

böll.brief

GRÜNE ORDNUNGSPOLITIK #8

November 2018

Mehr Strom bitte!

Szenarien für die
Dekarbonisierung und
Elektrifizierung des
Verkehrssektors

GISA HOLZHAUSEN

SARAH RIESEBERG

DR. CHRISTINE WÖRLEN

JENS ALTEVOGT

(AREPO CONSULT)

 **HEINRICH BÖLL STIFTUNG**

*Das **böll.brief – Grüne Ordnungspolitik** bietet Analysen, Hintergründe und programmatische Impulse für eine sozial-ökologische Transformation. Der Fokus liegt auf den Politikfeldern Energie, Klimaschutz, Stadtentwicklung sowie arbeits- und wirtschaftspolitische Maßnahmen zum nachhaltigen Umbau der Industriegesellschaft.*

*Das **böll.brief** der Abteilung Politische Bildung Inland der Heinrich-Böll-Stiftung erscheint als E-Paper im Wechsel zu den Themen «Teilhabegesellschaft», «Grüne Ordnungspolitik» und «Demokratie & Gesellschaft».*

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Einleitung	4
3	Wie viel Strom wird benötigt?	7
3.1	Entwicklung der Verkehrsleistung	7
3.2	Entwicklung der Energieeffizienz	9
3.3	Energieträger	10
4	Woher kommt der Ökostrom?	14
4.1	Wie viel Strom?	14
4.2	Woher kommt der Importstrom?	15
4.3	Anforderungen zur Umsetzung der Sektorenkopplung	17
5	Schlussfolgerungen für die Energiewende im Verkehr	22
	Literaturverzeichnis	26
	Die Autor/innen	28
	Impressum	28

1 Zusammenfassung

Diese Metastudie vergleicht drei Szenarien zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors: das Modell «Treibhausgasneutrales Deutschland 2050» des Umweltbundesamtes (UBA), den «95-Prozent-Klimapfad», den die Unternehmensberatung Boston Consulting Group (BCG) und das Wirtschaftsforschungsunternehmen Prognos für den Bundesverband der Deutschen Industrie skizziert haben, und das «Dekarbonisierungsszenario 2035» des Wuppertal Instituts für Greenpeace. Der vorliegende böll.brief vergleicht die drei Szenarien hinsichtlich drei zentraler Fragen:

- Wie viel Strom wird für die Elektrifizierung des Verkehrssektors in den kommenden Jahren benötigt?
- Aus welchen Quellen kommt der Strom?
- Welche Netze und Infrastrukturen sind für die Elektrifizierung notwendig?

Die Antworten auf die Fragen geben Hinweise darauf,

- wie der optimale Pfad der Dekarbonisierung des Verkehrssektors aussieht.

Alle einbezogenen Szenarien halten die Dekarbonisierung des Verkehrssektors für möglich. Aber alle betonen auch, dass dies nicht ohne Weiteres und insbesondere nicht ohne eine grundlegende Veränderung des Verkehrsenergiemixes möglich sein wird. Hierfür wird erneuerbarer Strom benötigt, der in den heutigen Ausbauplänen für erneuerbare Energien der Bundesregierung nicht vorgesehen ist. Zusätzlich sind in allen Szenarien Importe von synthetischen Kraftstoffen, Strom oder beidem notwendig. Der Bedarf an erneuerbarem Strom und Importen kann umso stärker reduziert werden, je weniger strombasierte CO₂-neutrale synthetische gasförmige oder flüssige Kraftstoffe im Verkehrssektor verwendet werden und je stärker Verkehrsvermeidung und Energieeffizienz in allen Verbrauchssektoren zum Tragen kommen.

Auf Basis des Szenarienvergleichs werden sechs Leitsätze für eine Energiewende im Verkehr abgeleitet. Diese beziehen sich insbesondere auf den ordnungspolitischen Rahmen und zielen auf eine proaktive, gestaltende Rolle der Politik. Die Kernbotschaft ist, dass der Staat seine Richtungsentscheidungspotenziale und Regulierungshoheit verantwortungsvoll einsetzt.

2 Einleitung

Das Pariser Abkommen schreibt eine Begrenzung des globalen mittleren Temperaturanstiegs auf 1,5 bzw. zwei Grad fest. Auch Deutschland hat sich in Paris zur Erreichung der Klimaziele verpflichtet und damit zugesagt, seine Emissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Von den 905 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten der deutschen Gesamtemissionen (ohne Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)^[1] stammten im Jahr 2017 19 Prozent aus dem Verkehrsbereich.^[2] Die Emissionen dieses Sektors lagen im selben Jahr um vier Prozent höher als 1990 (vgl. UBA 2018a).

Viele Szenariostudien beleuchten, wie die zukünftige Energieversorgung aussehen muss, um gleichzeitig die Mobilität von Waren und Personen und die Einhaltung der Klimaziele sicherzustellen. Für den vorliegenden böll.brief wurden drei Szenarien ausgewählt, die die Bandbreite an technischen Optionen und Handlungskorridoren aufzeigen: das Szenario «Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050» des Umweltbundesamtes (2014), das «Dekarbonisierungsszenario 2035», das das Wuppertal Institut in seiner Studie «Verkehrswende für Deutschland. Der Weg zu CO₂-freier Mobilität bis 2035.» (2017) für Greenpeace entwickelte, und den «95-Prozent-Klimapfad», den die Unternehmensberatung Boston Consulting Group (BCG) und das Wirtschaftsforschungsunternehmen Prognos in ihrer Studie «Klimapfade für Deutschland» 2018 für den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) skizziert haben (vgl. Tabelle 1).

Den drei ausgewählten Szenarien ist gemein, dass sie alle Reduktionen der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 Prozent darstellen und damit kompatibel mit den Zielvorgaben des Pariser Abkommens sind. Die untersuchten Studien beziehen verschiedene «emissionsfreie» Technologien mit ein. Neben dem direkten Elektroantrieb (mit erneuerbarem Strom) gehört dazu auch der Verbrennungsmotor mit CO₂-neutralen synthetischen

- 1** Der Zusatz ohne Landnutzungsänderungen (engl. land use, land-use change, and forestry: LULUCF) bezieht sich auf Emissionen und Speicherung von Emissionen in Böden und der Vegetation. Für Deutschland sind die Kategorien Wälder, Ackerland und Grünland von Bedeutung.
- 2** Die CO₂-Emissionen des Verkehrs werden ohne den Energieverbrauch zur Energiebereitstellung, ohne den internationalen Luft- und Schiffsverkehr sowie ohne die Verbrennung von Biokraftstoffen erfasst. Nicht berücksichtigt werden zudem die aufgrund bestehender Kraftstoffpreisunterschiede ins Ausland verlagerten Tankvorgänge, insbesondere im Straßengüterverkehr.

Kraftstoffen.^[3] Da der Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, zum Biodiversitätsschutz und zur CO₂-Speicherung in Biomasse steht, betrachten die ausgewählten Studien nur solche Szenarien, die keinen Ausbau der Biokraftstoffe für den Verkehrssektor vorsehen bzw. nur Biomassepotenziale aus Reststoffen berücksichtigen.

Der Szenarienvergleich soll folgende Fragen beantworten:

- Wie viel Ökostrom wird für die Elektrifizierung des Verkehrssektors benötigt?
- Reicht der Ökostrom? Ist physikalisch möglich, was politisch wünschenswert ist?
- Woher kommt der Strom für die Elektrifizierung? Aus welchen Quellen, aus welchen Regionen, aus welchen Netzen? Wie viel zusätzliche Strominfrastruktur ist notwendig?
- Welche Auswirkungen hat die Sektorenkopplung auf die Verteilnetze und die Stromerzeugung?

Im Anschluss an den Szenarienvergleich wird untersucht, inwiefern der energiepolitische Rahmen für eine klimafreundliche Sektorenkopplung stimmt. Diese Untersuchung leitet über zu den ordnungspolitischen und infrastrukturellen Hebelpunkten für das erfolgreiche Gelingen eines emissionsfreien Verkehrssektors. In zwei Exkursen wird je ein Schlaglicht auf Vorhaben der Bundes- und EU-Ebene geworfen, die für die Verkehrswende relevant sind. Zum Schluss werden transformativ wirkende Elemente zum Gelingen der Energiewende vorgestellt.

- 3** Sowohl gasförmige als auch flüssige Kraftstoffe können künstlich in Syntheseverfahren hergestellt werden. So kann in der Elektrolyse aus Wasser und Strom Wasserstoff (H₂) hergestellt werden. Zusammen mit CO₂ kann daraus Methan (CH₄) produziert werden, das gegebenenfalls auch zu höherkettigen Kohlenwasserstoffen synthetisiert und damit zu synthetischem Benzin, Kerosin oder Diesel werden kann. Geschieht dies unter dem Einsatz von Strom, spricht man von strombasierten gasförmigen Kraftstoffen (engl. Power-to-Gas, PtG) oder strombasierten flüssigen Kraftstoffen (engl. Power-to-Liquid, PtL). Diese synthetischen Kraftstoffe können als CO₂-neutral gelten, wenn der Strom aus erneuerbaren Energien und das CO₂ vorher mit CO₂-neutralen Techniken (z.B. durch Kühlung mit Hilfe von erneuerbaren Energien, oder biologisch) der Atmosphäre entzogen wurde. Bei der Verbrennung dieser strombasierten CO₂-neutralen synthetischen gasförmigen oder flüssigen Kraftstoffe entstehen zwar auch CO₂-Emissionen, dieses CO₂ befindet sich aber in einer Kreislaufnutzung.

Tabelle 1: Überblick über die drei verglichenen Studien

Titel	Jahr	Autorenschaft	Betrachtetes Szenario
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050	2014	Umweltbundesamt (UBA)	Szenario für einen treibhausgasneutralen Verkehr 2050
Jährlicher Energieverbrauch Verkehr 2050	gesamt (inklusive Flug-/Seeverkehr ^[4]): 624 TWh, – davon Strom direkt: 91 TWh, – davon synthetische Kraftstoffe: 533 TWh, gesamt national (ohne Flug-/Seeverkehr international): 451 TWh, – davon Strom direkt: ca. 90 TWh (20 %), – davon synthetische Kraftstoffe: ca. 360 TWh (80 %).		
Zusammenfassung	Die Studie zeigt, dass Treibhausgas-Neutralität bis 2050 technisch und unter Berücksichtigung anderer ökologischer Faktoren möglich ist. Sie stellt ein Zielszenario für die klimarelevanten Bereiche Energie, Verkehr, Industrie, Abfall und Abwasser, Landwirtschaft sowie Landnutzung und Forst dar. Die Autor/innen berücksichtigen dabei auch technologische Lösungen, die derzeit noch in der Erprobung sind. Gesamtgesellschaftliche Transformationspfade, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sowie politische Instrumente und Wechselbeziehungen zu anderen Ländern lassen die Autor/innen außen vor, zeigen aber einen möglichen Pfad für einen treibhausgasneutralen Verkehrssektor bis 2050 auf. Die Studie nimmt ein durchschnittliches Wirtschaftswachstum von 0,7 % pro Jahr an.		
Klimapfade für Deutschland	2018	BCG/Prognos für BDI	95%-Klimapfad
Jährlicher Energieverbrauch Verkehr 2050	gesamt (inklusive Flug-/Seeverkehr ^[4]): 389 TWh, – davon Strom direkt: 94 TWh, – davon synthetische Kraftstoffe: 245 TWh, – davon biogene Kraftstoffe: 50 TWh, gesamt national (ohne Flug-/Seeverkehr international): 247 TWh.		
Zusammenfassung	Die Studie zeigt volkswirtschaftlich kosteneffiziente Wege zur Erreichung der deutschen Emissionsminderungsziele auf. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und der Industriestruktur Deutschlands sowie auf der Eröffnung zusätzlicher Chancen am Weltmarkt für deutsche Exporteur/innen. In dieser Synopse wird nur das Szenario berücksichtigt, das eine 95%ige Emissionsreduktion erreicht. Es wird von 1,2 % jährlichem Wirtschaftswachstum ausgegangen.		
Verkehrswende für Deutschland. Der Weg zu CO₂-freier Mobilität bis 2035	2017	Wuppertal Institut für Greenpeace	Dekarbonisierungsszenario 2035
Jährlicher Energieverbrauch Verkehr 2035	gesamt national (ohne Flug-/Seeverkehr ^[5]): 235 TWh, – davon Strom direkt: 125,3 TWh.		
Zusammenfassung	nicht analysiert.		

Quelle: Eigene Darstellung.

- 4** Diese Summe berücksichtigt auch den deutschen Anteil am internationalen See- und Flugverkehr, der bisher in der Bilanzierung der THG-Emissionen nicht berücksichtigt wird.
- 5** Innerdeutscher Flugverkehr findet in diesem Szenario nicht mehr statt, internationaler Flug- und Schiffsverkehr wird nicht betrachtet.

3 Wie viel Strom wird benötigt?

Die erste Untersuchungsfrage lautet: Wie viel Ökostrom wird für die Elektrifizierung des Verkehrssektors benötigt? Um diese Frage zu beantworten, nutzen alle Szenarien die folgenden drei großen Stellschrauben in unterschiedlicher Weise:

- (1) die Entwicklung der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr,
- (2) die Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs der einzelnen Verkehrsmittel, also der Energie pro Personen- oder Tonnenkilometer (Pkm bzw. tkm),
- (3) die Emissionen pro Energieeinheit, also der Einsatz von CO₂-freiem Strom oder CO₂-neutralen Kraftstoffen.

3.1 Entwicklung der Verkehrsleistung

Der Verkehrssektor umfasst sowohl den Personen- als auch den Gütertransport, und zwar auf Straße, Schiene, Wasserstraße und in der Luft. Im Jahr 2015 wurden 82 Prozent der Personenverkehrsleistung mit dem Pkw zurückgelegt, die Bahn findet sich weit abgesehen bei acht Prozent. 72 Prozent der Güter wurden auf der Straße transportiert, 18 Prozent mit der Bahn und zehn Prozent mit dem Binnenschiff (vgl. UBA 2018b: 66f.).

Nach dem Szenario des Wuppertal Instituts wird der Pkw-Verkehr bis 2035 deutlich abnehmen, da Autofahren allgemein unattraktiver wird, nachdem sich die Kosten für die Autonutzung durch die Einführung einer distanzbasierten Pkw-Maut, höhere Kfz-Steuern, Kraftstoffpreiserhöhungen sowie die Einführung städtischer City-Mautgebühren drastisch erhöht haben. Außerdem werden mehr auto- und verkehrsfreie Wohnquartiere geschaffen, die autofreien Bereiche in den Innenstädten erweitert (vgl. Wuppertal Institut 2017: 41) und die Anzahl der innerstädtischen Parkplätze reduziert (vgl. ebd.: 42). Insgesamt geht das Wuppertal Institut von einer starken Verlagerung des Verkehrs auf Schiene und Wasserstraße aus. Beim Güterverkehr sorgt eine verbesserte Logistik für weniger Leerfahrten. Eine wichtige Stellschraube ist hier die Erhöhung der Kosten, zum Beispiel durch höhere Dieselpreise sowie eine Lkw-Maut, die nicht nur erhöht, sondern auch auf kleinere Lkw ausgeweitet wird.

Die Studie des Umweltbundesamtes geht von ähnlichen Maßnahmen wie das Wuppertal Institut aus: Auch hier werden verschiedene Anreize zur Senkung der Verkehrsleistung angenommen, wie beispielsweise die Förderung von Fahrrad- und Fußverkehr (vgl. UBA 2014: 108). Die Abschaffung der Entfernungspauschale soll zu einer Reduktion der durchschnittlichen Arbeitswegelänge beitragen. Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs im Personenverkehr sinkt aber lediglich geringfügig. Auch im UBA-Szenario wird der Güterverkehr durch höhere Kraftstoffpreise sowie die Ausweitung der Lkw-Maut

(vgl. ebd.: 109) bei gleichzeitigem Ausbau des Schienennetzes auf die Schiene verschoben. Allerdings wirken sich die Effekte, verglichen mit der Studie des Wuppertal Instituts, deutlich weniger stark dämpfend auf das Wachstum der Verkehrsleistung im Güter- und Personenverkehr aus.

Anders als in den beiden anderen Studien bleibt die Personenverkehrsleistung bei BCG/Prognos nahezu unverändert. Die dämpfende Wirkung des demografischen Wandels wird durch ein höheres Pro-Kopf-Einkommen kompensiert. Kommerzielle Lieferdienste werden stärker nachgefragt, und das Auto wird oft auch für kurze Strecken und für Freizeitaktivitäten genutzt (vgl. BCG/Prognos 2018: 174). Die Güterverkehrsleistung steigt wegen des sich fortsetzenden Wirtschaftswachstums (vgl. ebd.: 105). Im Güterverkehr wird jedoch ein steigender Anteil von Schiene und Schiff erwartet.

Abbildung 1 und Tabelle 2 zeigen die Entwicklung der Personenverkehrsleistung (gesamt) und der Güterverkehrsleistung (nach Verkehrsträger). Im Vergleich wird klar: Auch mit höheren Verkehrsleistungen als heute kann in allen Studien dekarbonisierte Mobilität ermöglicht werden.

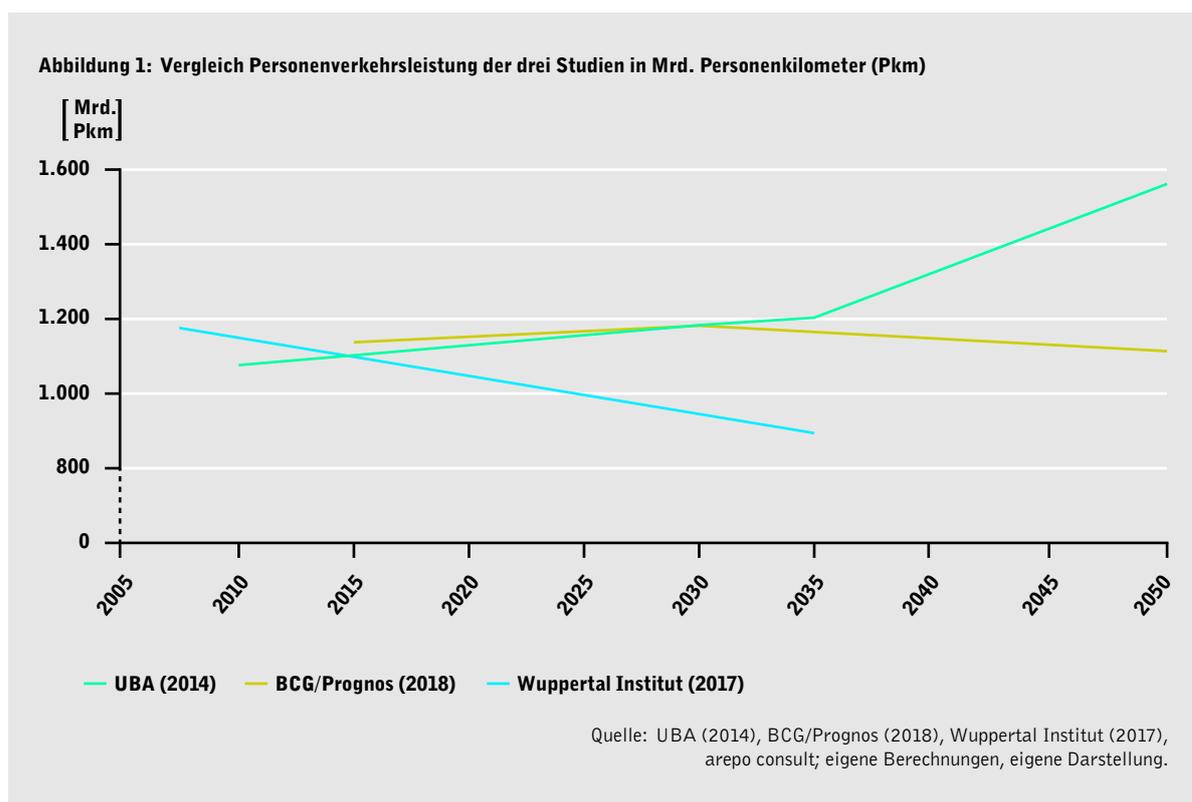


Tabelle 2: Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern in den drei Szenarien
in Mrd. Tonnenkilometer (tkm)

Jahr	Jahr			BCG/Prognos			Wuppertal Institut		
	Straße	Schiene	Schiff	Straße	Schiene	Schiff	Straße	Schiene	Schiff
2015	480	119	66	467	117	55	460	117	55
	gesamt 665			gesamt 639			gesamt 632		
2030/2035 ^[6]	k. A. ^[7]			590	166	82	388	229	94
				gesamt 838			gesamt 711		
2050	ca. 800	253	k. A. ^[7]	627	220	98	k. A. ^[7]		
	gesamt 1.143			gesamt 945					

Quelle: Eigene Darstellung.

3.2 Entwicklung der Energieeffizienz

Eine zweite Stellschraube für die Senkung der Emissionen aus dem Verkehrssektor ist die Erhöhung der Verkehrsleistung pro Energieeinheit, also die Erhöhung der Fahrzeugeffizienz.

Das Wuppertal Institut nimmt an, dass durch die Einführung einer Lkw-Maut, die an die CO₂-Emissionen gekoppelt ist, Anreize für effizientere Fahrzeuge und alternative Antriebe geschaffen werden (vgl. Wuppertal Institut 2017: 56). Autonome Fahrzeuge im Carsharing führen zu einer sehr viel intensiveren und damit ressourcenschonenderen Nutzung. Die intensivere Nutzung geht aber auch mit höheren Austauschraten und kürzeren Reinvestitionszyklen einher – Neuerungen und Effizienzfortschritte kommen schneller in Umlauf (vgl. ebd.: 51).

Die Studie des Umweltbundesamtes geht davon aus, dass durch eine CO₂-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge die Effizienz um 50 Prozent gesteigert wird (vgl. UBA 2014: 113). Das UBA nennt zusätzlich auch ein effizienteres individuelles Fahrverhalten. Zudem wird unterstellt, dass durch den Preisdruck einer Kerosinsteuer die Effizienz bei Flugzeugen um jährlich zwei Prozent steigt, bei Seeschiffen wird eine Effizienzerhöhung von 39 Prozent bis zum Jahr 2050 angenommen (vgl. ebd.: 113f.).

6 Das 2030-Szenario gilt für BCG/Prognos, das 2035-Szenario für das Wuppertal Institut.

7 Die Studie weist diese Angaben nicht genau aus.

BCG/Prognos erwarten in allen Antriebsklassen Verbrauchssenkungen zwischen 55 (Plug-in-Hybrid) und 36 Prozent (Batterie) im Jahr 2050 gegenüber 2015.^[8]

Die spezifischen Verbrauchsmengen des Pkw-Bestands mit Verbrennungsmotor verringern sich um 32 bis 37 Prozent, von Lkw mit Verbrennungsmotor um 27 bis 34 Prozent, von Flugzeugen um 30 und von Binnenschiffen um durchschnittlich sechs Prozent (vgl. BCG/Prognos 2018: 167). Außerdem zählt das Szenario auch klassische Elemente auf, etwa dass durch «intelligente» Verkehrsleitsysteme der Parkplatzsuchverkehr reduziert wird (vgl. ebd.: 179) oder durch verbesserte Flugrouten Treibstoff pro Beförderungsleistung (vgl. ebd.: 188) eingespart werden kann.

3.3 Energieträger

Die dritte große Stellschraube für die Dekarbonisierung des Verkehrs ist die Dekarbonisierung der Energieträger. In allen Szenarien kommen beinahe ausschließlich CO₂-neutrale Energieträger zum Tragen, und zwar in Form von erneuerbarem Strom oder synthetischen Kraftstoffen, die mithilfe von erneuerbarem Strom hergestellt werden. Damit wird die Frage der Energieträger mit der Frage der Antriebstechnologie kombiniert.

Elektrische Antriebe sind in aller Munde, spielen aber heute im Verkehrssektor insgesamt bislang nur im Schienenverkehr eine relevante Rolle.^[9] Der Stromanteil am Gesamtenergieverbrauch im Verkehr beträgt rund zwei Prozent (vgl. UBA 2018c). Die drei ausgewählten Szenarien sehen hier aber die Hauptenergiequelle der Zukunft.

Die Dekarbonisierung wird in den betrachteten Szenarien durch verschiedene Maßnahmen erreicht:

- a) elektrische, leitungsgebundene Fahrzeuge (elektrifizierte Schienen oder Straßen mit Oberleitungen),
- b) batteriebetriebene Fahrzeuge oder
- c) Verbrennungsmotoren unter Nutzung von strombasierten CO₂-neutralen synthetischen Kraftstoffen.

8 Als Plug-In-Hybrid bezeichnet man ein Fahrzeug, dessen Akkumulator sowohl über den Verbrennungsmotor als auch über ein externes Stromnetz geladen werden kann. Im Gegensatz dazu verfügt ein Batteriefahrzeug nicht über einen Verbrennungsmotor und ein klassisches Hybridfahrzeug nicht über eine externe Lademöglichkeit, sondern rekuperiert Bremsenergie.

9 Der Anteil an elektrischen Antrieben betrug 2012 88 % der Verkehrsleistung im Reisezugverkehr (Personen) und 78 % im Schienengüterverkehr (vgl. FIS 2017).

Tabelle 4 zeigt die gewählten Antriebsarten für die unterschiedlichen Verkehrsträger in den drei Szenarien.

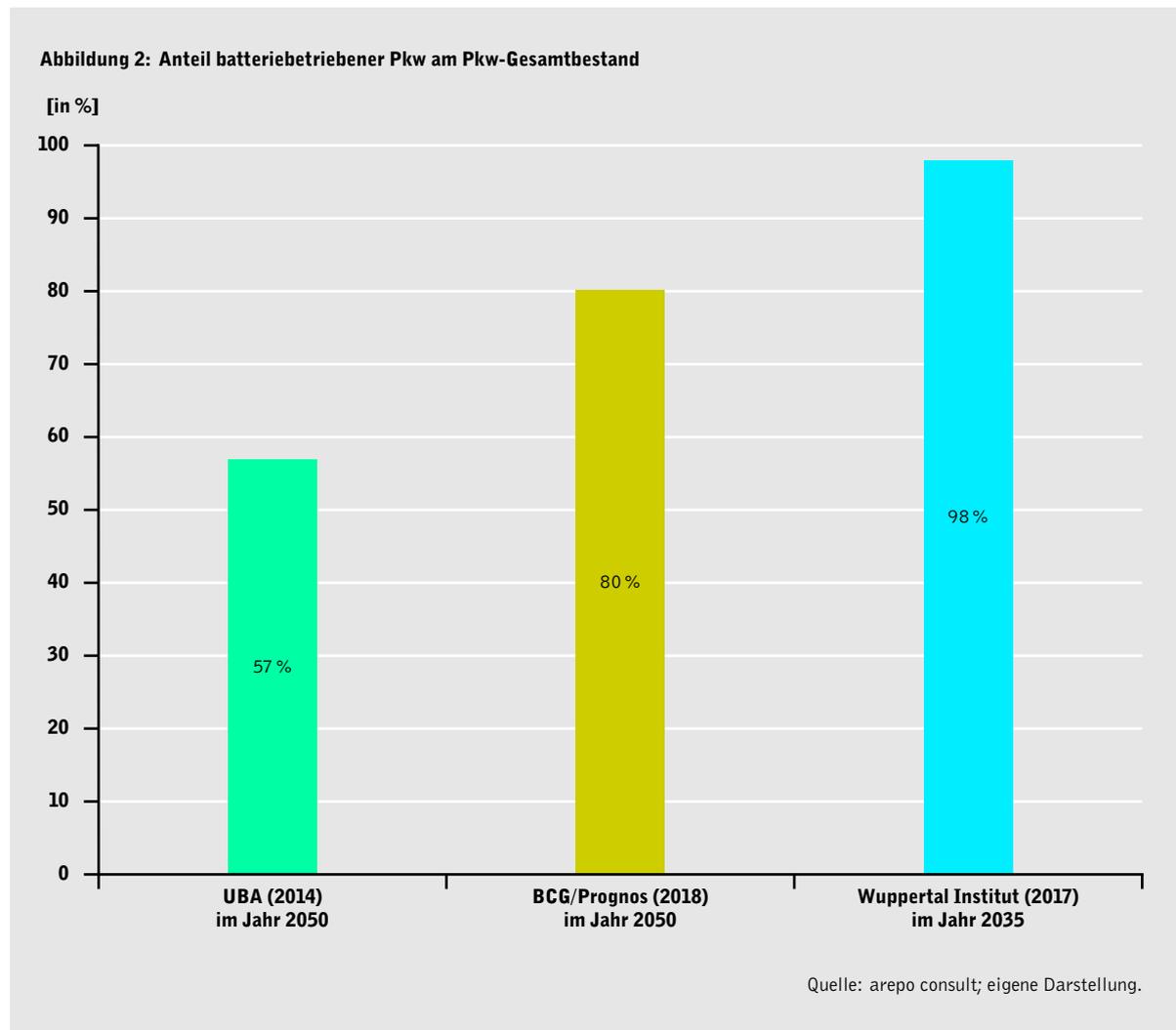
Tabelle 4: Antriebsarten nach Verkehrsträger

	Straße		Schiene	Schiff
	Pkw	Nutzfahrzeuge		
UBA	Elektrofahrzeuge, Plug-in-Hybride	<ul style="list-style-type: none"> – Leichte Nutzfahrzeuge: Plug-in-Hybride und Elektrofahrzeuge – Lkw von über 12t Gewicht: synthetischer Flüssigkraftstoff – unter 12 t: Plug-in-Hybride 	elektrisch	CO ₂ -neutraler, synthetischer Flüssigkraftstoff
BCG/Prognos	Batterieelektrische und Plug-in-Hybride ^[10]	Lkw: Wasserstoff, Batterie, Oberleitungshybride, CO ₂ -neutraler, synthetischer Flüssigkraftstoff ^[10]	elektrisch	CO ₂ -neutraler, synthetischer Flüssigkraftstoff
Wuppertal Institut	Elektrofahrzeuge, Plug-in-Hybride	<ul style="list-style-type: none"> – Leichte Nutzfahrzeuge: Batterieelektrische Fahrzeuge, Hybridantriebe, Brennstoffzellenfahrzeuge – Lkw: Hybridantriebe – Last- und Sattelzüge: Oberleitungshybride – Güterverkehr: methan-basiert 	elektrisch und mit synthetischem Diesel betrieben	

Quelle: Eigene Darstellung.

Im Pkw-Verkehr setzt das Wuppertal Institut auf eine fast vollständige Elektrifizierung durch den Einsatz von Batteriefahrzeugen; der Anteil der Pkw mit Elektroantrieb an der gesamten Pkw-Flotte beträgt in diesem Szenario 98 Prozent. Die verbleibenden zwei Prozent sollen mittels strombasierter CO₂-neutraler synthetischer Kraftstoffe klimaneutral werden (vgl. Wuppertal Institut 2017: 46). Begründet wird dieser hohe Elektrifizierungsgrad damit, dass in der Studie ab 2025 mit einer deutlich verbesserten Reichweite sowie mit Schnellladestationen gerechnet wird, die ein Fahrzeug innerhalb von 30 Minuten aufladen können (vgl. ebd.: 47). Auch leichte Nutzfahrzeuge sollen vermehrt batterieelektrisch betrieben werden, unterstützt von Hybrid- und Brennstoffzellenantrieben (vgl. ebd.: 55). Abbildung 2 gibt einen Überblick zum Anteil der Elektroautos in den jeweiligen Studien.

10 Der 95%-Klimapfad enthält auch Anteile von biogenen gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen im nationalen Verkehr, der Nutzungseinsatz wird aber nicht näher angegeben.



Das Szenario des Wuppertal Instituts setzt im Bereich des Güterfernverkehrs auch auf eine leitungsgebundene Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Im Jahr 2035 sollen 80 Prozent der Last- und Sattelzüge oberleitungsfähig elektrifiziert werden (vgl. ebd.: 57). Der Güterverkehr insgesamt wäre auf der Straße primär methanbetrieben (vgl. ebd.: 48), der Schienenverkehr würde zu 95 Prozent elektrisch und zu fünf Prozent mit synthetischem Diesel aus Power-to-Liquid-Herstellung (PtL) betrieben (vgl. ebd.: 58).

Die beiden anderen Studien sind bezüglich der Elektrifizierung durch Batterieantriebe weniger optimistisch als das Wuppertal Institut und rechnen mit einem höheren Grad von indirekter Elektrifizierung mit strombasierten CO₂-neutralen synthetischen Kraftstoffen. Sowohl das Umweltbundesamt als auch BCG/Prognos argumentieren, dass sich PtL-Kraftstoffe am einfachsten im Verkehrssektor einsetzen lassen.

Im Verkehrssektor dominiert in der Studie des Umweltbundesamtes der strombasierte CO₂-neutrale synthetisch erzeugte Flüssigkraftstoff (vgl. UBA 2014: 114). Der Anteil der elektrischen Fahrleistung an der Gesamtfahrleistung beträgt lediglich 20 Prozent (vgl. ebd.: 117). Mit synthetischem Diesel betriebene Lkw haben nach dem UBA-Szenario bis

2050 weiterhin den höchsten Fahrleistungsanteil im Lkw-Verkehr, Hybrid- und Elektroantriebe sind mit lediglich rund einem Drittel deutlich schwächer vertreten (vgl. ebd.: 118).

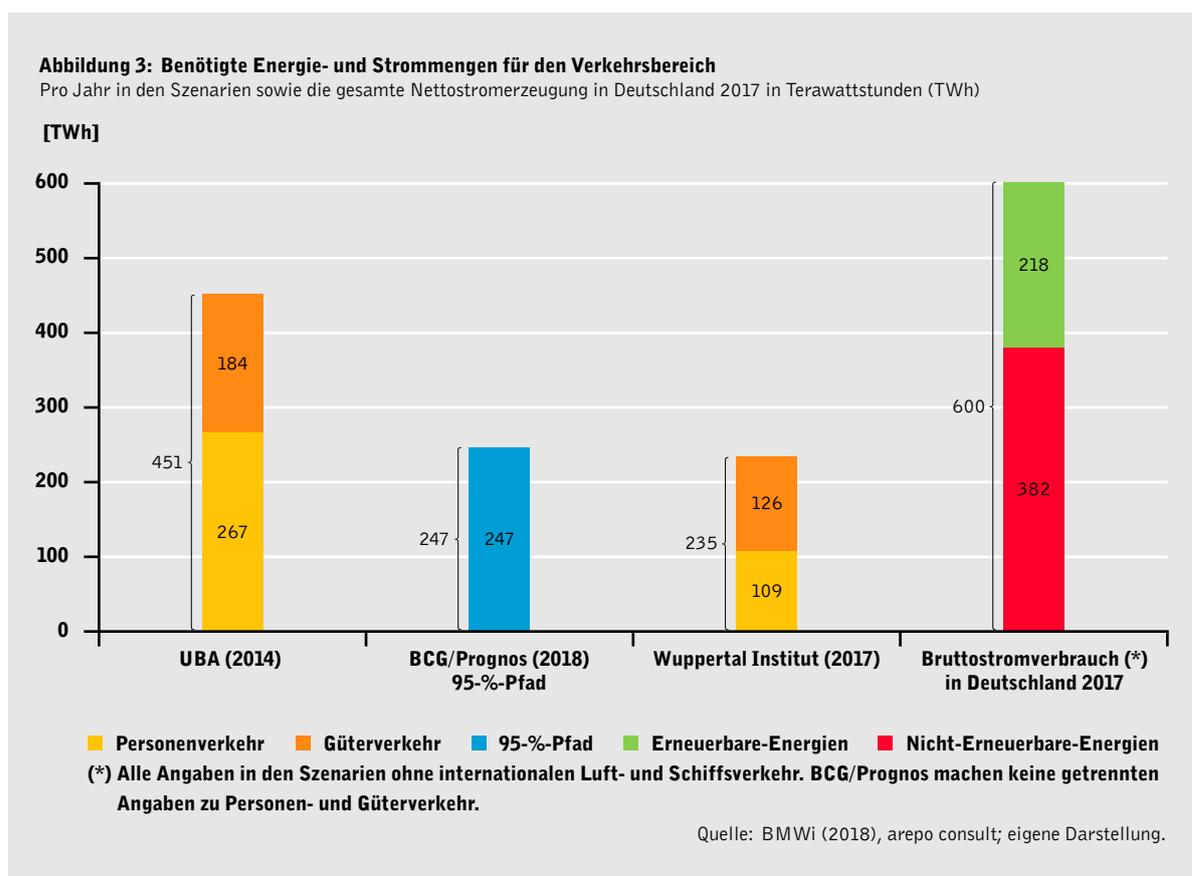
Der Anteil elektrischer Antriebe im Pkw-Bestand bei BCG/Prognos liegt immerhin bei 80 Prozent im Jahr 2050 (vgl. BCG/Prognos 2018: 172). Wie das UBA-Szenario nimmt diese Studie an, dass synthetischer Dieselmotorkraftstoff vor allem noch in schweren Nutzfahrzeugen zum Einsatz kommt (vgl. ebd.: 191).

Auch wenn die drei Szenarien sich hinsichtlich ihrer Annahmen zur Verbreitung von Elektroantrieben im Personenverkehr unterscheiden und die Herausforderungen im Güterstraßenfernverkehr unterschiedlich lösen, sind die Autorengruppen sich relativ einig, was den Schiffs- und Flugverkehr betrifft: Strombasierte CO₂-neutrale Kraftstoffe scheinen hier die einzige «emissionsfreie» Alternative. Aufgrund der Einschränkungen bei der Elektrifizierung im Bereich Schiff-, Flug- und Straßengüterfernverkehr setzt das Umweltbundesamt auf 80 Prozent PtL-Kraftstoffe und auf 20 Prozent elektrische Antriebe. Im Flugverkehr kommen aus Strom hergestellte flüssige Energieträger zum Einsatz (vgl. UBA 2014: 69, BCG/Prognos 2018: 173). Die direkte Stromnutzung (in Form von Batterien) wird weder für den Schiffs- noch für den Flugverkehr angenommen (vgl. UBA 2014: 92).

4 Woher kommt der Ökostrom?

4.1 Wie viel Strom?

Insbesondere die unterschiedlichen Kraftstoffe und Antriebe führen zu einem sich deutlich unterscheidenden Strombedarf für den dekarbonisierten Verkehrssektor, denn die Erzeugung von CO₂-neutralen synthetischen Kraftstoffen benötigt sehr viel mehr CO₂-freien Strom als der direkte Stromverbrauch – auf den Energieverbrauch bezogen erhöht sich die Menge um den Faktor 2 bis 4.^[11] Auch insgesamt, also zusammen mit den Variationen in den Annahmen zum Verkehrsaufkommen und zur Fahrzeugeffizienz, variieren die erwarteten Stromverbrauchsmengen für den Verkehr. Während die Studie des Wuppertal Instituts von 235 TWh zusätzlichem Strombedarf pro Jahr ausgeht, sind es bei BCG/Prognos 247 TWh und beim Umweltbundesamt 451 TWh. Abbildung 3 zeigt die jährlichen Strommengen aus den Szenarien, die allein für den Verkehrssektor notwendig würden, im Vergleich zum gesamten Bruttostromverbrauch im Jahr 2017. Davon kamen lediglich 11,7 TWh im Verkehrssektor zum Einsatz.



- 11** Bei Power-to-Liquid-Nutzung ist drei- bis viermal so viel Endenergie (Strom), bei Brennstoffzellen zwei- bis dreimal so viel Energie notwendig, da elektrische Energie erst mit Verlusten umgewandelt werden muss (vgl. BCG/Prognos 2018: 53).

An die Frage «Wie viel Ökostrom wird für die Elektrifizierung des Verkehrssektors benötigt?» schließt sich die Frage: «Reicht der Ökostrom? Ist physikalisch möglich, was politisch wünschenswert ist?».

Im Szenario des Wuppertal Instituts soll der für den Direktverbrauch der Pkw-Flotte benötigte Strom von 108,6 TWh jährlich primär in Deutschland bereitgestellt werden (vgl. Wuppertal Institut 2017: 46).^[12] In Bezug auf die Stromerzeugungsstrukturen für den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen verweist die Studie auf die Notwendigkeit des Imports (vgl. ebd.: 69).

Insgesamt werden laut Umweltbundesamt für den nationalen Verkehrssektor jährlich 451 TWh benötigt, davon rund 90 TWh für die direkte Stromnutzung und 360 TWh zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe.^[13] BCG/Prognos sehen über alle Sektoren (Verkehr, Haushalte und Gewerbe/Handel/Dienstleistungen etc.) hinweg einen Bedarf an synthetischen Kraft- und Brennstoffen von 383 TWh pro Jahr, zu deren Erzeugung eine Strommenge von 740 TWh erforderlich wäre.

Die erforderlichen Strommengen lassen sich allein mit den inländisch verfügbaren Potenzialen unter Berücksichtigung technologisch-ökologischer Grenzen nicht realisieren. Das UBA-Szenario geht von einer maximal möglichen inländischen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von jährlich circa 786 TWh aus, BCG/Prognos legen dafür 715 TWh zugrunde. Das Umweltbundesamt schlägt in seinem Szenario vor, insgesamt etwa 137 bis 151 TWh Strom zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen pro Jahr zu importieren (vgl. UBA 2014: 94). BCG/Prognos wollen synthetische Kraftstoffe für den nichtelektrifizierten nationalen Verkehr in einem jährlichen Umfang von 125 TWh sowie weitere 143 TWh für den internationalen Luft- und Seeverkehr einführen (ebd.: 167).

4.2 Woher kommt der Importstrom?

4.2.1 Importregionen

Besonders für den Verkehrssektor halten sowohl Umweltbundesamt als auch BCG/Prognos Importe von aus erneuerbaren Energien synthetisch erzeugten Kraftstoffen aus Nordafrika für möglich. Die Umstellung auf fluktuierende Quellen erneuerbarer Energien macht europaweit einen Stromaustausch notwendig, im UBA-Szenario wird verstärkt

12 Da sich das Szenario des Wuppertal Instituts auf den Verkehrssektor beschränkt, werden die Interaktionen mit den Energiebedarfsmengen der anderen Sektoren nicht berücksichtigt.

13 Der Bedarf erhöht sich auf jährlich 624 TWh (91 TWh für die direkte Stromnutzung und 533 TWh zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe) bei Hinzurechnung des Seeverkehrs.

Windenergie aus Nordeuropa, Wasserkraft aus Skandinavien und Solarenergie aus dem Mittelmeerraum und Nordafrika importiert.

4.2.2 Infrastrukturanforderungen

Das Umweltbundesamt geht auch auf den Bedarf an Netzinfrastruktur ein, wobei hierfür eine gesamteuropäische Perspektive notwendig ist. Westeuropa verfügt nach Einschätzung der Autor/innen über ein gesichertes technisches Potenzial an erneuerbaren Energien von mindestens 40.000 PJ pro Jahr (entspricht ca. 11.111 TWh).^[14] Das entspricht etwa 60 Prozent des gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs der 27 EU-Länder. Das Szenario des Umweltbundesamtes geht aber auch davon aus, dass in den nächsten Dekaden durch technische Entwicklung der Erneuerbaren weitere Potenziale erschlossen werden können. Wenn außerdem Strom aus solarthermischen Kraftwerken mit Standorten in Nordafrika im Rahmen eines mediterranen Stromverbunds mitbetrachtet wird, könnten mehr als 20.833 TWh in Europa und im Mittelmeerraum zur Verfügung stehen (vgl. UBA 2014: 50). Zur Nutzung von Windenergie aus Nordeuropa und von Solarenergie aus dem Mittelmeerraum ist der europäische Netzausbau vorgesehen (vgl. ebd.: 78). Unter Hinweis auf die Leitstudie des Bundesumweltministeriums (DLR et al. 2012) wird beim Umweltbundesamt angenommen, dass zusätzliche Übertragungskapazitäten von 79,4 Gigawatt bis 2050 für den Transport von Strom aus solarthermischen Kraftwerken von Nordwestafrika nach Europa benötigt werden. Insbesondere der Ausbau von Grenzkuppelleitungen zu den Netzen in Österreich, der Schweiz und Frankreich (zur Weiterleitung des Stroms aus Nordafrika über Italien und Spanien) und zu den skandinavischen Netzen müsste vorangetrieben werden.

Der Bedarf an Speichern kann durch die Vernetzung mit skandinavischen Pumpspeicherkraftwerken beeinflusst werden (vgl. UBA 2014: 59). Größere Batteriespeicher können nach Ansicht der UBA-Autor/innen vor allem zur Sicherung der Netzstabilität und zur Bereitstellung von Primärregelleistung eingesetzt werden. Batterien in Pkw (Elektromobilität) können dagegen nur einen begrenzten Beitrag zur Energiespeicherung im Rahmen eines Lastmanagements leisten, da sie nur ein sehr geringes Speicherpotenzial aufweisen (vgl. ebd.: 60). Für die Überbrückung saisonaler Schwankungen sind chemische Speicher über die Umwandlung von Strom in Wasserstoff oder Methan und die Rückverstromung über Gas- und Dampf-Kombikraftwerke, sogenannte GuD-Kraftwerke, vorgesehen.

Das UBA-Szenario nennt auch die Möglichkeit, Wasserstoff großflächig zum Einsatz zu bringen, wofür ein ausgedehntes Verteilnetz für Wasserstoff aufgebaut werden müsste. Anders als bei regenerativem Methan entstehen bei einer Beimischung von Wasserstoff

14 Dies beinhaltet erneuerbar erzeugte Energie zur Deckung des Wärme- sowie des Strombedarfs, die Summe wird daher in PJ angegeben.

ins Erdgasnetz höhere Anforderungen an die Sicherheitstechnik und damit zusätzliche Investitionskosten (vgl. ebd.: 63).

BCG/Prognos betonen den Ausbau der Ladeinfrastruktur inklusive der Netzanbindung und einer Verteilnetzinfrastuktur. Den Investitionsbedarf für den Aufbau von Schnellladestationen beziffert die Studie mit 106 Milliarden Euro, den Verteilnetzausbau auf 15 bis 19 Milliarden Euro (vgl. BCG/Prognos 2018: 196). Für den Import synthetischer CO₂-neutraler Kraftstoffe aus Nordafrika gehen die Autor/innen von Importkosten von 150 Euro/MWh aus und halten Investitionen von rund 180 Milliarden Euro für den Aufbau von Produktionskapazitäten zur Kraftstoffproduktion in den Exportregionen für notwendig.

4.3 Anforderungen zur Umsetzung der Sektorenkopplung

Der erneuerbare Strom wird in Dekarbonisierungsszenarien nicht nur für den Energiebedarf des Verkehrs herangezogen. Er wird auch in anderen Sektoren, insbesondere dem Industrie- und Wärmesektor, gebraucht, um fossile Brennstoffe zu ersetzen. Generell wird dies als «Sektorenkopplung» bezeichnet. In der Studie von BCG/Prognos werden dafür neben 32 Millionen E-Pkw auch 16 Millionen Wärmepumpen genutzt. Das führt in diesem Szenario nur dann zu fallenden Gesamtemissionen, wenn die Emissionen aus der Stromerzeugung schneller abnehmen als in den bisherigen Regierungsplänen. Braunkohlekraftwerke stellen ihren Betrieb in den BCG/Prognos-Szenarien ab Ende der 2020er bzw. Anfang der 2030er-Jahre ein, ihnen folgen die Steinkohlekraftwerke ab Anfang der 2040er-Jahre.

Während das UBA-Szenario «Treibhausgasneutrales Deutschland» sich zur Umsetzung der Sektorenkopplung nicht konkret äußert, wird die Nachfolgestudie (UBA 2018b) deutlicher und stellt klar: «Die derzeitigen Ausbaukorridore Deutschlands sind für die Dekarbonisierung in den Anwendungsbereichen durch Sektorenkopplung [...] deutlich zu erhöhen. Zielorientierte Ausbaukorridore sollten die ganzheitliche Umstrukturierung der Energieversorgung und -anwendung, den Rückbau sowie einen möglichst stetigen Anstieg des Ausbauniveaus erneuerbarer Energieanlagen im Blick haben.» (Ebd.: 20). Das Wuppertal Institut unterstreicht ebenfalls, dass für eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors höhere Strommengen erforderlich sind – und dass für deren Bereitstellung der Ausbau der erneuerbaren Energien entsprechend schneller erfolgen muss, als von der Regierung bisher geplant. Der Studienfokus ist also klar auf eine Erhöhung der EE-Ausbaukorridore ausgerichtet, die Sektorenkopplung wird nicht explizit thematisiert.

Exkurs: Wie bringt die Bundesregierung die Energiewende im Verkehr voran?

Politische Leitlinien und Strategien

Bereits im Jahr 2013 hat das Bundeskabinett die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) beschlossen. Sie sieht unter anderem eine Roadmap für den Einsatz von EE-Flüssigerdgas, Wasserstoff und strombasierten Kraftstoffen im schweren Straßengüterverkehr vor. Außerdem sind «die Prüfung von Gesetzesinitiativen, die Förderung geeigneter Pilotprojekte sowie die Identifikation und finanzielle Unterlegung von Projekten zur weiteren Forschung, Entwicklung und Demonstration» (BMVI 2017: 19) geplant.

Forschungspolitik

Zu den Demonstrationsvorhaben sollen zum Beispiel Stand-alone-Anlagen zur Erzeugung von PtL-Kraftstoffen mit unterschiedlichen Elektrolyse- und Synthesemethoden und «Aufrüstungsprojekte» von Erdölraffinerien gehören. Die Bundesregierung fördert bereits seit Langem eine Vielzahl von Forschungsprojekten, einerseits zu Antriebstechnologien und Mobilitätskonzepten, unter anderem im Förderprogramm «Schaufenster Elektromobilität». Andererseits wird auch die Sektorenkopplung erforscht, zum Beispiel im «Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende». Zu den untersuchten Sektorenkopplungstechnologien gehören Wärmepumpen, die Elektromobilität, aber eben auch die Speicherung von «überschüssigem» bzw. nicht abtransportierbarem Strom in Speichermedien wie beispielsweise Wasserstoff.

Förderrichtlinien und Förderprogramme

Im Rahmen des «Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie» werden Züge, Schiffe, der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) in Flotten sowie die dazugehörigen Wasserstofftankstellen gefördert – heute existieren allerdings bundesweit erst 52 Wasserstofftankstellen (vgl. H₂ Mobility 2018).

Wichtige Elemente bei den verkehrsbezogenen Maßnahmen der Bundesregierung sind die Förderrichtlinien für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen für Kommunen, Unternehmen und seit 2016 auch für Privatpersonen. Diese Förderungen stammen allerdings noch aus der vorherigen Legislaturperiode. Die Bundesregierung hält weiterhin an ihrem Ziel fest, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen, wobei es bis Juli 2018 erst rund 93.000 Fahrzeuge waren (vgl. KBA 2018: FZ 27.2). Auch für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur mit 100.000 Ladepunkten bis 2020 existiert eine Förderung in Höhe von 300 Millionen Euro. Bis August 2018 waren allerdings bundesweit erst 12.134 Ladesäulen verfügbar (vgl. Bundesnetzagentur 2018).

Zudem sollen als neuestes Projekt der Bundesregierung eine oder mehrere Großfabriken für Batteriezellen in Deutschland entstehen.

Neben dem Ziel von weiteren 100.000 Elektroladepunkten wird ab 2019 die Dienstwagensteuer für Elektro- und Hybridautos auf die Hälfte reduziert werden.

Zur Überprüfung des Regulierungsrahmens gehören laut dem Bundesverkehrsministerium und der Roadmap der «Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr» eine mögliche Anpassung des EE-Ausbauziels, wenn PtL-Kraftstoffe merkliche Marktanteile erreichen sollen, sowie mögliche Umlagebefreiungen des Stromverbrauchs.

Bewertung des Maßnahmenbündels

Die Bundesregierung geht mit der Gießkanne vor – sie lässt 1.000 bunte Blumen blühen, aber trifft keine Richtungsentscheidungen. Im Koalitionsvertrag stehen ebenfalls verschiedene Themengebiete zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Dies sind etwa die Investitionen in Elektromobilität sowie in Wasserstoff- und Brennstoffzelle. Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) erkennt zwar an, dass der Aufbau von Tankstellen- und Ladeinfrastrukturen für alternative Kraftstoffe und Antriebe eine Kernherausforderung darstellt. Eine Entscheidung zwischen den Optionen fällt aber nicht. Eine Diskussionsplattform «Zukunft der Mobilität», die bis Ende 2018 eine Strategie zur «Zukunft der bezahlbaren und nachhaltigen Mobilität» erarbeiten soll, wurde im September eingerichtet.

Exkurs: Wie bringt die EU klimafreundliche Mobilität und die Energiewende im Verkehr voran?

Clean Energy Package

Die Mitteilung der EU-Kommission «Saubere Energie für alle Europäer» (vgl. Europäische Kommission 2016a), häufig «Clean Energy Package» genannt, spiegelt wider, dass Energieversorgung sektorenübergreifend gedacht und organisiert werden muss. So wird auf Mobilität in dem Papier an ein paar Stellen eingegangen: Von Bedeutung für den Verkehrssektor ist zumindest mittelbar, dass das EU-Ziel von mindestens 27 Prozent für erneuerbare Energien bis 2030 zu überprüfen sei (das Ziel wurde im Sommer 2018 auf 32 Prozent erhöht). Außerdem wird die Elektrifizierung des Verkehrs explizit als «weiteres neues Hauptziel des Rahmens für den Elektrizitätsmarkt» (vgl. ebd.: 10) definiert. Die EU-Kommission schlägt zum Beispiel vor, Kurzfriststrommärkte einzurichten, die helfen, die kurzfristige Einspeicherung von erneuerbarem Strom zu belohnen (vgl. ebd.: 9). Aber auch im Zusammenhang mit Gebäudeeffizienz

wird das Thema aufgegriffen: So fordert die Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden beispielsweise, dass bei bestimmten Gebäuden Ladestationen vorzusehen sind oder zumindest vorverkabelt werden müssen (vgl. ebd.: 6). Nicht zuletzt wird eine «Initiative zur Beschleunigung von Innovationen im Bereich saubere Energie» (vgl. ebd.: 14) vorgeschlagen, die unter anderem auf die strategische Forschungs- und Innovationsagenda für den Verkehrssektor Bezug nimmt.

Elemente der europäischen Strategie für eine emissionsarme Mobilität

Die EU-Kommission hat in ihrer europäischen Strategie für eine emissionsarme Mobilität (vgl. Europäische Kommission 2016b) das Ziel ausgegeben, die transportbedingten Treibhausgasemissionen bis 2050 um nur 60 Prozent gegenüber 1990 zu senken und ab diesem Zeitpunkt das Ziel Nullemission weiterzuverfolgen. Drei Handlungsfelder werden genannt:

1. *Erhöhung der Effizienz des Verkehrssystems durch Nutzung digitaler Technologien und neuer, auch partizipativer Geschäftsmodelle, Preisgestaltung und Einbeziehung externer Kosten sowie die Unterstützung von Multimodalität.*
2. *Stärkerer Einsatz emissionsarmer alternativer Energieträger im Verkehrssektor, zum Beispiel durch die Verpflichtung von Kraftstoffherstellern, festgelegte Anteile innovativer Bio- oder synthetischer Kraftstoffe bereitzustellen (unter Ausschluss von Kraftstoffen aus Pflanzen zur Nahrungsmittelgewinnung), durch den Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe einschließlich Strom, durch die Förderung der Möglichkeit, elektrische Fahrzeuge auch international nutzen zu können, und durch die Harmonisierung von Normen.*
3. *Ermöglichung des Umstiegs auf emissionsärmere und -freie Fahrzeuge, zunächst durch die weitere Verbesserung von Verbrennungsmotoren (einschließlich verlässlicherer Emissionsüberprüfung), durch die Einführung von CO₂-Emissionsnormen ab 2020, die Schaffung von Anreizen für die größere Marktdurchdringung entsprechender Fahrzeuge auf Anbieter- und Nachfragerseite bis 2030, den Aufbau von Produktionskapazitäten innovativer Akkus und die Einführung eines Kontrollsystems für CO₂-Emissionen sowie abgasmindernder Normen bei Lkw und Bussen, aber auch durch die Kundensensibilisierung im Kontext von Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen.*

Einordnung

Die drei in diesem böll.brief verglichenen Studien gehen von einer vollständigen oder nahezu vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrs bis 2050 aus, die nötig ist, um die Ziele von Paris zu erreichen. Entsprechend ist das EU-Ziel einer Reduzierung um nur 60 Prozent deutlich zurückhaltender. Diese Zurückhaltung spiegelt sich in der Schwerpunktsetzung der EU-Strategie nieder: Zwar werden ähnliche Maßnahmen benannt,

aber die EU-Strategie konzentriert sich vor allem auf kurz- bis mittelfristige Maßnahmen bis 2030 und bleibt mit Blick auf 2050 vage. Mit dieser verkürzten Perspektive wird dem Verbrennungsmotor und dessen Verbesserung entsprechend viel Raum gegeben, obwohl durchaus erkannt wurde, dass heute mehr Patente zu neuen Antriebskonzepten außerhalb als innerhalb der EU angemeldet werden.

Auch bleibt das Strategiepapier beim Thema Strom im Konjunktiv und stellt lediglich fest, dass emissionsarme Mobilität die Stromnachfrage steigern könnte. Es geht aber nicht auf ein Szenario ein, in dem unter Umständen sogar erneuerbarer Strom nach Europa importiert oder der Ausbau der Erneuerbaren innerhalb der EU verstärkt werden müsste.

Zudem wird konstatiert, dass die Kapazität der Strominfrastruktur für Strom im Verkehrssektor grundsätzlich ausreiche. Man befürchtet lediglich, dass auf der Verteilungsebene während der Spitzenlastzeiten Probleme entstehen könnten. Eine Lösung wird in der Umgestaltung des EU-Strommarktes mit Blick auf das Laden und Entladen zu Niedrig- bzw. Hochpreiszeiten gesehen. Dieser Ansatz könne auch für die Produktion von Wasserstoff, Biomethan und synthetischen Kraftstoffen nützlich sein, so das Papier.

EU-Parlament und Umweltrat

Bei den Grenzwerten zum CO₂-Flottenausstoß gehen die Forderungen des EU-Parlaments und des Umweltrates über die deutschen Vorstellungen hinaus. Eine Verschärfung des Flottengrenzwertes um 35 Prozent wurde von der deutschen Automobilindustrie bereits als Weichenstellung für die Elektromobilität interpretiert: Bei einer 40-prozentigen Verschärfung müssten 2030 bereits 50 Prozent der neu zugelassenen Pkw elektrisch fahren, so der Volkswagen-Chef Herbert Diess im Oktober 2018 in einer Rede auf der Internationalen Zuliefererbörse über die Zukunft der Autoindustrie (vgl. manager magazin 2018).

5 Schlussfolgerungen für die Energiewende im Verkehr

Alle einbezogenen Szenarien halten die Dekarbonisierung des Verkehrssektors für möglich. Aber alle betonen auch, dass dies nicht ohne Weiteres und insbesondere nicht ohne eine grundlegende Veränderung des Verkehrsenergiemixes möglich sein wird. Während effizientere Fahrzeuge und Verkehrsvermeidung bzw. -lenkung helfen, besteht in allen Bereichen grundsätzlich nur die Wahl zwischen der direkten Nutzung von erneuerbarem Strom aus Batteriespeichern (und zu einem geringen Anteil aus Oberleitungen) oder aus dem «chemischen Stromspeicher» der synthetischen strombasierten Kraftstoffe.^[15]

Auf Basis des Szenarienvergleichs können sechs Leitsätze für eine Energiewende im Verkehr abgeleitet werden. Diese beziehen sich insbesondere auf den ordnungspolitischen Rahmen und zielen auf eine proaktive, gestaltende Rolle der Politik. Die Kernbotschaft ist, dass der Staat seine Richtungsentscheidungspotenziale und Regulierungshoheit verantwortungsvoll einsetzt.

Erneuerbare ausbauen statt ausbremsen. Für die Energiewende im Verkehr, für die Sektorenkopplung insgesamt, ambitioniert Ökostromkapazitäten im In- und Ausland aufbauen und die zugehörige Infrastruktur entwickeln.

Für eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors werden die nationalen regenerativen Stromquellen nicht ausreichen, die Dekarbonisierung der anderen Sektoren, insbesondere Industrie und Wärmezeugung werden den regenerativen Strombedarf darüber hinaus erheblich erhöhen. Der Energiebedarf macht auch bei starken Anstrengungen zur Verkehrslenkung und effizienten Antriebstechnologien weiterhin Energieimporte erforderlich. Im Umkehrschluss bedeutet das zunächst einmal, dass für die Dekarbonisierung im Verkehr alle nationalen erneuerbaren Stromquellen gebraucht werden und in allen Verbrauchsbereichen (Verkehr und andere) allerhöchste Energieeffizienz die richtige Strategie ist. Baldmöglichst muss entschieden werden, bis zu welchem Grad Deutschland seine technisch-ökologischen Potenziale an erneuerbaren Energien ausschöpfen will, dementsprechend sind die **bislang gesetzten EE-Ausbauziele zu erhöhen** – und neue Anlagen zu errichten.

Interessanterweise gilt dies auch, wenn der Verkehr nicht vollständig auf «Batteriebetrieb» umgestellt wird. Im Gegenteil: Der Strombedarf wird um das Doppelte bis Vierfache höher,

15 Der Anteil der Biokraftstoffe wird in den betrachteten Studien – mit unterschiedlicher Begründung – als konstant angenommen.

wenn auch synthetische Kraftstoffe eingesetzt werden. Die «Rettung des Verbrennungsmotors» macht noch mehr erneuerbare Stromerzeugung notwendig.

Die Szenarien mit besonders hohen Anteilen synthetischer Kraftstoffe (jährlich 295 TWh bei BCG/Prognos und ca. 360 TWh beim Umweltbundesamt) gehen explizit auf die Erzeugungsregionen ein. Es wird angenommen, dass sich der Mittelmeerraum zu einer Exportregion für aus erneuerbaren Energien erzeugte, synthetische Kraftstoffe entwickeln könnte. Hierfür müssten in den Exportländern ausreichend Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien ausgebaut und Kraftstoffproduktionsanlagen aufgebaut werden. Der Kraftstoff könnte in flüssiger oder gasförmiger Form transportiert werden. Auch **transnationale und transkontinentale Stromnetze gewinnen neue Bedeutung – der Speicher und der Ausbau der nationalen Strominfrastruktur sowieso**. Diese sind ohnehin für die Elektrifizierungsstrategie erforderlich – eine weitere große Investitionsaufgabe.

Deutschland mit einer klaren Entscheidung für die Art der CO₂-freien Mobilität als relevanten Leitmarkt und Impulsgeber erhalten.

Die Szenarien zeigen meist geteilte Technologiemarkte, bei denen eine Vielzahl unterschiedlicher Antriebe und Kraftstoffe verwendet wird. Ob das realistisch ist, wird davon abhängen, welche Techniken sich in den führenden Absatzmärkten durchsetzen. Ähnlich wie sich bei den erneuerbaren Energien Wind und Sonne als tragende Säulen der Energiewende herauskristallisiert haben, ist es schwer vorstellbar, dass sich mehr als ein bis zwei grundsätzlich unterschiedliche Antriebstechnologien im Verkehrssektor halten werden. Zwischen batteriebetriebenen Fahrzeugen, Oberleitungs-Lkws, Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffen, in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren und den jeweils notwendigen Infrastrukturen für die Treibstoffversorgung und Wartung herrscht ein Wettkampf mit einer unbekanntem Zahl von Siegern, aber starker Pfadabhängigkeit. Die synthetischen Kraftstoffe haben einen «Startvorteil» bei der bestehenden Fahrzeugflotte, der Elektroantrieb bei der Effizienz. Richtungsentscheidungen für eine Antriebstechnologie und für eine Infrastruktur müssen baldmöglichst getroffen werden – obwohl hier ein Henne-Ei-Problem vorliegt, das nicht einfach zu lösen ist, wird es durch die «Wer zuckt, hat verloren»-Haltung nur schlimmer. **Deutschland wäre für eine Rolle als Leitmarkt prädestiniert und könnte sie auch wiederfinden, dazu müssten aber Entscheidungskraft und Innovationswille demonstriert werden.** Ob «die Regierung» oder «die Industrie» die Beharrungskräfte überwindet, wäre dabei zunächst sekundär. Ein «Weiter so!» ist jedoch hierfür nicht die richtige Strategie. Die Entscheidung zwischen den Antrieben der Industrie zu überlassen ist eine geübte Praxis. Sie vernachlässigt, dass jedwede Technologieumstellung große Infrastrukturinvestitionen notwendig macht. Daher wird es wahrscheinlich nötig sein, Technologiesieger auszuwählen.

Kohlenstoffintensive Energieträger und Kraftstoffe durch direkte Elektrifizierung auf Ökostrombasis ersetzen. Mit klaren Entscheidungen den Innovations- und Investitionsstau auflösen.

Ein interessantes Vorbild bietet hier Norwegen, dessen Regierung schon angekündigt hat, nach 2025 nur noch Nullemissionsfahrzeuge in den Verkauf bringen zu lassen. Das Aus für Diesel- und Benzin-Fahrzeuge wurde in Dänemark und Belgien für 2030 und in Frankreich und im Vereinigten Königreich für 2040 angekündigt. **Um den Ausbau der erneuerbaren Energien so gering wie möglich zu halten, ist es sinnvoll, synthetische Kraftstoffe, die gegenüber direkter Elektrifizierung einen drei- bis vierfachen Strombedarf haben, in möglichst geringem Maße zu nutzen.** Sie würden nur als Ergänzung zur E-Mobilität eingesetzt werden, also in Bereichen des Flug- und Schiffsverkehrs, wo eine effizientere (direkte) Elektrifizierung nicht möglich ist. Die Analyse hat eindrücklich dargelegt, dass auch die Potenziale für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen nicht unbegrenzt sind, auch nicht im Import. Zudem gibt es neben dem Verkehr auch noch andere (schwer dekarbonisierbare) Verbrauchssektoren, die auf diese Energieträger in zunehmendem Maße zurückgreifen werden. Als Beispiel sei nur der Einsatz von Wasserstoff in Stahlwerken genannt, der derzeit von der Salzgitter AG erforscht wird.

Frühzeitig einen Einstiegsfad und eine Importstrategie für CO₂-neutrale strombasierte synthetische Kraftstoffe entwickeln. Strombasierte Kraftstoffe nur da zum Einsatz kommen lassen, wo Strom nicht effizienter und direkt genutzt werden kann.

Für die Importe von erneuerbarem Strom und synthetischen Kraftstoffen müssen Weichen gestellt werden: Aus welchen Regionen und unter welchen Herstellungs- und Einfuhrbedingungen sollen die Importe von Strom und synthetischen Kraftstoffen erfolgen? Müssen frühzeitig Abkommen bzw. Einkaufsverträge mit Produzent/innen geschlossen werden, damit die Produktionskapazitäten rechtzeitig zur Verfügung stehen? Wie kann gesichert werden, dass es tatsächlich erneuerbarer Strom bzw. CO₂-neutrale Kraftstoffe sind, die importiert werden? Wie wird garantiert, dass die Erzeugungskapazitäten zusätzlich sind und Exporte nicht in den Herkunftsländern zu Engpässen führen? Für Deutschland steht also an, neben einer nationalen Energiewende auch eine nachhaltige Importstrategie für nicht fossile Energieträger zu entwickeln.

Strom- und Treibstoffbesteuerung nachjustieren und damit neue Anreize zum Umstieg schaffen.

Die Kopplung des Stromsektors mit dem Verkehrssektor wird aktuell dadurch erschwert, dass die Umwandlung von Strom in gasförmige oder flüssige Kraftstoffe durch hohe Stromkosten weitestgehend unattraktiv ist.^[16] Die Preise für fossile Kraftstoffe spiegeln

16 Mit den Stromkosten müssen in Form verschiedener Umlagen auch die Erzeugungs- und Transportinfrastruktur bezahlt werden, also u. a. EEG-Umlage, Netzentgelte, KWK-Umlage etc., hinzu kommt die Stromsteuer. Dieser Punkt belastet nicht nur die Sektorenkopplung, sondern noch viel stärker die Investitionen in Stromspeicher.

dagegen noch immer nicht die Externalitäten dieser Energieträger wider, sind also eigentlich zu niedrig. Seit der Einführung der Ökosteuern wurden keine weiteren Maßnahmen mehr vorgenommen, um die Kosten von Benzin oder Diesel weiter zu erhöhen. Eine Überprüfung und Neujustierung, sowohl der Strom- als auch der Treibstoffbesteuerung, scheint angebracht.

Umfassend denken und gestalten. Die Verkehrswende als gesellschaftliches Anliegen verstehen und behandeln.

Szenarioanalysen sind stets an die heute plausibel darstellbaren Technologien und Strategien gebunden. Disruptive Technologien oder radikale Verhaltensänderungen können in Szenarien nicht angenommen werden, ohne die Seriosität und Akzeptanz des Szenarios zu gefährden. Die «Extremmaßnahmen» zu disruptiven Technologien und Verhaltensänderungen sind zum Beispiel im Szenario des Wuppertal Instituts die Zunahme des autonomen Fahrens und Carsharing oder bei BCG/Prognos die zunehmende Lieferökonomie. Diese Veränderungen mögen für unseren Alltag stark disruptiv wirken. Die Szenarien zeigen, dass solche Disruptionen nur dann zu einer Verringerung der Emissionen führen, wenn sie die technische Effizienz stark fördern oder die Verkehrsleistung stark reduzieren. **Effizienz und die Reduzierung unnötigen Verkehrs sollten als maßgebliche Parameter in die Entscheidungsfindung mit aufgenommen werden.** Die durch Verkehrsreduzierung frei werdenden Räume können zur Erhöhung der Lebensqualität erschlossen werden. Dafür müssen Ansätze zur Schaffung und Pflege öffentlicher, geteilter Räume sowie Ansätze für die Verkehrswende stärker integriert werden.

Literaturverzeichnis

- Boston Consulting Group (BCG)/Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie. Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.: Berlin. Online: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland>.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017): Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr – Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Antriebe und Kraftstoffe). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMIV) (2018): Zahlen und Fakten Energiedaten. Online: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html.
- Bundesnetzagentur (2018): Ladesäulenregister. Online: www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/HandelundVertrieb/Ladesaeulenkarte/Karte/Ladesaeulenkarte-node.html.
- Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR), Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) Ingenieurbüro für neue Energie (IFnE) (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht.
- Europäische Kommission (2016a): Saubere Energie für alle Europäer. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Wirtschafts- und Sozialausschuss, den Ausschuss der Regionen und die Europäische Investitionsbank. COM (2016) 860 final. Europäische Kommission: Brüssel.
- Europäische Kommission (2016b): Eine europäische Strategie für emissionsarme Mobilität. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM (2016) 501 final. Europäische Kommission: Brüssel.
- Forschungsinformationssystem (2017): Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs. Online: www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234.
- H₂ Mobility (2018): H₂ tanken – Wasserstoffmobilität beginnt jetzt. Online: <https://h2.live>.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2018): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen, 1. Juli 2018 (FZ 27).
- manager magazin (2018): Rede von Volkswagen-Chef Herbert Diess auf der Zuliefererbörse in Wolfsburg über die Zukunft der Autoindustrie: «Gelingt das nicht, fahren wir

schlimmstenfalls mit Braunkohle». Rede im Wortlaut: www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/volkswagen-rede-herbert-diess-im-wortlaut-a-1233534.html.

- Umweltbundesamt (UBA) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. Online: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. Online: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_fachbrosch_rtd_final_bf_0.pdf.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018a): Energiebedingte Emissionen. Online: www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#textpart-1.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018b): Politiksznarien für den Klimaschutz VII – Treibhausgas-Emissionssznarien bis zum Jahr 2035. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018c): Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. Online: www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#textpart-1.
- Wuppertal Institut (2017): Verkehrswende für Deutschland. Der Weg zu CO₂-freier Mobilität bis 2035. Studie im Auftrag von Greenpeace. Greenpeace e. V.: Hamburg. Online: https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/Mobilitaetsszenario_2035_Langfassung.pdf.

Die Autor/innen

Gisa Holzhausen ist Beraterin beim unabhängigen Forschungs- und Beratungsunternehmen Arepo Consult und arbeitet in dieser Rolle schwerpunktmäßig an Projekten zur Energiepolitik in der internationalen Zusammenarbeit. Weiterhin unterstützt sie die strategische Weiterentwicklung von Arepo Consult.

Sarah Rieseberg ist Projektleiterin bei Arepo Consult. Schwerpunktthemen ihrer Arbeit sind Energienutzung und Emissionen der Industrie, das Risiko der Verlagerung von CO₂-Emissionen (Carbon Leakage) durch Klimapolitik, Energieabgaben und -steuern, Aspekte internationaler Klimapolitik und Energieszenarien.

Dr. Christine Wörten ist die Gründerin von Arepo Consult und eine international renommierte Expertin in den Bereichen erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Dabei verfügt sie über besondere Expertise in der Entwicklung und Evaluierung von Projekten und Programmen zu nachhaltiger Energiepolitik sowie zur Integration von erneuerbaren Energien.

Jens Altevogt ist Seniorberater bei Arepo Consult. Schwerpunkte seiner Arbeit sind die Evaluierung von Capacity-Building-Maßnahmen und Analysen im Bereich der Klimafinanzierung. Er ist Experte in der Entwicklung, Umsetzung und Qualitätssicherung von internationalen Hochschul- und Berufsbildungsprogrammen im Kontext der erneuerbaren Energien.

Impressum

Herausgeberin: Heinrich-Böll-Stiftung e.V., Schumannstraße 8, 10117 Berlin
Kontakt: Referat Ökologie und Nachhaltigkeit, Dr. Stefanie Groll **E** groll@boell.de

Erscheinungsort: www.boell.de

Erscheinungsdatum: November 2018

Lizenz: Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

Verfügbare Ausgaben unter: www.boell.de/de/boellbrief

Abonnement (per E-Mail) unter: boell.de/news

Die vorliegende Publikation spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung der Heinrich-Böll-Stiftung wider.