualisierung statt im Hinblick auf die Nutzung strombasierter Brenn- und Kraftstoffe.

Hinweise zur Vorgehensweise, Einordnung und Bewertung des Studienvergleichs

Die Metaanalyse vergleicht die Aussagen verschiedener Studien zum Flexibilitätsbedarf und den -potenzialen im deutschen Stromsystem. Die betrachteten Studien haben dabei unterschiedliche Fragestellungen und Analyseschwerpunkte, die modellierten Energieszenarien basieren auf teilweise sehr unterschiedlichen Annahmen und Rahmenbedingungen. Das wirkt sich auf die Ergebnisse aus und ist bei der Interpretation zu berücksichtigen.

Grundsätzlich sind folgende Studien und Szenarien zu unterscheiden:

- Studien, die das gesamte Energiesystem modellieren und die Sektoren Umwandlung, Verkehr, Haushalte, Industrie und Gewerbe berücksichtigen. Solche Studien liefern mehr oder weniger detaillierte Energiebilanzen, die zum Beispiel auch Umwandlungsverluste berücksichtigen, die insbesondere bei PtX-Technologien bedeutsam sind. Hierzu zählen zum Beispiel Prognos/EWI/GWS 2014, DLR/IWES/IfnE 2012, Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015.
- Studien, die gezielt den Flexibilitätsbedarf aufgrund des steigenden Anteils fluktuierender Erneuerbarer Energien im Stromsystem und die Flexibilitätsmöglichkeiten untersuchen. Oft ist die Verbrauchsseite weniger detailliert behandelt. Beispiele sind BEE/BET 2013 und Fraunhofer IWES/Agora Energiewende 2015.
- Studien, die nur einen Sektor betrachten. Unter den herangezogenen Studien sind mehrere mit Fokus auf den Verkehrssektor. Sie analysieren die mögliche Transformation der Energieversorgung im Verkehr und die Rolle, die Erneuerbare Energien bzw. Strom und strombasierte Kraftstoffe spielen könnten. Beispiele sind DLR/ifeu/LBST/DBFZ 2014/2015 sowie Öko-Institut 2014. Andere Studien haben nur den Stromsektor im Blick (Dekarbonisierung der Stromerzeugung, Netzstabilität, Beitrag zur Energiewende). Die Interaktion mit anderen Sektoren wird in diesem Fall nur sehr begrenzt analysiert und entsprechende Fragestellungen nicht explizit berücksichtigt. Ein Beispiel ist Fraunhofer IWES et al. 2014.
- Studien, die gezielt Speichertechnologien untersuchen. Speicher sind eine mögliche Option zur Flexibilisierung des Energiesystems und können zum zeitlichen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage beitragen. Die Charakteristika von Speichern sind vielfältig (kurzfristig/langfristig, elektrisch/chemisch/mechanisch/thermisch, sektoral/sectorübergreifend), und sie unterscheiden sich in Entwicklungsstand und Wirtschaftlichkeit. Beispiele sind Agora Energiewende 2014 und OTH/FENES/Energy Brainpool 2015.

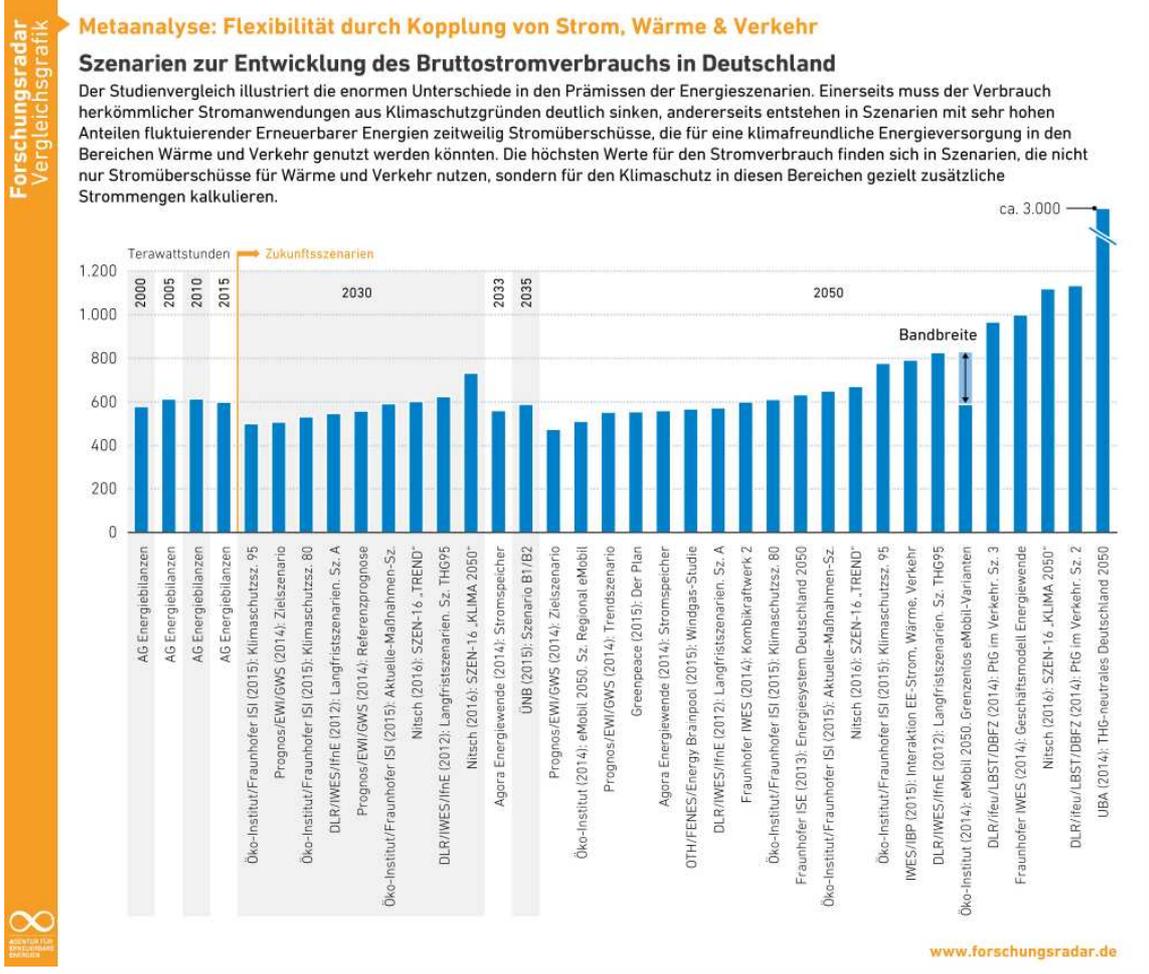
Die jeweiligen Zielsetzungen und Systemgrenzen der einzelnen Studien sind bei der Interpretation der zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnisse zu berücksichtigen.

Entwicklung des Stromverbrauchs in Deutschland

Gemäß dem Ziel der Bundesregierung soll der Stromverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2020 um zehn Prozent gegenüber dem Wert von 2008 sinken. In absoluten Zahlen bedeutet das einen Rückgang beim Bruttostromverbrauch von 618 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a) auf 556 TWh/a. Im Jahr 2015 lag der Wert bei 600 TWh (AG Energiebilanzen 2016). Zur Zielerreichung ist also noch eine deutliche Reduktion notwendig.

Für die Jahre 2030/35 weisen sechs der betrachteten Energieszenarien einen Bruttostromverbrauch von maximal 561 TWh/a aus, wobei es sich sowohl um Trendprognosen (Prognos/EWI/GWS 2014) als auch um zielorientierte Szenarien handelt (z.B. Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015: Klimaschutzscenario 80+95). Drei Studien bzw. Szenarien rechnen mit einer Stagnation bei rund 600 TWh, während das Szenario „SZEN-16 KLIMA 2050“ von Nitsch 2016 bis zum Jahr 2030 eine erhebliche Zunahme des Bruttostromverbrauchs auf 733 TWh beinhaltet.

Die Bandbreite der Aussagen illustriert unterschiedliche Bewertungen zweier gegenläufiger Trends: Auf der einen Seite bewirken Effizienzsteigerungen Einspareffekte, auf der anderen Seite entsteht durch neue Verbraucher eine zusätzliche Stromnachfrage. Mehrere Studien gehen davon aus, dass der Stromverbrauch sich auch unter der Annahme erheblicher Effizienzsteigerungen langfristig nicht reduzieren wird. Die Ursache dafür liegt vornehmlich in der zunehmenden Nutzung von Strom in den Sektoren Wärme und Verkehr durch Techniken wie Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge und strombasierte Brenn- und Kraftstoffe.



Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

Im Zeitverlauf wächst die Differenz zwischen den Szenarien. In sieben Szenarien liegt der deutsche Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 mit 475 TWh/a im Zielszenario von Prognos/EWI/GWS 2014 bis 574 TWh im Szenario A bei DLR/IWES/IfnE 2012 niedriger als heute. Fünf Szenarien nennen Werte zwischen 600 und 700 TWh/a und neun Szenarien liegen deutlich darüber mit Werten bis über 1.000 TWh/a (z.B. „KLIMA 2050“ von Nitsch 2016). Die Größenordnung von 1.000 TWh/a entspricht dabei dem, was z.B. DLR/ifeu/LBST/DBFZ 2015 als nationales technisches Stromerzeugungspotenzial aus Erneuerbaren Energien bezeichnen.

Der von UBA 2014 skizzierte Strombedarf für das Jahr 2050 hebt sich sehr von den anderen Studien ab. Der extrem hohe Wert von fast 3.000 TWh erklärt sich dadurch, dass die Studie nicht nur eine treibhausgasneutrale Stromversorgung zum Ziel hat, sondern eine vollständig treibhausgasneutrale Energieversorgung inklusive Wärme und Kraftstoffe. Strom ist in diesem Szenario der Hauptenergieträger. Zudem dient Strom in dieser Studie zur Bereitstellung von chemischen Rohstoffen in der Industrie. Ein wesentlicher Baustein sind Power-to-X-Techniken, die mithilfe von Elektrolyse und anderen Prozessen regenerativen Wasserstoff, Methan, flüssige Kraftstoffe und chemische Produkte bereitstellen. Da die Erzeugung von regenerativen Brenn- und Kraftstoffen mit erheblichen Umwandlungsverlusten verbunden ist, liegt der Strombedarf hier weit über den Mengen in den anderen betrachteten Studien. Das nationale EE-Stromerzeugungspotenzial wird deutlich überschritten, so dass Stromimporte sowie Importe von Brenn- und Kraftstoffen aus Erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle spielen.

Installierte Leistung zur Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland

Im Jahr 2015 erreichte die installierte Leistung Erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung 97 Gigawatt (GW). Der weitaus größte Anteil entfiel dabei mit rund 45 GW auf die Windenergie und mit rund 40 GW auf die Photovoltaik. Für den Zeitraum bis 2030/35 gehen acht der für die Metaanalyse betrachteten Studien von einem weiteren Ausbau der Erneuerbare-Energien-Kapazitäten auf insgesamt ca. 140 bis 160 GW aus. Weitere acht Szenarien sehen einen stärkeren Ausbau auf insgesamt 170 GW bis 246 GW vor.

Bis zum Jahr 2050 bleibt die EE-Erzeugungskapazität in fünf Szenarien (z.B. Prognos/EWI/GWS 2014) im Bereich von 170 bis 200 GW, weitere fünf nennen Werte bis zu 275 GW und in zehn Szenarien erfolgt eine deutlich stärkere Zunahme der EE-Leistung auf Werte von rund 290 GW bis auf knapp 540 GW (90%-Szenario in Fraunhofer ISE 2015).

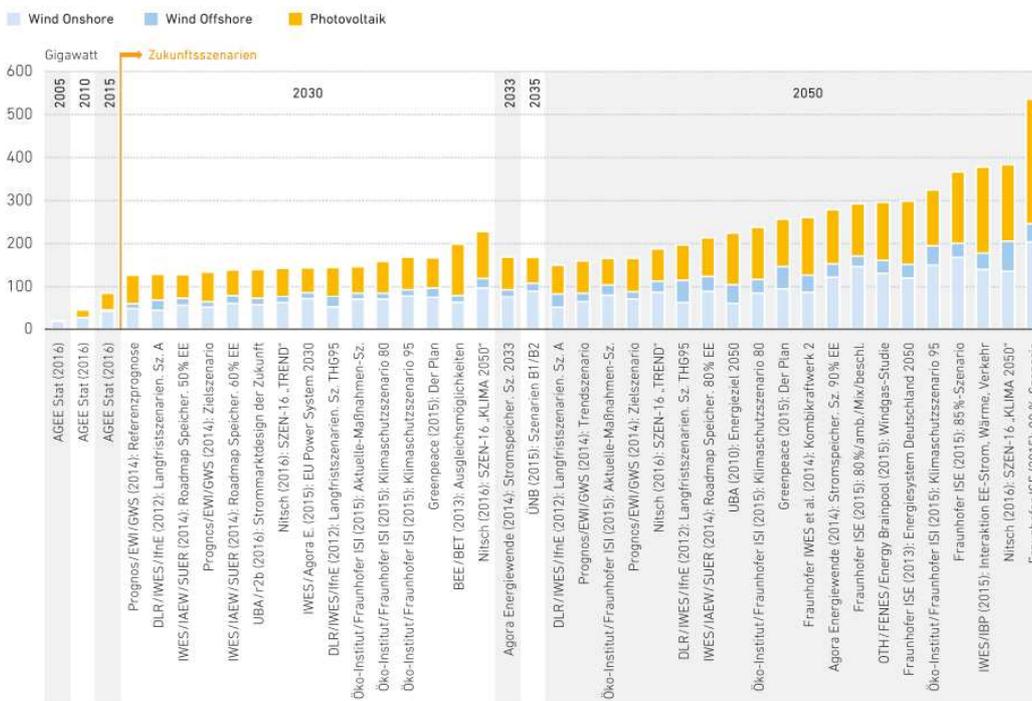
In fast allen Szenarien liegt der Anteil der Windenergie und Photovoltaik an der insgesamt installierten Leistung Erneuerbarer Energien bei mehr als 90 Prozent, nur in wenigen Szenarien liegt er etwas niedriger (z.B. IWES/IAEW/SUER 2014). Das Ausbaupotenzial der Wasserkraft gilt hingegen generell als sehr begrenzt, die Potenziale der Geothermie sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet und welche Rolle die Biomasse im Energiemix der Zukunft spielen soll, wird sehr kontrovers beurteilt¹. Die fluktuierenden Stromerzeuger spielen also die Schlüsselrolle für die zukünftige Energieversorgung.

¹ Vgl. [Metaanalyse „Nutzungspfade der Bioenergie“](#) vom Oktober 2015

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr

Szenarien zur installierten Leistung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen in Deutschland

Die Gegenüberstellung verschiedener aktueller Energieszenarien zeigt eine große Bandbreite hinsichtlich des in Referenzszenarien weiteren erwarteten bzw. in Klimaschutz-Zielszenarien als möglich oder wünschenswert erachteten Ausbaus der (fluktuierenden) Erneuerbaren Energien. Die Werte für die insgesamt in Deutschland installierte Leistung Erneuerbarer Energien bewegen sich für das Jahr 2050 zwischen ca. 170 Gigawatt und mehr als 500 Gigawatt.



www.forschungsradar.de

Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland

Im Jahr 2015 stammten 196 TWh Strom aus Erneuerbaren Energien, die damit 30 Prozent zur Stromerzeugung beitrugen (AG Energiebilanzen 2016). Bis zum Jahr 2030 sieht die Hälfte der untersuchten Szenarien einen weiteren Anstieg auf Werte von rund 290 bis 320 TWh/a, während die andere Hälfte mit bis zu 471 TWh/a (Nitsch 2016: KLIMA 2050) teilweise deutlich höhere Beiträge vorsieht. In Abhängigkeit von der Gesamtmenge an Strom steigt der Anteil der Erneuerbaren Energien bis 2030/35 auf Werte zwischen 47 Prozent (Referenzprognose von Prognos/EWI/GWS 2014) und 71 Prozent (Greenpeace 2015), in den meisten Fällen sind es 60 bis 67 Prozent. Bis 2050 weisen die Szenarien mit der geringsten Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien Werte von ca. 350 bis 430 TWh/a aus, während die Szenarien mit den höchsten Beiträgen Erneuerbarer Energien Werte von rund 600 TWh/a (z.B. Fraunhofer IWES et al. 2014) bis 874 TWh/a (Nitsch 2016: KLIMA 2050) beinhalten.

Der bis 2050 von der Politik angestrebte Anteil von mindestens 80 Prozent Erneuerbaren Energien wird in drei Trendszenarien mit 63 bis 68 Prozent deutlich verfehlt (z.B. Prognos/EWI/GWS 2014). In den anderen Szenarien liegt der Anteil der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien zwischen 80 und 100 Prozent. Allen Studien gemeinsam ist die Erwartung, dass der weitaus größte Teil der Erzeugung in Zukunft auf die fluktuierenden Quellen Wind und Sonne entfällt. Die Bandbreite für Strom aus diesen Quellen liegt im Zeitraum bis 2030/35 zwischen 210 TWh/a (Prognos/EWI/GWS: Trendprognose) und 386 TWh/a (Nitsch 2016: KLIMA 2050). Für den langfristigen Betrachtungszeitraum bis 2050 ergeben die Auswertungen Wind- und Solarstrombeiträge von 282 bis 769 TWh/a, wobei die Extremwerte jeweils auf die gleichen Szenarien entfallen.

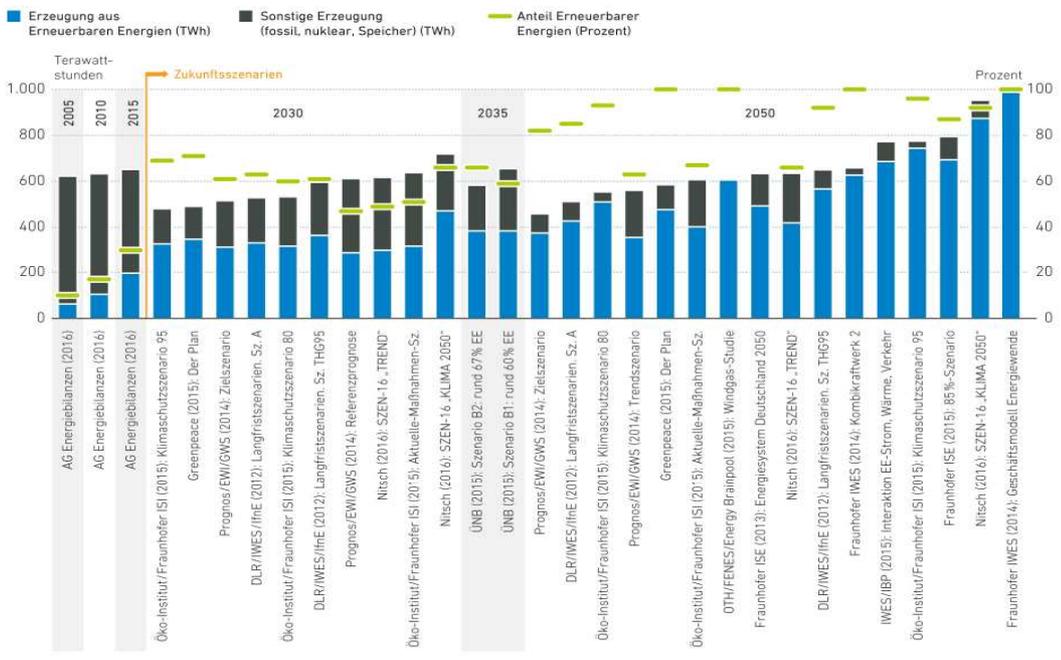
Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

Forschungsradar Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr

Szenarien zur Entwicklung der Stromerzeugung und des Anteils Erneuerbarer Energien in Deutschland

In der Darstellung ist nicht zu erkennen, inwieweit zur Deckung des Stromverbrauchs noch Stromimporte benötigt werden und inwieweit ein zusätzlicher Strombedarf für Wärme und Verkehr berücksichtigt ist. Die fünf Szenarien mit der höchsten Erzeugung im Jahr 2050 sind jeweils stark klimaschutzorientiert und sehen große Strommengen für Wärme und Verkehr vor.



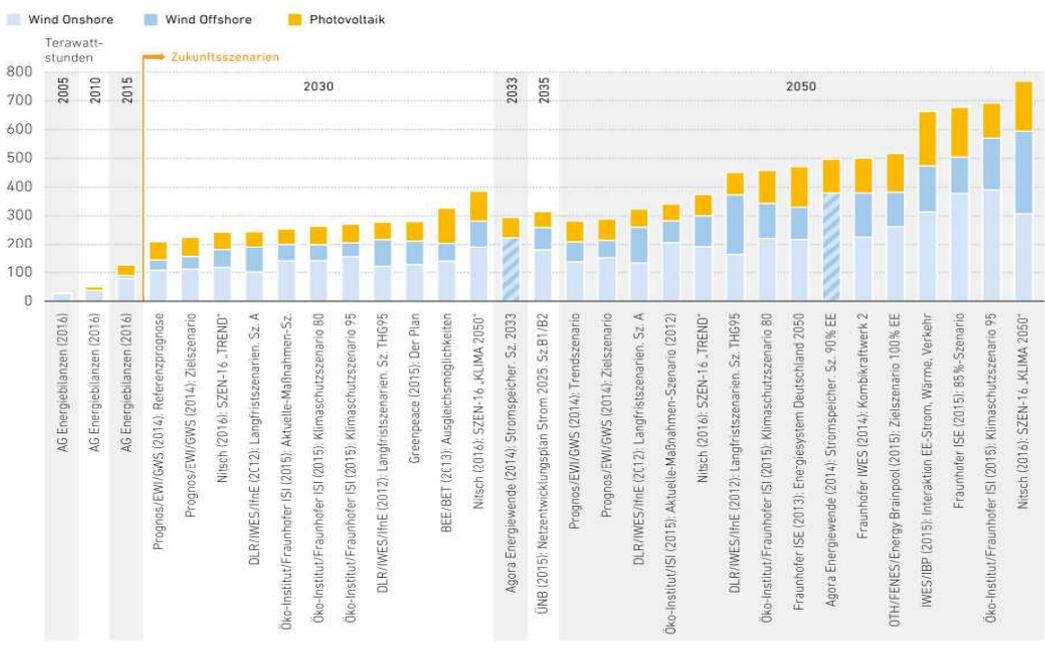
www.forschungsradar.de

Forschungsradar Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr

Szenarien zur Stromerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik in Deutschland

Die Gegenüberstellung verschiedener aktueller Energieszenarien zeigt eine große Bandbreite hinsichtlich der erwarteten oder für möglich und erstrebenswert erachteten Entwicklung der Wind- und Solarstromerzeugung. Insgesamt liegen die Angaben für die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien (inkl. Wasserkraft, Biomasse, Geothermie) in Deutschland im Jahr 2050 zwischen ca. 360 und 870 Terawattstunden. Manche Szenarien sehen langfristig keinen Strom aus Geothermie und Biomasse vor oder machen keine konkreten Angaben dazu (z. B. Fraunhofer ISE 2015; Fraunhofer IWES/IBP 2015). Zudem unterscheiden sich die Szenarien bei der Berücksichtigung von Im- und Exporten sowie beim Einsatz von Strom für Wärme und Verkehr.



www.forschungsradar.de

Residuallast

Der stark wachsende Anteil zeitlich fluktuierender Erneuerbarer Energien macht eine zunehmend flexibel reagierende komplementäre Stromerzeugung ebenso notwendig wie eine flexibel reagierende Nachfrage nach Strom. Die erwarteten Extremwerte für die Residuallast geben einen Eindruck davon, wie groß der Flexibilitätsbedarf im Stromsystem wird. Die Residuallast ist die Differenz zwischen dem aktuellen Stromverbrauch (= Last) und der Einspeisung aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien, also Windenergie, Photovoltaik und Laufwasserkraft. Sie stellt die Leistung dar, die durch regelbare Stromerzeugungseinheiten gedeckt werden muss. Bei gleichzeitig hoher Wind- und PV-Einspeisung wird es zukünftig dazu kommen, dass die Stromerzeugung die nachgefragte Leistung übersteigt, es kommt zeitweise zu Überschüssen (= negative Residuallast). Durch Stromexport oder die gezielte Steigerung der Nachfrage, beispielsweise durch das Aufladen von Elektrofahrzeugen, kann die negative Residuallast verringert werden.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine negative Residuallast auftritt, steigt mit dem Anteil (fluktuierender) Erneuerbarer Energien. Die meisten Studien rechnen ab etwa 2020 mit einzelnen Stunden negativer Residuallast und ab 2030 mit häufigeren und längeren Zeiträumen².



² Bisher ist es bei deutschlandweiter Bilanzierung hingegen noch nicht zu Situationen mit negativer Residuallast gekommen. Leistungsüberschüsse sind derzeit noch regional begrenzt, die Abregelung von Erneuerbaren Energien (Einspeisemanagement) erfolgt ausschließlich aufgrund von Netzengpässen bzw. weil noch zu viele inflexible Kraftwerke (Must-Run-Anlagen) am Netz sind.

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

In den (wenigen) Studien, die konkrete Werte für die in ihren Szenarien auftretende negative Residuallast ausweisen, liegt die Größenordnung im Jahr 2030 zwischen -18 GW (Fraunhofer IWES/Agora Energiewende 2015) und -84 GW (BEE/BET 2013). Für das Jahr 2050 schwanken die Angaben zwischen -61 GW und -145 GW. Die Werte für die maximale positive Residuallast bewegen sich zwischen etwa 40 und 80 GW. Hier besteht in der Regel ein direkter Zusammenhang mit der in verschiedenen Studien prognostizierten Jahreshöchstlast.

Forschungsradar
Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr

Szenarien zur Entwicklung der Jahreshöchst- und Jahrestiefstlast in Deutschland

Das Lastminimum weisen nur sehr wenige Studien aus. Für die Jahreshöchstlast gehen viele Studien von einer auch in Zukunft weitgehend konstanten Korrelation mit dem jährlichen Stromverbrauch aus. Die Einbeziehung neuer, flexibler Lasten in den Bereichen Wärme und Verkehr steigert die Höchstlast jedoch in der Regel nicht. Grund ist die Annahme, dass diese Verbraucher nur dann eingesetzt werden, wenn genügend Erzeugungskapazität verfügbar ist. Den Unterschied zwischen der Höchstlast durch neue Verbraucher bei hohem Stromangebot aus Erneuerbaren Energien illustriert die Studie "Kombikraftwerk 2".



www.forschungsradar.de

Last- und Einspeisemanagement (DSM / Abregelung)

Das Lastmanagement oder Demand-Side-Management (DSM) besteht in verschiebbaren, zu- oder abschaltbaren Lasten. 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 Batteriespeicher, Wärmepumpen, Speicherheizungen, elektrische Warmwasserspeicher sowie weiße Ware (Geschirrspüler, Waschmaschinen, Trockner, Kühl- und Gefriergeräte). Im GHD-Sektor 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 Quantifizierung der DSM-Potenziale variiert je nach Szenario sehr stark. Das Klimaschutzniveau und der Einsatz von Strom in Wärme und Verkehr sind wesentliche Einflussfaktoren. Annahmen zur Entwicklung von Elektrofahrzeugen spielen eine erhebliche Rolle, da Elektromobilität ein hohes Potenzial für die flexible Speicherung von Strom bietet. Theoretisch ist das Potenzial neuer zusätzlicher Lasten, die gezielt Stromüberschüsse aufnehmen, sehr groß. Insbesondere Power-to-Heat ist hier zu nennen.

Sind alle anderen Ausgleichsoptionen ausgereizt, muss die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien gedrosselt (abgeregelt) werden, um das Stromnetz stabil zu halten (= Einspeisemanagement gemäß § 14 EEG). Bei nur kurzzeitig negativen Residuallasten und entsprechend geringen Stromüberschüssen ist die Abregelung oft kostengünstiger als die zusätzliche Erschließung anderer Flexibilitätsoptionen (z.B. Speicher- und Netzausbau „bis auf die letzte Kilowattstunde“). Auf dieser Grundlage rechnen die Übertragungsnetzbetreiber für das Jahr 2035 in den Szenarien B1/B2 mit einer Abregelung von 5,1 TWh. Im Jahr 2050 reicht die Bandbreite für Abregelungen von 1,2 TWh (UBA 2010) bis 37 TWh (Agora Energiewende 2014: Referenzszenario ohne Speicherausbau).

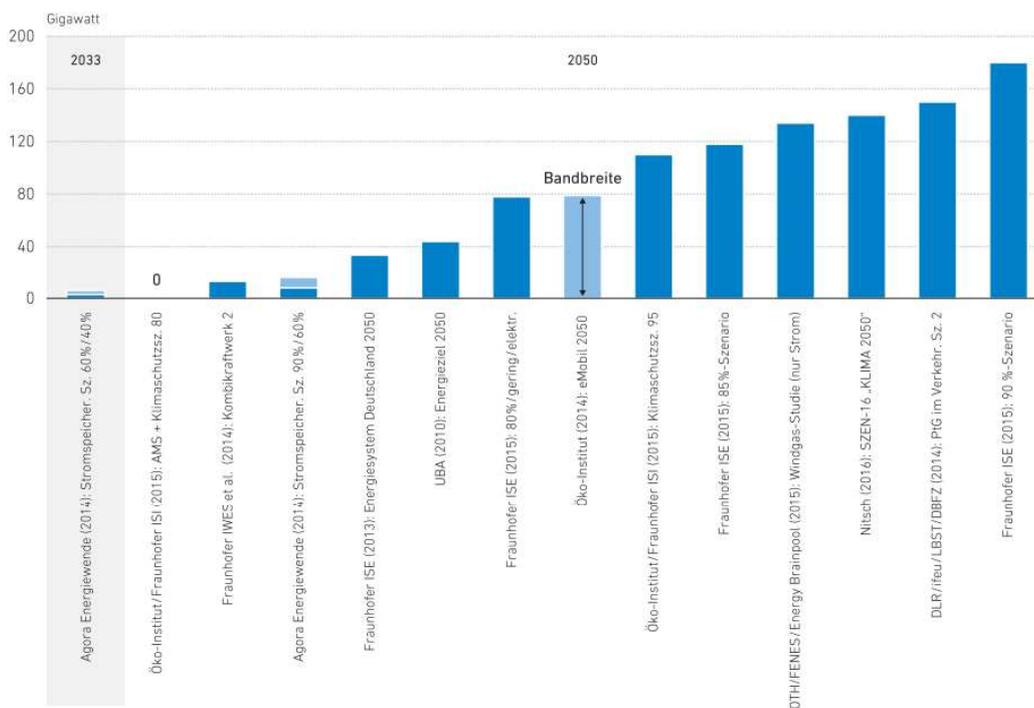
Strombasierte chemische Energieträger (PtG, PtL)

Bei der Power-to-Gas-Technik (PtG) wird durch Elektrolyse regenerativer Wasserstoff erzeugt, der in weiteren Prozessen zu synthetischem Methan (auch EE-Methan oder Windgas genannt) verarbeitet werden kann. Darüber hinaus können mithilfe von Strom regenerative flüssige Kraftstoffe (Power-to-Liquid) bereitgestellt werden. Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffe können gespeichert und in unterschiedlichen Sektoren verwendet werden: in der Stromerzeugung (durch Rückverstromung), im Verkehr (z.B. in Brennstoffzellen-Pkw, Schiffen, Flugzeugen), für Prozesswärme sowie als chemischer Grundstoff in der Industrie. Die Herstellungsverfahren für strombasierte Kraftstoffe befinden sich aktuell noch in einer frühen Phase der Erforschung und Entwicklung. Sie sind mit einem hohen technischen Aufwand, einem erheblichen Energieeinsatz und hohen Kosten verbunden. Viele Studien gehen davon aus, dass andere Flexibilitätsoptionen (insb. direkter Stromverbrauch bei Verkehr und Wärme sowie DSM) ausreichen, um die anfallenden Stromüberschüsse wirtschaftlich zu nutzen. Die meisten Szenarien sehen den Einsatz von Elektrolyseuren und Methanisierungsanlagen daher erst ab ca. 2030.

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr

Installierte Leistung zur Umwandlung von Strom in gasförmige oder flüssige Brennstoffe (Power-to-Gas/Power-to-Liquid)

Inwieweit Strom künftig in Wasserstoff, Methan oder Flüssigkraftstoffe umgewandelt werden soll, wird in den untersuchten Studien sehr unterschiedlich eingeschätzt. Einigkeit besteht jedoch darin, dass aufgrund der Kosten und Umwandlungsverluste frühestens ab 2030 mit nennenswerten Mengen zu rechnen wäre. Die höchsten Werte finden sich in Szenarien mit ehrgeizigen Klimaschutzziele, die mithilfe von Power-to-Gas (PtG) bzw. Power-to-Liquid (PtL) auch eine klimafreundliche Energieversorgung des Verkehrs anstreben. Deutlich niedrigere Werte finden sich in Szenarien, die keine 100% Erneuerbare Energien im Stromsektor anstreben bzw. die sich ausschließlich auf den Speicherbedarf im Stromsektor fokussieren.



www.forschungsradar.de

Für das Jahr 2050 zeigt sich eine enorme Bandbreite hinsichtlich der erwarteten PtX-Anlagen. Ursachen für die enormen Unterschiede sind einerseits der sehr unterschiedliche Ausbau der (fluktuierenden) Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung (je höher ihr Anteil, desto mehr zeitweilige Stromüberschüsse) und andererseits das Klimaschutzniveau und damit die Nutzung von Strom und strombasierten Energieträgern in anderen Sektoren (z.B. Verkehr, Industrie, Wärme). Manche Autoren zeigen sich auch in der langen Frist skeptisch gegenüber den Nutzungspotenzialen von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen (z.B. Prognos/EWI/GWS 2014). Andere (z.B. DLR/IFEU/LBST/DBFZ 2014; UBA 2014) sehen hingegen erhebliche Möglichkeiten zur Dekarbonisierung des Verkehrs- und auch des Chemiesektors. Die Mehrheit setzt dabei vorrangig auf Wasserstoff (z.B. Nitsch 2016; Fraunhofer ISE 2013), andere auch auf Methan (z.B. DLR/IFEU/LBST/DBFZ 2014) oder Flüssigkraftstoff (z.B. Öko-Institut 2013; UBA 2014). Der Grund dafür ist, dass bei der weiteren Umwandlung von Wasserstoff in Methan oder Flüssigkraftstoffe zusätzliche Energieverluste entstehen. Dafür hat die PtL-Technik den Vorteil, dass bestehende Fahrzeugtechniken („Verbrenner“) weiter genutzt werden können und auch ein Einsatz im Güterverkehr möglich ist. Außerdem stehen für die Lagerung und den Transport bewährte Techniken und Infrastrukturen zur Verfügung. Der ausgewiesene Stromverbrauch von PtX-Anlagen reicht in den ausgewerteten Studien von 0 TWh (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015: Aktuelle-Maßnahmen-Szenario und Klimaschutzszenario 80) bis zu 596 TWh (Szenario 2 in DLR/IFEU/LBST/DBFZ 2014).

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

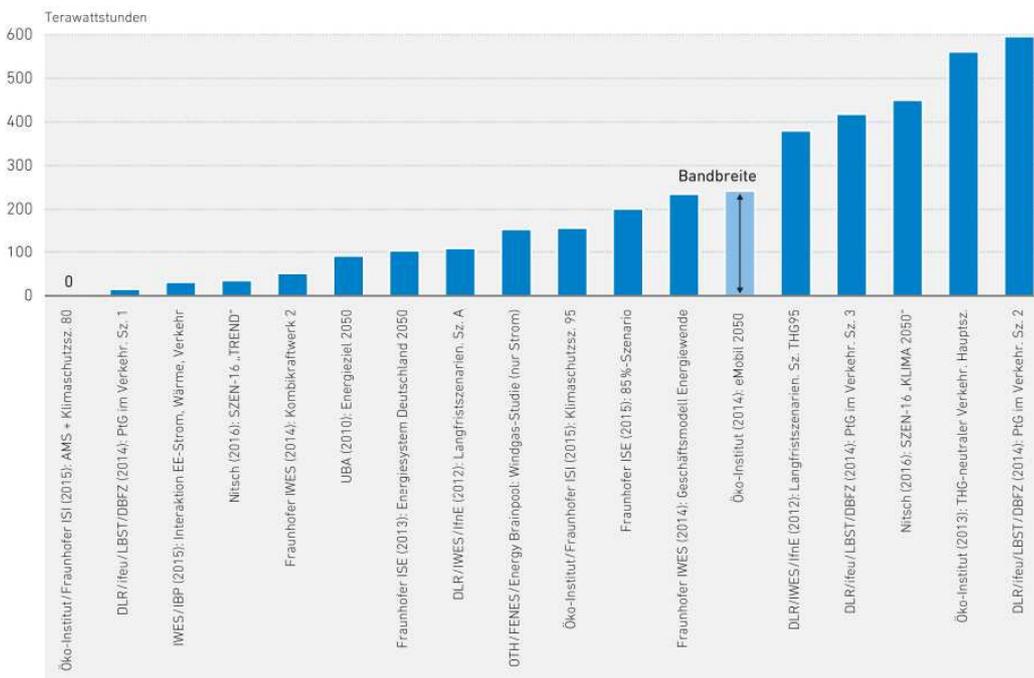
Der hohe Wert für den Stromverbrauch für die PtL-Herstellung in der UBA-Studie Treibhausgasneutrales Deutschland bzw. der zugrunde liegenden Studie von Öko-Institut 2013 ist zudem auf die Einbeziehung des deutschen Anteils am internationalen See- und Flugverkehr zurückzuführen, was über die derzeitigen offiziellen Bilanzierungsgrenzen sowie die Methodik anderer Studien hinausgeht.

Forschungsradar
Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr

Stromverbrauch zur Herstellung von synthetischen Brenn- oder Kraftstoffen (Power-to-Gas/Power-to-Liquid) im Jahr 2050 in Deutschland

Inwieweit Strom künftig in Wasserstoff, Methan oder Flüssigkraftstoffe umgewandelt werden soll, wird in den untersuchten Studien sehr unterschiedlich eingeschätzt. Die höchsten Werte finden sich in Szenarien mit ehrgeizigen Klimaschutzzielen, die mithilfe von Power-to-Gas (PtG) / Power-to-Liquid (PtL) auch eine klimafreundliche Energieversorgung des Verkehrs anstreben. Deutlich niedrigere Werte finden sich in Szenarien, die keine 100% Erneuerbare Energien im Stromsektor anstreben bzw. die sich ausschließlich auf den Speicherbedarf im Stromsektor fokussieren.



www.forschungsradar.de

Die Notwendigkeit von großvolumigen Speichern wie PtG ist stark vom Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung abhängig. Ab wann diese Speicher unabdingbar bzw. wirtschaftlich gegenüber anderen Flexibilitätsoptionen werden, ist derzeit umstritten. In einigen Studien wird von 60 Prozent EE an der Stromerzeugung ausgegangen, andere Autoren rechnen mit einem Anteil von 80 Prozent. Der Einsatz von chemischen Langfristspeichern wird entscheidend von der technologischen und damit der Kostenentwicklung abhängen. Langfristig kann es sein, dass Langzeitspeicher die Systemkosten reduzieren.

Strom zu Wärme: Wärmepumpen und Power-to-Heat

Stromüberschüsse können mit „Power-to-Heat“-Konzepten gezielt für die Wärmeerzeugung genutzt werden. Manche Studien beschreiben damit ausschließlich die zentrale Wärmeerzeugung mittels Elektrodenkesseln in Fernwärmenetzen (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015), andere (z.B. BEE/BET 2013 und Fraunhofer IWES/IBP 2015) meinen damit sowohl in Fernwärmenetze integrierte Elektrokessel, als auch zusätzliche Elektroheizstäbe in dezentralen Einzelheizungen (Brennwertkessel, Mini-KWK, Gas-Wärmepumpen). Manchmal wird der Begriff „Power-to-Heat“ auf alle Umwandlungsmöglichkeiten von Strom zu Wärme und Kälte bezogen und umfasst dann Elektroheizungen, Wärmepumpen, Kältemaschinen und Hochtemperatur-Öfen, oft ist er nicht genau definiert (z.B. Agora Energiewende 2014).

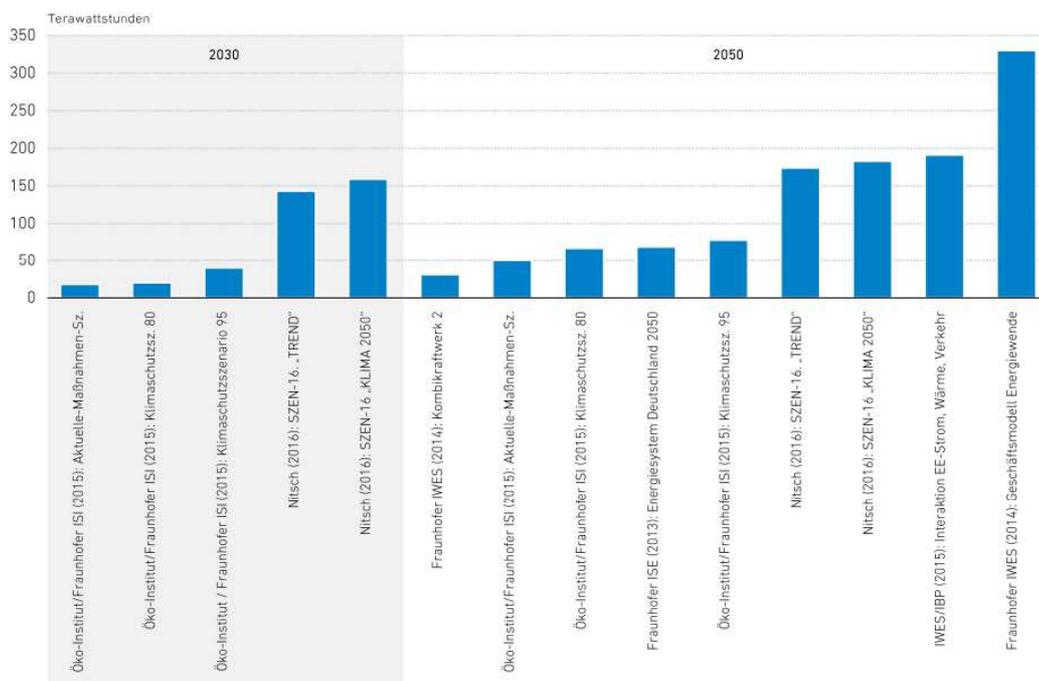
Die vorliegende Metaanalyse nimmt keine eigene Definition von Power-to-Heat vor, sondern vergleicht einfach die Strommengen, die in verschiedenen Studien zur Bereitstellung von Wärme angegeben werden. Neben dem Stromverbrauch durch zentrale und dezentrale Elektroheizungen und Wärmepumpen gehört in manchen Studien die industrielle Prozesswärme und auch Klimakälte dazu (z.B. Nitsch 2016; Fraunhofer IWES/IBP 2015), in anderen nicht. Die Angaben sind also nicht immer vergleichbar, geben aber einen Eindruck von der möglichen Größenordnung, die Strom künftig im Wärmebereich spielen könnte.

In Studien, die den Stromverbrauch für Wärmepumpen gesondert ausweisen, beträgt der Wert im Jahr 2030 zwischen 18 TWh (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015: Aktuelle Maßnahmen-Szenario und Klimaschutzszenario 80) und 37 TWh (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015: Klimaschutzszenario 95). Für das Jahr 2050 reicht die Bandbreite von 21 TWh (Fraunhofer IWES et al. 2014) bis 62 TWh (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015: Klimaschutzszenario 95).

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr

Szenarien zum Stromverbrauch für Wärmeanwendungen in Deutschland

Viele Studien rechnen mit einer deutlich zunehmenden Nutzung von Strom für Wärmezwecke. Ein Teil entfällt dabei auf Wärmepumpen, zudem sollen Stromüberschüsse durch Elektroheizungen bzw. Heizstäbe im Rahmen von Power-to-Heat-Konzepten, z. B. in Wärmenetzen verwertet werden. Die Werte in der Grafik sind nur eingeschränkt vergleichbar: In einem Teil der Szenarien ist auch der Strombedarf für Prozesswärme in Industrie und Gewerbe sowie für die Gebäudeklimatisierung eingerechnet (z.B. Nitsch 2016; IWES/IBP 2015), während z.B. die von Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015 ausgewiesenen Werte nur den Strom für Wärmepumpen und Power-to-Heat in Fernwärmenetzen umfassen, aber nicht für Klimatisierung und Prozesswärme.



Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

Insgesamt reicht die Bandbreite der für Wärmezwecke angegebenen Stromverbräuche im Jahr 2050 von 31 TWh (Fraunhofer IWES et al. 2014) bis 330 TWh (Fraunhofer IWES 2014). Die beschriebenen Unterschiede liegen auch darin begründet, dass die Studien nicht das gleiche System betrachten. So dient die strombasierte Wärmebereitstellung in der Studie „Kombikraftwerk 2“ in erster Linie dazu, den in einem 100 % erneuerbaren Stromsystem anfallenden Stromüberschuss sinnvoll zu nutzen. Der Wärmesektor wird hier nicht mitmodelliert. Studien, die auf eine insgesamt klimafreundliche Energieversorgung ausgerichtet sind bzw. gezielt die Interaktion zwischen den Sektoren untersuchen (z.B. Nitsch 2016; Fraunhofer IWES/IBP 2015) kommen daher zu sehr viel höheren Werten.

Strom im Verkehr: Schienenverkehr, Elektrofahrzeuge und Oberleitungs-LKW

Strom wird im Sektor Verkehr in unterschiedlicher Weise eingesetzt: Eine direkte Nutzung liegt vor allem im Schienenverkehr sowie in batteriebetriebenen Fahrzeugen vor. Fast alle betrachteten Szenarien rechnen für die Zukunft mit einer breiten Elektrifizierung des Straßenverkehrs. In Frage kommen dafür zum Beispiel reine Elektroautos, Plug-in-Hybride und Pedelecs. Für den Güterverkehr sehen einige Studien auch Oberleitungs-LKW vor (z.B. Öko-Institut 2014, Fraunhofer IWES/IBP 2015). Hierfür müsste allerdings eine neue Infrastruktur aufgebaut werden, deren Realisierbarkeit noch kontrovers beurteilt wird.

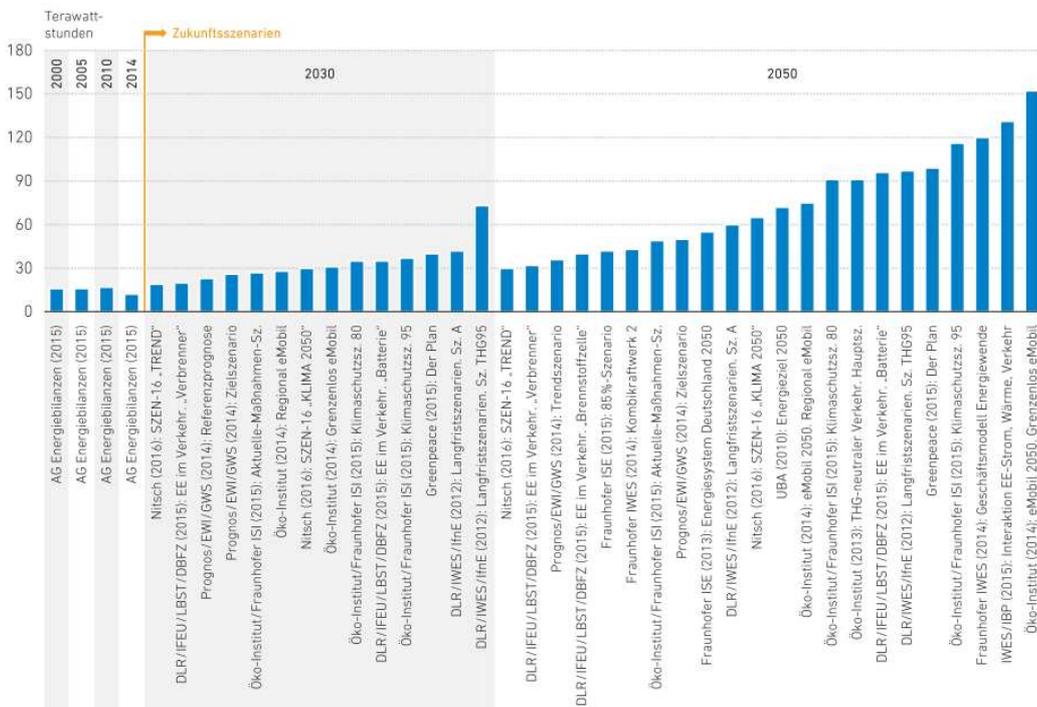
Indirekt wird Strom im Verkehr eingesetzt, wenn durch Elektrolyse EE-Wasserstoff, EE-Methan oder EE-Kraftstoff erzeugt und dann als Kraftstoff genutzt wird (PtG/PtL). Brennstoffzellen-Fahrzeuge haben einen Elektroantrieb, der mit Strom aus einer mit Ethanol oder Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle versorgt wird.

Forschungsradar Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr

Szenarien zur direkten Nutzung von elektrischem Strom im Verkehr in Deutschland

Die meisten Werte berücksichtigen den Endenergie-Stromverbrauch des Schienenverkehrs, von Elektrofahrzeugen sowie gegebenenfalls von Oberleitungs-LKW (z.B. Öko-Institut: eMobil 2050). Ausgeschlossen sind in der Regel die internationale Seeschifffahrt und der Luftverkehr. Die große Bandbreite der Werte illustriert die unterschiedlichen Annahmen, wie stark sich die Elektrifizierung im Verkehr durchsetzen kann.



www.forschungsradar.de

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

Bis zum Jahr 2030 reicht der direkte Stromverbrauch für den Verkehr in den hier ausgewerteten Szenarien von 19 TWh (Nitsch 2016: TREND) bis 73 TWh (DLR/IWES/IfnE 2012: THG 95). Im Jahr 2050 sind die Differenzen zwischen den unterschiedlichen Studien deutlich größer, die ausgewiesenen Stromverbräuche reichen von 30 TWh bis 152 TWh (Öko-Institut 2014). Grund hierfür sind im Wesentlichen unterschiedliche Annahmen zu den Anteilen der einzelnen Antriebe (Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen, Batterie) im Fahrzeugbestand. Die einzelnen Werte sind nicht immer direkt vergleichbar, da der Schienenverkehr nicht in allen Szenarien berücksichtigt wird, dennoch gibt der Überblick einen Eindruck vom potenziellen direkten Stromverbrauch im Verkehr.

Im Szenario „grenzenlos eMobil“ des Öko-Instituts 2014 wird langfristig sogar eine vollständige Elektrifizierung des Straßenverkehrs, inklusive des Straßengüterverkehrs skizziert. Zu beachten ist, dass hiermit keine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Szenarios einhergeht, sondern die damit verbunden Implikationen erörtert werden. Voraussetzung für eine solch ambitionierte Marktentwicklung wären demnach optimale Rahmenbedingungen in Bezug auf die technologische Entwicklung, die Ladeinfrastruktur, Nutzerakzeptanz und politische Weichenstellungen zugunsten der Elektromobilität. Obwohl die Studie auch erhebliche Veränderungen des Verkehrsverhaltens und Verkehrsverlagerungen unterstellt, würde sich in diesem Szenario im Jahr 2050 allein für die Elektromobilität ein Stromverbrauch von 152 TWh ergeben. Die Autoren weisen darauf hin, dass ein solcher Strombedarf des Verkehrs eine deutlich höhere Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien erfordern würde, als sie zum Beispiel im Szenario 2011 A der Studie von DLR/IWES/IfnE 2012 vorgesehen ist.

Für den gesamten Strombedarf des Verkehrssektors ist neben dem direkten Verbrauch für Elektrofahrzeuge und Schienenverkehr auch der Strom für PtG und PtL zu berücksichtigen. Hierzu stehen in den untersuchten Szenarien nur vereinzelt Informationen zur Verfügung. Oft ist unklar, welcher Anteil der PtX-Produktion im Verkehr eingesetzt wird und welcher Anteil zur Rückverstromung, für Hochtemperatur-Prozesswärme oder chemische Produkte genutzt wird. Umgekehrt gibt es auch den Fall, dass zwar die im Verkehr eingesetzte Menge an Wasserstoff oder Methan ausgewiesen wird, aber nicht der für die Produktion anfallende Strombedarf (z.B. DLR/IWES/IfnE 2012).

Aufgrund der höheren Energie- und Kosteneffizienz wird in den meisten Studien, die entsprechende Informationen ausweisen, mindestens bis 2030 der gesamte Stromverbrauch im Verkehr direkt für Elektromobilität und Schienenverkehr eingesetzt. Der über alle untersuchten Szenarien hinweg höchste Wert für den gesamten Stromverbrauch im Verkehrssektor (direkt und indirekt) liegt im Jahr 2050 bei 2.000 TWh (LBST 2016: PtL - High). DLR/IFEU/LBST/DBFZ 2015 beziffert das auf nationaler Ebene bestehende technische Stromerzeugungspotenzial aus Erneuerbaren Energien auf rund 1.000 TWh/a. Damit verbleibe nach Abzug des Stromverbrauchs der anderen Sektoren für den Verkehr eine Strommenge von 465 TWh, die direkt oder indirekt zur Produktion von Kraftstoffen genutzt werden könne. Je nach Studie und Szenario (z.B. in allen Szenarien von LBST 2016) könnte Deutschland daher für sehr hohe Anteile Erneuerbarer Energien in allen Nutzungssektoren auf den Import von Strom oder strombasierten Kraftstoffen angewiesen sein.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine klimaneutrale Energieversorgung setzt die Umstellung auf 100 Prozent Erneuerbare Energien voraus. Da Wind- und Solarenergie die höchsten Potenziale in Deutschland aufweisen, werden sie in Zukunft die Hauptenergieträger sein. Aufgrund der begrenzten Potenziale von erneuerbaren Wärmetechnologien und Biomasse wird Strom in ehrgeizigen Klimaschutzszenarien zunehmend zur „Primärenergie“ für den Wärme- und Verkehrssektor.

Um die Ziele der Energiewende zu erreichen, muss das Stromsystem künftig ein hohes Maß an Flexibilität aufweisen. Diese kann durch Netzausbau, Stromaustausch mit dem Ausland, Lastmanagement bei bestehenden und neuen Verbrauchern (z.B. Power-to-Heat), flexible Biogas- und KWK-Anlagen zu großen Teilen erreicht werden. Es besteht noch Unsicherheit darüber, wann und in welchem Umfang welche Flexibilitätsoptionen benötigt werden. Der Erfolg beim Netzausbau, die Kostenentwicklung von Speichertechnologien sowie das Zusammenspiel der verschiedenen Flexibilitätsoptionen werden schließlich die Einsatzreihenfolge und die Kosten des Gesamtsystems beeinflussen.

Neben den Kosten sind weitere Aspekte zu berücksichtigen. So müssen beispielsweise die wirtschaftlichen Herausforderungen der Energiebereitstellung beim Einsatz von PtX-Kraftstoffen mit den strukturellen Herausforderungen der Einführung von Oberleitungs-Lkw abgewogen werden. Auch politische Prioritäten spielen eine bedeutsame Rolle. Technologieauswahl und -ausbau unterscheiden sich je nachdem, ob die Prioritäten auf einer vom Ausland unabhängigen Energieversorgung oder einer weitgehenden Dekarbonisierung liegen.

In den ausgewerteten Szenarien wird oft angenommen, dass langfristig sämtliche Flexibilitätsoptionen notwendig und in der Zukunft auch wirtschaftlich werden. Hinsichtlich der zeitlichen Einordnung und Größenordnung der Optionen bestehen jedoch große Unterschiede.

Ausgewertete Literatur und Erläuterungen

- ▶ [AG Energiebilanzen \(2016\): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern. Stand: 28.1.2016](#)
- ▶ [Agora Energiewende \(2014\): Stromspeicher in der Energiewende](#)

Die Studie untersucht, wie viele Stromspeicher für die Energiewende in Deutschland gebraucht werden und wie sich die Kosten des Stromsystems entwickeln könnten. Dabei werden drei Zeitpunkte betrachtet, bei denen jeweils von einem unterschiedlich hohen Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromversorgung in Deutschland und Gesamteuropa ausgegangen wird. Für das Jahr 2023 wird ein Anteil von 43 Prozent in Deutschland und 23 Prozent in Gesamteuropa angenommen. Bis zum Jahr 2035 wird sich dieser Anteil jeweils um 17 Prozentpunkte (auf 60 Prozent, respektive 40 Prozent) erhöhen. Der dritte analysierte Zeitpunkt wird nicht datiert, der zugrunde gelegte Anteil von 90 Prozent Erneuerbaren Energien in Deutschland und 60 Prozent in Gesamteuropa könnte aber um das Jahr 2050 erreicht sein.

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

- ▶ [BEE/BET \(2013\): Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien](#)

Die Studie ist im Rahmen der Plattform Systemtransformation des Bundesverbands Erneuerbare Energie erarbeitet worden. Sie stellt die verschiedenen Möglichkeiten zum Ausgleich der zunehmend fluktuierenden Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien dar, bewertet sie hinsichtlich ihrer quantitativen Bedeutung und ordnet sie hinsichtlich der Umsetzung der Energiewende auf der Zeitachse ein. Zu den Projektpartnern gehören das Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE), Lichtblick und Enercon.

- ▶ [BMW/AGEE-Stat \(2016\): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Stand: Februar 2016](#)
- ▶ [Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt \(DLR\) / Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik \(IWES\) / Ingenieurbüro für neue Energien \(IfnE\) \(2012\): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global](#)

Die Studie stellt Ergebnisse von systemanalytischen Untersuchungen der Transformation in der Strom-, Wärme- und Kraftstoffherzeugung dar, die im Rahmen eines dreijährigen Forschungsvorhabens für das Bundesumweltministerium erarbeitet wurden. Dabei bauen die Arbeiten auf den in den vorangegangenen Jahren durchgeführten Projekten auf. In vier Zielszenarien, die von einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen von 80 % bis 2050 bzw. 95 % bis 2060 ausgehen, werden mögliche Entwicklungspfade des langfristigen Ausbaus der Erneuerbaren Energien aufgezeigt und die strukturellen und ökonomischen Wirkungen untersucht.

Mittels einer zeitlich dynamischen und teilweise räumlich aufgegliederten Simulation der zukünftigen Stromversorgung stellen die Autoren die Rolle von Lastausgleichsoptionen wie Flexibilisierung des konventionellen Kraftwerksparks, Stromnetzausbau, Lastmanagement und Einsatz von Stromspeichern dar. Die verschiedenen Entwicklungspfade stellen jeweils keine Prognose dar, sondern sind als in sich konsistente Wege zur Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele zu verstehen.

- ▶ [DLR/ifeu/Ludwig-Bölkow-Systemtechnik \(LBST\)/DBFZ \(2014\): Power-to-Gas \(PtG\) im Verkehr. Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven](#)

Die Kurzstudie dient der Beratung des Bundesverkehrsministeriums und ist Teil eines größeren Forschungsauftrags mit Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien. Sie soll aufzeigen, welche technisch-wirtschaftlichen Randbedingungen, Umwelteffekte und Potenziale für den Einsatz von PtG im Verkehrssektor bestehen. Zu diesem Zweck werden drei Szenarien zur Entwicklung des Straßenverkehrs und der Binnenschifffahrt bis zum Jahr 2050 modelliert.

In Szenario 1 (CNG/LNG ohne EE-Methan) wird von einer starken Durchdringung von CNG/LNG-Fahrzeugen bis im Jahr 2050 ausgegangen. Szenario 2 (CNG/LNG mit EE-Methan) zeigt die sukzessive Ersetzung von Erdgas durch EE-Methan auf. In Szenario 3 (EE-Methan + Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge) wird ein hoher Anteil von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb und Brennstoffzellenfahrzeugen modelliert. Auf Basis aktueller Verkehrsprognosen trifft die Studie unter anderem Aussagen zur Aufteilung der Fahrleistung auf die verschiedenen Verkehrsträger, zum Endenergieverbrauch, zum Strombedarf für die Kraftstoffproduktion und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen.

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

- ▶ [DLR/ifeu/LBST/DBFZ \(2015\): Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger](#)

Die Studie untersucht im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums technische Potenziale verschiedener erneuerbarer Energieträger (Biokraftstoffe, strombasierte Kraftstoffe und Elektromobilität) für den Einsatz im Verkehr und stellt sie Szenarien zum Energieverbrauch des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 gegenüber. Die Ergebnisse sollen ein erstes umfassendes Bild von dem in Verkehrsprognosen erwarteten Energiebedarf des Verkehrs und den Potenzialen geeigneter erneuerbarer Energieträger geben.

- ▶ [Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE \(2013\): Energiesystem Deutschland 2050. Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien](#)

Mithilfe einer Modellanalyse skizziert das Fraunhofer ISE, wie ein kostenoptimales Energiesystem aussehen könnte, das die energiebedingten CO₂-Emissionen bis 2050 um mindestens 80 Prozent senken würde. Das eingesetzte Modell REMod-D („Regenerative Energien Modell Deutschland“) umfasst die Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien in den Sektoren Strom, Wärme, Mobilität sowie Prozesse aus Gewerbe und Industrie.

- ▶ [Fraunhofer ISE \(2015\): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050](#)

In der Studie wird die System- und Kostenentwicklung einer mit den Klimaschutzziele kompatiblen Transformation des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2050 dargestellt. Anhand von 9 Szenarien werden verschiedene, kostenoptimierte Transformationspfade aufgezeigt. Die Szenarien basieren jeweils auf unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich des CO₂-Zielwerts (-80 Prozent, -85 Prozent, -90 Prozent), der energetischen Sanierung von Gebäuden, der Zusammensetzung des Fahrzeugsektors und der Geschwindigkeit des Ausstiegs aus der Kohlenutzung.

- ▶ [Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES \(2014\): Geschäftsmodell Energiewende. Eine Antwort auf das „Die-Kosten-der-Energiewende“-Argument](#)

In der im Rahmen der „Herculesprojekt Energiewende“-Aktivitäten des Fraunhofer IWES erarbeiteten Studie greifen die Autoren die Diskussion um die Kosten der Energiewende auf und vergleichen sie mit den möglichen Erlösen. Dafür stellen sie den notwendigen Investitionen in neue Energietechnologien die vermiedenen Kosten für fossile Brennstoffe der alten Energieinfrastruktur gegenüber. Im Ergebnis sei die Finanzierbarkeit des Gesamtprojekts Energiewende möglich. Auch eine erneuerbare Vollversorgung sei wirtschaftlich darstellbar. Das Kostenargument solle im Kontext klimapolitischer Entscheidungen korrigiert werden auf die Bilanzierung des Gesamtgeschäfts mit Kosten und Erlösen.

- ▶ [Fraunhofer IWES et al. \(2014\): Kombikraftwerk 2. Abschlussbericht](#)

In der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Studie wird ein Szenario betrachtet, in dem die Stromversorgung in Deutschland vollständig aus Erneuerbaren Energien bestritten wird. Zentrale Fragestellung der Studie ist, ob die für die

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

Versorgungssicherheit notwendige Netzstabilität in einem solchen System mit 100 Prozent Erneuerbaren Energien jederzeit gewährleistet werden kann. Der Wärme- und Verkehrssektor werden nur hinsichtlich der Bereitstellung flexibler Lasten für den Stromsektor betrachtet, aber nicht weitergehend modelliert.

- ▶ [Fraunhofer IWES / Agora Energiewende \(2015\): The European Power System in 2030: Flexibility Challenges and Integration Benefits. An Analysis with a Focus on the Pentalateral Energy Forum Region.](#)

Die im Auftrag von Agora Energiewende durch das Fraunhofer IWES erarbeitete Studie untersucht die Auswirkungen des Windenergie- und Photovoltaik-Ausbaus auf den Flexibilitätsbedarf sowie die Vorteile einer regionalen und europäischen Marktintegration. Die Studie beruht auf modellbasierten Szenarien des europäischen Stromsystems. Die Autoren fokussieren auf die Region des Pentalateralen Energieforums (PLEF), zu der Österreich, Belgien, Frankreich, Deutschland, Luxemburg und die Niederlande zählen (die Schweiz ist als Beobachter einbezogen).

- ▶ [Fraunhofer IWES / IAEW / SUER \(2014\): Roadmap Speicher. Speicherbedarf für Erneuerbare Energien – Speicheralternativen – Speicheranreiz – Überwindung rechtlicher Hemmnisse. Endbericht](#)

Die Studie ermittelt den Stromspeicherbedarf in Deutschland für verschiedene Szenarien, die sich hinsichtlich des Anteils der Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch unterscheiden. Dabei spielen der europäische Kontext und technisch-ökonomische sowie rechtliche Rahmenbedingungen eine Rolle. Im Einzelnen untersuchen die Autoren die erforderliche Speichergröße, die benötigten Speichertechnologien und Flexibilitäten sowie den Bedarf bezüglich der Standorte und bezüglich der Zeitachse. Weiterhin bewerten sie den bestehenden Rechts- und Förderrahmen und den diesbezüglichen Entwicklungsbedarf.

- ▶ [Fraunhofer IWES / Fraunhofer IBP / IFEU / SUER \(2015\): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr](#)

Der Bericht beschreibt die Ergebnisse eines Forschungsprojekts zu der Frage, wie das Zusammenspiel von Strom-, Wärme- und Verkehrssektor in Deutschland ausgestaltet werden muss, um die angestrebte Treibhausgasreduzierung von -80 % bis 2050 möglichst kostengünstig zu erreichen. Im Zentrum stehen die Herausforderungen der Abstimmung von Stromangebot und Stromnachfrage bei einem sehr großen Anteil fluktuierender Erneuerbarer Energien. Aus der Analyse der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Energienutzungsbereichen leiten die Forscher die notwendigen Entwicklungspfade (Roadmaps) für den Verkehrs- und Wärmesektor ab und entwickeln Vorschläge, um die als erforderlich identifizierten Schlüsseltechnologien in den Markt einzuführen.

- ▶ [Greenpeace \(2015\): Klimaschutz: Der Plan. Energiekonzept für Deutschland](#)

Die Studie von Greenpeace Deutschland beschreibt ein Szenario eines nahezu CO₂-freien Deutschlands bis 2050, in dem die Strom- und Wärmeversorgung auf 100 Prozent Erneuerbaren Energien beruht. Es handelt sich dabei um eine Aktualisierung der Veröffentlichungen „Plan B“ von 2007 bzw. „Klimaschutz Plan B 2050“ von 2009. Die Anpassungen der aktuellen Publikation berücksichtigen die seitdem fortgeschrittene Entwicklung der Energiewende in Deutschland sowie die Veränderung der energiepolitischen Rahmenbedingungen.

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

▶ [LBST \(2016\): Renewables in Transport 2050 – Europe and Germany](#)

Die im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) durchgeführte Studie entwickelt Kraftstoffszenarien für das Jahr 2050 auf der Basis von 100 Prozent Erneuerbaren Energien. Die Analysen berücksichtigen die Machbarkeit und Auswirkungen auf die aktuelle Entwicklung und künftige Nutzung von Verbrennungsmotoren im Transportsektor. Drei Kraftstoff- und Antriebsszenarien - eines für synthetische Kraftstoffe, ein weiteres für Elektromobilität und eine drittes mit einer ausgewogenen Mischung aller Ansätze - wurden definiert und dann mit zwei verschiedenen Nachfrageszenarien ("hoch", "niedrig") für den Verkehrssektor in Deutschland und der EU-28 modelliert.

▶ [Nitsch, Joachim \(2016\): SZEN-16. Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Eckdaten des Jahres 2014](#)

Die für den Bundesverband Erneuerbare Energie erstellte Kurzexpertise modelliert drei Szenarien zur möglichen Entwicklung der Energieversorgung für Strom, Wärme und Mobilität in Deutschland. Ausgehend vom Stand Ende 2015 beschreibt das Szenario SZEN-16 „TREND“ die vom Autor erwarteten Effekte der derzeit formulierten energiepolitischen Aktionsprogramme und Planungen. Gegenüber der Vorjahresstudie [SZEN-2015] habe sich die Ausgangslage verschlechtert. Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen seien leicht gestiegen und die Anreize für einen Umbau der Energieversorgung seien aufgrund der sehr niedrigen Preise für fossile Energien und Börsenstrom sowie geringe CO₂-Preise gesunken.

Im Vergleich dazu beschreibe das Szenario SZEN-16 „KLIMA 2050“, wie ein im Sinne des Klimaschutzes erfolgreicher Umbau der deutschen Energieversorgung aussehen könne, durch den sich der Ausstoß an Treibhausgasen bis 2050 um 95 % reduziere. Dazu sei eine 100%ige Energieversorgung auf Basis Erneuerbarer Energien erforderlich. Strebe man an, wie bei der Pariser Klimakonferenz (COP 21) angekündigt, die globale Erwärmung unter der 2°C- Marke zu halten, müsse Deutschland seine Energieversorgung bereits bis 2040 praktisch vollständig klimaneutral machen. Diese Entwicklung stelle SZEN-16 „KLIMA 2040“ dar.

▶ [Öko-Institut \(2014\): eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz](#)

Die mit Unterstützung des Bundesumweltministeriums durchgeführte Studie beleuchtet anhand einer Szenarienanalyse einen möglichen Durchbruch der Elektromobilität und die damit verbundenen Wechselwirkungen zwischen Verkehrssektor und Energiewirtschaft. Im Szenario „Grenzenlos eMobil“ werden ein weiteres Wachstum der Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr und keine großen Veränderungen im Modal Split unterstellt. Der Ausstoß an Treibhausgasen wird hier vor allem durch starke Effizienzsteigerung und eine hohe Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen (inklusive Oberleitungen im Straßengüterverkehr) erreicht. Das Szenario „Regional eMobil“ nimmt hingegen eine stärkere Änderung im Verhalten an, sodass sich die Verkehrsmittelwahl zugunsten des öffentlichen Verkehrs verändert und sich die Verkehrsleistung reduziert.

▶ [Öko-Institut/Fraunhofer ISI \(2015\): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht](#)

Die Studie ist die erste von drei geplanten Aktualisierungen des im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellten Klimaschutzszenarios 2050. Im Zentrum steht die Frage, wie sich eine Fortschreibung der aktuellen Politik auf die klimapolitischen Zielsetzungen auswirken würde und welche Maßnahmen

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

und Strategien notwendig wären, um bis 2050 eine darüber hinausgehende Treibhausgasreduzierung um 80 % oder 95 % gegenüber 1990 zu erreichen. Des Weiteren erörtern die Autoren für die verschiedenen energie- und klimapolitischen Entwicklungen jeweils, welche Kosten-Nutzen-Wirkungen für Verbraucher und Volkswirtschaft zu erwarten wären und welche Verteilungseffekte entstehen könnten. Das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) bildet dabei die Fortschreibung aller bis Oktober 2012 ergriffenen Maßnahmen ab. In den beiden anderen Szenarien wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 Prozent (Klimaschutzszenario 80), respektive 95 Prozent (Klimaschutzszenario 95) modelliert.

► [Öko-Institut \(2013\): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr](#)

Bei dem Dokument handelt es sich um den Abschlussbericht zu einem vom Umweltbundesamt (UBA) beauftragten Forschungsvorhaben im Kontext des Projekts „Treibhausgasneutrales Deutschland“. Die Ergebnisse stellen die Grundlage dar für die gleichnamige Veröffentlichung des UBA aus dem Jahr 2014. Ein „Basisszenario“ schätzt zunächst ab, wie sich Endenergiebedarf und Treibhausgasausstoß des deutschen Verkehrssektors ohne politische Eingriffe voraussichtlich entwickeln würden. Dem steht ein Zielszenario („Hauptszenario“) gegenüber, das neben dem Einsatz von elektrischen Antrieben vor allem stromerzeugte Flüssigkraftstoffe vorsieht. Der Einsatz von Biokraftstoffen ist in diesem Szenario hingegen nicht vorgesehen. Unter der Voraussetzung einer vollständig auf Erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung würde dadurch ein nahezu treibhausgasneutraler Verkehrssektor erreicht werden.

► [Prognos/EWI/GWS \(2014\): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose](#)

Im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums analysiert die Studie die mögliche Entwicklung der Energiemärkte, des Endenergieverbrauchs, den Treibhausgasemissionen und der Erneuerbaren Energien in Deutschland unter Berücksichtigung aktueller energie- und klimapolitischer Vorgaben. Dabei bildet das Trendszenario die Fortschreibung aktueller Entwicklungen in den Bereichen Politik, Technologie und Marktdurchdringung bis im Jahr 2050 sowie eine Verschärfung der Energie- und Klimaschutzpolitik ab. Demgegenüber steht das Zielszenario, in dem die im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegten Ziele durch die Umsetzung verschiedener Maßnahmen erreicht werden. Es zeigt auf, was erforderlich wäre, um die von der Bundesregierung im Energiekonzept definierten Ziele zu erreichen und unterstellt, dass den energie- und klimapolitischen Zielen in Deutschland Vorrang eingeräumt und bestehende Hemmnisse mithilfe politischer Maßnahmen überwunden werden können. Wichtige Rollen spielen demnach die Steigerung der Energieeffizienz, neue und weiterentwickelte Technologien sowie die Reduktion der Erzeugung aus CO₂-intensiven Kraftwerken. Auch die gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen werden analysiert.

► [Öko-Institut \(2014\): eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz](#)

Die Studie geht der Frage nach, wie sich eine zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs hinsichtlich langfristiger Klimaschutzziele bis 2050 auswirken könnte. Den beiden betrachteten Szenarien „Grenzenlos eMobil“ und „Regional eMobil“ liegen jeweils unterschiedliche Annahmen bezüglich Verkehrsnachfrage und Verkehrsverhalten zugrunde.

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

▶ [OTH/FENES/Energy Brainpool \(2015\): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland](#)

Im Auftrag von Greenpeace Energy untersuchen die Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher der OTH Regensburg (FENES) und die Analysten von Energy Brainpool die Notwendigkeit und die wirtschaftlichen Auswirkungen von Windgas (das auf Basis von Windstrom durch Elektrolyse gewonnene Gas) in einem vollständig erneuerbaren Stromsystem. Die Modellierungen basieren auf dem von Energy Brainpool entwickelten Modell Power2Sim. Grundlage für die Berechnung des Großhandelsstrompreises im Modell ist die Zusammenführung der sich unter den Modellannahmen ergebenden Angebots- und Nachfragekurven. Die Autoren beschäftigen sich mit der Frage, ab wann Windgas als Stromspeicher für die Versorgungssicherheit im Stromsystem erforderlich wird und wie sich die Technologiekosten entwickeln. Des Weiteren vergleichen sie die Windgastechologie mit anderen Flexibilitätsoptionen, erörtern weitere Anwendungsmöglichkeiten für Windgas außerhalb des Stromsektors und die daraus zu ziehenden Konsequenzen für die Markteinführung.

▶ [r2b energy advisors / Umweltbundesamt \(UBA\) \(2016\): Strommarktdesign der Zukunft](#)

Im Auftrag des Umweltbundesamts analysiert die Studie die für den weiteren Umbau des Stromsystems geeignete Ausgestaltung des Strommarktdesigns. Grundlagen dafür sind eine ausführliche Analyse empirischer Daten und die Modellierung von Zukunftsszenarien auf Basis der energiepolitischen Zielsetzungen bis 2030. Aus nationaler sowie länderübergreifender Perspektive modellieren die Autoren den mit dem zunehmenden Ausbau der (fluktuierenden) Erneuerbaren Energien einhergehenden Flexibilitätsbedarf sowie zur Verfügung stehenden Flexibilitätsoptionen. Sie zeigen die veränderten Anforderungen an die verschiedenen Akteure im deutschen Stromsystem auf und erörtern die Gründe für technische Inflexibilität und andere Hemmnisse zur Erschließung von Flexibilitäten. Auf dieser Basis leiten sie die für die weitere Transformation des Energiesystems notwendigen Änderungen an den Rahmenbedingungen ab.

▶ [UBA \(2014\): Treibhausgasneutrales Deutschland 2050](#)

Ziel der Studie ist es, eine technisch machbare Möglichkeit aufzuzeigen, wie die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2050 um 95 Prozent reduziert werden können. Das betrachtete Zielszenario „Treibhausgasneutrales Deutschland“ (THGND 2050) geht daher davon aus, dass die Stromversorgung zu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen erfolgt und Effizienzpotenziale ausgeschöpft werden. Im Hinblick auf den Verkehr basiert die Studie auf den Erkenntnissen von Öko-Institut (2013). Die in den Abbildungen der Metaanalyse erfassten Aussagen stammen daher aus der Studie des Öko-Instituts, gelten aber quasi gleichermaßen für UBA (2014).

▶ [UBA \(2010\): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen](#)

Das UBA zeigt mit dem Szenario „Regionenverbund“ aus technischer Perspektive, dass der Strombedarf in Deutschland im Jahr 2050 vollständig durch Erneuerbare Energien gedeckt werden kann, und zwar weitgehend aus heimischen Kapazitäten. Der Beitrag der Biomasse wird dabei aus Nachhaltigkeitsgründen auf Abfallbiomasse beschränkt. Das technisch-ökologische Potenzial der Erneuerbaren Energien in Deutschland werde dabei zu etwa 75 Prozent genutzt. Die Studie ist eine wesentliche Grundlage für das Szenario „Treibhausgasneutrales Deutschland“ des UBA von 2014 und daher weiter aktuell.

Metaanalyse: Flexibilität durch Sektorkopplung

► [ÜNB \(2015\): Netzentwicklungsplan Strom 2025, Version 2015. Erster Entwurf](#)

Im Netzentwicklungsplan Strom bilden die deutschen Übertragungsnetzbetreiber die weitere Entwicklung des Stromsystems in den nächsten zehn bzw. 20 Jahren ab unter Berücksichtigung des im Sommer 2014 novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG). Vier der Szenarien bilden die Netzentwicklung bis im Jahr 2025 ab, zwei weitere reichen bis ins Jahr 2035 (B1 2035, B2 2035). Der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung beträgt im Szenario B1 59,9 Prozent und 67,3 Prozent im Szenario B2 (jeweils im Jahr 2035).

Bearbeiter:

Dr. Almut Kirchner, Sylvie Koziel, Natalie Mayer (Prognos AG) / Claudia Kunz (Agentur für Erneuerbare Energien)

Weitere Informationen und Grafiken finden Sie im Forschungsradar Energiewende: www.forschungsradar.de.

Kontakt:

Agentur für Erneuerbare Energien e.V.

Claudia Kunz

Projektleiterin Forschungsradar Energiewende

Tel: 030-200535-43

E-Mail: c.kunz@unendlich-viel-energie.de

www.unendlich-viel-energie.de