



Sektorenkopplung

Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr

Zusammenfassung

In diesem Hintergrundpapier wird der Klimanutzen verschiedener Optionen zur Nutzung von Strom zur Wärmeerzeugung und von Strom in der Mobilität mit folgenden Ergebnissen diskutiert:

- Mit Blick auf die Klimaziele bis 2050 wird die vollständige Substitution fossiler Brenn- bzw. Kraftstoffe in diesen Sektoren voraussichtlich nur durch den zusätzlichen Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien (EE) erreicht.
- Prioritär sind in den Sektoren Wärme und Verkehr Maßnahmen zur Verringerung des Endenergieverbrauchs durch Effizienzsteigerungen und Verbrauchsvermeidung erforderlich, um die Klimaziele zu erreichen. Sie haben bereits kurz- bis mittelfristig ein hohes Treibhausgas (THG)-Vermeidungspotential.
- Annahmen zum Umfang der erforderlichen zusätzlichen EE-Strombereitstellung für einen weitgehend strombasierten Wärme- und Verkehrssektor variieren stark. Da Strom aus EE nicht unbegrenzt zur Verfügung steht, ist davon auszugehen, dass die Sektorenkopplung nur dann ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, wenn der Endenergiebedarf der Sektoren insgesamt um 40 bis 60 Prozent zurückgeht.
- Um die Substitution fossiler Brenn- bzw. Kraftstoffe durch strombasierte Anwendungen zwischen 2030 und 2050 schrittweise zu ermöglichen, ist eine erhebliche Senkung der CO₂-Emissionen des verwendeten Stroms erforderlich. Dafür muss der Ausbaupfad für EE deutlich angehoben und die Kohleverstromung zurückgeführt werden.
- Eine Nutzung von Strom aus EE in den Sektoren Wärme und Verkehr ist unter Klimaschutzaspekten nur dann sinnvoll, wenn damit mehr CO₂ vermieden wird, als im Strommix emittiert wird (2015 waren es 565 Gramm CO₂/kWh). Gegenwärtig ergibt sich daher nur für wenige Anwendungen ein Klimanutzen:
 - » Im **Gebäudebereich** erreichen strombetriebene **Wärmepumpen**, auch in regenerativ gespeisten Wärmenetzen, Wirkungsgrade von etwa 300-500 Prozent. Der Ersatz von Ölheizungen durch Wärmepumpen kann schon im heutigen Strommix mit knapp einem Drittel EE etwa 14 Mt CO₂ einsparen. Ein Austausch von vorhandenen Gaskesseln durch Wärmepumpen kann weitere 14 Mt einsparen. Bei steigenden Anteilen EE im Strommix steigt auch der Einspareffekt.
- » Die direktelektrische Nutzung von Strom zu Wärme in **Elektrodenkesseln** ist mit dem heutigen Strommix noch nicht sinnvoll: Durch die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom wird hier doppelt so viel CO₂ emittiert wie durch die Bereitstellung der gleichen Energiemenge über fossile Energien. Nur andernfalls abgeregelter EE-Strom mit sehr geringem CO₂-Emissionsfaktor kann dafür eingesetzt werden.
- » Im **Verkehrsbereich** kann heute mit **batterieelektrischen Fahrzeugen** im Pkw-Segment eine CO₂-Bilanz erreicht werden, die mit effizienten Benzin- oder Dieselantrieben vergleichbar ist. Unter den Bedingungen des heutigen Strommixes kann die batterieelektrische Mobilität aber noch keinen signifikanten Beitrag zur Reduktion der Verkehrsemissionen leisten. Mit sinkender CO₂-Fracht der Strombereitstellung kann sich die Bilanz zugunsten des Elektroantriebes verbessern.
- » Die Nutzung von Strom im Verkehrssektor erfolgt besonders effektiv im **Schieneverkehr**. Die Verlagerung von Teilen des motorisierten Personen- und Güterverkehrs auf die Schiene bietet erhebliche THG-Vermeidungspotentiale. So kann theoretisch etwa die Steigerung des Schienenanteils an der Güterverkehrslast auf 25 Prozent Einsparungen in Höhe von etwa 8,6 Mt CO₂ ermöglichen. Allerdings sind hierfür durch regulative Anpassungen die Wettbewerbsbedingungen zu verbessern sowie Investitionen in den Ausbau der Infrastruktur erforderlich.
- » Aufgrund des hohen Energieaufwands der Herstellung sowie geringerer Wirkungsgrade gegenüber der direkten Nutzung von Strom ist der Einsatz synthetischer Kraft- bzw. Brennstoffe, die mittels Verfahren wie **Power-to-Gas (PtG)** und **Power-to-Liquid (PtL)** hergestellt werden, erst ab EE-Anteilen von nahezu 100 Prozent bei der Strombereitstellung ökologisch sinnvoll. Als Flexibilitäts- bzw. Speicheroption sind PtG und PtL aber möglicherweise schon in einem Stromsystem mit EE-Anteilen von 60 bis 80 Prozent von Bedeutung. Mit dem Einsatz strombasierter Kraftstoffe steigt die erforderliche EE-Stromerzeugung überproportional an. Angesichts begrenzter Verfügbarkeit von EE-Strom sollten sie daher nur dort zur Anwendung kommen, wo die direkte Nutzung erneuerbarer Energien bzw. erneuerbaren Stroms nicht möglich ist. Da strombasierte Kraftstoffe aber eine wesentliche Rolle bei der Dekarbonisierung der Sektoren Wärme und Verkehr spielen könnten, ist die Technik weiterzuentwickeln sowie ein Einstieg in die Nutzung ab 2030 sinnvoll.

Einleitung

Die Beschlüsse der Klimakonferenz in Paris vom Dezember 2015 erfordern eine Reduktion der THG-Emissionen um 95 Prozent bis 2050. Neben dem Stromsektor müssen daher bis 2050 auch die Energieverbrauchssektoren Wärme und Verkehr treibhausgasneutral werden. Dazu müssen zunächst Effizienzmaßnahmen ergriffen werden, um den bisherigen Energieverbrauch in allen drei Sektoren deutlich zu reduzieren. Der verbleibende Energiebedarf wird zum größten Teil aus erneuerbaren Energien gedeckt werden müssen. Neben den direkt einsetzbaren Energien wie Solarthermie oder Biomasse ist dazu erneuerbarer Strom vor allem aus Sonne und Wind erforderlich.

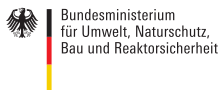
Hierfür müssen die Sektoren Wärme und Verkehr mit dem Stromsektor „gekoppelt“ werden. Sektorenkopplung wird außerdem als Flexibilitätsoption zur Stabilisierung eines Stromsystems mit großen Anteilen fluktuierender Stromerzeugung diskutiert.

Das vorliegende Hintergrundpapier beschreibt die Voraussetzungen und Chancen der Kopplung der Bereiche Wärme und Verkehr mit dem Stromsektor.

Folgende Fragen werden betrachtet:

- Welche CO₂-Reduktionspotentiale lassen sich durch eine Sektorenkopplung Strom – Wärme und Strom – Verkehr realisieren?
- Welche Technologien zur Sektorenkopplung sind wann für die CO₂-Reduktion einsetzbar?
- Welche Bedeutung hat das für den Ausbau der erneuerbaren Energien?
- Welchen Beitrag leistet Sektorenkopplung als Flexibilitätsoption?

Ziel ist es, eine Diskussionsgrundlage zu schaffen und Hinweise für eine unter Klimaschutzgesichtspunkten sinnvolle Sektorenkopplung zu geben. Am Ende der Kapitel werden Handlungsempfehlungen für die Politik formuliert, um die Sektorenkopplung voranzubringen.



Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen KII 5 (K) – 42230/1.2.5 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Klimaschutzpotential der Sektorenkopplung im Wärmesektor

Ausgangslage und Ziele im Wärmesektor

Der Wärmesektor (Industrie, Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistung) macht etwa 50 Prozent am Endenergieverbrauch und rund 32 Prozent an den energiebedingten THG-Emissionen in Deutschland aus. Als größter der drei Verbrauchssektoren (Strom, Wärme, Verkehr) kommt dem Wärmesektor damit eine Schlüsselrolle beim Erreichen der deutschen Klimaschutzziele zu.

Für den Wärmesektor insgesamt hat die Politik keine spezifischen Ziele zur Reduktion des Endenergieverbrauchs oder des Anteils der erneuerbaren Energien vorgegeben. Nur im Gebäudesektor¹ hat sich die Bundesregierung klare Ziele gesetzt, in denen sie einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 anstrebt. Folglich fokussieren sich die vorliegende Bestandsaufnahme und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen auf den Gebäudesektor.²

Der Primärenergiebedarf von Gebäuden soll durch eine Kombination aus Energieeinsparung und dem Einsatz erneuerbarer Energien bis 2050 um 80 Prozent gegenüber 2008 gesenkt werden.³ Mit Blick auf das 1,5 Grad-Ziel, das bei der Klimakonferenz von Paris festgelegt wurde und wonach eine sektorübergreifende THG-Minderung von 95 Prozent bis 2050 (gegenüber 1990) nötig ist, muss die Zielsetzung für den Gebäudebereich sogar noch ambitionierter ausfallen.⁴ Sieht man von mit Risiken und Zielkonflikten behafteten Technologien wie Carbon Capture and Storage (CCS) oder von einer möglichen Reduktion von Emissionen aus Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) für die Kalkulation künftiger Emissionsbudgets ab,

dann bedarf es sogar einer Senkung des Primärenergiebedarfs um 100 Prozent bis 2050. Das entspricht in absoluten Zahlen einer Reduktion des nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauchs im Gebäudesektor von ca. 1.200 TWh (640 TWh für Wohngebäude, 560 TWh für Nichtwohngebäude) im Jahr 2008 auf 0 TWh (für Wohn- und Nichtwohngebäude) bis 2050.⁵

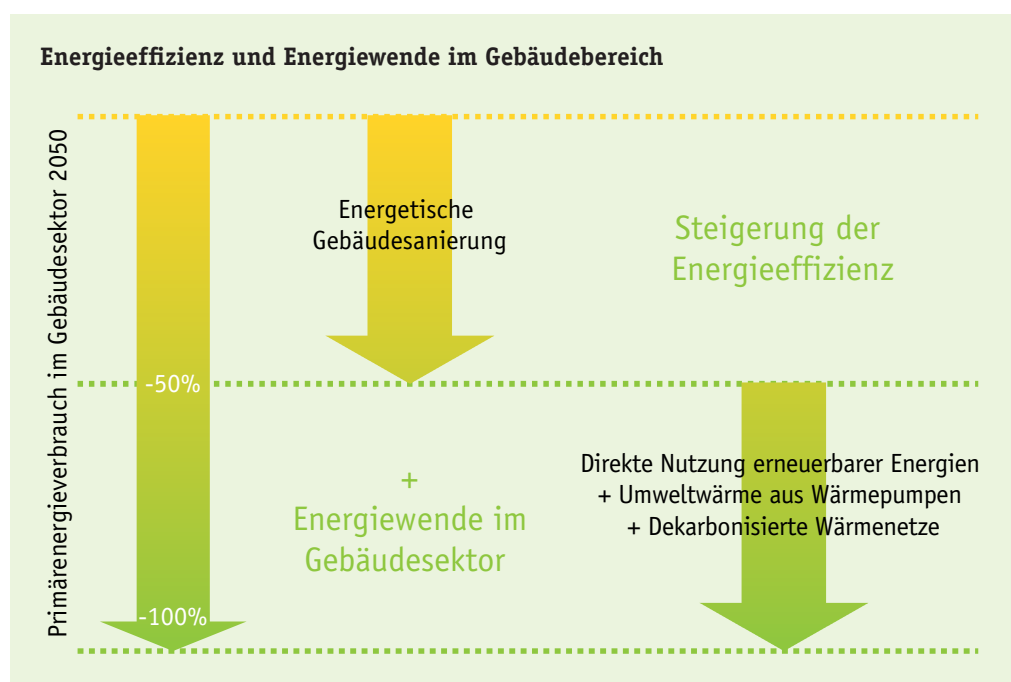
Dieses Ziel kann nur mit sehr ambitionierten Energieeffizienzmaßnahmen und einer ausschließlich auf erneuerbaren Energien basierenden Wärmeversorgung erreicht werden.

Zwar konnten Steigerungen bei der Energieeffizienz und damit eine Senkung des Endenergieverbrauchs seit 1990 erzielt werden, allerdings stagnieren die Werte in den letzten Jahren und die Sanierungsquote liegt bei knapp einem Prozent. Die erneuerbaren Energien haben im Wärmesektor derzeit lediglich einen Anteil von etwa 13 Prozent. Der Rest wird immer noch von fossilen Energieträgern gedeckt. Damit wird deutlich, dass im Wärmesektor noch erhebliche THG-Reduktionspotentiale liegen.

Energieeffizienz als Grundlage für Sektorenkopplung

Steigerungen der Energieeffizienz sind die Grundvoraussetzung für das Erreichen der Klimaziele und die Kopplung der Sektoren Strom und Wärme. Zum einen ist die Verringerung des Primärenergiebedarfs um 100 Prozent im Gebäudebereich ohne Effizienzsteigerungen nicht zu erreichen. Zum anderen begrenzen

Abbildung 1. Reduzierung des Primärenergieverbrauchs durch Energieeffizienz und Energiewende im Gebäudebereich.
Quelle: eigene Darstellung



Effizienzsteigerungen den Mehrbedarf an erneuerbarem Strom (EE-Strom für eine Dekarbonisierung im Wärmesektor) auf ein erforderliches Mindestmaß. Andernfalls würde sich der zusätzliche Strombedarf drastisch erhöhen und aufgrund von Flächen- und Akzeptanzproblemen außerhalb der realisierbaren Kapazitäten liegen.

Je nach Prioritätensetzung von Effizienz und erneuerbaren Energien zur Zielerreichung einer THG-Neutralität variiert die installierte elektrische Leistung von Strom bis 2050.⁶ Damit wird erneut deutlich, dass die klimafreundlichste Kilowattstunde diejenige ist, die nicht verbraucht wird.

Dies sollte sich auch in der politischen Priorisierung zur Weiterentwicklung der Energiewende widerspiegeln: Dem Prinzip „Efficiency First“ folgend, sollten zunächst Möglichkeiten zur Energieeinsparung geprüft werden. Sind diese ausgeschöpft, sollte auf die direkte Nutzung erneuerbarer Energien und erst als letzte Option auf erneuerbaren Strom zur Wärmeengewinnung mittels Sektorenkopplung gesetzt werden (vgl. Abbildung 1).⁷

Verschiedene Trend- und Zielszenarien weisen beim Potential der Energieeffizienz eine Bandbreite von 40 bis 60 Prozent Einsparung am Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser bis 2050 (gegenüber 2008) auf. Eine höhere Einsparung ist aus verschiedenen Gründen nicht möglich: Denkmalschutz sowie architektonische und technische Dämmrestriktionen im Bestand (konstruktiv, bauphysikalisch, geometrisch) stehen dem im Wege.⁸ Da Bestandsgebäude gegenüber Neubauten einen wesentlich höheren Anteil am gesamten Gebäudebestand aufweisen, kommt ihnen für die Energieeinsparung eine größere Bedeutung zu.⁹ In der praktischen Umsetzung würde ein ambitioniertes Effizienzscenario eine Sanierungsrate von durchschnittlich zwei Prozent – also eine Verdoppelung der aktuellen Sanierungsrate – voraussetzen. Ausgehend von einem Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in 2008 von 889 TWh, wäre damit eine Reduktion auf 445 TWh zu erreichen.

Fest steht: Je größer die Energieeffizienz desto realistischer die Deckung des restlichen Wärmebedarfs mit erneuerbaren Energien. Klar ist aber auch, dass die erzielbare Primärenergieeinsparung durch Effizienzmaßnahmen begrenzt und ein treibhausgasneutraler Gebäudebestand nicht allein durch eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs zu erreichen ist.

Direkte Nutzung von erneuerbaren Energien (Biomasse, Solarthermie, Geothermie)

Aufgrund des begrenzten Einsparpotentials bei der Primärenergie durch Effizienzmaßnahmen bedarf es als nächsten Schritt der direkten Nutzung erneuerbarer Energien für die Wärmeversorgung im Gebäudebereich.

Objektnahe, direkte EE-Nutzung

Der potentielle Beitrag der objektnahen Solarthermie zum Wärmebedarf der Gebäude liegt 2050 nach Prognosen zwischen 53 und 69 TWh pro Jahr¹⁰. Restriktionen der Technik bestehen durch die Ausrichtung und Belastbarkeit der Dachflächen, das saisonale Angebot und den begrenzten solaren Deckungsgrad.

Das Potential der Biomasse liegt 2050 bei der dezentralen Nutzung zwischen 69 und 139 TWh pro Jahr.¹¹ Die Menge an Reststoffen ist begrenzt und auch für den Anbau von Biomasse bestehen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten Restriktionen. Zudem gibt es Nutzungskonkurrenzen mit anderen, schwer elektrifizierbaren Anwendungen sowie der Nutzung bei industrieller Prozesswärme mit hohen Temperaturen. Biomasse muss also möglichst effizient in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen genutzt werden, die gleichzeitig Strom und Wärme auf einem hohen Temperaturniveau bereitstellen. Damit verschiebt sich die Nutzung von Biomasse immer mehr von dezentralen Einzelheizungen zur netzgebundenen Versorgung bzw. industriellen Biomasseanlagen.¹² Das Potential der direkten, objektnahen Nutzung erneuerbarer Energien liegt also zwischen 122 TWh und 208 TWh. Weitere 237 bis 323 TWh Endenergieverbrauch sind zu dekarbonisieren.

Direkte Nutzung von erneuerbaren Energien in Wärmenetzen

Die begrenzten Kapazitäten der objektnahen, direkten Nutzung von erneuerbaren Energien müssen durch dekarbonisierte (Nah- und Fern-)Wärmenetze ergänzt werden. Mögliche Optionen der direkten Nutzung von erneuerbaren Energien in Wärmenetzen sind (Tiefen-)Geothermie, solarthermische Großanlagen, Biomasse und industrielle Abwärme. Leider wurden die technisch-ökonomischen Potentiale von Wärmenetzen noch nicht ausreichend detailliert untersucht. Schätzungen gehen von einem Wärmenetzpotential von 100 bis 140 TWh aus. Im Jahr 2013 stammten lediglich rund 15 TWh des Fernwärmeverbrauchs aus erneuerbaren Energien. Demnach müsste der EE-Anteil (Biomasse, Tiefengeothermie etc.) in Wärmenetzen um das Sieben- bis Zehnfache ansteigen, damit diese dekarbonisiert werden.¹³

Hier bedarf es aber noch umfangreicher Potentialeinschätzungen für solarthermische Großanlagen und Tiefengeothermie. Gerade für die Tiefengeothermie braucht es günstige geologische Gegebenheiten, die nur an wenigen Orten in Deutschland vorhanden sind. Damit scheint ihr Erschließungspotential, neben weiteren Faktoren wie Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz, limitiert zu sein. Auch bei der Solarthermie wird das Ausbaupotential von der Wissenschaft als begrenzt eingestuft.¹⁴

Insgesamt reichen die Potentiale der objektnahen und netzgebundenen, direkten Nutzung erneuerbarer Energien in Kombination mit Effizienzmaßnahmen nicht für eine Dekarbonisierung des Gebäudebereichs aus. **Die zu deckende Lücke liegt zwischen 212 TWh und 308 TWh (davon ca. 85 bis 125 TWh Wärmenetze).**

Nutzung von EE-Strom im Wärmesektor

Um den verbleibenden Energiebedarf zu dekarbonisieren, gelten im Bereich der Niedertemperatur elektrische Wärmepumpen als die Schlüsseltechnologie für die Integration von erneuerbarem Strom im Wärmesektor.¹⁵ Diese können sowohl dezentral in den Gebäuden als auch zentral zur Speisung von Wärmenetzen eingesetzt werden. In nahezu allen bestehenden Szenarien werden Wärmepumpen bis zum Jahr 2050 zur wichtigsten Wärmequelle in Einzelgebäuden. Die Technologie ist bereits vergleichsweise ausgereift, wobei weiterhin mit Effizienzsteigerungen durch technologischen Fortschritt zu rechnen ist.¹⁶ Mit voranschreitender Transformation des Energiesystems sagen Prognosen und Studien einen notwendigen Anteil von Wärmepumpen an allen Heizungsanlagen von über 80 Prozent voraus.¹⁷

Wärmepumpen können verschiedene Quellen von Umgebungswärme nutzen: Luft, Grundwasser oder das Erdreich. Dabei bestehen Unterschiede hinsichtlich ihrer Effizienzgrade. Die Effizienz von Wärmepumpen ist abhängig von ihrer Jahresarbeitszahl (JAZ). Sie beschreibt das Verhältnis von eingesetzter elektrischer Energie zur Nutzenergie in Form von Wärme über ein Jahr. Die JAZ ist abhängig von der Art der Wärmepumpe, den berücksichtigten Qualitätsstandards, der Einstellung, dem Anwendungsgebiet und der Temperatur der Wärmequelle. Sole/ Wasser-Wärmepumpen erreichen in der Regel höhere Effizienzwerte als Luft/ Wasser-Wärmepumpen. Die Prognosen über zukünftige JAZ reichen von

2,9 bis 4 bei Luft/ Wasser-Wärmepumpen und von 3,1 bis 4,9 bei Sole/ Wasser-Wärmepumpen.²⁰

Großwärmepumpen können zur Versorgung über Wärmenetze dienen. Dafür müssen bestehende Wärmenetze transformiert werden: Die Hochtemperaturnetze müssen an die Niedertemperatur angepasst werden.²¹ Für eine flächendeckende erneuerbare Wärmeversorgung ist eine Nachverdichtung bestehender Wärmenetze und der Bau neuer Netze dort, wo sie zur Erschließung von EE-Wärme erforderlich sind, voranzutreiben.

CO₂-Vermeidungspotentiale

Eine vollständige Dekarbonisierung des Wärmesektors kann nur über die Integration von erneuerbarem Strom umgesetzt werden. Im Gegensatz zu PtG-Technologien können Wärmepumpen schon bei den aktuellen Anteilen von erneuerbaren Energien am Strommix einen wichtigen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten (siehe Abbildung 2).

In der zeitlichen Abfolge und bei dem zurzeit noch hohen Gehalt von CO₂ im Strommix ist der Einsatz von Wärmepumpen nach jetzigem Stand gegenüber PtG effizienter.

Aktuelle Szenarien gehen davon aus, dass der EE-Anteil an der Wärmeversorgung der Gebäude um das Fünf- bis Sechsfache gesteigert werden muss, um den Gebäudebereich weitgehend zu dekarbonisieren und die Ziele bis 2050 nicht zu gefährden.²² Das bedeutet: Bei der Erschließung der CO₂-Vermeidungspotentiale spielt die zeitliche Komponente eine bedeutende Rolle. Die derzeitigen Absatzzahlen von knapp 60.000 Wärmepumpen pro Jahr²³ reichen nicht aus. Um auf dem Zielpfad für 2050 zu liegen, müssten bis 2030 bereits vier bis acht Millionen Wärmepumpen installiert sein.²⁴ Ende 2015 waren es erst insgesamt rund 600.000.²⁵ Gleichzeitig sind gut 3,7 Millionen Öl- und 2,8 Millionen Gaskessel im Gebäudebestand älter als 25 Jahre und gemäß der Energieeinsparverordnung (EnEV)²⁶ besteht nach spätestens 30 Jahren eine Pflicht zum Kesseltausch. Demzufolge steht im Jahr 2020 ein breitflächiger Austausch von Wärmeerzeugern an. Diese günstige Gelegenheit sollte dringend genutzt werden, um Fehlinvestitionen und Lock-In-Effekte zu vermeiden.

Das konkrete technische Emissions-Vermeidungspotential der verschiedenen Wärmepumpen wurde in Feldversuchen über mehrere Jahre erforscht. Sole/ Wasser-Wärmepumpen sparen bereits ab einer JAZ von 2,3 THG-Emissionen gegenüber fossilen Systemen ein. Bei einer JAZ von 3,2 entspricht die CO₂-Einsparung einer Wärmepumpe (mit aktuellem Strommix²⁷) ca. 30 Prozent gegenüber einem Gas-Kessel.²⁸ Im Neubau können Wärmepumpen JAZ von 5 (teils sogar höher) erreichen. Daraus ergibt sich ein Einsparpotential von ca. 50 Prozent. Dies zeigt, dass Wärmepumpen grundsätzlich auch für den Bestand geeignet sind. Die technische Weiterentwicklung wird diese Ergebnisse noch steigern. Der Dekarbonisierungseffekt und damit das Potential für CO₂-Einsparungen steigen außerdem mit zunehmendem EE-Strom-Anteil. Abbildung 2 veranschaulicht die Details.

Einsatz von Groß-Wärmepumpen und Power-to-Gas für Prozesswärme

Im Bereich der Prozesswärme müssen Energieeinsparungen über eine konsequente Abwärmennutzung und Optimierung der Prozessabläufe erzielt werden. Für ein Temperaturniveau von unter 100 Grad Celsius kommt für die Dekarbonisierung der Einsatz von Groß-Wärmepumpen in Frage. Diese würden auch zu einer effizienten Abwärmennutzung beitragen. Bis 500 Grad Celsius spielen vor allem Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme mit integriertem Elektrodenkessel eine Rolle. Bei noch höheren Temperaturen müssen dann Power-to-Heat (PtH) und langfristig auch PtG-Technologien zur Anwendung kommen, um fossile Energieträger zu substituieren. Wirtschaftlichkeit ist hierbei allerdings noch nicht gegeben. Aufgrund von hohen Umwandlungsverlusten ist PtG erst ab einem Anteil von nahezu 100 Prozent erneuerbarer Energie wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll.¹⁸ Dennoch ist es notwendig, diese Technologie heute schon zu erproben und weiter zu entwickeln. Prognosen weisen darauf hin, dass insbesondere beim ambitionierten Klimaziel keine Technologie ausgeschlossen werden darf und PtG langfristig mit zunehmender Verdrängung von fossilen Energieträgern für die Erzeugung regenerativer Prozesswärme eine wichtige Rolle spielen wird.¹⁹

CO₂-Vermeidungspotentiale verschiedener Heiztechniken

Heiztechnik	CO ₂ -Äq. [g/kWh]	Effizienzfaktor	CO ₂ -Äq. [g/kWh _{th}]	CO ₂ -Äq. [T./a] Ø Einfamilienhaus	CO ₂ -Äq. Ersparnis in %
Ölkessel	319	1	319	8,9	Referenz
Gaskessel	250	1	250	7	22%
Wärmepumpe (JAZ 3)	565	3	188	4,2	53%
Wärmepumpe (JAZ 5)	565	5	113	2,5	72%
Power-to-Gas Elektrolyseur	565	0,8	706	15,8	77% Mehrverbrauch

Abbildung 2. Annahme: Durchschnittliches Einfamilienhaus mit jährlichem Wärmebedarf von 22.400 kWh/a (160 kWh/a pro m²; 140 m² Wohnfläche. Eigene Berechnungen in Anlehnung an TU München (2013). Strom (Bundesmix), CO₂-Äq.(g/kWh): 565g.
Quelle: GEMIS-Datenbank 4.95 11/2016

Dennoch stößt das theoretische Potential von Wärmepumpen für das Erreichen der Klimaziele in der Realität an Grenzen. Aufgrund von Restriktionen durch Bebauungsdichte, hydrologische Gegebenheiten und bereits bestehende unterirdische Infrastrukturen sind Wärmepumpen nicht in jedem Gebäude einsetzbar. Daher wird der maximale Anteil von Wärmepumpen für den gesamten Gebäudebestand momentan mit ca. 60 Prozent beziffert.²⁹ Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen bleibt ein Potential für den Ausbau von Wärmepumpen von ca. 116 TWh in 2050.³⁰ Andere Prognosen gehen von einem maximalen Potential zur Erschließung der Umweltwärme durch Wärmepumpen von lediglich 58 bis max. 100 TWh aus³¹.

Abbildung 3 zeigt die eingesparte Menge CO₂ durch den Einsatz von Wärmepumpen anstelle konventioneller Heiztechnik. Insgesamt können hier durch die Sektorenkopplung schon jetzt 28 Mt CO₂ eingespart werden.

Bestehende Hemmnisse

Dem Einsatz von Wärmepumpen steht der aktuell niedrige Preis für Heizöl entgegen. Der Absatz von Ölheizungen ist im letzten Jahr gestiegen.³² Da Ölheizungen zudem noch subventioniert werden, besteht die Gefahr, dass die Gelegenheit zum

CO₂-Einsparpotential von Wärmepumpen gegenüber fossilen Heiztechniken

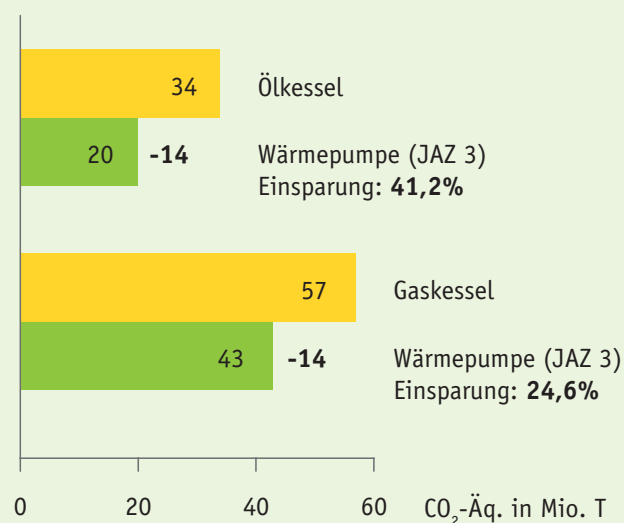


Abbildung 3. Annahme: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser von Öl (177 TWh) und Gas (379 TWh) im Jahr 2014. Davon würden 60 % durch eine Wärmepumpe (JAZ 3) ersetzt (max. Potential für Installation von Wärmepumpe). Strom (Bundesmix), CO₂-Äq.(g/kWh): 565g.
Quelle: GEMIS-Datenbank 4.95 11/2016. Daten für Verbrauch aus Quaschnig (2016)

Klimaschutz beim Kesseltausch aufgrund falscher Anreize ungenutzt bleibt.

Demgegenüber wird der Strompreis durch Umlagen und Steuern stark belastet. Diese machen rund 54 Prozent des Strompreises aus.³³ Das Ungleichgewicht in der Besteuerung und die hohe Preisdifferenz zwischen Gas bzw. Öl und Strom stellt das größte Hindernis für die Kopplung der Sektoren Strom und Wärme dar.

In der Realität weisen Wärmepumpen zum Teil eine relativ große Bandbreite an JAZ auf.³⁴ Das deutet darauf hin, dass die eigentlich gute Effizienz der Wärmepumpen teilweise durch Fehler in der Verbauung und Einstellung gemindert wird. Die korrekte technische Installation ist eine wichtige Bedingung, um die THG-Vermeidungspotentiale zu erschließen.

Handlungsempfehlungen

Um die beschriebenen Hemmnisse zu beseitigen und das Potential der Sektorenkopplung im Wärmebereich umfänglich nutzen zu können, empfehlen sich folgende Optionen für die politische Rahmensetzung:

- Bestehende Energiesteuern mit CO₂-Emissionen als Bemessungsstab anpassen: Fossile Energieträger müssen über eine Neuausrichtung der Steuersätze verteuert werden, um die ökologischen Folgekosten einzupreisen und so die Wettbewerbsfähigkeit von Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbaren Energien zu erhöhen.
- Staatliche KfW-Förderung für Öl- und Gasbrennwertheizungen einstellen: Jede Investitionsentscheidung für eine rein fossi-

le Heizung bedeutet Emissionen für die nächsten 20 bis 30 Jahre. Angesichts des zeitlichen Handlungsdrucks dürfen auch Investitionen in effiziente fossile Heiztechnik nicht staatlich gefördert werden.

- Verbot eines Einbaus von Öl- und Gasheizungen ab dem Jahr 2025: Unter Annahme einer verkürzten Stilllegungsfrist alter Heizkessel auf 25 Jahre dürften ab dem Jahr 2025 nur noch in Ausnahmefällen Öl- und Gaskessel installiert werden. Andernfalls wäre eine treibhausgasneutrale Wärmeversorgung im Jahr 2050 nicht möglich.
- Weiterbildungsoffensive für das Handwerk: Um einen breitflächigen, fehlerfreien Einbau von Wärmepumpen in der Praxis zu ermöglichen, bedarf es Weiterbildungsangebote für das Handwerk. Fachhandwerker müssen für die optimale Verbauung und Einstellung der Wärmepumpe geschult werden, damit möglichst hohe JAZ erreicht und keine mehrfachen Nachjustierungen am Gerät nötig werden.
- Kommunale Wärmeplanung fördern – Prüfung, wo Ausbau und Transformation der Wärmenetze nötig sind: Für eine möglichst effiziente Deckung des Wärmebedarfs mit erneuerbaren Energien bedarf es einer an die jeweiligen regionalen und lokalen Gegebenheiten angepassten Planung. Die Einführung einer verpflichtenden kommunalen Wärmeplanung kann helfen, geeignete Wärmeversorgungskonzepte zu erarbeiten. In dicht besiedelten Gebieten können Wärmenetze eine wichtige Rolle zur Erschließung erneuerbarer Wärme spielen.
- Sanierungsrate der energetischen Gebäudesanierung durch geeignete Anreize steigern: Das Potential der Energieeffizienz im Wärmebereich ist noch nicht ansatzweise ausgeschöpft.

Klimaschutzpotential der Sektorenkopplung im Verkehrssektor

Ausgangslage und Ziele im Verkehrssektor

2015 betrug der Anteil des Verkehrs am Endenergieverbrauch in Deutschland etwa 30 Prozent, wovon etwa 94 Prozent durch Mineralöle gedeckt wurden. Die THG-Emissionen des Verkehrs sind seit 1990 etwa konstant. Mit direkten Emissionen von ca. 164 Mt CO₂-Äquivalenten im Jahr 2015 ist der Verkehr für etwa 18 Prozent der gesamten THG-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Etwa 96 Prozent davon stammen aus dem Straßenverkehr. Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sieht eine Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr um 40-42 Prozent (gegenüber 1990) bis 2030 vor. Allerdings geht das Bundesverkehrsministerium bis 2030 von einer weiteren Zunahme der Verkehrsleistung um rund 13 Prozent beim motorisierten Personenverkehr und um 38 Prozent beim Güterverkehr aus.³⁵

Für das Erreichen eines sektorübergreifenden THG-Reduktionsziels von 95 Prozent bis 2050 ist neben den prioritär zu definierenden Maßnahmen zur Vermeidung und Verlagerung von Verkehrsleistungen sowie der beschleunigten Effizienzsteigerung der nahezu vollständige Verzicht auf fossile Kraftstoffe im Verkehr bis 2050 erforderlich. Da biogene Kraftstoffe für die Substitution fossiler Kraftstoffe nur in sehr begrenztem Maße zur Verfügung stehen, wird der Energiebedarf dann weitgehend mit anderen erneuerbaren Energien gedeckt werden müssen.³⁶

Die Umstellung auf alternative und stromgenerierte Kraftstoffe wird im Folgenden als „Energiewende im Verkehr“ bezeichnet. Maßnahmen die zur Reduktion des Endenergiebedarfs des Verkehrs beitragen – in Form von Vermeidung und Verlagerung von

Verkehrslast sowie Verbesserung von Antrieben – werden als Teil der notwendigen „Mobilitätswende im Verkehr“ begriffen.

Mobilitätswende als Grundlage für Sektorenkopplung

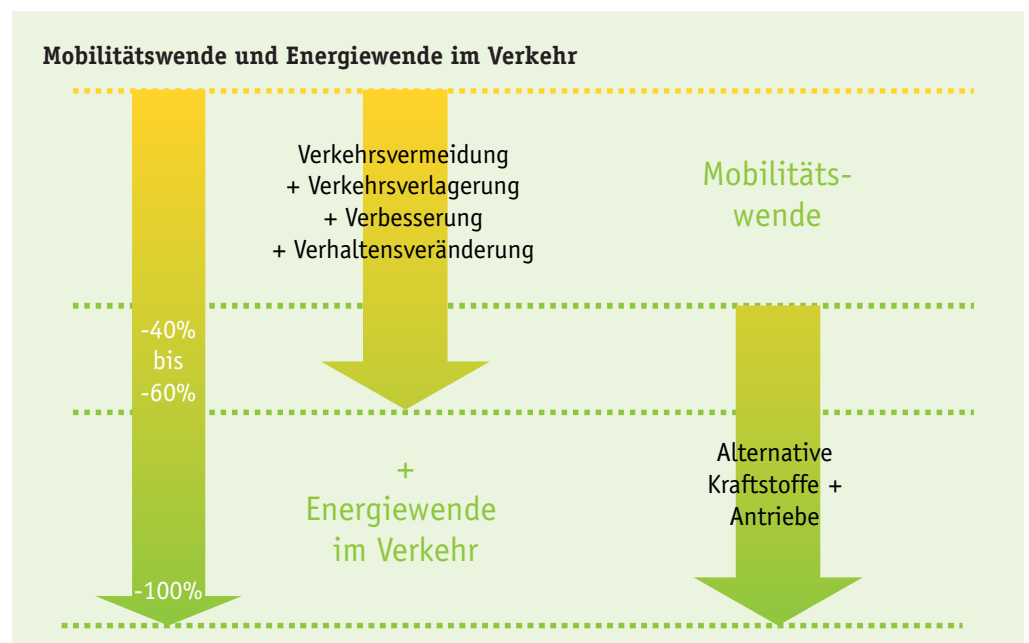
Überragende Bedeutung für eine Dekarbonisierung des Sektors Verkehr hat die Verringerung des Endenergiebedarfes sowie die effiziente Nutzung der Energie. Eine Reduktion des Endenergiebedarfs des Verkehrs um 50 bis 60 Prozent bis 2050 bzw. um 30 Prozent bis 2030 ist zum Erreichen der Klimaziele zwingend erforderlich.³⁷ Maßnahmen, die im Sinne einer Mobilitätswende zur Verkehrsvermeidung und Steigerung der Effizienz beitragen, sind zudem kurzfristig und mit bestehenden Technologien umsetzbar.³⁸

Die Reduktion des Endenergiebedarfs ist außerdem besonders wichtig, um die im Verkehrssektor dominierenden fossilen Energien weitgehend durch EE-Strom ersetzen zu können.³⁹ Denn auch erneuerbare Energien sind nur begrenzt verfügbar und verursachen durch ihren Flächenbedarf Nutzungskonkurrenzen z. B. zum Arten- und Naturschutz. Der heute überwiegend mit fossilen Energien gedeckte Endenergiebedarf des Verkehrs liegt bei 728 TWh (2015), davon werden über 600 TWh im Straßenverkehr verbraucht.⁴⁰ Im Vergleich dazu liegt die gesamte inländische Bruttostromerzeugung im Jahr 2015 jedoch „nur“ bei 645 TWh.

Die Mobilitätswende wird damit zur zentralen Voraussetzung für eine Sektorenkopplung mit dem Ziel der CO₂-Reduktion.⁴¹ Abbildung 4 veranschaulicht den Zusammenhang.

Abbildung 4. Die Mobilitätswende senkt den Endenergiebedarf des Verkehrs so weit, dass er über EE abgedeckt werden kann.

Quelle: Schmied 2016/Agora Verkehrswende



Energiewende im Verkehrssektor

In Szenarien mit einem THG-Reduktionsziel von 95 Prozent wird i.d.R. davon ausgegangen, dass für die Energiewende im Verkehr sowohl die direkte Nutzung von Strom im Schienenverkehr und in batterieelektrischen Antrieben sowie die indirekte Nutzung durch den Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren erforderlich wird.⁴²

Direkte Nutzung von Strom

Der **Schienenverkehr** bietet eine energetisch sehr effiziente Möglichkeit der Elektrifizierung des Personen- und des Güterverkehrs. In der Verlagerung von motorisierten Verkehren auf die Schiene liegt daher ein großes CO₂-Vermeidungspotential. Selbst bei einer Steigerung der Schienengüterverkehrsleistung um 160 Prozent in 2050 wird nur von einem sehr moderaten Anstieg des Endenergiebedarfs für den Schienenverkehr insgesamt auf 61 PJ (2015: 54 PJ) bzw. 17 TWh ausgegangen.⁴³ Der Güterverkehr hat nach dem motorisierten Individualverkehr den höchsten Anteil an den Gesamtemissionen des Verkehrs. Bei verbesserter CO₂-Bilanz der Strombereitstellung kann durch eine Steigerung des Anteils der Schiene an der Gütertransportleistung auf 25 Prozent bis 2030 (von 17,7 Prozent im Jahr 2010) eine Senkung der THG-Emissionen des Güterverkehrs um ca. 8,6 Mt CO₂ erreicht werden.⁴⁴

Rein **batterieelektrisch betriebene Pkw** (BEV, Battery Electric Vehicle) mit Reichweiten unter 100 km bieten beim heutigen Strommix CO₂-Werte, die mit effizienten Benzin- oder Dieselantrieben vergleichbar sind.⁴⁵ Dies gilt jedoch nur auf Basis der Herstellerangaben, die in der Regel nicht den realen Werten entsprechen, wie der Internationale Rat für sauberen Verkehr ICCT (International Council on Clean Transportation) in seiner jüngsten Studie zeigt: Abweichungen von den Herstellerangaben werden im Durchschnitt mit 42 Prozent, bei größeren Pkw-Modellen sogar mit mehr als 50 Prozent beziffert.⁴⁶ Mit sinkender CO₂-Fracht der Strombereitstellung kann sich die Bilanz zugunsten des Elektroantriebes verbessern.

Indirekte Nutzung von EE-Strom

Die Nutzung stromgenerierter Kraftstoffe wird maßgeblich in Verkehrssegmenten erforderlich, in denen der Einsatz batterieelektrischer Antriebe technisch begrenzt ist. Dies betrifft insbesondere den Schiffs- und den Luftverkehr sowie den Anteil des Straßengüterverkehrs, der – nach heutigem technischen Stand – nicht auf die Schiene verlagert werden bzw. elektrifiziert werden kann. Durch PtL-Verfahren wird das in PtG-Anlagen gewonnene EE-Methan verflüssigt und ist damit auch in den genannten Verkehrssegmenten einsetzbar.

Der energetische Wirkungsgrad stromgenerierter Kraftstoffe ist jedoch geringer als der einer direkten Nutzung von Strom im Schienenverkehr und in batterieelektrischen Antrieben. Ihr Einsatz trägt damit erheblich zum Endenergiebedarf des Verkehrs im Jahr 2050 bei.

Selbst in Szenarien mit einem hohen Anteil direkter Stromnutzung im Verkehr und mit ambitionierten Effizienzannahmen wird angenommen, dass ein Großteil des Endenergiebedarfs des Verkehrs durch stromgenerierte Kraftstoffe (i.d.R. in Verbrennungsmotoren) gedeckt wird. Dabei liegt ihr Anteil an der für einen THG-neutralen Verkehr erforderlichen EE-Strombereitstellung bei ca. 73-88 Prozent im Jahr 2050.⁴⁷ Alle Betrachtungen, in denen PtG bzw. PtL eine maßgebliche Rolle bei der Energiebereitstellung spielen, gehen außerdem davon aus, dass diese zu 100 Prozent aus EE-Strom hergestellt werden und daher THG-neutral zur Verfügung stehen. Vor dem Hintergrund des aktuellen Strommixes sind stromgenerierte Kraftstoffe heute noch nicht CO₂-mindernd gegenüber Diesel- und Benzinantrieben einsetzbar.

CO₂-Vermeidungspotentiale

Das THG-Minderungspotential der Sektorenkopplung im Verkehr ist nur in Zusammenhang mit einer umfangreichen Reduktion des Gesamtenergiebedarfs des Verkehrs sowie mit einem beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und der damit verbundenen Senkung der CO₂-Fracht der Strombereitstellung zu realisieren. Andernfalls werden durch Schaffung neuer Stromanwendungen zusätzliche Emissionen verursacht. Diese Gefahr besteht außerdem durch eine insgesamt steigende Verkehrslast, die zur Kompensation von Emissionsminderungen führen kann. Maßnahmen zur Verlagerung und Vermeidung von Verkehr sind daher schon kurz- bis mittelfristig eine Voraussetzung einer klimaschutzdienlichen Sektorenkopplung.

Bis 2030 hat die Nutzung von Strom im Verkehr theoretisch die größten THG-Vermeidungspotentiale durch Verlagerung von Personen- und Güterverkehrslast auf die Schiene. Zum Beispiel können durch Erhöhung der Gütertransportleistung auf 25 Prozent auf der Schiene (von 17,7 Prozent in 2010) im Jahr 2030 bei verbesserter CO₂-Bilanz der Strombereitstellung ca. 8,6 Mt CO₂ vermieden werden.⁴⁸ Der heutige Strommix führt noch nicht zu signifikanten CO₂-Reduktionen durch Sektorenkopplung bei batterieelektrischen Fahrzeugen. Ihr Beitrag zur Reduktion der Verkehrsemissionen kann sich jedoch durch eine sinkende CO₂-Fracht des Strommixes bis 2030 erhöhen. Beide Annahmen sind jedoch ambitioniert vor dem Hintergrund, dass sowohl eine entsprechende Energiebereitstellung aus EE als auch Investitionen in Schienen- und Ladeinfrastruktur notwendig werden.

Mit dem Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe steigt die erforderliche EE-Stromerzeugung überproportional an. In zwei jüngeren Studien zum Klimaschutz im Verkehr wird selbst bei Berücksichtigung erheblicher Reduktionen auf der Verbrauchsseite, je nach angenommenem Technologiemix und entsprechender Wirkungsgrade, erzeugungsseitig ein EE-Strombedarf von ca. 2000 bis 2486 PJ für den gesamten inländischen Verkehr angenommen. Das entspricht ca. 556 bis 691 TWh. Daraus folgt, dass die klimaschutzdienliche energetische Versorgung des Verkehrs darauf angewiesen ist, den Endenergiebedarf deutlich zu senken und EE-Strom in möglichst

effizienten Technologien einzusetzen, selbst unter Annahme einer maximalen Flächenverfügbarkeit für zusätzliche EE-Anlagen und eines hohen Importanteils. Da die direkte Nutzung von Strom in batterie- oder direktbetriebenen Fahrzeugen mit höheren Wirkungsgraden als bei PtG und PtL einhergeht, ist sie unter CO₂-Minderungsaspekten der Nutzung stromgenerierter Kraftstoffe vorzuziehen. Der Bedarf an EE-Stromerzeugung würde bei ausschließlicher Nutzung stromgenerierter Kraftstoffe bis 2050 bei 3300 bis 3847 PJ liegen. Das entspricht ca. 917 bis 1070 TWh.⁴⁹

Aufgrund ihrer energieintensiven Herstellung sind stromgenerierte Kraftstoffe außerdem nur bei nahezu vollständiger Strombereitstellung aus EE klimadienlich. Sie sollten daher nur zum Einsatz kommen, wenn keine anderen Optionen zur Substitution fossiler Kraftstoffe zur Verfügung stehen. Zum Erreichen eines treibhausgasneutralen Verkehrs bis 2050 scheint ihre Nutzung aus heutiger Perspektive dennoch notwendig zu sein. Hinzu kommt ein möglicher „Doppelnutzen“ durch den Einsatz von PtG als Speicher für ein auf EE basierendes Stromsystem. Deshalb sollten stromgenerierte Kraftstoffe schrittweise weiterentwickelt werden. Der Einstieg in die verkehrliche Nutzung wird in den meisten Studien mit geringen Anteilen ab 2030 angesetzt.⁵⁰

Kann der Gasantrieb unter den bestehenden Bedingungen zum Klimaschutz beitragen?

Erdgas hat unter den derzeit genutzten fossilen Kraftstoffen gegenüber Diesel und Benzin eine bessere CO₂-Bilanz und daneben weitere Umweltvorteile bei der Verbrennung wie einen geringeren Stickoxid-Ausstoß und weniger Feinstaub aus dem Abgas. Solange der Strommix noch keine Herstellung von PtG oder PtL sinnvoll scheinen lässt, kann Gas durchaus eine Technologie im Sinne des Klimaschutzes sein.

Gasantriebe für Personen- und Güterverkehr sind aus heutiger Sicht in erster Linie ein Beitrag zur Luftreinhaltung. Der Verkehr zählt insbesondere in den Innenstädten zu den Hauptverursachern von Luftverunreinigung mit Feinstaub und Stickoxiden, was jedes Jahr zu zahlreichen vorzeitigen Todesfällen und unzähligen Erkrankungen mit entsprechenden Kosten für die Gesellschaft führt. In vielen Kommunen werden die geltenden Grenzwerte zur Luftbelastung überschritten. Die EU Kommission hat daher sowohl wegen der Feinstaub- als auch wegen der Stickoxidbelastung Vertragsverletzungsverfahren gegen Deutschland eingeleitet. Alternative strombasierte Antriebe ohne lokale Emissionen stehen nicht in dem Umfang bereit, um kurzfristig Abhilfe zu schaffen. Erdgasantriebe hingegen gelten als Stand der Technik und sind für zahlreiche Anwendungen auf dem Markt einsetzbar. Auch die vorhandene Infrastruktur bietet ausreichend Potential. Ergänzende Effizienzanforderungen sind hier allerdings ebenfalls sinnvoll.

Bestehende Hemmnisse

Das größte Hemmnis für Sektorenkopplung im Verkehrssektor sind fehlende Vorgaben für die erforderliche Vermeidung und Verlagerung von Verkehr. Dazu zählen der Verzicht auf die Einführung bzw. die ambitionierte Weiterentwicklung von CO₂-Grenzwerten für schwere Nutzfahrzeuge bzw. Pkw, der Abbau statt des consequenten Ausbaus von Schienengütertransportinfrastruktur sowie die zu geringe Privilegierung bzw. finanzielle Förderung öffentlicher Verkehre. Auch verhindern Subventionen wie z.B. das Dienstwagenprivileg oder die günstigere Besteuerung des Diesels einen umweltschonenden Verkehr.

Daneben bestehen technische Probleme bei der Abkehr von fossilen Kraftstoffen im Verkehrssektor. Die aktuell angebotenen Elektrofahrzeuge (Pkw, Busse, Nutzfahrzeuge) sind durch das schlechte Preis-Leistungs-Verhältnis unattraktiv. Trotz sinkender Batteriekosten verhindern die weiterhin hohen Gesamtkosten von E-Fahrzeugen eine schnellere Marktdurchdringung. Gleiches gilt für einfaches und schnelles Handling beim Aufladen der Fahrzeuge.

Handlungsempfehlungen

Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, -verlagerung und zur Steigerung der Effizienz bestehender Antriebe weisen bis 2030 das größte THG-Vermeidungspotential auf. Mit Blick auf das Jahr 2050 sind sie unverzichtbar, um den Mehrbedarf an Strom aus erneuerbaren Quellen mittels Sektorenkopplung auf ein machbares Maß zu reduzieren. Zahlreiche Studien, darunter die bereits zitierte Studie des Umweltbundesamtes „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“, stellen eine umfassende Übersicht über erforderliche Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung bereit. Insbesondere bedarf es einer umfassenden Verankerung von Klimaschutzziele in allen Verkehrs- und Infrastrukturplanungen. Diese finden jedoch bislang keinen ausreichenden Niederschlag in politischem Handeln auf unterschiedlichen Ebenen. Verbesserungen für einen klimafreundlichen Verkehr mit dem Schwerpunkt öffentlicher Verkehrsmittel sollten mit Restriktionen für den individuellen mobilisierten Verkehr kombiniert werden. Dazu steht eine Vielzahl steuerlicher, ordnungsrechtlicher und anreizorientierter Maßnahmen zur Verfügung. Insbesondere in städtischen Gebieten sollten die derzeit diskutierten Herausforderungen zur Verbesserung der Luftqualität zum Anlass genommen werden, um entsprechende Maßnahmen rasch auf den Weg zu bringen. Die nachfolgend angeführten Maßnahmen sind als Beispiele zu verstehen:

Verkehrsvermeidung

- Integrierte und nachhaltige Stadt- und Umlandplanung: Stadtplanerische Maßnahmen können zur Verkehrsvermeidung beitragen. Nach dem Leitbild der „Stadt der kurzen Wege“ können individuelle motorisierte Fahrten vermieden werden, wenn die Fahrtziele besser zu Fuß, mit dem Rad oder mit dem ÖPNV erreicht werden können.

- Insbesondere beim Güterverkehr stellt die erforderliche Verkehrsvermeidung – nicht zuletzt angesichts der zitierten Wachstumsprognosen – eine besondere Herausforderung dar. Diese zu beantworten kann nicht Gegenstand dieses Papieres sein sondern bedarf umfassender Betrachtung an anderer Stelle.

Verkehrsverlagerung

- Verlagerung von Gütern von der Straße auf die Schiene: Bis 2030 sollten 100 Prozent der Schienenstrecken elektrifiziert und bis 2035 die Kapazitäten mit zusätzlichen Schienenstrecken, Lärmschutz und Verladebahnhöfen erweitert sein. Hierfür ist ein Sonderinvestitionsprogramm zur beschleunigten Elektrifizierung und zum weiteren Ausbau erforderlich. Die Anpassung der Trassennutzungsentgelte sowie die Weiterentwicklung der Lkw-Maut sollten die bestehenden Ungleichheiten im Wettbewerb zwischen den Verkehrsträgern beenden.
- Verlagerung von Personenverkehr: Dies ist einerseits durch eine Angebotserweiterung des öffentlichen Verkehrs und andererseits durch restriktive Maßnahmen wie Parkraumbewirtschaftung, Einführung einer City-Maut sowie einer fahr- und emissionsabhängigen Pkw Maut auf allen Straßen zu erreichen. Bessere Bedingungen für Fuß- und Fahrradverkehr können insbesondere in urbanen Regionen zu einer Verlagerung beitragen, denn 50 Prozent der Wege in der Stadt sind kürzer als 5 km. Die Besteuerung von Kerosin sollte Teil eines umfassenden Konzepts zur Verlagerung von Kurzstreckenflügen auf die Bahn sein.

Erhöhung der Effizienz

- Die Entwicklung künftiger Technologien im Hinblick auf Antriebsarten und alternative Kraftstoffe wird auch von deren Kosten im Vergleich zu erdölbasierten Produkten und Antrieben bestimmt werden. Dies ist bei der Besteuerung bzw. Abgabefestsetzung künftig stärker zu beachten.
- Bestehende Energiesteuern mit CO₂-Emissionen als Bemessungsmaßstab anpassen: Fossile Energieträger müssen daher über

eine Neuausrichtung der Steuersätze verteuert werden, um die ökologischen Folgekosten einzupreisen und so die Wettbewerbsfähigkeit von Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbaren Energien zu erhöhen.

- Die Flottengrenzwerte für CO₂-Ausstoß für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge müssen weiter reduziert werden. Hierbei ist ein unabhängiges, flächendeckendes und regelmäßiges Mess- und Kontrollverfahren der Emissionen im realen Fahrbetrieb inklusive spürbarer Sanktionen für die Wirksamkeit dieses Instruments von hoher Bedeutung.
- Die Einführung von CO₂-Grenzwerten für schwere Nutzfahrzeuge wird auch hier die vorhandenen Potentiale zur Energieeinsparung heben und ist daher überfällig.
- Eine effiziente Nutzung begrenzter Energien verlangt für alle Antriebe die Entwicklung von Effizienzstandards unter realen Fahrbedingungen.
- Bei der Kfz-Besteuerung sollte eine exponentielle Höherbelastung von CO₂-intensiveren Fahrzeugen stattfinden und dafür Fahrzeuge, die die zukünftigen CO₂-Werte deutlich unterschreiten, entsprechend geringer besteuert werden.

Verhaltensänderung

- Ein gutes Angebot von öffentlichem Personenverkehr ist Grundlage für die Akzeptanz von Multimodalität, der Nutzung verschiedener Verkehrsträger, mit dem Ziel der Vermeidung von individualisiertem motorisiertem Verkehr.
- Mobilitätsleitsysteme und Smartphone-Apps, die auf alternative Verkehrsträger hinweisen und hinführen, eröffnen neue Handlungsoptionen für Mobilität.
- Tempolimits bzw. der Einsatz von fahrzeugseitigen Geschwindigkeitsbegrenzungen steuern in erster Linie das Verhalten der Fahrzeugnutzer, können andererseits aber auch das zukünftige Anforderungsprofil von Neufahrzeugen beeinflussen.

Flexibilität und Strombedarf durch Sektorenkopplung

Flexibilität durch Sektorenkopplung

Sektorenkopplung durch Wärmepumpen, Elektrodenkessel, batterieelektrische Mobilität und stromgenerierte Kraftstoffe gelten auch als Flexibilitätsoptionen, die zur Integration von EE im System beitragen sollen. In einem Stromsystem mit hohen Anteilen EE steigt die Anzahl der Stunden, in denen das Angebot die Nachfrage übersteigt. Bis 2020 ist das nur an wenigen Stunden im Jahr der Fall, weshalb keine zusätzliche Flexibilität im System erforderlich wird. Ab 2030 tritt dieses Phänomen in einem Stromsystem ab Anteilen von 60 Prozent EE und mehr häufiger und über längere Zeiträume auf und zusätzliche Optionen zur Bereitstellung von Flexibilität werden erforderlich.⁵¹

Vermeidung der Abregelung von EE-Strom

Im Jahr 2015 konnten 4,7 TWh⁵² überwiegend in Norddeutschland erneuerbar erzeugter Strom nicht eingespeist werden, da Netzkapazitäten fehlten. Mit dem bereits genehmigten Ausbau der EE sowie noch am Netz befindlicher hoher Kohlekraftwerkskapazitäten wird diese Menge weiter steigen bis der geplante Ausbau der Übertragungsnetze fertiggestellt ist.⁵³ Die Reduzierung von „Must-Run“ bei Kohlekraftwerken kann bis zur Fertigstellung des Netzausbaus ggf. dazu beitragen, Abregelungen zu vermeiden. Daneben wird die direkte regionale Nutzung von Strom beispielsweise durch Wärmepumpen, E-Fahrzeuge oder Elektrodenkessel diskutiert.

Es scheint jedoch kaum realistisch, dass **Wärmepumpen** oder **E-Fahrzeuge** in den von Abregelung betroffenen Regionen mit relevanten Kapazitäten bis 2030 zur Verfügung stehen. Nicht nur sind dafür ausreichende Investitionen privater Anwender und eine entsprechende Infrastruktur Voraussetzung, das Lastverschiebepotential beider Anwendungen ist auch begrenzt bzw. mit hohen Unsicherheiten behaftet. So stellen beide Varianten zunächst eine zusätzliche Stromanwendung dar, die aus dem Strommix gespeist werden muss. Während Wärmepumpen dabei heute bereits THG-Vermeidungspotentiale aufweisen gilt das für E-Fahrzeuge noch nicht.

Der **Elektrodenkessel** stellt zwar bei Verwendung des aktuellen Strommix unter Klimaschutzgesichtspunkten im Vergleich zur Wärmepumpe noch keine sinnvolle Option der Sektorenkopplung dar. Als komplementäres Element einer bestehenden Fern- bzw. Nahwärmeversorgung kann er jedoch ausschließlich zur Aufnah-

me andernfalls abgeregelter EE-Strommengen eingesetzt werden. Voraussetzung ist dafür jedoch eine entsprechende bestehende Wärmeversorgungsstruktur.

PtG als Flexibilitätsoption bei hohen Anteilen EE im System

Stromgenerierte Kraft- bzw. Brennstoffe können zum Teil (Wasserstoff) oder komplett (synthetisches Methan) im Gasnetz gespeichert und im Wärme- und Verkehrssektor sowie zur Rückverstromung genutzt werden. Die bereits vorhandene Gasinfrastruktur wird hier als Vorteil bewertet. Doch auch in einem System mit 60 Prozent EE und mehr kann die notwendige Flexibilität zur Integration der EE voraussichtlich noch durch Optionen mit höheren Wirkungsgraden bereitgestellt werden als durch die Umwandlung von Strom in synthetische Kraft- bzw. Brennstoffe. Dazu zählt u.a. auch die Steuerung von Verbrauchern (Demand-Side-Management) wie E-Fahrzeugen und Wärmepumpen in privaten Haushalten, sofern dies unter Berücksichtigung ihrer Nutzungsanforderungen möglich ist. Dies gilt auch für Potentiale zur Lastverschiebung in Industrie und Gewerbe. Der Ausgleich über den europäischen Netzverbund sowie Pumpspeicher und Batteriespeicher gewährleisten ebenfalls Flexibilität. Auch die Abregelung von EE-Strom kann in gewissem Umfang eine sinnvolle Flexibilitätsoption darstellen.⁵⁴ PtG hat vor allem eine sinnvolle Rolle zur Stabilisierung des Stromsystems, wenn ab höheren Anteilen EE zwischen 60 und 80 Prozent längere „Defizit-Zeiträume“ überbrückt werden müssen. Soll ein THG-Reduktionsziel von 95 Prozent erreicht werden muss die Leistung konventioneller Kraftwerke unter anderem durch diese Langzeitspeicheroption weitgehend ersetzt werden.⁵⁵

Handlungsempfehlungen

- Experimentierklauseln zulassen: Wegen der komplexen Abhängigkeiten von bestehenden Regelungen am Strommarkt und neuer Anwendungsfelder im Bereich der Sektorenkopplung, können Experimentierklauseln für klimaschutzdienliche Projekte sinnvoll sein.⁵⁶
- Forschung und Entwicklung für Umwandlungstechniken fördern: Die Umwandlungstechnologien PtG und PtL sind heute noch mit hohen Kosten und energetischen Wandlungsverlusten verbunden. Es gibt zwar eine Reihe von Pilotvorhaben, Forschung und Entwicklung von Demonstrationsprojekten sollten jedoch stärker als bisher gefördert werden.

EE-Strombedarf

Ist die Energieversorgung eines dekarbonisierten Verkehrs- und Wärmesektors über EE darzustellen, ist damit ein erheblicher Mehrbedarf an EE-Strom verbunden, der über abgeregelte EE-Strommengen deutlich hinausgeht. Der zusätzliche Strombedarf muss daher durch einen zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien ermöglicht werden. Über die Menge des zusätzlich benötigten EE-Stroms kommen bisherige Studien zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Dies hängt maßgeblich davon ab, welche Rolle sie PtG im künftigen Energiesystem beimesen.

Laut einer Metaanalyse der Agentur für erneuerbare Energien, die die Aussagen von 25 Studien vergleicht, wird für die **Wärmeerzeugung** in einem Szenario mit einer THG-Reduktion von 95 Prozent bis 2050 ein zusätzlicher Strombedarf von 37 TWh bis 2030 und von 75 TWh bis 2050 angenommen. Für die **Elektrifizierung des Verkehrssektors** – ohne PtG und PtL – liegt die Bandbreite der Schätzungen zwischen wenigen TWh bis hin zu 25 TWh Mehrbedarf an Strom bis 2030 gegenüber 2015. Ab 2030 bis 2050 wird dann wegen des erhöhten Bedarfs an EE-Strom für PtG und PtL deutlich mehr EE-Strom zur Verfügung stehen müssen, die Bandbreite des erwarteten Mehrbedarfs für PtL reicht dann von 30 bis 600 TWh.⁵⁷ Gemäß zweier jüngerer Studien zum Klimaschutz im Verkehrssektor wird bis 2050 allein für den Verkehr ein erzeugungsseitiger EE-Strombedarf von ca. 556 bis 691 TWh angenommen. Beide Studien gehen für die genannten Zahlen davon aus, dass ambitionierte Effizienzmaßnahmen umgesetzt werden und strombasierte Kraftstoffe im Verkehr nur dort zum Einsatz kommen, wo eine direkte Nutzung von Strom aus heutiger Perspektive nicht erwartet wird.⁵⁸

2015 betrug der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch 31,5 Prozent.⁵⁹ Bis 2035 soll laut Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2017 ein Anteil von 55 bis 60 Prozent erreicht werden. Sofern der im EEG vorgesehene jährliche Zubau an installierter Leistung tatsächlich realisiert wird, könnten im Jahr 2030 141 GW installierte EE-Leistung am Netz sein und dann etwa 280 TWh EE-Strom erzeugt werden.⁶⁰ Je nach angenommenem

Bruttostromverbrauch könnte damit ein Anteil von ca. 47,5 bis 52,5 Prozent EE bis 2030 realisiert werden.⁶¹

Laut Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 soll der Energieverbrauch bis 2020 um 10 Prozent sinken (gegenüber 2008). Bis 2015 wurden davon allerdings erst 3,4 Prozent realisiert.

Wird das Effizienzziel verfehlt und eine zusätzliche Strommenge in Höhe von ca. 60 TWh bis 2030 benötigt, wird ein Erreichen des EEG-Ziels von 60 Prozent EE-Anteil bis 2035 ungewiss. Zudem ist zu berücksichtigen, dass zwischen 2030 und 2050 der EE-Strombedarf für PtG in allen Sektoren exponentiell ansteigen könnte. Allein die Anpassung des EE-Ausbaukorridors für 2030 an den bis dahin zu erwartenden zusätzlichen Strombedarf durch Sektorenkopplung reicht daher nicht aus. Für das Erreichen eines THG-Reduktionsziels von 95 Prozent bis 2050, muss so bald wie möglich ein Strommix mit einer möglichst vorteilhaften CO₂-Bilanz für die Sektorenkopplung zur Verfügung stehen. Vor diesem Hintergrund sollte bereits bis 2030 ein höherer EE-Anteil am Verbrauch als bisher vorgesehen erreicht werden.

Handlungsempfehlungen

- Mit der nächsten Novelle des EEG sollte der Ausbaupfad auf ein Ziel von mindestens 65 Prozent bis 2030 angehoben und ein entsprechender Zubaukorridor für neu zu installierende EE unter Berücksichtigung des zusätzlichen Bedarfs aus der Sektorenkopplung festgelegt werden.
- Damit dieser Anteil am Stromverbrauch erreicht werden kann, sind außerdem die Festlegung sektoraler Effizienzziele einschließlich ihrer ambitionierten Umsetzung sowie eine weitere schrittweise Rückführung der Kohleverstromung notwendig. Die Einführung einer CO₂-Komponente bei den Energiesteuern ist zur Unterstützung dieser Entwicklung geboten.
- Der umfangreiche Ausbau der EE muss gesellschaftlich getragen sein. Dazu bedarf es der Meinungsbildung vor Ort und neuer ganzheitlicher Planungsansätze, die Bürger stärker einbeziehen.

Endnoten

- 1 Der Gebäudesektor umfasst Wohn- und Nichtwohngebäude mit Energieverbrauch für Raumwärme, Raumkühlung, Warmwasserbereitung und Haustechnik. Er macht ungefähr 32% am Endenergieverbrauch und 16% der Treibhausgasemissionen in Deutschland aus.
- 2 Die industrielle Prozesswärme erfordert aufgrund des deutlich höheren Temperaturniveaus und anderer technologischer Ansätze eine eigenständige Betrachtung. Diese würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen und muss bei künftigen, anknüpfenden Projekten stärker in den Fokus gerückt werden.
- 3 „Effizienzstrategie Gebäude“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015.
- 4 „Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland?“, Greenpeace, 2016.
- 5 Bei einer Reduzierung des Primärenergiebedarfs von 80% bis 2050 liegt der Zielwert bei 240 TWh.
- 6 Berechnungen vom ifeu-Institut zeigen: Im Zielszenario „Effizienz“ würde die installierte elektrische Leistung von Strom zur Wärmeerzeugung bei 24 GW im Jahr 2050 liegen. Im Zielszenario „Erneuerbare Energien“ würde sich der Strombedarf für die Wärmeerzeugung auf 31 GW im Jahr 2050 erhöhen. Vgl. „Optionspfade und Abhängigkeiten für die Wärmeversorgung“, Vortrag Peter Mellwig, ifeu, 17.10.16.
- 7 Vgl. Effizienzdreiklang im „Grünbuch Energieeffizienz“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016.
- 8 „Optionspfade und Abhängigkeiten für die Wärmeversorgung“, Vortrag Peter Mellwig, ifeu, 17.10.16.
- 9 Beheizte Wohnfläche/Nutzfläche in Mio.m² in 2050, vgl. „Sektorübergreifende Energiewende – Robuste Strategien, kritische Weichenstellungen 2030: Schwerpunkt Wärmesektor“, Vortrag Norman Gerhardt, Fraunhofer IWES, Berliner Energietage, 13.04.2016.
- 10 „Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude“, Prognos/ ifeu/ IWU, 2015
- 11 „Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude“, Prognos/ ifeu/ IWU, 2015
- 12 „Die neue Wärmewelt“, AEE, Studie im Auftrag Bündnis 90/Die Grünen, 2016
- 13 „Wie sieht der Wärmemix der Zukunft aus? Optionspfade und Abhängigkeiten“, Vortrag Peter Mellwig, ifeu, Berliner Energietage, 13.04.16.
- 14 „Sektorkopplung – von der Stromwende zur Energiewende“, Gesine Schwan et. al, Humboldt-Viadrina Governance Plattform, 2016.
- 15 „Sektorübergreifende Energiewende – Robuste Strategien, kritische Weichenstellungen 2030“, Vortrag Norman Gerhardt, Fraunhofer IWES, Berliner Energietage, 13.04.2016.
- 16 „Wärmepumpen im zukünftigen Strom- und Wärmesektor“, Marek Miara, Fraunhofer ISE, 2015.
- 17 „Energiesystem Deutschland 2050“, Hans-Martin Henning, Andreas Palzer, Fraunhofer ISE, 2013.
- 18 „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“, acatech/ Leopoldina/ Akademiunion (Hrsg.), 2015.
- 19 „Integration von Power to Gas/ Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess“, UBA, 2016.
- 20 „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“, UBA, 2016.
- 21 „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“, Fraunhofer IWES/ IBP mit ifeu/ Stiftung Umweltenergierecht, 2015.
- 22 „Wie sieht der Wärmemix der Zukunft aus? Optionspfade und Abhängigkeiten“, Vortrag Peter Mellwig, ifeu, Berliner Energietage, 13.04.16.
- 23 BWP (2016): <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatz-zahlen/>.
- 24 „Sektorübergreifende Energiewende – Robuste Strategien, kritische Weichenstellungen 2030“, Vortrag Norman Gerhardt, Fraunhofer IWES, Berliner Energietage, 13.04.2016.
- 25 „Wärmepumpen im zukünftigen Strom- und Wärmesektor“, Marek Miara, Fraunhofer ISE, 2015.
- 26 Siehe EnEV 2014 § 10 Nachrüstung bei Anlagen und Gebäuden.
- 27 Für die Erzeugung einer Kilowattstunde Strom für den Endverbrauch werden derzeit durchschnittlich 565 Gramm Kohlendioxid als direkte Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger emittiert (vgl. GEMIS-Datenbank 4.95 11/2016).
- 28 „Bewertung der Effizienz von Wärmepumpen basierend auf Untersuchungen im realen Betrieb“, Marek Miara, Fraunhofer ISE, 2015.
- 29 „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“, Fraunhofer IWES/ IBP mit ifeu/ Stiftung Umweltenergierecht, 2015.
- 30 „Wie sieht der Wärmemix der Zukunft aus? Optionspfade und Abhängigkeiten“, Vortrag Peter Mellwig, ifeu, Berliner Energietage, 13.04.16.
- 31 „Effizienzstrategie Gebäude“, Bundeswirtschaftsministerium, 2015.
- 32 BDH Marktentwicklung Wärmeerzeuger 2005-2015: www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Daten_Fakten/BDH_Marktentwicklung_2005-2015.pdf.
- 33 „Strompreisanalyse November 2016“, BDEW.
- 34 „Bewertung der Effizienz von Wärmepumpen basierend auf Untersuchungen im realen Betrieb“, Marek Miara, Fraunhofer ISE, 2015.
- 35 Emissionswerte: Direkte Emissionen ohne Vorketten. Vgl. „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, 1990-2015“, AG Energiebilanzen, 07/2016; „Treibhausgas-Emissionen nach Gasen und Quellkategorien Deutschland“, BMWi, 07/2016; „Verkehr in Zahlen 2016/2017“, BMVI, 2016.
- 36 Vgl. „Renewability III“, Öko-Institut/ DLR/ ifeu/ INFRAS, 11/2016.
- 37 Vgl. „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu/ INFRAS/ LBST [UBA], 05/2016.
- 38 Dies beinhaltet etwa die Stärkung des Rad- und Fußverkehrs, Verlagerung auf die Schiene bzw. hin zu öffentlichem Verkehr. Die DUH fordert u.a. in diesem Zusammenhang die Vorlage eines Masterplans zur Ausweitung des öffentlichen Verkehrs sowie die Einführung bzw. Weiterentwicklung sowie verbesserte Vollzugkontrolle ambitionierter Effizienzvorgaben und CO₂-Obergrenzen für bestehende und zukünftige Antriebe.
- 39 Vgl. „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu/ INFRAS/ LBST [UBA], 05/2016.
- 40 „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, 1990-2015“, AG Energiebilanzen, 07/2016.
- 41 Vgl. „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu/ INFRAS/ LBST [UBA], 05/2016.
- 42 Vgl. „Klimaschutz: Der Plan“, Greenpeace 11/2015; „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu/ INFRAS/ LBST [UBA], 05/2016; „Renewability III“, Öko-Institut/ DLR/ ifeu/ INFRAS, 11/2016.
- 43 Vgl. „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu/ INFRAS/ LBST [UBA], 05/2016.
- 44 Daten zu den Emissionen des Güterverkehrs beinhalten direkte sowie Vorkettenemissionen. Annahmen aus: „Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur“, INFRAS/ Fraunhofer ISI [UBA], 06/2016.
- 45 Diese Berechnung geht von einer THG-Bilanz der Strombereitstellung von 622 g CO₂/kWh aus, vgl. „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“ ifeu [UBA], 08/2015.
- 46 Vgl. „Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen neuer Pkw in der EU – Prüfstand versus Realität“, ICCT, 11/2016.
- 47 Vgl. „Renewability III“, Öko-Institut/ DLR/ ifeu/ INFRAS, 11/2016; Vgl. „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu/ INFRAS/ LBST [UBA], 05/2016. Die in diesen Studien zitierten Szenarien gehen von der umfassenden ambitionierten Umsetzung zur Verfügung stehender Maßnahmen aus, die insgesamt den Endenergiebedarf des Verkehrs um 60 Prozent senken.
- 48 Vgl. „Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur“, INFRAS/ Fraunhofer ISI [UBA], 06/2016.
- 49 2000 bzw. 3300 PJ: Vgl. „Renewability III“ Öko-Institut/ DLR/ ifeu/ INFRAS, 11/2016; 2486 bzw. 3847 PJ: Vgl. „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu/ INFRAS/ LBST [UBA], 05/2016. Nicht berücksichtigt sind internationale Verkehre. Beide Szenarien gehen für den jeweils niedrigeren Wert von ambitionierten Effizienzreduktionen und einem hohen Anteil direkter Stromnutzung aus.
- 50 Vgl. „Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr“, AEE, 04/2016.
- 51 Vgl. „Ökologische Bereitstellung von Flexibilität im Stromsystem“, Öko-Institut, 11/2016.
- 52 Vgl. „Netz- und Systemsicherheit. Daten für das Jahr 2015“, BNetzA, https://www.bundesnetzagentur.de/clin_1411/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stronetze/Netz_Systemsicherheit/Netz_Systemsicherheit_node.html#doc266942bodyText2, am 06.01.2017.
- 53 Vgl. „Ökologische Bereitstellung von Flexibilität im Stromsystem“, Öko-Institut, 2016.
- 54 „Sektorenkopplung“, Vortrag von Max Rathmann, BMWi, auf der Fachtagung der Deutschen Umwelthilfe „Nutzen statt Abschalten“ am 20.09.2016; „Ökologische Bereitstellung von Flexibilität im Stromsystem“, Öko-Institut, 11/2016.
- 55 Vgl. „Ökologische Bereitstellung von Flexibilität im Stromsystem“, Öko-Institut, 11/2016.
- 56 Vgl. „Experimentierklauseln im Energierecht“, Stiftung Umweltenergierecht, 03/2016.
- 57 Vgl. „Metaanalyse zur Flexibilität durch Sektorkopplung“, AEE, 04/2016.
- 58 Vgl. „Renewability III“ Öko-Institut/ DLR/ ifeu/ INFRAS, 11/2016; Vgl. „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“, ifeu, INFRAS, LBST [UBA], 05/2016. Nicht berücksichtigt sind internationale Verkehre.
- 59 „Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015“, BMWi / AGEE-Stat, 12/2016.
- 60 Unter folgender Annahme: Installierte Leistung etwa 60 GW Wind Onshore, 15 GW Wind Offshore, 52 GW Photovoltaik, 6 GW Wasserkraft, 8 GW Biomasse; Vollast-Stunden Wind Onshore 1800 h, Wind Offshore 3500 h, PV 1000 h; Erzeugung Biomasse 50 TWh, Wasserkraft 20 TWh.
- 61 Vgl. „Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2015. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2016“, Agora Energiewende 01/2016.

Bildnachweis

DUH (Icons & Abbildungen); guukaa/Fotolia.com (Icons S.1 & Hintergrund S.1,16)

Flexibilität

Energieeffizienz

Sektorenkopplung

Wasserstoff

Elektrofahrzeuge

Mobilität

Klimaschutz

Power-to-Heat

Wärme

Wärmespeicher

Wärmepumpe

Power-to-Gas

CO₂-Reduktionspotential

Strom

alternative Antriebe

Verkehr

Wärmenetze

Power-to-Liquid

Erneuerbare Energien

Dekarbonisierung

Methan

strombasierte Kraftstoffe



Deutsche Umwelthilfe e.V.

Bundesgeschäftsstelle Radolfzell
Fritz-Reichle-Ring 4
78315 Radolfzell
Tel.: 07732 9995-0

Bundesgeschäftsstelle Berlin
Hackescher Markt 4
10178 Berlin
Tel.: 030 2400867-0

Ansprechpartner

Peter Ahmels
Leiter Energie und Klimaschutz
Tel.: 030 2400867-91
E-Mail: ahmels@duh.de

Paula Brandmeyer
Teamleiterin Energieeffizienz
Tel.: 030 2400867-97
E-Mail: brandmeyer@duh.de

www.duh.de

[@ info@duh.de](mailto:info@duh.de)

[umwelthilfe](#) [umwelthilfe](#)

Wir halten Sie auf dem Laufenden: www.duh.de/newsletter-abo



Die Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH) ist als gemeinnützige Umwelt- und Verbraucherschutzorganisation anerkannt. Sie ist mit dem DZI-Spendensiegel ausgezeichnet. Testamentarische Zuwendungen sind von der Erbschafts- und Schenkungssteuer befreit.

Wir machen uns seit über 40 Jahren stark für den Klimaschutz und kämpfen für den Erhalt von Natur und Artenvielfalt. Bitte unterstützen Sie unsere Arbeit mit Ihrer Spende – damit Natur und Mensch eine Zukunft haben. Herzlichen Dank! www.duh.de/spenden

Unser Spendenkonto: Bank für Sozialwirtschaft Köln | IBAN: DE45 3702 0500 0008 1900 02 | BIC: BFSWDE33XXX