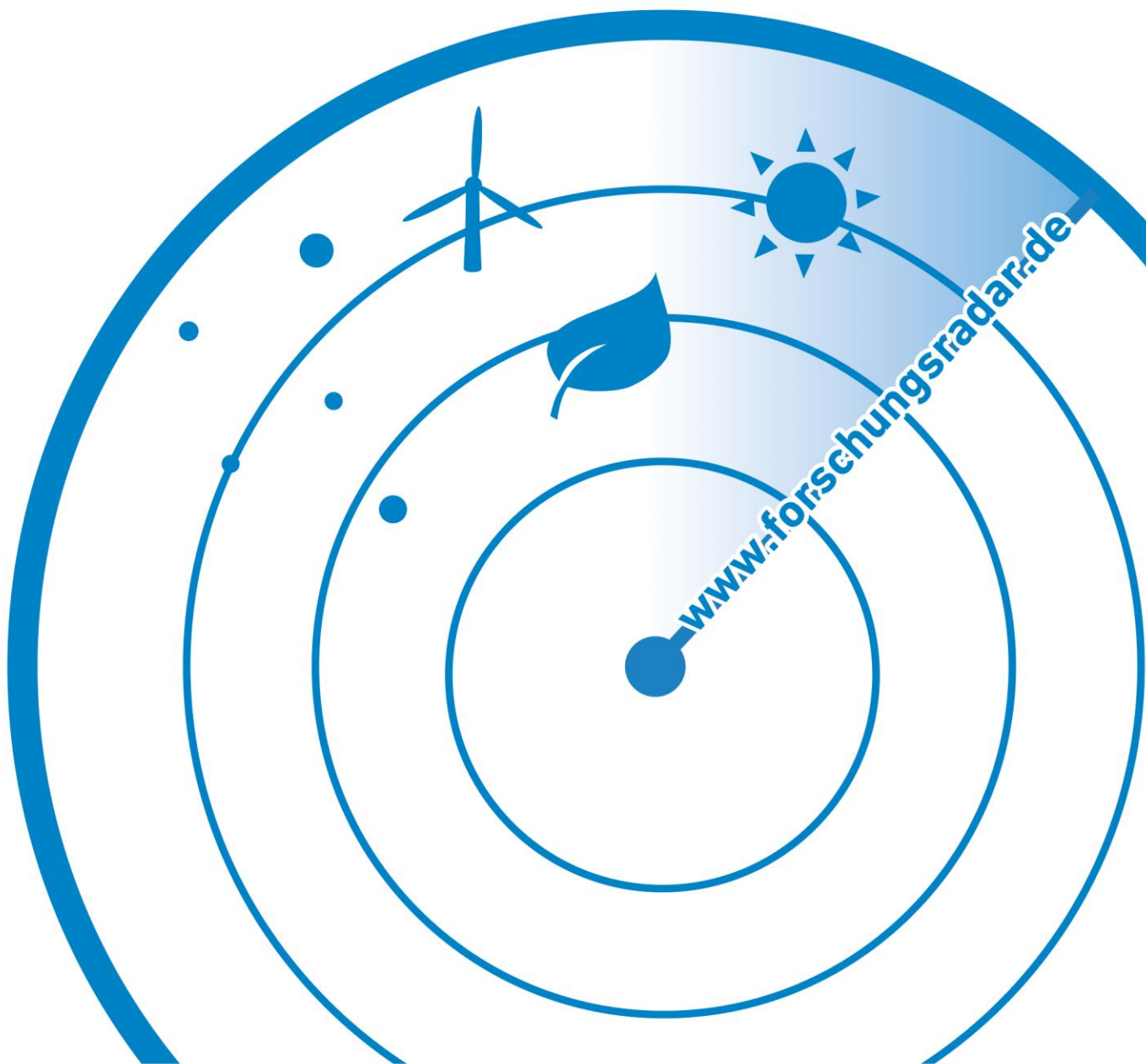


METAANALYSE

Januar 2019

Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr



Inhaltsverzeichnis

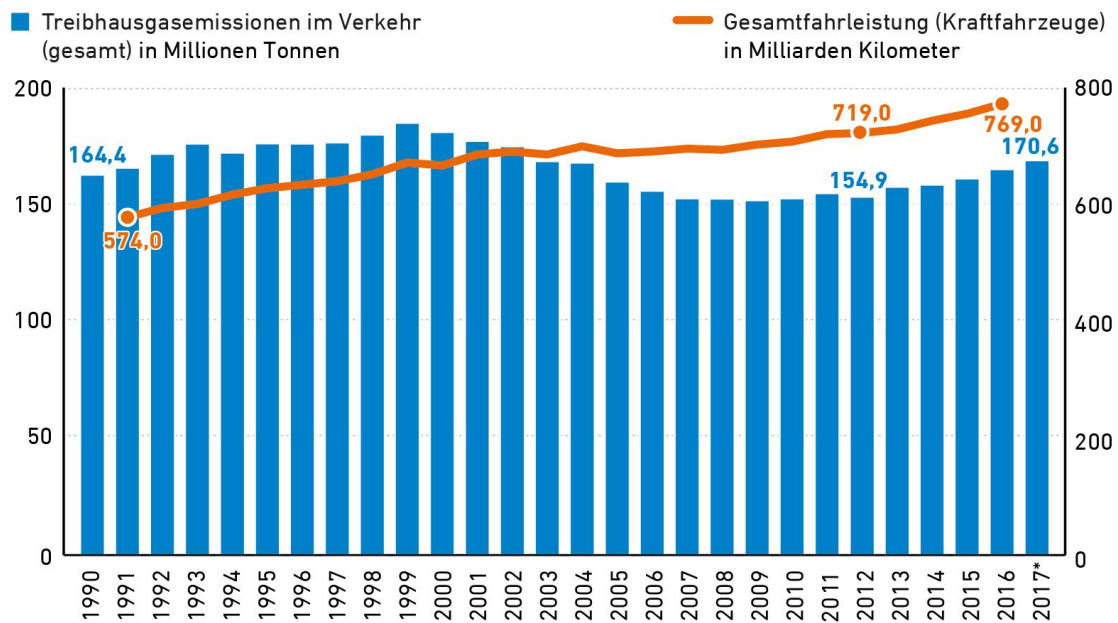
1. Keine Spur von Energiewende im Verkehr.....	3
2. Hinweise zur Einordnung und Bewertung des Studienvergleichs	4
3. Zusammenspiel von Strom- und Verkehrssektor in der Energiewende	6
3.1 Entwicklung des Endenergiebedarfs im Verkehr	6
3.2 Elektromobilität.....	9
3.3 Strombasierte Kraftstoffe (Power-to-Gas/Power-to-Liquid)	10
3.4 Wechselwirkungen zwischen Strom- und Verkehrssektor.....	13
4. Zusammenfassung.....	14
5. Ausgewertete Literatur und Erläuterungen.....	16

1. Keine Spur von Energiewende im Verkehr

Trotz Dieselskandal ist der Verkehrssektor in der Debatte um die Energiewende stark unterbelichtet. Dabei ist der Verkehr die Quelle für rund ein Fünftel des Treibhausgasausstoßes in Deutschland und zentral für die Erreichung der klimapolitischen Zielsetzungen. Im Gegensatz zu den bereits erzielten Fortschritten in Energiewirtschaft und Industrie ist der Ausstoß an Klimagasen durch den Verkehr heute höher als 1990. Und so stellt die von der Bundesregierung eingesetzte Expertenkommission zum Monitoring der Energiewende in ihrer Stellungnahme aus dem Jahr 2018 fest: „Der Verkehrsbereich verfehlt die Energiewendeziele sowohl bezüglich der Steigerung des Anteils Erneuerbarer als auch bezüglich der Minderung des Endenergieverbrauchs deutlich“ (Expertenkommission 2018, S. Z-3).

Treibhausgasemissionen und Fahrleistung im Verkehr

Der Ausstoß von Klimagasen im Straßen-, Schienen-, Luft- und Seeverkehr ist in Deutschland seit 2012 um zehn Prozent gestiegen.



* Schätzung

Quelle: UBA

Stand: 1/2018

© 2019 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.



Der Grund dafür ist die enorm gewachsene Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr. Die Fahrleistung aller Kraftfahrzeuge im Straßenverkehr ist zwischen 1991 und 2016 um 34 Prozent gestiegen. Der Güterverkehr ist sogar um 71 Prozent gestiegen. Hinzu kommt der Trend zu immer schwereren und leistungsstärkeren Kraftfahrzeugen, der Effizienzgewinne wieder zunichte macht. Das größte Wachstum erzielte der Luftverkehr mit 183 Prozent. Die umweltfreundlichen Verkehrsmittel (Fußgänger, Rad-, Schienen- und öffentlicher Personennahverkehr) gewinnen dagegen kaum Anteile hinzu und kommen zusammen auf etwa 20 Prozent. Begünstigt wird diese negative Entwicklung von einem seit 2014 gesunkenen und auf niedrigem Niveau verharrenden Ölpreis.

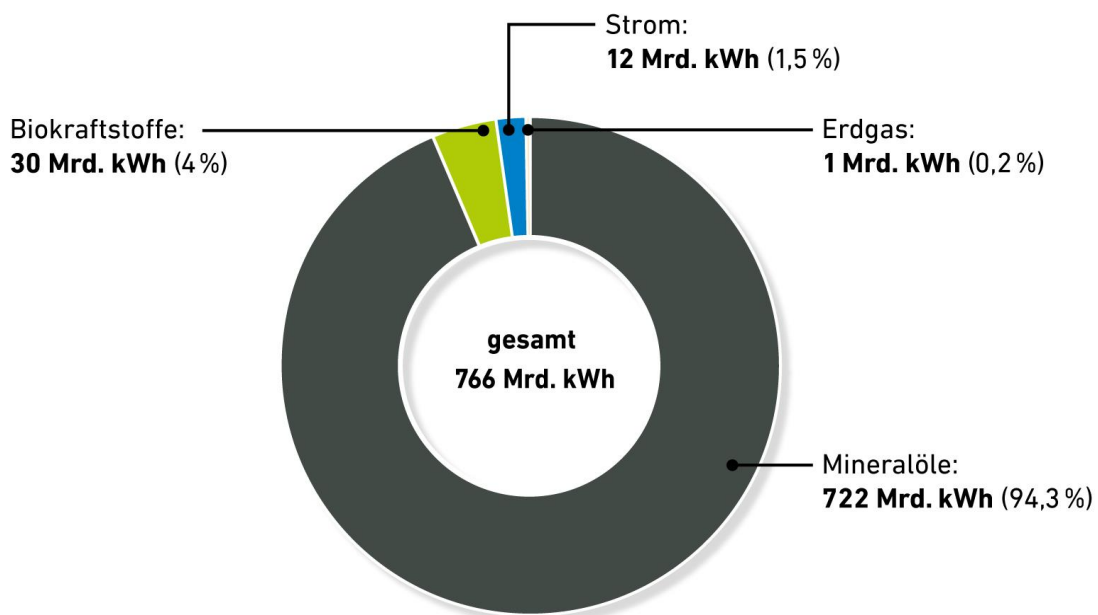
Auch für die Zukunft sehen Verkehrsprognosen ein weiteres Wachstum der Verkehrsleistung,

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

insbesondere im Güter- und Luftverkehr. Effizienzsteigerungen sind dringend notwendig, werden jedoch bei weitem nicht ausreichen, um die notwendige Treibhausgasminderung um 80 bis 95 Prozent bis 2050 zu erreichen. Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsmittel (z.B. auf die Schiene) müssen stärker in den politischen Fokus rücken. Gleichzeitig gilt es, Alternativen zu den herkömmlichen Kraftstoffen zu entwickeln, denn derzeit bezieht der Verkehr in Deutschland seine Energie zu über 90 Prozent aus Erdöl.

Endenergieverbrauch des Verkehrs 2017

in Milliarden Kilowattstunden



Quelle: eigene Darstellung nach AG Energiebilanzen
Stand: 7/2018

© 2018 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.



In Frage kommen hierfür (teil-)elektrische Antriebe sowie der Einsatz von Kraftstoffen, die aus Biomasse oder Strom gewonnen werden. Wie der Energiebedarf, die Energieversorgung und der damit verbundene Treibhausgasausstoß des Verkehrs in Zukunft aussehen könnten, wird inzwischen von vielen wissenschaftlichen Studien beleuchtet. Die diesbezüglichen Aussagen verschiedener Studien werden im Folgenden gegenübergestellt und verglichen, wobei das Zusammenspiel von Strom- und Verkehrssektor (Sektorenkopplung) im Fokus steht.

2. Hinweise zur Einordnung und Bewertung des Studienvergleichs

Die vorliegende Metaanalyse vergleicht und erläutert die Aussagen 16 verschiedener Studien zur zukünftigen direkten und indirekten Nutzung von Strom im Verkehr in Deutschland. Ziel ist es, den Stand der Erkenntnisse knapp und verständlich zusammenzufassen, die Transparenz hinsichtlich wichtiger Annahmen und Ergebnisse zu erhöhen und so eine Grundlage für die öffentliche Debatte zu liefern. Dazu werden quantitative und qualitative Aussagen der untersuchten Studien wieder-

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

gegeben, miteinander verglichen und erläutert. Kernpunkte sind dabei die potenzielle Entwicklung des Energiebedarfs und der Energiebereitstellung.

Die im Rahmen der Metaanalyse betrachteten Studien behandeln ein komplexes Themenfeld und setzen unterschiedliche Schwerpunkte. Daher unterscheiden sie sich in der Herangehensweise und den getroffenen Annahmen bzw. der verwendeten Datenbasis.

Zu unterscheiden ist in erster Linie zwischen **Trendszenarien** und **Klimaschutzzielszenarien**. Trendszenarien beschreiben meist eine dem Trend der vergangenen Jahre folgende Entwicklung unter der Annahme, dass keine weiteren Maßnahmen umgesetzt werden. Sie werden daher häufig als Referenzszenarien eingesetzt (z.B. BCG/Prognos: Referenzszenario. 2018, Öko-Institut/Fraunhofer ISI: Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS). 2015, Nitsch: TREND-18. 2018, Öko-Institut/DLR/ifeu/INFRAS: Renewbility Basisszenario. 2016, Fraunhofer ISI/Consentec/ifeu: Referenzszenario. 2017). Manche Referenzszenarien unterstellen jedoch durchaus zusätzliche Maßnahmen bzw. technologische Entwicklungen gegenüber dem Status Quo, wenn diese als relativ sicher angenommen werden. In **Zielszenarien** wird vorab ein Ziel definiert, zum Beispiel eine Minderung des Treibhausgasausstoßes um 80 oder 95 Prozent bis 2050. Davon ausgehend werden ein oder mehrere Szenarien entwickelt, die dieses Ziel erreichen. Gleichzeitig wird der zur Zielerreichung notwendige Handlungsbedarf in verschiedenen Bereichen formuliert. Dafür müssen die Effekte bestimmter Maßnahmen abgeschätzt werden. Teilweise wird die Umsetzbarkeit der Zielszenarien von den jeweiligen Autoren und Autorinnen als schwierig eingestuft (z.B. BCG/Prognos: 95%-Pfad. 2018).

In den Zielszenarien ergibt sich bis 2050 ein nahezu treibhausgasneutraler Verkehr, wenn weitreichende verkehrs- und energiepolitische Maßnahmen ergriffen und zudem technologische Durchbrüche unterstellt werden. Wie für das Energiesystem insgesamt gilt auch für den Verkehr, dass der Schlüssel für Klimaschutz und Ressourcenschonung in einer Kombination aus Verkehrswende (Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Energieeffizienz) und Energiewende, also dem Ersatz fossiler Kraftstoffe wie Benzin, Diesel und Kerosin liegt¹. Der mögliche Beitrag von Biokraftstoffen wird dabei unterschiedlich hoch eingeschätzt, ist jedoch in jedem Fall begrenzt. Eine umweltschonende, treibhausgasneutrale Energieversorgung basiert daher auf drei Grundprinzipien²:

- Erhöhung der Energieeffizienz sowie Energieeinsparung auf der Verbrauchsebene;
- Biokraftstoffe
- Sektorenkopplung: direkte oder indirekte Verwendung von Strom aus Erneuerbaren Energien (Elektromobilität, Power-to-Gas, Power-to-Liquids).

Die Energieeinsparungen können unter anderem durch eine Stärkung des öffentlichen Personenverkehrs und eine stärkere Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene erreicht werden. Auch ökonomische Instrumente wie die Einführung oder Ausweitung von Mautsystemen, die Erhöhung von Kraftstoffsteuern und der Abbau umweltschädlicher Subventionen im Verkehr werden als notwendig betrachtet (z.B. Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015, dena/EWI 2018). Während manche Szenarien hauptsächlich Effizienzsteigerungen bei konventionellen Antrieben und mehr Elektromobilität unterstellen (z.B. Öko-Institut/Fraunhofer ISI: KS95. 2015, Öko-Institut/KIT/INFRAS: E+. 2016, dena/EWI: EL95. 2018), gehen andere davon aus, dass in Zukunft auch in größerem Umfang strombasierte Kraftstoffe genutzt werden können (z.B. dena/EWI: TM95. 2018, Öko-Institut/KIT/INFRAS: Fl+. 2018, ifeu/INFRAS/LBST: Klima. 2016).

¹ Vgl. vgl. UBA 2017, S.28

² Vgl. UBA 2017, S.17

Das Nutzungspotenzial von Biokraftstoffen ist umstritten. In der Metaanalyse [„Perspektiven fester, flüssiger und gasförmiger Bioenergieträger“](#) vom November 2016 untersuchte die AEE verschiedene Zukunftsszenarien im Hinblick auf die Energiebereitstellung aus Biokraftstoffen. Die Bandbreite reichte von einer Stagnation auf dem Niveau von 2015 (32 Mrd. kWh) im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario von Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) bis zu einem Anstieg auf 173 Mrd. kWh im Jahr 2050 in der Energierferenzprognose von Prognos/EWI/GWS (2014). Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsrestriktionen sowie der Unsicherheit technologischer Weiterentwicklungen rechnen die meisten Studien maximal mit etwa dem 2,5-fachen der aktuellen Energiebereitstellung aus Biokraftstoffen. Im Vergleich zur bisherigen Entwicklung wäre das bereits ein großer Zuwachs, gemessen am gesamten Energiebedarf des Verkehrs wird jedoch deutlich, dass es anderer Antriebstechnologien und Kraftstoffe bedarf, um hohe Anteile Erneuerbarer Energien zu erreichen.

3. Zusammenspiel von Strom- und Verkehrssektor in der Energiewende

3.1 Entwicklung des Endenergiebedarfs im Verkehr

Ziel der Bundesregierung ist es, den Endenergieverbrauch des Verkehrs bis 2020 um 10 Prozent und bis 2050 um 40 Prozent gegenüber 2005 zu reduzieren (Energiekonzept 2010). Der Trend zeigt allerdings in eine andere Richtung. Im Jahr 2017 lag der Endenergieverbrauch im Verkehr bei 765 Mrd. kWh³ und damit rund 6,5 Prozent über dem Wert des Jahres 2005 (718 Mrd. kWh). Seit 2012 nimmt der Energieverbrauch kontinuierlich zu. Die Hauptursache für den steigenden Endenergiebedarf im Verkehr ist die steigende Verkehrsleistung, sowohl im Güter- als auch im Personenverkehr. Manche Studien und Szenarien modellieren die Entwicklung und Umsetzung von Strategien zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung. Beispielsweise unterstellen die Ziel- und Trendszenarien bei BCG/Prognos (2018) und bei Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) eine jeweils unterschiedliche Personen- und Güterverkehrsleistung. Die höchste Verkehrsleistung im Personenverkehr findet sich bei Öko-Institut/DLR/ifeu/INFRAS (2016) mit 1.262 Milliarden Personenkilometern (Pkm) im Jahr 2030 und 1.174 Mrd. Pkm in 2050. Im Güterverkehr wird die höchste Verkehrsleistung bei dena/EWI (2018) angenommen (969 Milliarden Tonnenkilometer (Mrd. tkm) im Jahr 2050). Dafür ist hier die Verkehrsleistung im Personenverkehr am niedrigsten (1.060 Mrd. Pkm in 2050).

Neben der Verkehrsleistung in Personen- und Güterverkehr wirken sich auch die Annahmen zur demographischen und wirtschaftlichen Entwicklung sowie zum Ölpreis auf den Energieverbrauch in den Szenarien aus. Auf den ersten Blick unterscheiden sich die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung und zum Wirtschaftswachstum nur wenig. So liegt die Bevölkerungszahl in Deutschland bei 74 bis 77 Millionen Einwohnern im Jahr 2050. Beim Bruttoinlandsprodukt (BIP) wird das Wachstum auf 0,8 bis 1,2 Prozent pro Jahr geschätzt. Über mehr als 30 Jahre gerechnet, machen die 0,4 Prozentpunkte Differenz allerdings einen großen Unterschied.

Offensichtlicher sind die Unterschiede bei den Annahmen zur Entwicklung des Ölpreises. Während die Studien unter der Federführung des Öko-Instituts im Jahr 2050 mit einem Preis von 195 US-Dollar pro Barrel rechnen, sind es bei dena/EWI (2018) nur 65 US-Dollar.

³ Das entspricht 2.755 Petajoule (PJ). Beide Einheiten sind in Energiestatistiken geläufig. In der vorliegenden Metaanalyse erfolgen die Größenangaben durchgängig in Milliarden Kilowattstunden, um die Vergleichbarkeit der Werte im Hinblick auf die Stromstatistik und die Erneuerbare-Energien-Statistik zu erleichtern.

Basisannahmen:

Studie	Bevölkerung 2030/2050 (in Mio.)	BIP- Wachstum in % p.a.	Ölpreis 2030/2050 in \$/bl.	Personen- Verkehrsleistung 2030/2050 in Mrd. Pkm	Güter- Verkehrsleistung 2030/2050 in Mrd. Tkm
Öko- Institut/DLR/ ifeu/INFRAS (2016)	78/74	0,8	120/195 (Preisbasis 2013)	1262/1174	835/905
BCG/Prognos (2018)	81/77	1,2	80-111/50- 115 (Preisbasis: 2015)	1185/1123 (RS), 1181/1115 (80%- /95%-Pfad)	837/945
Dena/EWI (2018)	81/76	1,1	77/65 (Preisbasis: 2017)	1112/1060	858/969
Öko- Institut/ISI (2015)	78/74	0,8	128/195 (Preisbasis 2013)	1090/1099 (AMS), 1045/1056 (KS80), 985/1001 (KS95)	758/821 (AMS), 822/865 (KS80), 792/846 (KS95)
Aktueller Stand 2018	83	1,5	70	1208 (2016)	655 (2016)

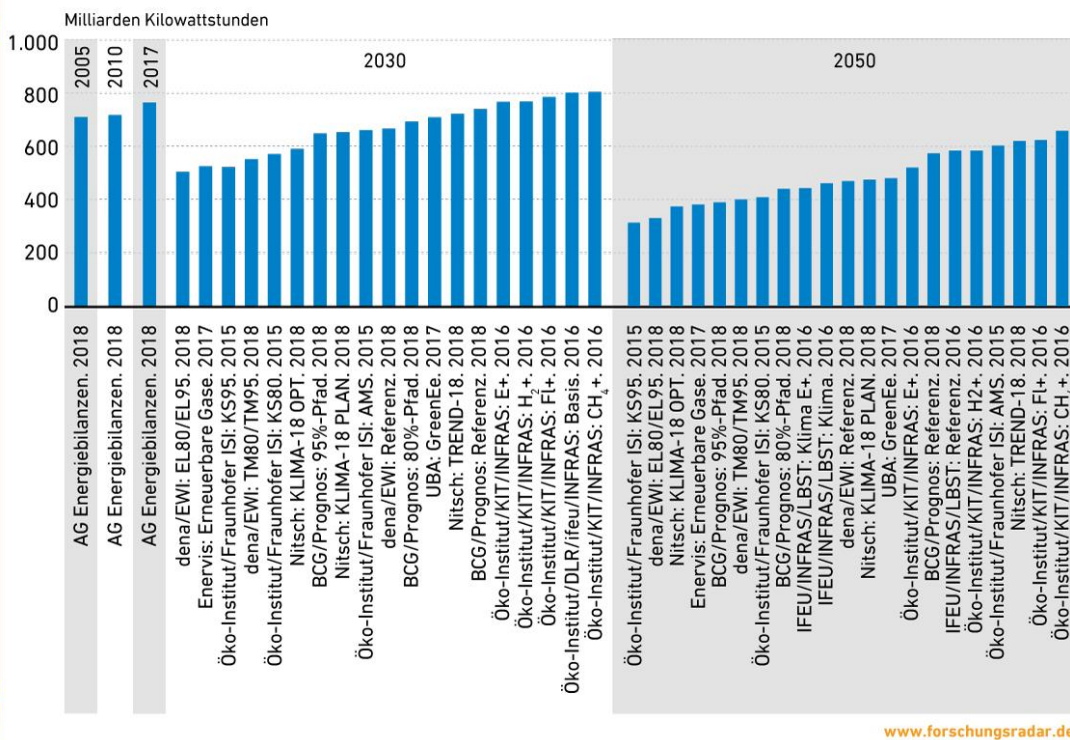
Öko-Institut/KIT/INFRAS (2016) und Öko-Institut/DLR/ifeu/INFRAS (2016) gehen davon aus, dass der Energieverbrauch bis 2030 weiter steigen wird, v.a. wegen der steigenden Güterverkehrsleistung. Der Endenergieverbrauch ist in den Szenarien CH4+ und Fl+ in den Jahren 2030 und 2050 am höchsten. Hauptgrund ist ein hoher Anteil an strombasierten Kraftstoffen, da die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor einen geringeren Wirkungsgrad aufweisen und dadurch mehr Energie verbrauchen als Elektrofahrzeuge. Bei der Interpretation der Werte ist zudem zu beachten, dass beim Endenergieverbrauch die Energieverluste in der Herstellung strombasierter Kraftstoffe nicht berücksichtigt werden. Der durch den Verkehr verursachte Primärenergieverbrauch fällt bei einem hohen Anteil dieser Technologien also erheblich größer aus als bei einem hohen Anteil an Elektrofahrzeugen.

Mit einem großen Energieeinsparpotenzial rechnen die meisten Studien im Straßenpersonenverkehr. Chancen bestünden hier vor allem durch die Elektromobilität, Verkehrsvermeidung und -verlagerung. Im Straßengüter-, Schiffs- und Luftverkehr werden die Möglichkeiten zur Senkung des Endenergieverbrauchs dagegen deutlich geringer eingeschätzt. Vor allem aufgrund des erwarteten weiteren Wachstums der Verkehrsleistung könnte es hier trotz unterstellter Effizienzsteigerungen zu einem weiteren absoluten Anstieg des Energiebedarfs kommen.

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Szenarien zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr in Deutschland

Die meisten dargestellten Werte umfassen den nationalen und internationalen Verkehr (inkl. Luft- und Seeverkehr).



Die Verlagerung auf die Schiene gilt studienübergreifend als das wichtigste Instrument im Güterverkehr und wird von verschiedenen Akteuren schon seit vielen Jahren gefordert. Das Umweltbundesamt geht davon aus, dass der Anteil des Schienenverkehrs an der gesamten Güterverkehrsleistung bis 2030 von 18 auf 23 Prozent erhöht werden könnte.⁴ Eine weitere Möglichkeit den Energieverbrauch zu senken, könnte in der Nutzung von Oberleitungs-Lkw liegen. Die praktische Wirkung der CO₂-Grenzwerte für die Fahrzeugflotten der Hersteller ist im Moment relativ gering, da die Herstellerangaben und die realen Verbräuche weit auseinandergehen. Schätzungen gehen von einer Abweichung von ca. 40 Prozent aus.⁵

Größere Endenergieverbrauchsreduktionen im nationalen Verkehr werden z.B. in den Klimaschutzszenarien von dena/EWI (2018)⁶ und Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) angenommen. Diese setzen jedoch tiefgreifende politische Maßnahmen und technologische Fortschritte voraus. Das Szenario mit dem niedrigsten Endenergieverbrauch im Verkehr im Jahr 2030 in Höhe von 505 Mrd. kWh (dena/EWI 2018) umfasst auch konkrete Handlungsempfehlungen, um das Ziel zu erreichen. Dazu gehört beispielsweise die Verteuerung des motorisierten Individualverkehrs durch Energiesteuern oder die Einführung eines CO₂-Preises im Verkehr. Damit würden entsprechende Veränderungen in der Verkehrsnachfrage und der Verkehrsmittelwahl sowie Anreize für

⁴ URL:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_53_2016_finanzierung_einer_nachhaltigen_gueterverkehrsinfrastruktur_aktualisiert.pdf

⁵ URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-07-18_texte_45-2017_paris-papier-verkehr_v2.pdf

⁶ Ohne internationalen Verkehr.

erneuerbare Kraftstoffe einhergehen. Weitere konkrete Maßnahmen wie Tempolimits, eine Pkw-Maut oder die stärkere Förderung von Radverkehr und ÖPNV werden in dieser Studie allerdings nicht betrachtet. Dagegen umfasst das Klimaschutzszenario 95 von Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) einen breiten Maßnahmenmix aus Energiesteuern, Lkw- und Pkw-Maut, Förderung des ÖPNV und Radverkehrs, strengere Pkw-CO₂-Grenzwerte, Änderung der Entfernungspauschale, Kapazitätserweiterungen des Schienenverkehrs sowie Maßnahmen zur Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeiten (Verkehrsberuhigung, Tempolimits).

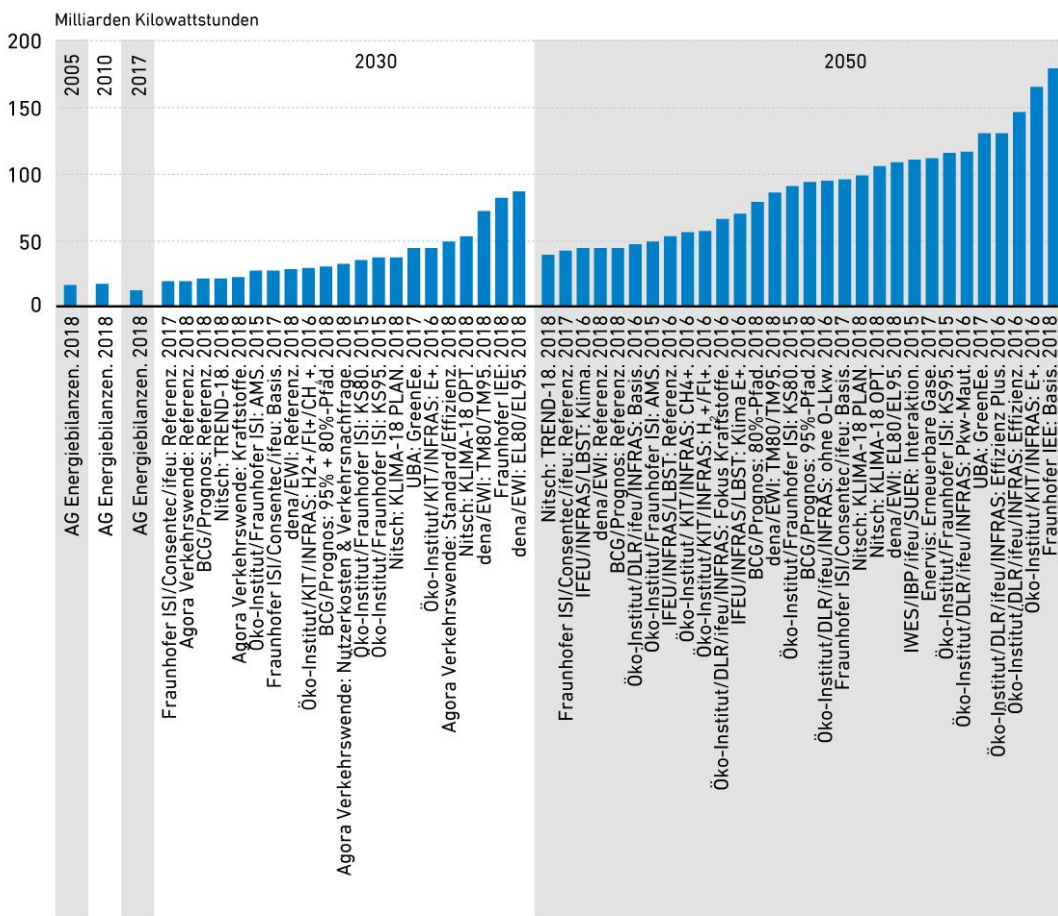
3.2 Elektromobilität

Strom wird im Verkehrssektor in unterschiedlicher Weise eingesetzt: Eine direkte Nutzung erfolgt vor allem im Schienenverkehr sowie in batteriebetriebenen Straßenfahrzeugen. Bisher entfällt der Stromverbrauch im Verkehr im Wesentlichen auf die Schiene. Er belief sich in den vergangenen Jahren nahezu konstant auf zwölf Mrd. kWh. Das entspricht weniger als zwei Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs im Verkehr. Um den Anteil Erneuerbarer Energien im Verkehr zu erhöhen, gilt die verstärkte Nutzung von Strom jedoch als zentrale Stellschraube.

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Szenarien zur direkten Nutzung von elektrischem Strom im Verkehr in Deutschland

Die Werte berücksichtigen in der Regel den Endenergie-Stromverbrauch des Schienenverkehrs, von Elektrofahrzeugen sowie gegebenenfalls von Oberleitungs-LKW.



Eine stärkere direkte Nutzung von Strom kann durch die Verlagerung von Verkehr auf die Schiene sowie durch eine stärkere Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen erreicht werden. Fast alle betrachteten Szenarien rechnen 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. Hierfür müsste allerdings eine neue Infrastruktur aufgebaut werden. Pilotprojekte testen die Technologie bereits in der Praxis.

Bis zum Jahr 2030 reicht der direkte Stromverbrauch für den Verkehr in den ausgewerteten Szenarien von 19 Mrd. kWh (Fraunhofer ISI/Consentec/ifeu: Referenz. 2017, Agora Verkehrswende: Referenz. 2018) bis 87 Mrd. kWh (dena/EWI: EL80/EL95. 2018). Im Jahr 2050 liegen die ausgewiesenen Stromverbräuche zwischen 39 Mrd. kWh (Nitsch: TREND-18. 2018) und 180 Mrd. kWh (Fraunhofer IEE: Basis. 2018). Grund für die großen Differenzen sind im Wesentlichen die unterschiedlichen Annahmen zu den Anteilen der einzelnen Antriebe (Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen, Batterie, Oberleitung) im Fahrzeugbestand. Hohe Werte für die Elektrifizierung des Verkehrs finden sich insbesondere in Klimaschutz-Zielszenarien, was die Bedeutung der effizienten Antriebstechnologie für mehr Klimaschutz im Verkehr illustriert.

Im Szenario E+ des Umweltbundesamts (Öko-Institut/KIT/INFRAS 2016) wird langfristig sogar eine vollständige Elektrifizierung des Straßenverkehrs skizziert, d.h. alle Fahrzeuge verfügen über elektrische Antriebe. Flüssigkraftstoffe würden dann nur noch in Hybridfahrzeugen eingesetzt. Der direkte Stromverbrauch liegt in diesem Szenario im Jahr 2050 bei 166 Mrd. kWh, was aber nur etwa ein Drittel des gesamten Endenergieverbrauchs im Verkehr ausmacht. Die anderen zwei Drittel werden in Form strombasierter Kraftstoffe bereitgestellt, die vor allem im Luft-, Schiffs- und Straßenfernverkehr zum Einsatz kommen. Bei der Studie von Öko-Institut/KIT/INFRAS (2016) ist zu beachten, dass schon 2030 keine Biokraftstoffe mehr eingesetzt werden. Dadurch erhöht sich der Bedarf an strombasierten Kraftstoffen.

Die unterschiedlichen Szenarien mit Fokus auf strombasierten Kraftstoffen oder direkter Elektrifizierung erörtern die Implikationen einer solchen Entwicklung, z.B. welche Kosten, Infrastrukturanpassungen oder Energieverbräuche mit der Wahl der entsprechenden Technologie verbunden wären. Für eine weitgehende Elektrifizierung des Verkehrs bräuchte es demnach optimale Rahmenbedingungen in Bezug auf die technologische Entwicklung, die Ladeinfrastruktur, Nutzerakzeptanz und andere politische Weichenstellungen zugunsten der Elektromobilität (u.a. eine gemeinsame, abgestimmte europäische Verkehrsstrategie). Für den breiten Einsatz strombasierter Kraftstoffe müssten deutlich mehr Erneuerbare-Energien-Anlagen zur Stromerzeugung sowie Power-to-Gas-/Power-to-Liquid-Kapazitäten im Ausland an sonnen- und windreichen Standorten⁷ aufgebaut werden.

3.3 Strombasierte Kraftstoffe (Power-to-Gas/Power-to-Liquid)

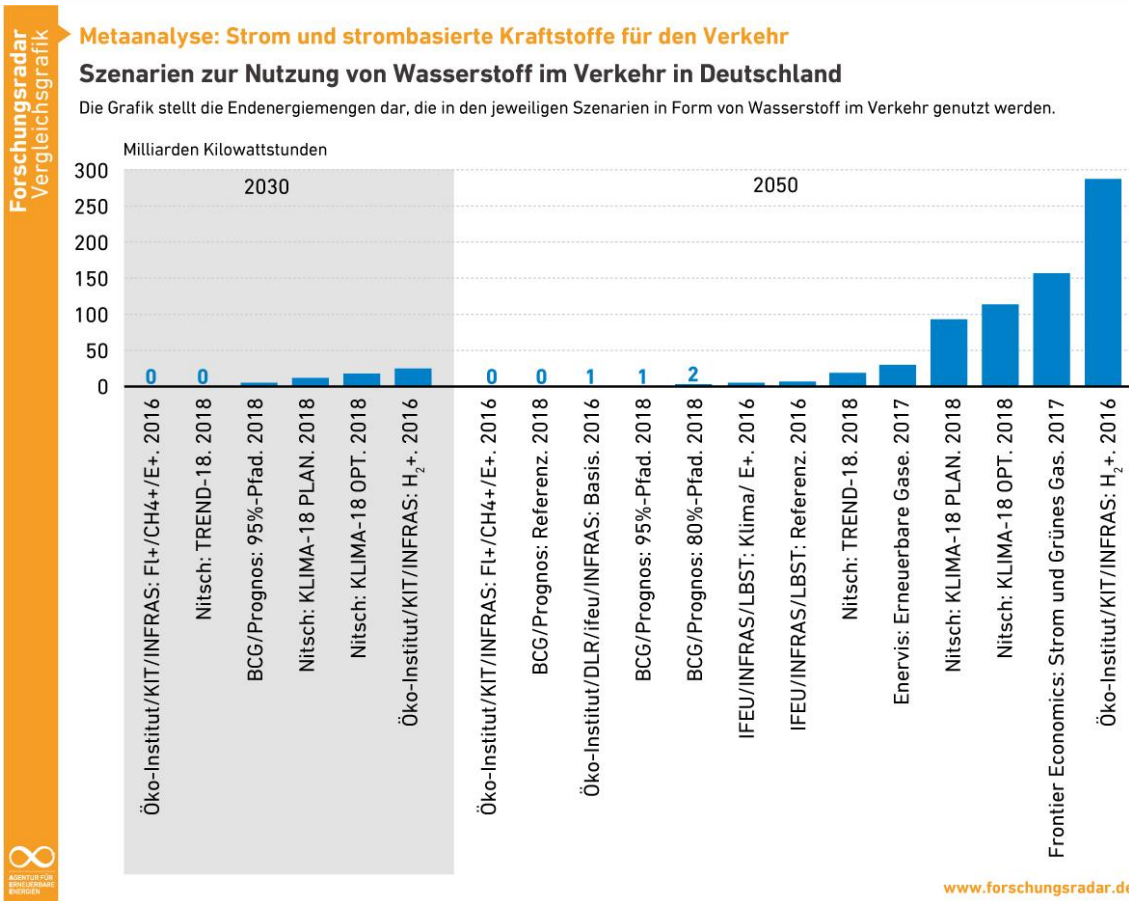
Zur Verknüpfung der Sektoren Strom und Verkehr kann elektrische Energie nicht nur direkt über Elektromobilität, sondern auch indirekt, über die Umwandlung von Strom in Kraftstoffe, genutzt werden. Es gibt Fälle, in denen ein elektrischer Direktantrieb nicht möglich oder technisch und ökonomisch zu aufwändig ist. Besonders für die Luft- und Schifffahrt kommt Elektromobilität wegen technischer Restriktionen nicht in Frage. Aber auch der Straßengüterverkehr wird in den betrachteten Szenarien nicht vollständig elektrifiziert.

Strombasierte Kraftstoffe gibt es gasförmig als Wasserstoff oder Methan (Power-to-Gas) oder flüssig als synthetisches Benzin, Diesel oder Kerosin (Power-to-Liquid). In den Klimaschutz-Zielszenarien mit weitgehender Treibhausgasneutralität decken synthetische Kraftstoffe im Jahr 2050 den größten Anteil des Energiebedarfs im Verkehrssektor. Die Trend- und 80%-

⁷ Eine Ausnahme bildet die Studie Enervis: Erneuerbare Gase. 2017. Hier befinden sich die Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Kapazitäten ausschließlich in Deutschland.

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Treibhausgasminderungs-Szenarien kommen dagegen auch im Jahr 2050 ohne strombasierte Kraftstoffe aus. Die Treibhausgasreduktion findet hier überwiegend in den Sektoren Strom und Wärme statt. Im Verkehrssektor dominieren hingegen weiter fossile Kraftstoffe.



Das Potenzial von Wasserstoff wird sehr unterschiedlich beurteilt. Der Einsatz in den Klimaschutzszenarien reicht von 0 Mrd. kWh (Öko-Institut/KIT/INFRAS: Fl+/CH4+/E+. 2016) bis 288 Mrd. kWh (Öko-Institut/KIT/INFRAS: H₂+. 2016). Auch Frontier Economics (Szenario „Strom und Grünes Gas“ 2017) und Nitsch (Szenario „KLIMA-18 OPT“) rechnen mit großen Beiträgen von Wasserstoff (157 Mrd. kWh bzw. 114 Mrd. kWh).

Der maximale Einsatz von synthetischem Methan reicht bis 383 Mrd. kWh (Öko-Institut/KIT/INFRAS: CH₄+. 2016), der von synthetischen Flüssigkraftstoffen sogar bis 540 Mrd. kWh (Öko-Institut/KIT/INFRAS: Fl+. 2016).

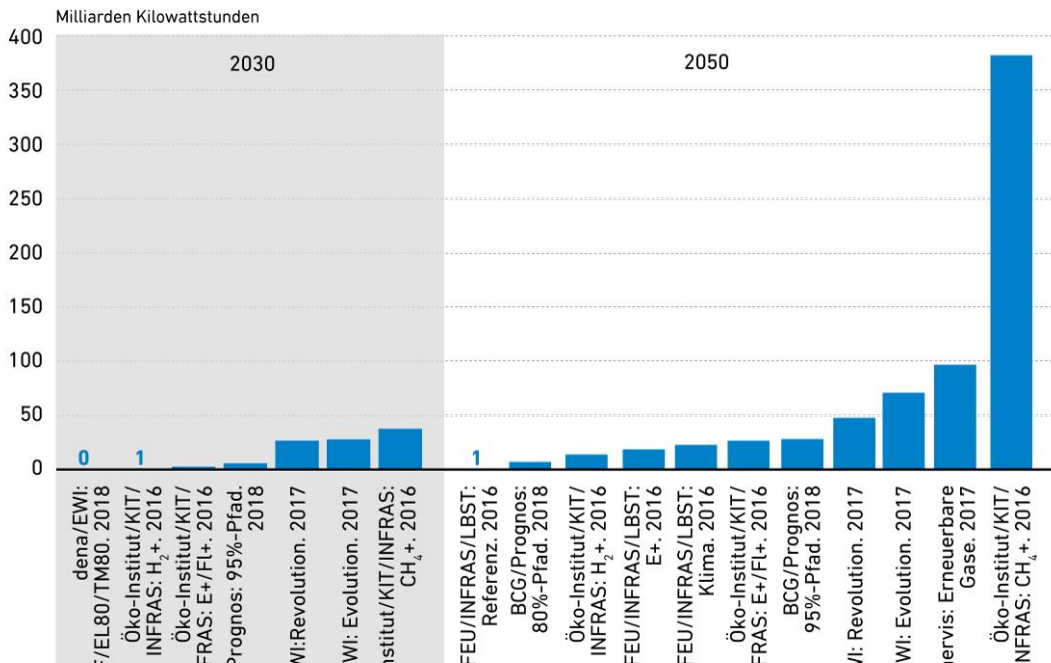
Der Vorteil von Flüssigkraftstoffen ist, dass die bestehende Energie- und Tankinfrastruktur des Verkehrssektors weiter genutzt werden kann. Die Szenarien, die schwerpunktmäßig auf strombasierte Gase setzen, gehen dagegen mit einem Umbau der Infrastruktur einher. Der Vorteil von Wasserstoff gegenüber Methan liegt in dem höheren Wirkungsgrad, da der Schritt der Methanisierung mit Umwandlungsverlusten verbunden ist. Allerdings müsste sowohl eine neue Transport- als auch eine neue Tankinfrastruktur aufgebaut werden. Ende 2018 gab es erst 60 Wasserstofftankstellen in Deutschland. Für Methan spricht, dass es quasi mit fossilem Erdgas identisch ist und dadurch im bestehende Erdgasnetz unbegrenzt speicher- und transportierbar ist. Das Gastankstellennetz (LPG und CNG) ist im Vergleich zu Wasserstoff relativ gut ausgebaut (2019: ca. 900).

Forschungsradar
Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Szenarien zur Nutzung von strombasiertem Methan im Verkehr in Deutschland

Die Grafik stellt die Endenergiemengen dar, die in den jeweiligen Szenarien in Form von strombasiertem, synthetischem Methan (Power-to-Gas) im Verkehr genutzt werden.

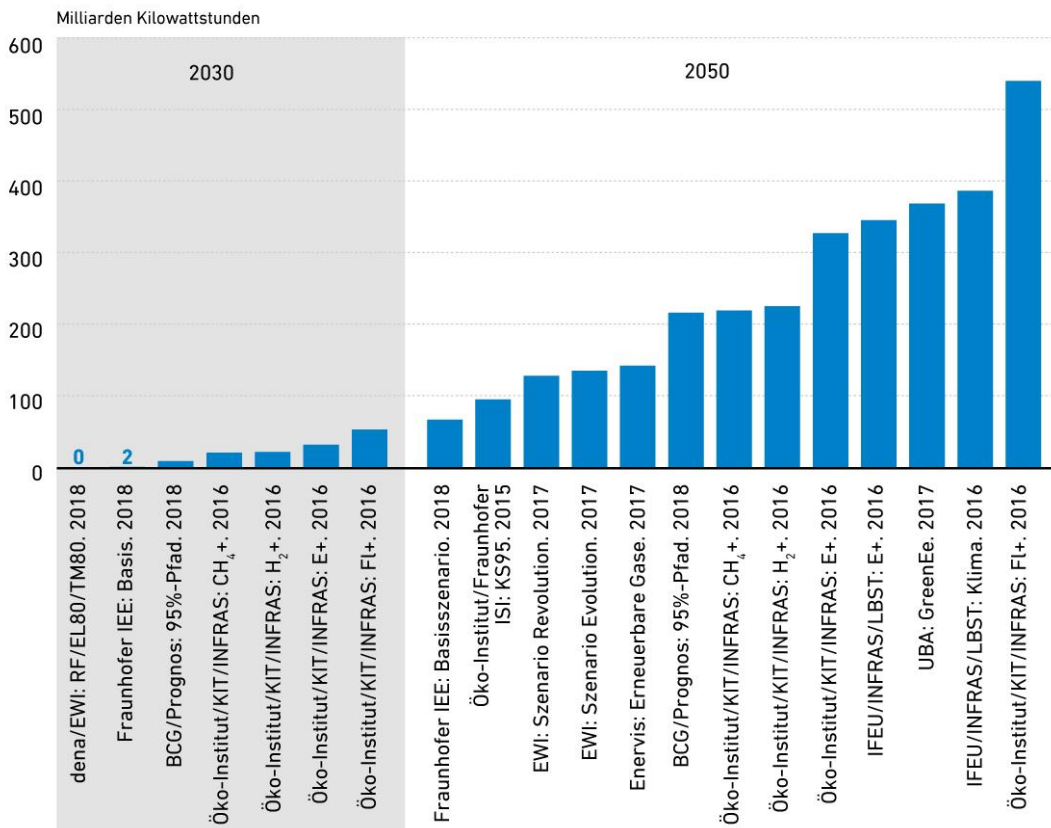


Forschungsradar
Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Szenarien zur Nutzung von strombasierten Kraftstoffen im Verkehr in Deutschland

Die Grafik stellt die Endenergiemengen dar, die in den jeweiligen Szenarien als strombasierter Flüssigkraftstoff (Power-to-Liquid) im Verkehr genutzt werden.

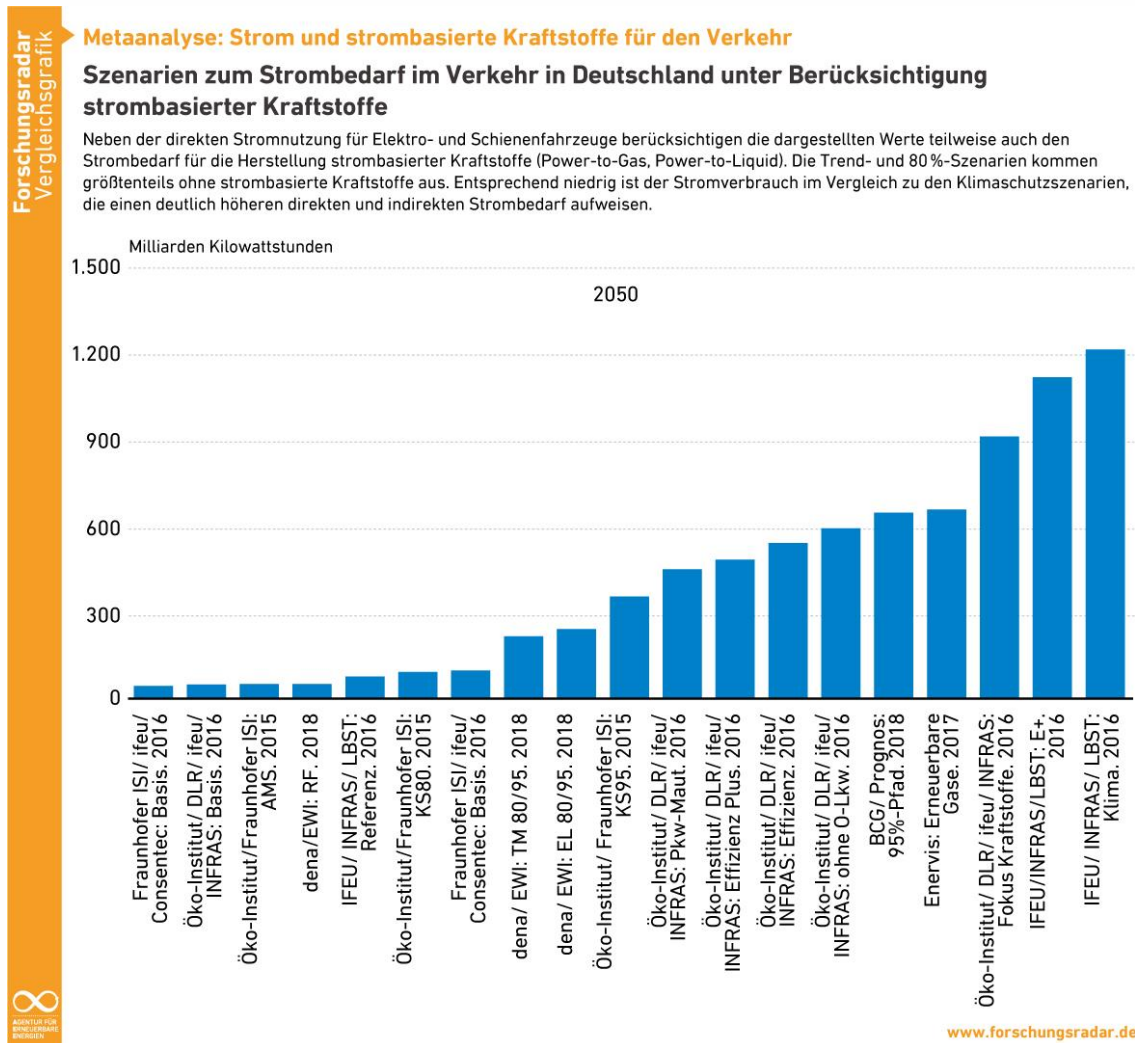


www.forschungsradar.de

3.4 Wechselwirkungen zwischen Strom- und Verkehrssektor

Die Möglichkeit der Dekarbonisierung des Verkehrs durch Energieeffizienz und Biokraftstoffe ist begrenzt. Vor diesem Hintergrund rückt eine verstärkte Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien bzw. strombasierten Gasen und Flüssigkraftstoffen als Ersatz für fossiles Benzin, Diesel und Kerosin ins Blickfeld. Dadurch steigt die Höhe des Stromverbrauchs, was unter Maßgabe des Klimaschutzes wiederum bedeutet, dass der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung dynamisch voranschreiten muss. Auch der für den Verkehr benötigte Strom muss in Zukunft zu 100 Prozent aus Erneuerbaren Energien stammen.

Während sich die direkte Stromnutzung in Form der Elektromobilität durch eine hohe Energieeffizienz auszeichnet, geht die Herstellung strombasierter Kraftstoffe mit großen Umwandlungsverlusten einher. In Szenarien, die große Beiträge strombasierter Kraftstoffe unterstellen, ergibt sich daher auch ein hoher Strombedarf zur Produktion derselben. Der Stromverbrauch im Verkehr könnte durch die direkte und indirekte Stromnutzung auf bis zu 1.218 Mrd. kWh (Ifeu/INFRAS/LBST: Klima. 2016) steigen. Das wäre mehr als das Doppelte des heutigen Stromverbrauchs in Deutschland.



Gleichzeitig würde die stärkere Verflechtung von Verkehrs- und Stromsektor auch große Chancen für die Integration der fluktuierenden Erzeugung aus Solar- und Windenergie bergen. Die

Elektromobilität mit ihren Batteriespeichern, die Elektrolyseanlagen und die Gasinfrastruktur könnten ein erhebliches Lastmanagementpotenzial, Speicherkapazitäten und Systemdienstleistungen für den Stromsektor bereitstellen.

4. Zusammenfassung

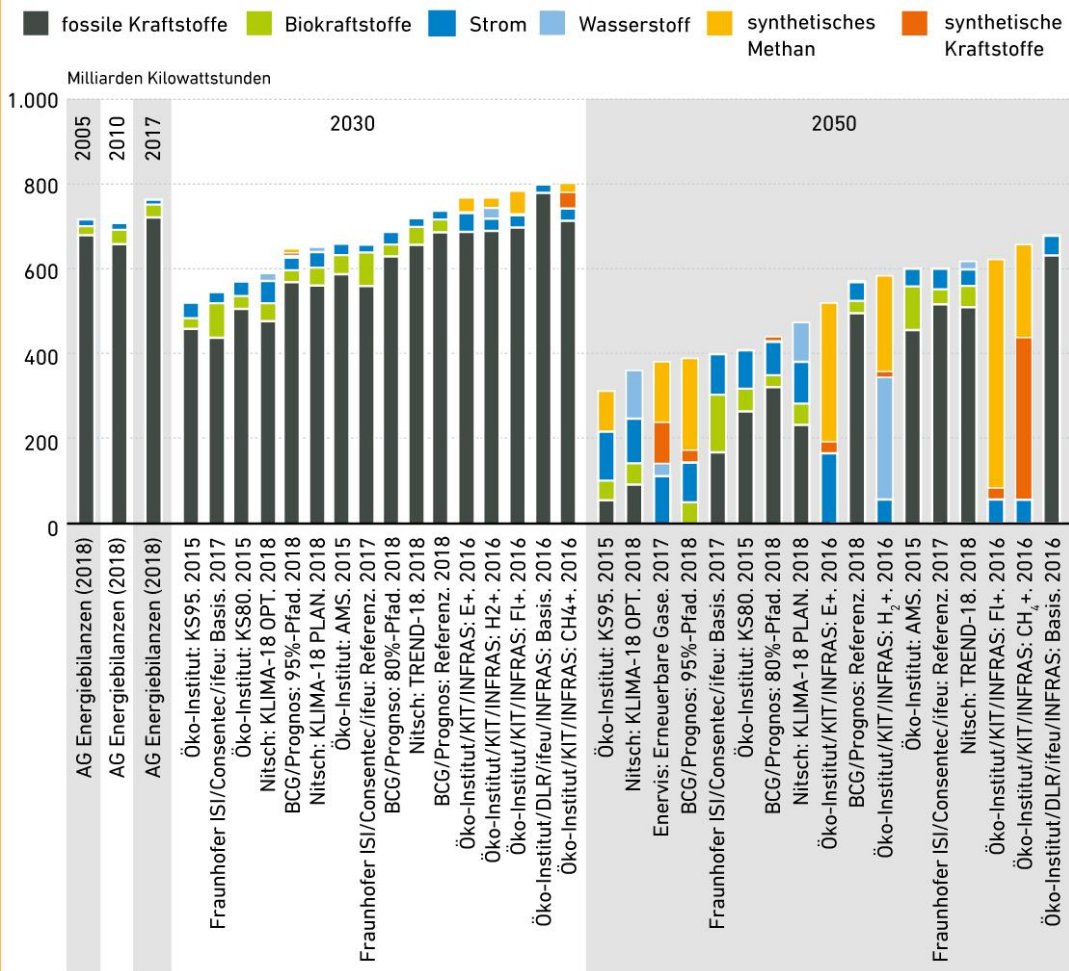
Die Metaanalyse verdeutlicht, dass Strom- und Verkehrssektor in Zukunft in hohem Maße miteinander verbunden sein werden, wenn der Klimaschutz ernst genommen wird. Die Möglichkeiten, den Verkehr über Effizienz, Einsparung und Biokraftstoffe zu dekarbonisieren, sind begrenzt. Im optimistischsten Szenario (Öko-Institut/Fraunhofer ISI: KS95. 2015) sinkt der Endenergiebedarf auf bis zu 313 Mrd. kWh (2017: 765 Mrd. kWh).

Forschungsradar
Vergleichsgrafik

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Szenarien zum Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Verkehr

Zur Dekarbonisierung des Verkehrs stehen verschiedene Energieträger zur Verfügung: Synthetische Gase und Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid), Biokraftstoffe und Strom aus Erneuerbaren Energien. Die Zusammensetzung fällt in den Klimaschutzenszenarien sehr unterschiedlich aus. Im Szenario Enervis 2017 ist unter „synthetisches Methan“ auch Biomethan enthalten.



www.forschungsradar.de

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Eine hohe Nutzung von Biokraftstoffen (136 Mrd. kWh) unterstellt unter den hier untersuchten Szenarien nur das Basisszenario von Fraunhofer ISI/Consentec/ifeu (2017). In der Mehrzahl der ausgewerteten Szenarien liegt der Beitrag der Bioenergie im Verkehr zwischen 27 und 53 Mrd. kWh (2017: ca. 30 Mrd. kWh). So ergibt sich in den ambitionierten Klimaschutz-Zielszenarien (-95 Prozent Treibhausgasreduktion) aus der Differenz zwischen dem Endenergieverbrauch im Verkehr und des Biokraftstoffpotenzials ein Energiebedarf zwischen 264 TWh (Fraunhofer ISI/Consentec/ifeu: Basis. 2017) und 659 TWh (Öko-Institut/KIT/INFRAS: Szenario CH4+. 2016), der aus dem Stromsektor gedeckt werden muss.

Bisher gibt es allerdings kaum Bewegung im Verkehr. Wird der aktuelle Trend fortgeschrieben, so werden die Klimaschutzziele im Verkehr deutlich verfehlt. Für eine Trendwende wären umfangreiche verkehrs- und energiepolitische Maßnahmen sowie technologische Veränderungen erforderlich. Wie Verkehr vermieden bzw. auf umweltfreundliche Verkehrsträger verlagert werden kann, muss ebenso wie die Frage nach alternativen Antrieben und Kraftstoffen stärker in den Blickpunkt gelangen.

Die Elektromobilität gilt dabei als äußerst energieeffizient und unter Einsatz Erneuerbarer Energien als besonders klimafreundlich. Sie kann aus heutiger Sicht jedoch nicht alle Verkehrsbereiche abdecken. Vor allem in der Luft- und Schifffahrt ist ihr Einsatz technisch nicht möglich, aber auch im Straßengüterverkehr bestehen noch Fragezeichen. Insbesondere auf langen Strecken wären Oberleitungssysteme eine potenzielle Lösung, deren Umsetzung jedoch noch nicht absehbar ist. Eine Alternative wären strombasierte Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid). Bei Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien wären sie ebenfalls klimafreundlich, jedoch benötigt ihre Herstellung aufgrund hoher Umwandlungsverluste viel Energie, was ihre Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit von technologischen Fortschritten abhängig macht. Die für den Verkehr potenziell benötigten Strommengen werden den Stromsektor vor zusätzliche Herausforderungen stellen, bieten aber gleichzeitig große Chancen für die optimale Nutzung von Wind- und Solarenergie.

5. Ausgewertete Literatur und Erläuterungen

Die folgenden 16 Veröffentlichungen wurden auf Aussagen zur Verknüpfung des Verkehrs- mit dem Stromsektor ausgewertet:

- ▶ [Agora Verkehrswende: Klimaschutz im Verkehr. Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030. 2018](#)

Die Studie untersucht die Wirkungen verschiedener Maßnahmen auf den Treibhausgasausstoß des Verkehrs. Zu den erforderlichen nationalen Maßnahmen rechnen die Autoren die Internalisierung externer Kosten des Verkehrs durch die Bepreisung von Kraftstoffen, Fahrzeugen und deren Nutzung. Um die Voraussetzung für Verkehrsverlagerungen zu schaffen, seien der Infrastrukturaufbau für den öffentlichen Verkehr und den Schienengütertransport sowie Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität in Städten notwendig. Darüber hinaus bedürfe es klimafreundlicher Kraftstoffe. Es werde aber deutlich, dass eine Umstellung auf CO₂-freie Kraftstoffe alleine nicht ausreiche, sondern eine Reduzierung des Endenergiebedarfs zwingend erforderlich sei.

Um das Klimaschutzziel im Verkehrssektor bis 2030 zu erreichen, müsse der Endenergiebedarf an fossilen Energieträgern in allen Szenarien um fast 40 Prozent gegenüber 2015 zurückgehen. Unterschiede zwischen den Szenarien ergeben sich beim Strombedarf und dem Einsatz von Biokraftstoffen. Der Strombedarf in den Szenarien unterscheidet sich vor allem durch die Höhe des Einsatzes von Elektromobilität und durch das Ausmaß der Verlagerung auf die Schiene.

- ▶ [BCG/Prognos: Klimapfade für Deutschland. 2018](#)

Ziel der Studie ist es, kosteneffiziente Wege zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele aufzuzeigen. Zur Erreichung des 80 %-Ziels seien bereits umfangreiche Emissionsminderungen im Straßenverkehr, u.a. durch Elektrifizierung, unumgänglich. Fossile Kraftstoffe würden im 80 %-Pfad im Jahr 2050 noch 57 Prozent des Endenergieverbrauchs des nationalen Verkehrs ausmachen. Synthetische Kraftstoffe würden erst im 95%-Pfad notwendig. Der 95 %-Pfad erfordere eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs. Der Anteil der elektrischen Antriebe am Pkw-Bestand würde bis 2050 auf 80 Prozent ausgebaut werden. Zusätzlich wären 125 TWh synthetische Kraftstoffe erforderlich. Für den internationalen Luft- und Seeverkehr würden weitere 143 Mrd. kWh benötigt. Die Herstellung dieser Kraftstoffe würde eine erneuerbare Stromerzeugung erfordern, die den gesamten Nettostromverbrauch Deutschlands im Jahr 2015 übersteigt.

- ▶ [Dena/EWI: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. 2018](#)

Die Studie untersucht sektorenübergreifend, wie Deutschland seine Klimaschutzziele für 2050 erreichen kann. Zu diesem Zweck werden verschiedene Transformationspfade für das deutsche Energiesystem entwickelt und miteinander verglichen.

Ein entscheidender Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sei die Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs der Verkehrsmittel. Neue Mobilitätsstrategien müssten das Verkehrsaufkommen senken. Große Herausforderungen beständen im Güterstraßenfernverkehr sowie bei der Schiff- und Luftfahrt. Die Energienachfrage könne durch Elektrifizierung und Effizienz trotz steigender Verkehrsnachfrage um 43 bis 52 Prozent reduziert werden. Biokraftstoffe spielten kurz- und mittelfristig weiterhin eine wichtige Rolle, im Vergleich zu anderen Erneuerbaren Energien im Verkehr nehme die Bedeutung aber sukzessive ab. Im Jahr 2050 würden zwischen 130 und 164 Mrd. kWh/a an synthetischen Kraftstoffen erzeugt. Im Straßenverkehr kämen ausschließlich Elektromobilität und Wasserstoff zum Einsatz.

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

► [Enervis: Erneuerbare Gase – ein Systemupdate der Energiewende. 2017](#)

Die Studie vergleicht zwei Szenarien für ein treibhausgasneutrales Energiesystem im Jahr 2050. Dabei wird unter dem Hinblick der Kosteneffizienz untersucht, in welchen Bereichen und in welchem Umfang erneuerbare Gase technisch erforderlich und volkswirtschaftlich sinnvoll sind. Im Szenario „Maximale Elektrifizierung“ werden alle Sektoren so weit wie möglich elektrifiziert. Erneuerbare Gase (synthetische und biogene Gase) kommen nur zum Einsatz, wo sie technisch unverzichtbar sind. Im Szenario „Optimiertes System“ werden sie überall eingesetzt, wo die Autoren sie für volkswirtschaftlich vorteilhaft gegenüber elektrischen Anwendungen halten. Es werden die Energieverbrauchssektoren Strom, Wärme, Verkehr sowie der stoffliche Einsatz von Energieträgern in der Industrie untersucht.

In beiden Szenarien erfolge die Dekarbonisierung des motorisierten Individualverkehrs durch Elektromobilität, im Luftverkehr durch synthetische Flüssigkraftstoffe und im Schiffsverkehr durch synthetische Gase. Der bei der Kerosinherstellung anfallende Diesel- und Benzinkraftstoff werde im Straßengüterverkehr eingesetzt. Der Endenergieverbrauch werde durch die Effizienzgewinne durch Elektrifizierung etwa halbiert auf 382 Mrd. kWh. Der größte Teil entfalle auf Flüssigkraftstoffe (143 Mrd. kWh), gefolgt von synthetischen Gasen (127 Mrd. kWh). Der direkte Stromverbrauch hat mit 112 Mrd. kWh den kleinsten Anteil.

► [EWI: Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO2-Minderung. 2017](#)

Die Studie vergleicht zwei Klimaschutzszenarien bis 2050, eines mit maximaler Elektrifizierung (Szenario Revolution) in allen Sektoren und eines mit breitem Einsatz strombasierte Brenn- und Kraftstoffe (Szenario Evolution). Die Stromnachfrage steigt in beiden Szenarien bis 2030 v.a. wegen des Verkehrs. Ab 2030 erfolge ein signifikanter Einsatz strombasierter Kraftstoffe. Der wesentliche Teil davon werde importiert. Bis zum Jahr 2050 stiege der Bedarf an synthetischen Gasen und Flüssigkraftstoffen auf 448 Mrd. kWh (Szenario Revolution) bzw. 634 Mrd. kWh (Szenario Evolution). Das Szenario Evolution sei um 139 Mrd. Euro günstiger als das Szenario Revolution. Im Szenario Evolution bestehe zwar ein um 252 Mrd. Euro höherer Importbedarf an synthetischen Gasen, dafür würden Kosten in Höhe von 272 Mrd. Euro für Stromnetze und -importe eingespart.

Die Autoren kommen zu dem Fazit, dass sich eine frühzeitige Festlegung auf eine weitgehende Elektrifizierung aller Sektoren mittel- und langfristig als volkswirtschaftlich nachteilig erweisen könne. Die Versorgungssicherheit werde sich zudem reduzieren, wenn eine einseitige Infrastrukturabhängigkeit von den Stromnetzen geschaffen werde.

► [Fraunhofer ISI/Consentec/ifeu: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. 2017](#)

Die Langfrist- und Klimaszenarien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie modellieren ein kostenoptimiertes Energiesystem, die das alle Sektoren (Strom, Wärme, Verkehr, Industrie) abdeckt. Mit Ausnahme des Referenzszenarios werden in allen Szenarien die energie- und klimapolitischen Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung bis 2050 erreicht, d.h. eine Reduzierung der Treibhausgase um 80 bis 95 Prozent.

Synthetische Gase oder Kraftstoffe seien bis zu einer 80-prozentigen Reduktion der Treibhausgase weder erforderlich noch wirtschaftlich. Die Nachfrage derjenigen Bereiche, die sich nicht elektrifizieren lassen oder denen keine anderen Erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen, könnten mit dem verbleibenden Emissionsbudget weiter durch fossile Energien gedeckt werden. Als Flexibilitätsoption werde Power-to-Gas/Power-to-Liquid nicht benötigt. Stromüberschüsse

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

würden v.a. durch Power-to-Heat (PtH) und Elektromobilität aufgenommen. Im Basisszenario werde die Senkung der Treibhausgasemissionen im Verkehr werde vor allem durch Effizienz und Biokraftstoffe erreicht. In den Zielszenarien kommen zunächst Hybridfahrzeuge und später vollelektrische Fahrzeuge und Oberleitungs-LKW zum Einsatz.

► [Fraunhofer IEE: Entwicklung des Straßenverkehrs und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95% THG-Klimazielszenarien. 2018](#)

Ziel der Studie ist es, Optionen zur Entwicklung des Straßenverkehrs im Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele zu untersuchen. Im Fokus steht dabei die Rückkopplung zwischen der Entwicklung des Straßenverkehrs, der Entwicklung des Energieversorgungssystems und der Rolle importierter synthetischer Kraftstoffe.

Für die Entwicklung des Verkehrsaufkommens wird ein Szenario unterstellt, welches zwar ein geringes Maß an Verkehrsverlagerung annimmt, aber keine Verkehrsvermeidung. Dabei wird deutlich, dass trotz einer maximalen Elektrifizierung des Straßenverkehrs ein großer Kraftstoffverbrauch, insbesondere für den internationalen Flug- und Schiffsverkehr, verbleiben würde. In Summe wären für die vollständige Dekarbonisierung mittels importierter synthetischer Flüssigkraftstoffe ca. 650 Mrd. kWh Strom für deren Herstellung für den Verkehr notwendig. Nationale PtG-Anlagen hätten lediglich ein ökonomisches Potenzial von 7,3 Gigawatt.

► [Frontier Economics/IAEW/Four Management/EMCEL: Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland. 2017](#)

Die Studie beschäftigt sich mit der Fragestellung, welchen Beitrag die Gasinfrastruktur zur Energiewende leisten kann. Es werden drei Szenarien für das Jahr 2050 mit und ohne Nutzung der Gasinfrastruktur gegenübergestellt. Es wird für alle Szenarien von einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 Prozent gegenüber 1990 ausgegangen. Ein Szenario setzt ausschließlich auf Strom, wobei auf die Gasinfrastruktur komplett verzichtet wird. Im Szenario „Strom und Gasspeicher“ sind die Endanwendungen ebenfalls überwiegend elektrisch. Synthetische Gase werden nur zur Rückverstromung eingesetzt. Im dritten Szenario „Strom und grünes Gas“ wird Wasserstoff und synthetisches Methan auch für einen Teil der Endanwendungen im Wärme- und Verkehrssektor genutzt. Im Flug- und Schiffsverkehr werden zu 100 Prozent importierte synthetische Flüssigkraftstoffe (PtL) genutzt. Der Schienenverkehr wird bis 2050 vollständig elektrifiziert. Im Straßenverkehr werden 50 Prozent der Verkehrsleistung über synthetische Flüssigkraftstoffe abgedeckt. Die verbleibenden 50 Prozent variieren je nach Szenario. In den Szenarien „Nur Strom“ und „Strom und Gasspeicher“ kommt hier nur Elektromobilität zum Einsatz. Im Szenario „Strom und Grünes Gas“ kommt neben Elektro- auch Gasfahrzeuge zum Einsatz. Der Endenergieverbrauch im Verkehr sinkt in den beiden Elektrifizierungsszenarien bis 2050 um 20 Prozent, im Gasszenario um 10 Prozent.

Die Autoren kommen zu dem Fazit, dass die Nutzung der Gasinfrastruktur die Kosten der Dekarbonisierung senken kann. Grund für die Reduzierung der Gesamtkosten seien vor allem die eingesparten Stromnetzkosten sowie die günstigeren Endanwendungen. Die Gesamteinsparungen der Gasnetznutzung im Szenario „Strom und grünes Gas“ betragen bis zum Jahr 2050 etwa zwölf Milliarden Euro pro Jahr. Der Stromnetzausbau könne im Übertragungsnetz um 40 Prozent und im Verteilernetz um 60 Prozent reduziert werden.

► [Ifeu/INFRAS/LBST: Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. 2016](#)

Ziel der Studie ist es, ein anspruchsvolles, aber realistisches Klimaschutzszenario für den Verkehrssektor zu entwickeln. Im Zuge dessen werden die möglichen Beiträge von

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Verkehrsvermeidung, -verminderung und -verbesserung sowie der Nutzung Erneuerbarer Energien zur Minderung des Treibhausgasausstoßes diskutiert. Einen Schwerpunkt bildet die Analyse von Power-to-Liquid und Oberleitungshybrid-LKW als Optionen für den Güterverkehr.

Um die für den Klimaschutz notwendige Entwicklung im Verkehr erreichen zu können, empfehlen die Autoren Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz (z.B. durch CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw und Nutzfahrzeuge), Anreize für den Wechsel auf elektrische Antriebe und zur Schaffung der entsprechenden Ladeinfrastruktur. Der Endenergieverbrauch des nationalen Verkehrs könne durch entschlossene verkehrspolitische Maßnahmen und den Einsatz der Elektromobilität um 50 bis 60 Prozent gesenkt werden. Zunächst solle eine starke Energieverbrauchsminderung angestrebt werden (-60 Prozent bis 2050). Wenn sich dann eine hohe Verfügbarkeit Erneuerbarer Energien abzeichne, könne das Verbrauchsminderungsziel entsprechend angepasst werden.

Im Referenzszenario steigt die Personenverkehrsleistung bis 2030 weiter an, insbesondere im Flugverkehr, aber auch auf der Straße. Danach sinkt die Personenverkehrsleistung, vor allem aufgrund des unterstellten Bevölkerungsrückgangs. Zudem kommt es zu einer leichten Verschiebung von der Straße auf die Schiene. Im Klimaschutzszenario wächst die Personenverkehrsleistung deutlich weniger und der Verkehr verlagert sich stärker von der Straße auf die Schiene. Der Endenergieverbrauch nimmt im Referenzszenario bis 2050 um 37 Prozent ab gegenüber dem Wert von 2005. Im Klimaschutzszenario ergibt sich bei gleicher Effizienzentwicklung durch die geringere Verkehrsleistung und mehr Verkehrsverlagerung eine entsprechend stärkere Verbrauchssenkung. Die Güterverkehrsleistung wächst im Referenzszenario sehr stark (um 75 Prozent bis 2050). Im Klimaschutzszenario liegt der Wert lediglich geringfügig darunter, der im Vergleich deutlich geringere Endenergieverbrauch des Güterverkehrs wird vor allem durch eine starke Verkehrsverlagerung auf die Schiene bewirkt. Die Autoren schlussfolgern, dass der Güterverkehr eine besondere Herausforderung für den Klimaschutz im Verkehr darstelle. Trotz der Annahme sehr ehrgeiziger Maßnahmen seien die Möglichkeiten zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung begrenzt. Umso wichtiger seien hier klimafreundliche Antriebe auf Basis Erneuerbarer Energien.

Batterieelektrische sowie Plug-in-Hybrid-elektrische Fahrzeuge stellen eine Schlüsseltechnik für den Straßenverkehr dar. Für den Güterfernverkehr auf der Straße werden Oberleitungs-Hybrid-Lkw trotz des Infrastrukturaufwands als die wirtschaftlichste und effizienteste Technik betrachtet. Noch sei nicht klar, welche der in Frage kommenden Techniken aus Emissions- und Kostensicht oder im Hinblick auf die Umsetzungschancen am vorteilhaftesten sei. Wichtigste Optionen für den Schiffs- und Flugverkehr seien flüssige Kraftstoffe und Gase.

► [Fraunhofer IWES/ Fraunhofer IBP/ ifeu/ Stiftung Umweltenergierecht \(2015\): 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 dabei 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 für den Verkehrs- und Wärmesektor ab und entwickeln Vorschläge, um die als erforderlich identifizierten Schlüsseltechnologien in den Markt einzuführen.

Unter der Prämisse, dass der Energiebedarf im Wärme- und Verkehrssektor in Zukunft zu einem

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

großen Teil mit Strom aus Windenergie und Photovoltaik gedeckt wird, ergibt sich im Zielszenario für das Jahr 2050 ein jährlicher Strombedarf von 793 Terawattstunden (TWh) in Deutschland. Um die Stromnachfrage zu decken, sieht das Szenario eine installierte Leistung von 200 Gigawatt (GW) Photovoltaik, 140 GW Onshore-Wind und 38 GW Offshore-Wind vor. Als Schlüsseltechnologien zur Integration der fluktuierenden Stromerzeugung im Verkehrssektor identifizieren die Autoren vollelektrische PKW, Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge, Oberleitungs-LKW, Batterien und Power-to-Gas. Im Verkehr seien möglichst hohe Anteile direkter Stromnutzung anzustreben, da die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe sehr viel Strom benötige. Für die Förderung sauberer Technologien im Verkehrssektor sei z.B. die Einführung eines Bonus-Malus-Systems als „Verschmutzungssteuer oder -abgabe“ im Wege der Kfz-Steuer möglich. Im Güterverkehr gelte es überhaupt erst die notwendige Infrastruktur für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw aufzubauen und z.B. über die bestehende oder eine neue Maut zu finanzieren.

- ▶ [Nitsch, Joachim \(2018\): Was für einen erfolgreichen Klimaschutz erforderlich ist. Schlussfolgerungen aus aktuellen Szenarien der deutschen Energieversorgung](#)

Die Studie beschäftigt sich mit den notwendigen Strukturveränderungen und Maßnahmen für den notwendigen Umbau der Energieversorgung im Sinne eines wirksamen Klimaschutzes. Die erarbeiteten Klimaschutzszenarien greifen vorliegende Erkenntnisse und Handlungsvorschläge auf und leiten die notwendigen Schritte zum Umbau der Energieversorgung ab. Das Energieszenario TREND-18 schreibt die derzeitigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und des derzeitigen Förderinstrumentariums für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz fort. Das Szenario KLIMA-18 PLAN beschreibt die Transformation der Energieversorgung gemäß der im Klimaschutzplan 2050 definierten Zielsetzung für 2030 (THG-Reduktion -55 bis -56 Prozent). Das Klimaschutzszenario KLIMA-18 OPT führt bis 2050 zu einer fast ausschließlich auf Erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung mit dem Ziel den Treibhausgasausstoß bis 2050 um -95 Prozent zu reduzieren.

Die erneuerbare Stromleistung müsse dazu rascher und in deutlich größerem Umfang ausgebaut werden (11 Gigawatt netto pro Jahr). 305 Mrd. kWh Strom werden im Jahr 2050 in 235 Mrd. kWh Wasserstoff umgewandelt. Davon werden 48 Prozent im Verkehr eingesetzt. Das zweckmäßigste Instrument sei die ausnahmslose CO₂-Bepreisung aller fossilen Energieträger gemäß ihrem Treibhausgaspotenzial.

- ▶ [Öko-Institut: Handlungsbedarf und -optionen zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität. 2017](#)

Die Studie analysiert die Wirkungen der Elektromobilität auf die Treibhausgasemissionen von Verkehrs- und Stromsektor. Es soll das Klimaschutzpotenzial der Elektromobilität aufgezeigt werden.

Das Szenario geht von 4,8 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 aus. Für die Bewertung des Klimaschutzeffekts der Elektromobilität sollten zwei Betrachtungsebenen berücksichtigt werden: Eine Systemperspektive betrachtet die Effekte der Technologie auf die Emissionen im gesamten System von Energieversorgung und Mobilität. Eine individuelle Perspektive untersucht die Effekte, die sich auf den einzelnen Fahrzeugnutzer zurückführen lassen. Außerdem müsse die Bewertung im Rahmen der bestehenden Regularien und Instrumente erfolgen (Ausbauziele für Erneuerbare Energien, der EU-Emissionshandel, und das Erneuerbare –Energien-Gesetz).

Aus der Systemperspektive könne ein deutlicher Klimavorteil der Elektromobilität als gesichert angesehen werden. Die Elektromobilität führe zu einer Emissionsreduktion in Höhe von 3,1 bis 3,7 Mio. t CO₂ im Jahr 2030. Der höhere Wert werde nur erreicht, wenn die Elektrofahrzeuge

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

systemdienlich geladen werden. Der Strombedarf der Elektromobilität liege bei zwei Mrd. kWh in 2020 und 15 Mrd. kWh im Jahr 2030. Somit stammen in diesem Szenario drei Prozent der Stromnachfrage im Jahr 2030 aus der Elektromobilität. Im Szenario „ungesteuertes Laden“ werden knapp 60 Prozent der zusätzlichen Stromnachfrage der Elektromobilität durch erneuerbaren Strom gedeckt. Im optimistischen Szenario „gesteuertes Laden“ kann dieser Anteil auf etwa 70 Prozent erhöht werden. Intelligente Ladestrategien könnten zu verschiedenen Zwecken eingesetzt werden, z.B. zur Vermeidung von Lastspitzen im lokalen oder überregionalen Stromnetz, oder zur gezielten Nutzung von überschüssigem Strom aus Erneuerbaren Energien zur Ladung der Batterien. Mittelfristig werde es allerdings nur in geringem Umfang möglich sein, überschüssigen Strom durch intelligentes Laden zu nutzen. Zum einen würden die Überschüsse durch regionale Netzengpässe verursacht und zum anderen träten sie nur über eine begrenzte Zahl von Stunden im Jahr auf. Damit Fahrzeuge diese Überschüsse nutzen können, müssten sie sich in der betreffenden Region befinden und während des Auftretens der Überschüsse geladen werden. Zudem würden die Stromnetze weiter verstärkt und ausgebaut, um die derzeitigen und künftig erwarteten Netzengpässe zu vermeiden. Aus diesen Gründen werde systemdienliches Laden auf absehbare Zeit wohl vorrangig dafür eingesetzt werden, Lastspitzen durch zeitgleiches Laden vieler Fahrzeuge zu vermeiden.

► [Öko-Institut/DLR/ifeu/INFRAS: Endbericht Renewbility III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. 2016](#)

Das Forschungsvorhaben zielte darauf, Aussagen zum erforderlichen Anteil der Elektromobilität und der Endenergiebedarfsreduzierung des Verkehrs unter Berücksichtigung anderer Maßnahmen und deren Wechselwirkungen zu treffen. Der Modellierungsansatz analysiert die Wirkung konkreter Instrumente und Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage, den Energieverbrauch und den Treibhausgasausstoß. Es wurde verstärkt auf das Thema „Strom im Verkehr“ und die Wechselwirkungen zwischen dem Verkehrssektor und dem Stromsektor eingegangen. In Renewbility III werden nur Klimaschutzszenarien betrachtet, die bis zum Jahr 2050 zu einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors führen.

Die Zielerreichung sei auf unterschiedlichen Wegen und mit unterschiedlichen Energiebedarfen möglich. Je nach Szenario stünden andere Technologien und Maßnahmen im Fokus. Im Fokus der politischen Rahmenbedingungen sehen die Autoren eine Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte, die Erhöhung der Kraftstoffpreise, die Förderung von öffentlichem Verkehr, Fuß- und Radverkehr sowie Parkraumbewirtschaftung in Städten.

Im Szenario Effizienz führt eine Effizienzsteigerung der Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 zu einem sehr hohen Anteil der Elektromobilität, und zwar sowohl bei Pkw als auch bei Lkw. Die verbleibenden Flüssigkraftstoffe werden zu großen Teilen synthetisch aus Strom aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt. Im Szenario Effizienz plus wurden zusätzlich zu den effizienzsteigernden Maßnahmen auch Schritte zur Steigerung der Lebensqualität in Innenstädten und eine Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs berücksichtigt. Im Basisszenario werden im Jahr 2050 keine Biokraftstoffe mehr eingesetzt. In den Klimaschutzszenarien läuft zwar der Einsatz von Biokraftstoffen der ersten Generation aus, aber Biokraftstoffe der zweiten Generation kommen weiter zur Anwendung. Für 2050 wird in den Renewbility-Klimaschutzszenarien eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors hinterlegt. 5 Prozent des Energiebedarfs wird durch Biokraftstoffe gedeckt, 95 Prozent über Strom. Der Strom müsse überall dort, wo es möglich ist, direkt genutzt werden. Strombasierte Kraftstoffe sollten nur dann zum Einsatz kommen, wenn diese Option nicht zur Verfügung steht, also voraussichtlich im Luft- und Seeverkehr. Die Szenarien zeigen, dass eine Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor bis 2050 von rund 60

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Prozent möglich sei – durch eine Kombination der Effizienzsteigerung des Verkehrssystems und der Fahrzeuge selbst. Die strombasierten Kraftstoffe werden in den Szenarien überwiegend importiert.

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

Im Zentrum der Studie steht die Frage, wie sich eine Fortschreibung der jeweils geltenden politischen Rahmenbedingungen auf die klimapolitischen Zielsetzungen auswirken würde und welche Maßnahmen und Strategien notwendig wären, um bis 2050 eine Treibhausgasminderung um 80 oder 95 Prozent gegenüber 1990 zu erreichen. 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.

In den Klimaschutzszenarien sinkt die Stromnachfrage bis 2030, steigt danach aber deutlich an, weil fossile Energieträger in anderen Sektoren (Wärme, Verkehr, Industrie) durch Strom ersetzt werden müssen. Die wichtigsten „neuen“ Stromverbraucher seien Elektromobilität, Wärmepumpen, Elektrokessel in Wärmenetzen sowie Power-to-Gas. Synthetische Gase und Flüssigkraftstoffe würden ab dem Jahr 2040 nur im KS 95 im Verkehr zunehmend zum Einsatz kommen.

Ohne verstärkte Maßnahmen (AMS) würden die Treibhausgasemissionen des nationalen Verkehrs nur um 46 Prozent gegenüber 1990 sinken, unter Berücksichtigung des internationalen Verkehrs sogar nur um 24 Prozent. In den Klimaschutzszenarien würden die Verkehrsemissionen hingegen um 81 Prozent (KS 80) bzw. 98,4 Prozent (KS 95) reduziert. Bis 2030 sei politisch vor allem die Förderung effizienterer Verkehrsträger (öffentlicher Verkehr, Schiene, Fahrrad) angezeigt sowie die Effizienzsteigerung bei Pkw und Lkw durch ambitionierte Emissionsgrenzwerte. Eine Erhöhung der Kraftstoffsteuern oder fahrleistungsabhängige Maut könne Rebound-Effekte verhindern. Im Luftverkehr müsse ein wirksamer Emissionshandel eingeführt werden.

Im Klimaschutzszenario 95 wird einer umfassenderen Änderung des Mobilitätsverhaltens jüngerer Generationen Rechnung getragen. Damit verbunden ist auch die Ausweitung der Intermodalität. Die Personenverkehrsnachfrage geht dadurch gegenüber dem AMS (2012) und dem KS 80 zurück. Es findet eine Verkehrsverlagerung hin zu nicht motorisierten Verkehrsträgern statt. Zudem bleibt die Verkehrsnachfrage gemessen an der Gesamtbevölkerung relativ konstant und nimmt nur aufgrund des Bevölkerungsrückganges ab. Im Güterverkehr findet wie auch schon im AMS eine Verschiebung der Verkehrsträger zum Schienenverkehr statt. Der Pkw-Bestand verringert sich im KS 95 auf 32 Millionen Fahrzeuge. Der Endenergiebedarf des Verkehrssektors liegt im Klimaschutzszenario 95 nochmals deutlich unter den Werten des Klimaschutzszenario 80. Während im Zeitraum bis 2030 die Reduktion des Endenergieverbrauchs vor allem auf die Effizienzsteigerung der verbrennungsmotorischen Fahrzeuge im Personen- und Güterverkehr, die Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene und die Reduktion des MIV zurückzuführen ist, findet der Großteil der Elektrifizierung des Verkehrssektors in der Periode zwischen 2030 und 2050 statt.

► [Öko-Institut/KIT/INFRAS: Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. 2016](#)

Die Studie vergleicht verschiedene Szenarien für einen treibhausgasneutralen Verkehrssektor im Jahr 2050. Daraus sollen Handlungsempfehlungen für eine langfristige Energieversorgungsstrategie für den Verkehrssektor abgeleitet werden. Zu diesem Zweck werden die Kosten für die Energieversorgung, Infrastruktur und Fahrzeugherstellung bei unterschiedlichen Lösungswegen miteinander verglichen. Wechselwirkungen mit den Sektoren Strom und Wärme werden nicht berücksichtigt.

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Die Autoren gehen davon aus, dass die Verkehrsleistung bis 2050 um insgesamt 25 Prozent gegenüber 2010 steigen wird. Vor allem Schifffahrt und Flugverkehr nehmen demnach stark zu, insgesamt dominiert jedoch weiter der Straßenverkehr. Verkehrsvermeidung, -verlagerung und Energieeffizienz könnten den Endenergieverbrauch und den Treibhausgasausstoß des Verkehrs bis 2050 annahmegemäß nur um bis zu 50 Prozent gegenüber 2005 senken. Um die Energieversorgung im Verkehr treibhausgasneutral zu gestalten, müssen unterschiedliche Energieträger zum Einsatz kommen. Der mögliche Beitrag von Biokraftstoffen sei begrenzt. Nur 10 bis 20 Prozent des Energiebedarfs im Verkehr könnten mit Bioenergie gedeckt werden.

Im Straßenverkehr sind die Szenarien mit strombasierten Flüssigkraftstoffen und strombasiertem synthetischem Methan zu Beginn zwar kostengünstiger, da sie konventionelle Antriebe und eine bereits vorhandene Infrastruktur nutzen. Langfristig wären PtL und PtG gegenüber dem Stromszenario jedoch deutlich teurer. Das teuerste Szenario wäre das Wasserstoffszenario. Die kostengünstigste Variante der Energieversorgung für Binnen- und Seeschifffahrt sei das Methanszenario inklusive Verflüssigung, gefolgt von Wasserstoff und strombasierten Flüssigkraftstoffen. Strom wäre in der Schifffahrt keine realistische Option. Für den Flugverkehr sei die Umstellung auf PtL die einzige in Frage kommende Form der Energieversorgung. Aufgrund der hohen Kosten für die Dekarbonisierung im Flug- und Schiffsverkehr sei hier eine Strategie zur Begrenzung der Verkehrsleistung besonders wichtig.

Im Vergleich zum Referenzszenario mit fossilen Kraftstoffen führe die Dekarbonisierung des Verkehrssektors in allen untersuchten Varianten zu volkswirtschaftlichen Mehrkosten. Dem stünde jedoch auch ein Nutzen durch die Verringerung der Treibhausgase und Luftschadstoffe gegenüber. Für die Verringerung der Kosten spielten Verkehrsverlagerungs- und Verkehrsvermeidungsstrategien eine zentrale Rolle. In der Gesamtkostenbetrachtung werde deutlich, dass die Kosten für die Energiebereitstellung und für die Fahrzeugherstellung und -anschaffung den bei weitem größten Teil ausmachen. Je höher die Nutzung und die Verkehrsleistung pro Fahrzeug, desto mehr schlugen die Energiekosten zu Buche, wie in der Schifffahrt oder im Straßenfernverkehr. Die Anpassung der Infrastruktur spiele eine untergeordnete Rolle (16 Prozent der Gesamtkosten).

Alle alternativen Technologien seien in der Einführungsphase mit hohen Kosten verbunden und müssten deshalb regulativ und finanziell unterstützt werden. Die Infrastruktur sei zu Beginn mit wenigen Fahrzeugen nicht rentabel zu betreiben. Deshalb sei eine staatliche Förderung für den Umbau der Infrastruktur sinnvoll. Wichtig sei eine internationale Abstimmung der Energieversorgungsstrategien, um das Risiko irreversibler Kosten (sunk costs) zu vermeiden.

► [Umweltbundesamt: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. 2017](#)

Die Studie zeigt ein Zukunftsszenario bis zum Jahr 2050 auf, in dem die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 95 Prozent sinken. Die Studie orientiert sich am Zielszenario der UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“. Hinzu kommt hier eine Reduzierung der Primärrohstoffinanspruchnahmen um 60 Prozent gegenüber dem Jahr 2010. Im Szenario „GreenEe“ wird dargestellt, wie ein ambitionierter und energetisch effizienter Transformationspfad ressourcenschonend umgesetzt werden kann. Vorübergehend gehe der Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Elektromobilität zwar mit einem erhöhten Rohstoffbedarf einher, insgesamt würden aber 821 Mio. t an Rohstoffen eingespart. Die Rohstoffinanspruchnahme pro Person sinkt von 16,8 Tonnen auf 7,6 Tonnen.

Die Marktdurchdringung von Techniken zur Produktion strombasierter Kraftstoffe erfolge in der

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Dekade zwischen 2030 und 2040 in allen Anwendungsbereichen. Abweichend zur Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ wird bis 2050 von einem höheren Anteil der Elektromobilität (auch im Güterverkehr) ausgegangen. Der Schlüssel zur Gestaltung eines treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Verkehrs liege in einer Kombination aus Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Energieeffizienz mit alternativen Antrieben. Der Endenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs könnten bis 2050 gegenüber 1990 zwischen 40 und maximal 60 Prozent reduziert werden. Der Vorrang einer direkten Elektrifizierung der Verkehrsmittel ergebe sich aufgrund der höheren Energie- und Kosteneffizienz im Vergleich zur Verwendung von strombasierten Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren. Indirekt werde Strom hauptsächlich in Form von Flüssigkraftstoffen eingesetzt. Im Inland erzeugter Wasserstoff werde zukünftig vor allem in der Industrie benötigt.

Metaanalyse: Strom und strombasierte Kraftstoffe für den Verkehr

Bearbeiter:

Magnus Maier (Projektleiter Forschungsradar Energiewende)

Tel: 030-200535-55

E-Mail: m.maier@unendlich-viel-energie.de

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

Impressum:

Agentur für Erneuerbare Energien e.V.

Invalidenstraße 91

10115 Berlin

Tel.: 030 200535 30

Email: kontakt@unendlich-viel-energie.de

www.unendlich-viel-energie.de

Geschäftsführer: Dr. Robert Brandt

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages