

Scheelhaase, Janina et al.

**Article**

## Klimaschutz im Verkehrssektor – aktuelle Beispiele aus der Verkehrsforschung

Wirtschaftsdienst

*Suggested Citation:* Scheelhaase, Janina et al. (2018) : Klimaschutz im Verkehrssektor – aktuelle Beispiele aus der Verkehrsforschung, Wirtschaftsdienst, ISSN 1613-978X, Springer, Heidelberg, Vol. 98, Iss. 9, pp. 655-663,  
<https://doi.org/10.1007/s10273-018-2347-y>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/213680>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

Janina Scheelhaase et al.

# Klimaschutz im Verkehrssektor – aktuelle Beispiele aus der Verkehrsforschung

Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors wird eine der größten Herausforderungen in der Zukunft sein. Anhand aktueller Beispiele für Innovationen im Verkehrsbereich wird ihr Potenzial zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sowie die damit verbundenen Kosten gezeigt. Ökonomen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) haben aktuelle Forschungsergebnisse aus verschiedenen DLR-Instituten zusammengetragen. Dabei wird deutlich, dass eine breite Palette an technologischen bzw. organisatorischen Innovationen zur Reduktion von klimarelevanten Emissionen mit unterschiedlicher Marktreife verfügbar ist. Eine technologische Effizienzsteigerung allein reicht jedoch nicht aus, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen. Hier ist die Politik mit weiteren Maßnahmen gefordert.

Transport, also die Raumüberwindung von Personen und Gütern, spielt mit zunehmender Relevanz in der Entwicklung der Menschheit eine herausragende Rolle. In unserer heutigen arbeitsteiligen und globalisierten Zeit ist der Verkehrssektor wichtiger denn je. Gleichzeitig nimmt auch die Belastung der Umwelt durch verkehrsbedingte Emissionen zu. Laut Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) stiegen die verkehrsbedingten Emissionen von Treibhausgasen zwischen 1990 und 2015 weltweit um 68 %. Bezogen auf die gesamten globalen Treibhausgasemissionen entspricht das einem Anteil von etwa 24 % im Jahr 2015, wobei der Anteil in den Ländern der OECD deutlich höher liegt.<sup>1</sup> Die weltweiten Treibhausgasemissionen soweit zu reduzieren, dass die globale Erderwärmung deutlich unter 2° C im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten gehalten wird, ist seit dem Klimavertrag von Paris erklärtes Ziel der Weltgemeinschaft. Dies macht es laut Angaben der Vereinten Nationen (UN) erforderlich, die Nettoemissionen bis in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts auf null zu reduzieren.<sup>2</sup> Die Senkung der spezifischen Treibhausgasemissionen, also der Emissionen pro Personen- bzw. Tonnenkilometer im Verkehrssektor ist in den vergangenen Jahrzehnten durch neue und verbesserte Technologien zwar vorangeschritten, diese Erfolge wurden durch die ansteigende Nachfrage nach Verkehrsleistungen jedoch überkompensiert. Auch künftig ist mit einer steigenden Nachfrage nach Verkehrsdienstleistungen zu rechnen.<sup>3</sup> Damit wird klar, dass die Dekarbonisie-

rung des Verkehrssektors eine der größten Herausforderungen in den kommenden Jahren sein wird.

## Klimarelevanz des Verkehrssektors in Europa

Der Verkehrssektor trug 2015 europaweit etwa zu 27 % zu den gesamten energiebedingten Treibhausgasemissionen

### Autorinnen und Autoren des Beitrags:

**Dr. Janina Scheelhaase** leitet die Gruppe Luftverkehrsökonomie und **Wolfgang Grimme**, Dipl.-Kfm., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr in Köln.

**Marlene O'Sullivan**, Dipl.-Ing., und **Dr. Tobias Naegler** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am DLR Institut für Technische Thermodynamik in Stuttgart.

**Matthias Klötzke**, Dipl.-Ing., leitet die Gruppe Straßenfahrzeuge und **Dr. Ulrike Kugler** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am DLR Institut für Fahrzeugkonzepte in Stuttgart.

**Benedikt Scheier**, M. Sc., ist Projektleiter am DLR Institut für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig.

**Thomas Standfuß**, M. Sc., ist Mitarbeiter am DLR Institut für Flugführung in Braunschweig.

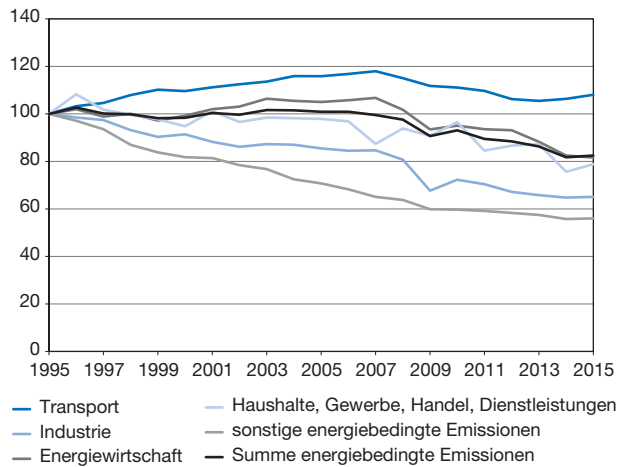
1 International Energy Agency: IEA Statistics, CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion – overview 2017, Paris 2017, <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview-2017> (29.8.2018).

2 United Nations: Paris Agreement, Paris 2015, <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement> (29.8.2018).

3 Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI): Bundesverkehrswegeplan 2030, Berlin 2016.

**Abbildung 1**  
**Energiebedingte Treibhausgasemissionen in der EU28 in verschiedenen Emittentenbereichen**

1995 = 100



<sup>1</sup> Ohne internationalen Luft- und Schiffsverkehr.

Quelle: eigene Darstellung nach European Commission, Statistical Pocketbook 2016 – EU Transport in Figures. European Commission, Luxemburg 2016, [https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016\\_en](https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016_en) (29.8.2018).

von insgesamt 3358 Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent bei.<sup>4</sup> Damit wird der Anteil der Emissionen des Verkehrssektors nur von der Energiewirtschaft übertroffen, die für 37 % aller energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU28 verantwortlich ist.

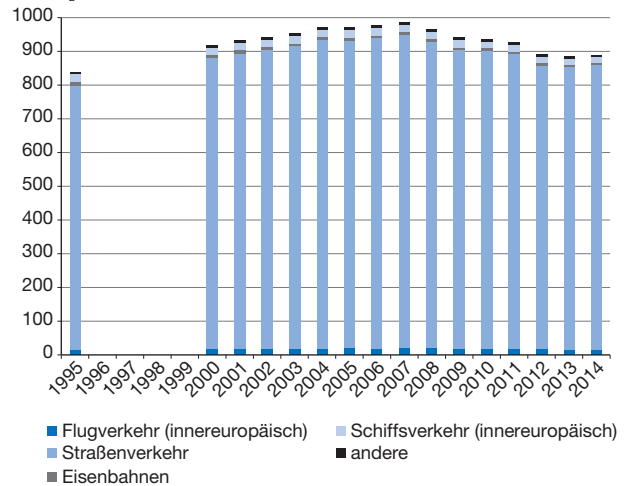
Grundsätzlich weisen energiebedingte Treibhausgasemissionen in der EU28 einen rückläufigen Trend auf (vgl. Abbildung 1). So lagen die Emissionen 2015 um 18 % niedriger als noch 1995 (4071 Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent). Einzig im Verkehrssektor verläuft die Entwicklung der Treibhausgasemissionen entgegen dem allgemeinen langfristigen Trend: 2015 lagen die Emissionen um 8 % höher als 1995 (1995: 838 Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent, 2015: 905 Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent). Innerhalb des Verkehrssektors stammt der Großteil der Treibhausgasemissionen aus dem Straßenverkehr (vgl. Abbildung 2), was einerseits mit dem hohen Anteil des Straßenverkehrs an der Personen- und Güterverkehrsleistung zu erklären ist, andererseits auf die relativ hohen (direkten) spezifischen Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs im Vergleich zum Bahn-<sup>5</sup> und Schiffsverkehr zurückzuführen ist.

<sup>4</sup> European Commission: Statistical Pocketbook 2016 – EU Transport in Figures, European Commission, Luxemburg 2016, [https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016\\_en](https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016_en) (29.8.2018). Vgl. hierzu auch: Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur: Nach der Klimakonferenz in Paris: Wird eine neue Klimastrategie für den Verkehr benötigt?, in: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 87. Jg. (2016), H. 3, S. 125-166.

<sup>5</sup> Bei den Emissionen des Bahnverkehrs sind nur die direkten Emissionen berücksichtigt, d.h. (unter anderem) nicht die Emissionen, die bei der Erzeugung des Bahnstroms anfallen.

**Abbildung 2**  
**Energiebedingte Treibhausgasemissionen des Verkehrs in der EU28 nach Verkehrsträgern<sup>1</sup>**

Mt CO<sub>2</sub>-Äquivalent/Jahr



<sup>1</sup> Ohne internationalen Luft- und Schiffsverkehr. Die gesamten Emissionen des Luftverkehrs innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (inklusive grenzüberschreitender Flüge) betrugen im Jahr 2013 53,4 Mt CO<sub>2</sub> und im Jahr 2014 54,9 Mt CO<sub>2</sub> (Quelle: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-15-4987\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-4987_en.htm) [29.8.2018]).

Quelle: eigene Darstellung nach European Commission, Statistical Pocketbook 2016 – EU Transport in Figures. European Commission, Luxemburg 2016, [https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016\\_en](https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2016_en) (29.8.2018).

Treibender Faktor für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs ist die zunehmende Verkehrsnachfrage: Auf europäischer Ebene ist der Güterverkehr, gemessen in Tonnenkilometern, zwischen 1995 und 2014 um 24 % und der Personenverkehr, ausgedrückt in Personenkilometern, um 23 % angestiegen. Innerhalb des Personenverkehrs hat der Pkw-Verkehr mit 72 % der Verkehrsleistung die mit Abstand größte Bedeutung. Blickt man hingegen auf die Wachstumsraten in den letzten zehn Jahren, weist der innereuropäische Flugverkehr die bei weitem höchste Wachstumsdynamik im Personenverkehr auf: Zwischen 1995 und 2014 ist eine Steigerung um 74 % zu verzeichnen. Im Güterverkehr hat der Lkw-Verkehr die größte Bedeutung.

Vergleicht man die Entwicklung der Personen- und Güterverkehrsleistung mit der Entwicklung des verkehrsbedingten Energieverbrauchs von 1995 bis 2015, so zeigen sich zwei gegenläufige Effekte: einerseits technische Effizienzgewinne, die eine Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs der verschiedenen Transport-Modi zur Folge haben, andererseits ein Anstieg der Fahrleistungen. Im Saldo wurden die energetischen Effizienzgewinne durch die gestiegene Fahrleistung überkompensiert. Im Personenverkehr trägt auch der starke Anstieg des

innereuropäischen Flugverkehrs (mit einem deutlich höheren spezifischen Energiebedarf pro Personenkilometer als der Personenverkehr im Durchschnitt) dazu bei, dass weder der Energieverbrauch des Verkehrssektors noch die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen in den letzten zwei Dekaden deutlich reduziert werden konnten.

Die EU hat für den Verkehrssektor ein Treibhausgas-Minderungsziel von minus 60 % des Jahres 1990 bis 2050 formuliert.<sup>6</sup> Deutschland hat sich für den Verkehrssektor das Ziel gesetzt, bis 2050 mindestens 40 % des Endenergieverbrauchs des Jahres 2005 zu vermeiden. Die Entwicklungen im Verkehrssektor zeigen sehr deutlich, dass die Umsetzung der ambitionierten Klimaschutzziele kein Selbstläufer ist: Vielmehr sind Maßnahmen und Innovationen auf vielen Ebenen erforderlich, wenn diese Ziele (noch) erreicht werden sollen. Im Folgenden werden aktuelle Innovationen aus der Verkehrsforschung vorgestellt, die zur Umsetzung dieser Klimaschutzziele beitragen können.

### Ausgewählte Zukunftsinnovationen im Verkehr, Potenziale zur Klimagasreduktion und ökonomische Effekte

Klimarelevante Emissionen im Verkehrssektor können grundsätzlich auf verschiedenen Wegen reduziert werden. Zu den wesentlichen Ansatzpunkten zählen:<sup>7</sup> Verkehrsvermeidung, -verlagerung, -optimierung, Erhöhung der fahrzeugspezifischen Energieeffizienz sowie der Einsatz von klimafreundlichen Energieträgern. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf ausgewählte technologische und organisatorische Innovationen zur Reduzierung der verkehrsbedingten klimarelevanten Emissionen und den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Sparpotenzialen und Kosten.

#### Luftverkehr

Zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr werden seit vielen Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen, maßgeblich weil gleichzeitig kostspieliges Kerosin eingespart werden kann. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich jedoch gezeigt, dass die technologische Weiterentwicklung von Verkehrsflugzeugen die durch das Verkehrswachstum steigenden Emissionen nicht kompensieren konnte. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro

erbrachtem Passagier- oder Tonnenkilometer sanken in den letzten Jahrzehnten durchschnittlich um weniger als 2 % pro Jahr.<sup>8</sup> Hierbei kann ein Großteil der Effizienzgewinne auf den Einsatz neuer Flugzeugtypen zurückgeführt werden. Gleichzeitig ist der Luftverkehr jährlich etwa 4 % bis 5 % gewachsen, sodass die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors etwa 3 % pro Jahr gestiegen sind.<sup>9</sup>

#### Technologische Entwicklungen der Flugzeughersteller

Die weitere Steigerung der Energieeffizienz neuer Flugzeugtypen ist in den vergangenen Jahrzehnten schwieriger geworden, da sich die technologischen Entwicklungen immer weiter an die Grenzen angenähert haben, die durch die Naturgesetze vorgegeben sind. Gleichzeitig sind die zeitlichen Intervalle zwischen den Flugzeuggenerationen länger und die notwendigen Investitionen für die Entwicklung neuer Typen größer geworden. Durch die länger werdenden Innovationszyklen und die Langlebigkeit von Flugzeugen befindet sich ein Großteil der heute betriebenen Flugzeugflotte auf dem technologischen Stand der 1980er und 1990er Jahre, so etwa die Airbus-Typen A320, A330 und A340 sowie die Boeing 737NG und 777.

Drei Gründe tragen zu einer eher niedrigen Innovationsgeschwindigkeit bei der Entwicklung und dem Bau von Verkehrsflugzeugen bei:

1. Die Hersteller vermeiden es aus Risiko- und Kostengesichtspunkten von Grund auf, neue Flugzeugprojekte zu initiieren und ziehen es vor, sofern möglich, bestehende Typen zu modifizieren und technologisch zu aktualisieren. Vielfach werden hierbei effizientere Triebwerke eingesetzt, Bauteile aus Aluminium durch Kohlefaser oder Kunststoffe ersetzt sowie die Aerodynamik optimiert. Beispiele hierfür sind bei Airbus der A320neo, A330neo und A380plus sowie bei Boeing 737MAX, 747-8 und 777-8/-9. Die neuen Langstreckenflugzeuge Airbus A350 und Boeing 787 stellen als grundsätzlich neue Typen eher die Ausnahme dar.
2. Aufgrund der Marktstruktur eines engen Oligopols mit hohen Markteintrittsbarrieren für neue Anbieter und aufgrund der politischen Rahmenbedingungen (z.B. keine „scharfen“ internationalen CO<sub>2</sub>-Standards) bestehen geringe Innovationsanreize.
3. Die Flugzeughersteller haben auch aufgrund der zumeist vollen Auftragsbücher nur relativ geringe Anrei-

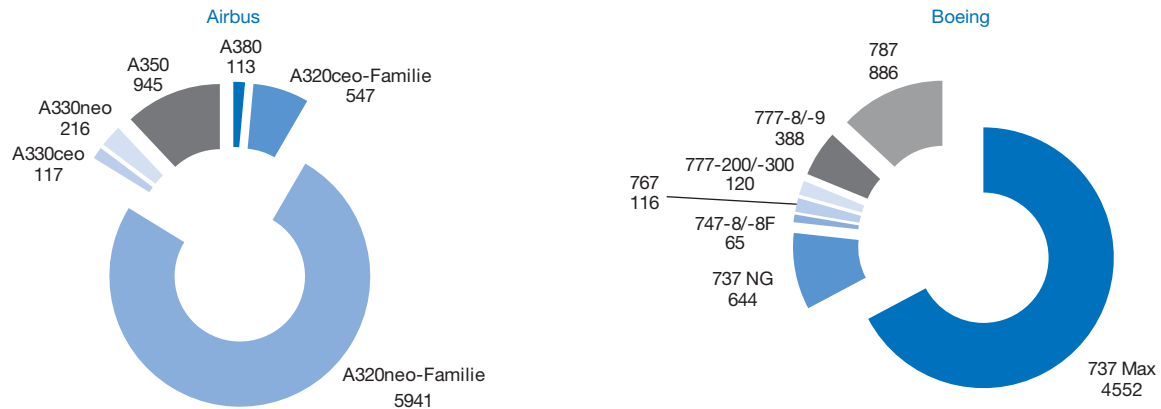
6 Europäische Kommission: Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft bis 2050, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Brüssel 2011.

7 Umweltbundesamt (Hrsg.): CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland – Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale – Ein Sachstandbericht des Umweltbundesamtes, Texte 05/2010, Dessau-Roßlau 2010.

8 M. Schaefer: Development of a Forecast Model for Global Air Traffic Emissions, DLR-Forschungsbericht, Nr. 2012-08, Köln 2012, S. 15 f.

9 <https://www4.icao.int/newdataplus/Tools>.

Abbildung 3

**Orderbuch von Airbus und Boeing, Zahl der Bestellungen und Optionen (Stand: August 2017)**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis Flightglobal Fleets Analyzer: <https://www.flightglobal.com/products/fleets-analyzer/> (29.8.2018).

ze, den Absatz ihrer aktuell gut laufenden Produktlinien durch die Einführung neuer, effizienterer Flugzeugtypen zu gefährden. Beispielsweise beläuft sich das Orderbuch bei Airbus auf aktuell annähernd 8000 Bestellungen und Optionen im Gesamtwert von mehr als 500 Mrd. Euro, wovon fast 6000 auf die überarbeitete A320neo-Familie entfallen (vgl. Abbildung 3).<sup>10</sup>

Laut Herstellerangaben ist durch eine technologische Aktualisierung und Modifikation eine etwa 15 %ige Treibstoff- bzw. CO<sub>2</sub>-Einsparung im Vergleich zum jeweiligen Vorgängermodell möglich. Die Kosten dieser Weiterentwicklung schlagen sich in den Listenpreisen für überarbeitete bzw. neue Flugzeugtypen nieder. Beispielsweise liegen die Listenpreise für Flugzeuge der Airbus A320neo-Familie mit 99,5 Mio. US-\$ bis 127 Mio. US-\$ im Schnitt um etwa 10 Mio. US-\$ über den Preisen der Vorgängermodelle.<sup>11</sup> Es ist davon auszugehen, dass die neuen Materialien und verbesserten Triebwerke höhere Produktionskosten für den Flugzeughersteller verursachen. Jedoch dürfte der Hersteller durch die Effizienzsteigerung einen Spielraum bei der Preisgestaltung der Flugzeuge erhalten und zumindest einen Teil des Nettobarwerts des eingesparten Treibstoffs durch den Verkaufspreis internalisieren. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass effizientere Flugzeuge auch Anreize auslösen, die angebotene Verkehrsleistung zu erhöhen. Steigt hierdurch die Nachfrage, werden die durch technologische Aktualisierung zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen zumindest teilweise wieder kompensiert.

Da es sich bei Flugzeugen um langlebige Investitionsgüter handelt und auch Verbesserungen eher graduell als

disruptiv erfolgen, lässt sich die zukünftige Flugzeugflotte relativ gut prognostizieren. Die aktuelle Flugzeuggeneration von Airbus und Boeing wird mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit für mindestens zehn bis 20 Jahre in Produktion verbleiben und die letzten produzierten Flugzeuge dieser Generation werden von den Fluggesellschaften voraussichtlich weitere 20 bis 30 Jahre genutzt. Entsprechend werden viele der heute produzierten Flugzeugtypen voraussichtlich auch noch nach 2050 eingesetzt. Es ist daher zu erwarten, dass die wachstumsbedingten klimarelevanten Emissionen auch auf lange Sicht nicht durch die aktuell genutzten Flugzeugflottentechnologien kompensiert werden können. Künftig werden sich die spezifischen Emissionen voraussichtlich nur um etwa 1,2 % pro Jahr verringern,<sup>12</sup> während das Verkehrswachstum in den nächsten 20 Jahren nach Schätzungen von Airbus insgesamt 4,4 % pro Jahr betragen wird.<sup>13</sup>

#### Längerfristige technologische Entwicklungen im Luftverkehr

Trotz der aktuell eher konservativen Ausrichtung der großen Flugzeughersteller werden andernorts größere Forschungsanstrengungen unternommen, um in Zukunft weitere Energieeffizienzsteigerungen und damit Treibhausgasreduktionen zu ermöglichen. Vor allem wird der Trend zur zunehmenden Automatisierung im Verkehr auch im Luftverkehr zu klimarelevanten Verbesserungen führen. Durch automatisierten Bodenverkehr und den damit verbundenen Reisezeiteinsparungen und Komfortgewinnen könnten erstens durch die effizientere Organisation des Flughafen- und -abgangs die (Luft-)Verkehrsströme stärker gebündelt werden, sodass größeres und damit auch CO<sub>2</sub>-effizienteres Fluggerät eingesetzt werden

<sup>10</sup> Flightglobal Fleets Analyzer, <https://www.flightglobal.com/products/fleets-analyzer/> (29.8.2018).

<sup>11</sup> Airbus Aircraft: 2017 Average List Prices, <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/Backgrounder-Airbus-Commercial-Aircraft-price-list-EN.pdf> (29.8.2018).

<sup>12</sup> M. Schaefer, a. a. O.

<sup>13</sup> Airbus: Global Market Forecast 2018-2037, <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html> (31.8.2018)



könnte. Zweitens könnten durch neue automatisierte Taxiflugkonzepte Luftverkehrsangebote stärker individualisiert werden. Beispielsweise wären Flüge auch von kleineren Flugplätzen denkbar, die auf individuelle Anforderung angeboten und mit autonom fahrenden Fahrzeugen zu Tür-zu-Tür-Reiseketten kombiniert werden könnten. Vorstellbar wäre der Einsatz von autonom operierenden Taxiflugzeugen mit einem hybrid-elektrischen Antrieb, die durch die Trennung von Energieumwandlung und verteiltem Antrieb mit Elektromotoren eine bessere Aerodynamik und Energieeffizienz erreichen, im Sinkflug Energie zurückgewinnen und mit entsprechender Lärmreduktion voll elektrisch starten und landen können. Möglicherweise kommt auch Wasserstoff als Energieträger für die Luftfahrt der Zukunft infrage. Bereits 2009 ist das ausschließlich durch Brennstoffzellen angetriebene Versuchsflugzeug Antares DLR-H2 zum Erstflug gestartet. Inzwischen wurde das Konzept zum viersitzigen Passagierflugzeug HY4 weiterentwickelt, das 2016 zum ersten Mal flog und eine Reichweite von bis zu 1500 km hat. Eine Weiterentwicklung hin zu einem Regionalflugzeug mit 19 Sitzen wird angestrebt. Die Auswirkungen dieser radikal neuen Konzepte auf die Emissionen des Luftverkehrs sind jedoch nur schwer abschätzbar. Hier wird es wesentlich darauf ankommen, ob die im Luftverkehr zu nutzende Energie aus regenerativen bzw. CO<sub>2</sub>-neutralen Quellen zur Verfügung gestellt werden kann.

#### Innovationen im Bereich Luftraumkontrolle

Aufgrund der staatlichen Hoheitsgebiete ist der europäische Luftraum durch eine starke Fragmentierung gekennzeichnet. Hohe Verkehrszahlen und der steigende Einfluss der Billigfluglinien führten Ende der 1990er Jahre zu signifikanten Verspätungsproblemen im europäischen Luftverkehr. Daraus resultieren Bestrebungen, die Flugsicherungsdienstleister zu bewerten und Verbesserungspotenziale abzuleiten. Diese Ziele und Maßnahmen wurden im Rahmen des Single European Sky (SES) festgeschrieben. Ein Ziel des SES ist die Reduktion von luft- und bodenseitigen Kapazitätsengpässen, die wiederum zu Verspätungen, Umwegen und damit auch zu höheren Emissionen führen. Durch SES sollen sowohl eine höhere Verkehrsleistung als auch optimierte, respektive direktere Flugrouten (Trajektorien) gewährleistet werden. Schätzungen zufolge können hierdurch bis zu 10 % der pro Flug entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.<sup>14</sup>

Die CO<sub>2</sub>-Effizienz des Luftverkehrsmanagements hängt von mehreren Faktoren ab, unter anderem auch der Tra-

jectory Fuel Efficiency.<sup>15</sup> Diese setzt sich zusammen aus einer Referenztrajektorie (orientierend an der sogenannten Großkreisentfernung) und der tatsächlich geflogenen Trajektorie. Hieraus kann die sogenannte horizontale and vertikale Flight Efficiency abgeleitet werden. Der vom Luftverkehrsmanagement beeinflussbare Anteil an CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luftverkehrs wird auf 6 % geschätzt.<sup>16</sup>

Die Hauptursache operativer Ineffizienz besteht in der Fragmentierung des Luftraumes. Eine Implementierung funktionaler Luftraumblöcke ist daher ein wesentlicher Bestandteil der SES-Konzeption und repräsentiert die technische, operative und strukturelle Konsolidierung mehrerer Flugsicherungen zu einem Functional Airspace Block (FAB). Dadurch sollen unter anderem der Koordinierungsaufwand abgebaut und Interoperabilität<sup>17</sup> gewährleistet werden.

Die Einführung dieser innovativen Luftraumstruktur stellt eine große technische und organisatorische Herausforderung dar. In weiten Teilen Europas verzögert sich die Umsetzung – bis heute gelten lediglich zwei der insgesamt neun Luftraumblöcke als implementiert.<sup>18</sup> Problematisch sind mehrere Faktoren: Die Allokation der Flugsicherungsdienstleister zu den einzelnen FAB ist durch die Politik entschieden worden. Dadurch müssen sich bis zu sieben Flugsicherungen in einer FAB koordinieren.<sup>19</sup> Individuelle kulturelle oder regulatorische Aspekte<sup>20</sup> der Staaten wurden bei der Zusammensetzung nicht berücksichtigt. Die Allokation beeinflusst wiederum Größe und Begrenzung der FAB. Diese Grenzen orientieren sich jedoch primär an den zugehörigen Staatsgebieten und weniger an (sich stetig verändernden) Verkehrsströmen. Die im SES geforderte Interoperabilität setzt eine Harmonisierung der technischen Systeme und operativen Verfahren voraus. Insbesondere die Interoperabilität stellt die Unternehmen vor hohe finanzielle Belastungen und organisatorische Schwierigkeiten. Zudem bietet die aktuelle Regulierung keine Anreize für diese Maßnahmen. Dagegen können die Einführung des sogenannten Flexible-Use-of-Airspace-Konzeptes (d.h. je nach Nachfrage für Militär oder zivilen Verkehr geöffnete Lufträume) oder die Gewährung von „directs“ (direkte Verbindung zwischen zwei Punkten ohne das „abfliegen“ des Flugplans, dadurch Verkürzung der Strecke) durch den Lotsen als positive Innovationen hinsichtlich Emissionseinsparungen gesehen werden. Belastbare Schätzungen zu den mit SES verbundenen Kosten liegen (noch) nicht vor.

15 EUROCONTROL: Performance Review Report 2015, Brüssel 2015, S. 22.

16 EUROCONTROL: Performance Review Report 2012, Brüssel 2012.

17 Interoperabilität = Harmonisierung der Systeme (Software, Hardware) und Verfahren innerhalb eines funktionalen Luftraumblocks (FAB).

18 EUROCONTROL: FAB, <https://www.eurocontrol.int/functional-air-space-block-fabs-defragmenting-european-airspace> (20.8.2017).

19 Die implementierten FAB bestehen aus je zwei Flugsicherungen.

20 Etwa sprachliche Differenzen, Unterschiede im Streikrecht etc.

14 SESAR Joint Undertaking: SESAR and the Environment, Brüssel 2010, [https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/sesar/doc/2010\\_06\\_sesar\\_environment\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/sesar/doc/2010_06_sesar_environment_en.pdf) (31.8.2017).

## Schienenverkehr

Der Verkehrsträger Bahn ist bei dem spezifischen Energiebedarf bezogen auf die Verkehrsleistung respektive spezifische direkte Treibhausgasemissionen im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern Vorreiter. Dies liegt zum einen daran, dass der Rollreibungswiderstand aufgrund des Einsatzes von Stahlrädern und Stahlschienen gering und der spezifische Luftwiderstand insbesondere bei langen Zügen günstig ist, zum anderen weil seit dem Beginn der Elektrifizierung 1903 Züge mit elektrischer Traktion betrieben werden und vermehrt Strecken elektrifiziert werden. Die indirekten Treibhausgasemissionen des Zugverkehrs hängen entscheidend von den spezifischen Emissionen des Bahnstrom-Mixes ab. 2014 lag der Anteil elektrischer Traktion an der Verkehrsleistung in Deutschland bei ca. 90 %. Der Ökostromanteil am Strommix lag bei den Gesellschaften der Deutschen Bahn 2015 mit 42 %<sup>21</sup> über dem Ökostromanteil des Gesamtstromverbrauchs in Deutschland von 30 % im Vergleichsjahr.<sup>22</sup> Bei der Nutzung elektrischer Traktion kann Energie, die für das Bremsen aufgewendet werden muss, in das Energienetz rückgespeist werden. Der Anteil dieser sogenannten Rekuperationsenergie am Gesamtstrombezug lag 2016 im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) bei 19 %, im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) bei 11 % und im Schienengüterverkehr (SGV) bei 7 %.<sup>21</sup> Dieser systembedingte Vorteil des Verkehrsträgers Schiene wird neben der Elektrifizierung weiterer Strecken kontinuierlich mittels inkrementeller Innovationen ausgebaut. Aus ökonomischen Gründen können nicht alle Strecken elektrifiziert werden. Dennoch haben diese Strecken als Zulaufstrecken zu den elektrifizierten Hauptstrecken eine wichtige Funktion. Wie können die klimarelevanten Emissionen im Bahnverkehr weitergehend gesenkt werden? Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten der Vermeidung – oder Verringerung – von Treibhausgasen auch bei nicht elektrifizierten Strecken:

- Kontinuierliche Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien am Bahnstrommix,
- Nutzung der E-Traktion auch auf nicht-elektrifizierten Strecken z.B. durch Brennstoffzellen, Akkumulatoren, Doppelschichtkondensatoren und Schwungmassenspeicher,

- Weiterentwicklung herkömmlicher Antriebssysteme, wie z. B. der dieselektrische Antrieb bzw. Kombinationen mit innovativen Antriebssystemen als Hybrid-Antrieb,
- Vermeidung von sogenannten ständigen Langsamfahrstellen auf der freien Strecke, die ein Verzögern und erneutes Beschleunigen verursachen. Dies tritt insbesondere bei nicht-elektrifizierten Strecken mit nicht-technisch gesicherten Bahnübergängen häufig auf.

## Triebfahrzeuge mit Brennstoffzellen

Bei dieselektrischen Lokomotiven bzw. Triebzügen wird mit einem Dieselmotor Strom erzeugt, der für die elektrische Traktion und für Nebenverbraucher benötigt wird. Wird stattdessen eine Brennstoffzelle verwendet, gibt es keine antriebsbedingten lokalen Emissionen mehr. Wird der Wasserstoff aus Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt, sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines mittelgroßen Nahverkehrstriebzuges auf ca. 300 g je Fahrzeugkilometer (Betrachtung Lebenszyklus). Ein dieselbetriebener Nahverkehrstriebzug verursacht unter sonst gleichen Bedingungen etwa 4000 g CO<sub>2</sub> pro Fahrzeugkilometer. Große Herausforderungen bei Triebfahrzeugen mit Brennstoffzellen sind die Produktion, Speicherung und der Transport von entsprechend großen Mengen an Wasserstoff.<sup>23</sup>

Der Systemwirkungsgrad ist besonders gut im Teillastbereich, bei Schienenfahrzeugen meistens bei Fahrt auf freier Strecke. Somit ist ein fahrdynamisches Profil günstig, das bei Regionalbahnen und Fernbahnen meistens vorhanden ist. Fernbahnen bieten sich derzeit jedoch nicht für den Umbau an, da die Leistungsabgabe einer Brennstoffzelle noch stark begrenzt ist. Daher wird ein elektrischer Zwischenspeicher benötigt, der Lastspitzen abdeckt und auch erst die Bremsenergie rückgewinnung ermöglicht. Hinzu kommt, dass die Brennstoffzelle gegenüber dem Dieselmotor aktuell ca. zehnmal so hohe Anschaffungskosten aufweist (1000 Euro/kW versus 100 Euro/kW) und eine viermal so geringe Lebensdauer hat.<sup>24</sup> Auch haben die Energiekosten maßgeblichen Anteil an den Lebenszykluskosten eines Fahrzeugs. Die Energiekosten des Wasserstoffs wiederum hängen stark von der Herkunft des Wasserstoffs ab. Da 50 wasserstoffbetriebene Triebzüge ab 2018, unter anderem im Eisenbahnnetz und Verkehrs-

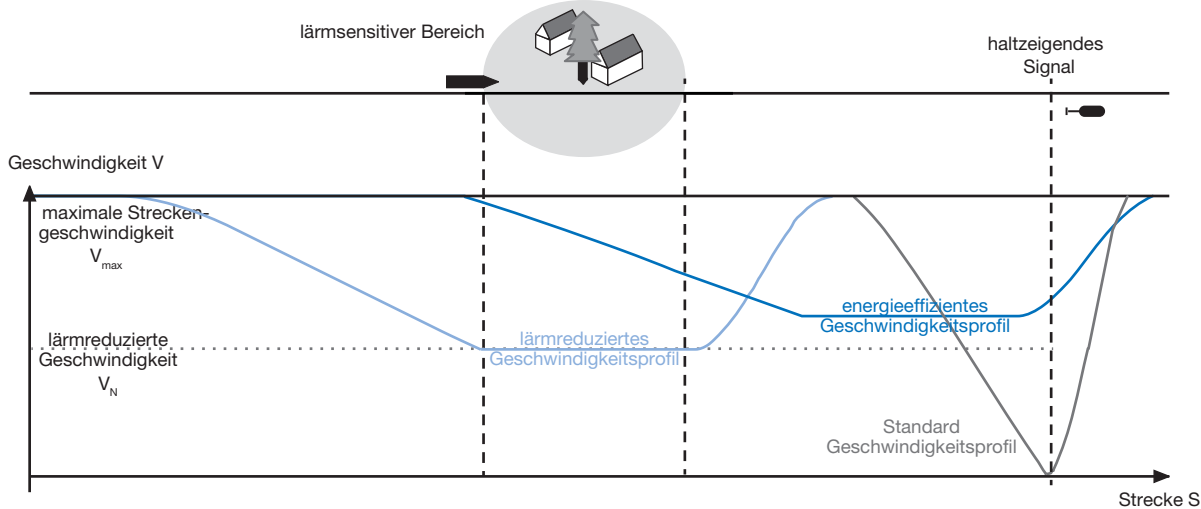
<sup>21</sup> Bei nicht-bundeseigenen Eisenbahnverkehrsunternehmen, die keine zusätzlichen Ökostrommengen bestellen, liegt der Anteil erneuerbarer Energien in dessen Bahnstrommix bei 28 %. Vgl. Deutsche Bahn Konzern: Integrierter Bericht 2016, S. 128-129, [https://www.deutschebahn.com/de/investor\\_relations/ib\\_online-1187368](https://www.deutschebahn.com/de/investor_relations/ib_online-1187368) (29.8.2018).

<sup>22</sup> Agora Energiewende: Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2015. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2016, [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Jahresauswertung\\_2016/Agora\\_Jahresauswertung\\_2015\\_web.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Jahresauswertung_2016/Agora_Jahresauswertung_2015_web.pdf).

<sup>23</sup> A. Frixen (Alstom): Wasserstoff auf der Schiene – Der Coradia iLint und sein geplanter Einsatz auf oberleitungsfreien Strecken in Deutschland, 4. Fachkonferenz Elektromobilität, München, 21.2.2017, [https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20170221-fachkonferenz-elektromobilitaet-vor-ort/1\\_16\\_frixen\\_wasserstoff.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20170221-fachkonferenz-elektromobilitaet-vor-ort/1_16_frixen_wasserstoff.pdf) (29.8.2018).

<sup>24</sup> M. Kache, A. Günther: Brennstoffzellen in Schienenfahrzeugantrieben – Ein Überblick zu Potentialen und Grenzen der Wasserstofftechnologie in der Schienenfahrzeugtechnik, in: EI-SPEZIAL – Entwicklung, Design, Ausstattung, September 2017.

Abbildung 4  
Verändertes Fahrregime zur Energieeinsparung



Quelle: DLR: Projekt IBOLES, internes Dokument.

betrieb Elbe-Weser,<sup>25</sup> im regulären Betrieb eingesetzt werden sollen,<sup>26</sup> können zukünftig zur Wirtschaftlichkeit solcher Fahrzeuge wichtige Erkenntnisse gewonnen werden.

#### Digitalisierung und Automatisierung im Schienenverkehr

Seit Jahrzehnten sind verschiedene digitale Assistenzsysteme für Triebfahrzeugführer in der (Weiter-)Entwicklung im Einsatz, damit der Triebfahrzeugführer die Geschwindigkeit in Bezug auf das aktuelle Betriebsgeschehen so beeinflussen kann, dass Energie und Fahrzeit eingespart werden, z. B. durch die Vermeidung von Bremsmanövern oder durch die effizientere Nutzung der elektrischen Generatorbremse zur Energierückgewinnung (vgl. Abbildung 4). Durch Fahrerassistenzsysteme und optimiertes Ad-hoc-Verkehrsmanagement (Disposition von Zugtrassen) kann ein „flüssiger“ betrieblicher Ablauf gewährleistet werden, d. h. durch die sinnvolle Beeinflussung des Fahrregimes können Halte an Signalen vermieden werden.<sup>27</sup> Bei voranschreitender Automatisierung können Maßnahmen zur Optimierung der Fahrregimes zielgerichteter umgesetzt werden, da Latenzen und (un-)beabsichtigte Missachtung durch den Triebfahrzeugführer die Effizienz nicht beeinträchtigen können.

#### Straßenverkehr

Im Straßenverkehr werden überwiegend flüssige Kraftstoffe auf fossiler Basis verbunden mit hohen Verkehrsleistungen eingesetzt. Dies führt dazu, dass der Straßenverkehr der Hauptemittent im Verkehrssektor ist (vgl. Abbildung 2). Neben Vermeidungs- und Verlagerungsmaßnahmen (z. B. ÖPNV oder Fernverkehr der Bahn) kommen Effizienzsteigerungen, die zunehmende Elektrifizierung sowie ein Wechsel der eingesetzten Energieträger zur Minderung der Treibhausgasemissionen in Betracht. Die Effizienz konventioneller Benzin- und Diesel-Pkw-Antriebe konnte durch die Einführung von Emissions- und Verbrauchsgrenzwerten in den letzten Jahren stetig gesteigert werden. Auch Technologien für künftige Antriebstränge weisen ein Reduktionspotenzial auf. Für Benzinmotoren fällt das maximale Effizienzsteigerungspotenzial mit voraussichtlich 30 % etwas höher aus als für Dieselmotoren mit ungefähr 20 %.<sup>28</sup> Durch die Elektrifizierung dieser Antriebe zu Micro- und Mid-Hybriden sind weitere Potenziale zur spezifischen Verbrauchsminderung zu erwarten, die allerdings im Vergleich zu konventionellen Effizienzmaßnahmen kostenintensiver sind (vgl. Abbildung 5).

Sowohl gasförmige als auch flüssige regenerativ erzeugte synthetische Kraftstoffe, die Otto- und Dieselmotoren ersetzen, sind derzeit kaum verfügbar. Prognosen zu den Kosten dieser Energieträger weisen darauf hin, dass entsprechende Power-to-Liquid-Szenarien aktuell drei- bis viermal so teuer wie Benzin oder Diesel sind. Die Schätzungen unterliegen starken

25 Bundesregierung: Brennstoffzelle statt Diesel-Lok, <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/09/2016-09-21-bahn-brennstoffzelle.html> (15.12.2017).

26 Alstom, NOW, DLR: Präsentation zum Brennstoffzellenbetriebenen Hybridzug Bathy, Berlin, 1.6.2015, [https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20150608-vollversammlung-statusseminar-brennstoffzelle/sprotte\\_bzbetriebenerhybridtriebzug.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20150608-vollversammlung-statusseminar-brennstoffzelle/sprotte_bzbetriebenerhybridtriebzug.pdf) (15.12.2017).

27 T. Schumann, M. Ummels: Operatives Verkehrsmanagement für einen energieeffizienten Bahnbetrieb, in: *Eisenbahningenieur*, Juni 2015, S. 36-40; A. Oetting, J. Glienicke: FreeFloat – Technologische Innovationen zur Steigerung der Kapazität im bestehenden Netz, in: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau*, Dezember 2010, Nr. 12, S. 824-829.

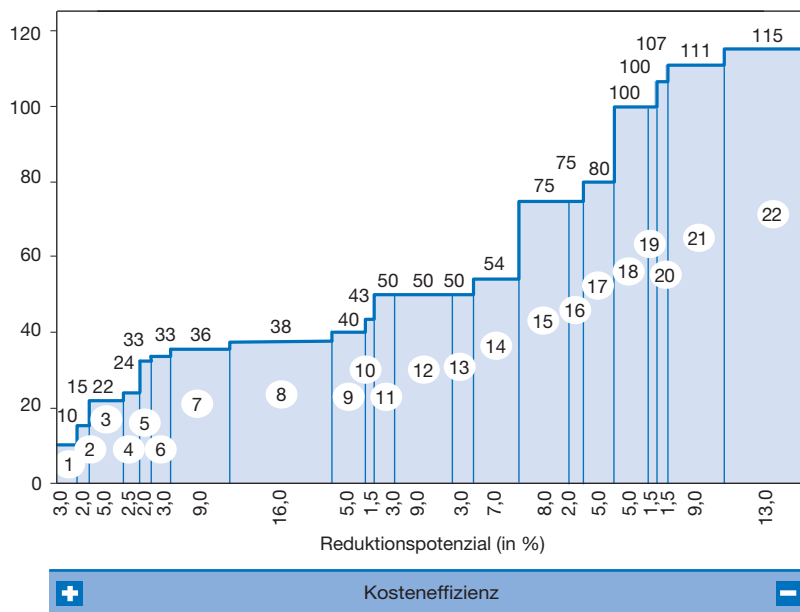
28 Neufahrzeuge im Neuen Europäischen Fahrzyklus gegenüber Referenzfahrzeugen 2015, ohne Getriebemaßnahmen und Hybridisierung; Quelle: Untersuchung des DLR und Angaben der Automobilindustrie.



Abbildung 5

**Kosteneffizienz verschiedener Effizienzsteigerungsmaßnahmen am Beispiel des Otto-Pkw (Mittelklasse)**

Kosten/Reduktionspotenzial (in Euro/%)



Nr. Verbrauchsreduktionstechnologie

1	Getriebeoptimierung
2	Rollwiderstandsreduzierte Reifen
3	Zylinderabschaltung
4	Reibungsreduzierter Antriebsstrang
5	Aerodynamik-Design
6	Ventilsteuerung – variabel (VVT)
7	Ventilsteuerung – vollvariabel
8	Downsizing (Stufe 3)
9	Downsizing (Stufe 1)
10	Aerodynamik-Optimierung
11	Direkteinspritzung, homogen
12	Downsizing (Stufe 2)
13	Elektrifizierung Nebenaggregaten
14	Micro-Hybrid
15	Direkteinspritzung, Schichtladung
16	Thermomanagement
17	Leichtbau – mittel (Karosserie)
18	Doppelkupplungsgetriebe
19	Leichtbau – Komponenten
20	Leichtbau – leicht (Karosserie)
21	Leichtbau – stark (Karosserie)
22	Mid-Hybrid

Quelle: M. Redelbach: Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative PKW-Antriebskonzepte, Dissertation, Universität Stuttgart, DLR-Forschungsbericht, Nr. 2016-12.

Schwankungen und reichen von 1,00 Euro/l (kostenloser Strom) bis 4,90 Euro/l (bei einem Strompreis von 0,15 Euro/kWh). Zu beachten ist, dass derzeit von einer energetischen Gesamteffizienz von ca. 40 % (elektrische Energie gebunden in flüssigen Kohlenwasserstoffen) ausgegangen wird, die im Zeithorizont bis 2030 ein signifikantes Verbesserungspotenzial birgt.<sup>29</sup> Die Herausforderung, neben einem CO<sub>2</sub>-neutraleren auch einen (lokal) schadstoffemissionsfreien Antrieb zu realisieren, kann aufgrund der Verbrennung des Kraftstoffs im Motor allein durch regenerative synthetische Energieträger nicht vollständig gelöst werden. Eine Co-Optimierung von Antrieben und Kraftstoffen kann längerfristig weitere Fortschritte ermöglichen.

Die Batterie ist das Kernstück des Elektrofahrzeugs. Durch deren Weiterentwicklung könnte die Energiedichte der Zellen in den nächsten Jahren um den Faktor 2,5 von 260 Wh/l auf 650 Wh/l bzw. um den Faktor 3 von und 100 Wh/kg auf 300 Wh/kg gesteigert werden.<sup>30</sup> Durch die Einführung von Batterietechnologien wie Festkörperbatterien, Lithium-Luft- oder Lithium-Schwefel-Batterien könnte die Energiedichte weiter erhöht werden. Diese

befinden sich derzeit aber noch im Stadium der Grundlagenforschung. Optimistische Szenarien prognostizieren für 2020 bereits Kosten von unter 100 Euro/kWh. Damit könnten in naher Zukunft die Kosten gesenkt und die Reichweite gesteigert werden.

Hybridfahrzeuge verfügen neben einem Verbrennungsmotor auch über einen elektrischen Antriebsstrang. Je nach Dimensionierung kann dieser Antriebsstrang zur Unterstützung beim verbrennungsmotorischen Fahren bis hin zum teilweise vollelektrischen Fahren genutzt werden. Den größten Leistungs- und Energiekapazitätsanteil weisen hierbei Plug-in-Hybride (PHEV) auf, die zudem ihre Batterie extern laden können. Somit ist rein-elektrisches Fahren möglich, zumindest auf Strecken mittlerer Distanz (aktuelle Modelle verfügen in der Regel über eine elektrische Reichweite von ca. 30 km bis 50 km). Der elektrische Fahranteil kann dabei stark variieren: eine Auswertung von sich derzeit im Betrieb befindlichen Plug-in-Hybriden ergab, dass der Anteil bei entsprechender Batteriekapazität und Tagesfahrleistung bis zu 75 % betragen kann, jedoch stark fahrzeug- und nutzerabhängig ist.<sup>31</sup> Wird ein mittlerer Emissionsfaktor im deutschen Strommix von 470 g CO<sub>2</sub>/kWh (Betrachtungs-

29 M. Moser et al.: Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe aus erneuerbaren Energien – Ergebnisse der Helmholtz Energieallianz, in: Chemie Ingenieur Technik, 89. Jg. (2017), H. 3, S. 274-288.

30 Horváth & Partner: Fakten-Check Mobilität 3.0, Stuttgart u. a. O. 2017.

31 P. Plötz, S. A. Funke, P. Jochem, M. Wietschel: CO<sub>2</sub> Mitigation Potential of Plug-in Hybrid Electric Vehicles larger than expected, in: Scientific reports, 7. Jg. (2017), H. 1, Nr. 16493.

zeitraum bis 2025),<sup>32</sup> ein Benzinverbrauch von 7 l/100 km sowie ein elektrischen Energiebedarf von 20 kWh/100 km zugrunde gelegt, so können PHEV bei hohem elektrischen Fahranteilen bis zu 25 g CO<sub>2</sub>/km einsparen.

### Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die klimarelevanten Emissionen im Verkehrsbereich müssen baldmöglichst reduziert werden, um die nationalen und europäischen Klimaziele noch erreichen zu können. Angesichts des in Zukunft erwarteten Wachstums der Nachfrage nach Verkehrsleistungen ist dies umso wichtiger. Insgesamt ist eine breite Palette an technologischen bzw. organisatorischen Innovationen zur Reduktion von klimarelevanten Emissionen verfügbar, von denen hier nur ein kleiner Ausschnitt vorgestellt werden konnte. Allerdings sind sowohl ihre Marktreife als auch ihre Wirtschaftlichkeit sehr unterschiedlich: Während einige Innovationen sofort auf breiter Basis umsetzbar wären, erfordern andere noch Grundlagenforschung bzw. den Aufbau einer umfassenden Infrastruktur (z. B. Wasserstoffwirtschaft) und/oder eine massive Kostendegression. Deutlich wird ebenso, dass die Kosten für weitergehende spezifische CO<sub>2</sub>-Einsparungen je nach Innovation sehr unterschiedlich sind.

Grundsätzlich zu berücksichtigen ist, dass viele dieser Innovationen einen Rebound-Effekt nach sich ziehen können. Dieser Effekt kann dadurch entstehen, dass die durch Innovationen ermöglichten Effizienzsteigerungen zu Kostensenkungen führen können, die eine steigende Nachfrage bewirken können, wodurch in der Folge die Verkehrsleistungen in der Volkswirtschaft steigen können. Dies wiederum kann zu steigenden klimarelevanten Emissionen des Verkehrssektors führen. Dieser Effekt wurde in der Vergangenheit häufig beobachtet und sollte bei der Markteinführung von Innovationen berücksichtigt werden.

Mit Blick auf die durch Fahrzeugtechnologie möglichen Einsparungen an klimarelevanten Gasen wird aber auch

deutlich, dass der Ansatzpunkt einer technologischen Effizienzsteigerung allein nicht ausreichen wird, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen. Da vieles dafür spricht, dass (nachhaltig erzeugte) Biokraftstoffe in nur begrenztem Umfang im Verkehrssektor zur Verfügung stehen werden, wird ein Wandel von konventionellen Kraftstoffen hin zu einer Elektrifizierung des Verkehrssektors auf Basis erneuerbarer Energien erforderlich sein. Welche Form der Elektrifizierung hingegen den Erfordernissen des Verkehrssektors am besten dient, ist bislang noch unklar. Die direkte Nutzung von Elektrizität in E-Fahrzeugen ist zwar erzeugungsseitig die günstigste Variante, da keine weiteren Wandlungsverluste hingenommen werden müssen, jedoch weist sie technische und ökonomische Einsatzgrenzen auf. Gleichzeitig ist der Ausbau einer Ladeinfrastruktur erforderlich, bei der bislang weder das Layout noch die investierenden Akteure klar sind. Die Nutzung von aus erneuerbarem Strom erzeugtem Wasserstoff ist technologisch ebenfalls vielversprechend. Eine dritte Option der Elektrifizierung ist der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen. Aufgrund der hohen Wandlungsverluste ist die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen erzeugungsseitig zwar die teuerste Variante, jedoch könnten hier die vorhandene Verteilungsinfrastruktur sowie die aktuell verwendeten Verbrennungsmotoren weiterhin genutzt werden. Eine ganzheitliche Bewertung der Kosten und Nutzen der verschiedenen Elektrifizierungsoptionen sowie ihrer Mischformen ist aufgrund der unklaren Kostenentwicklungen herausfordernd und steht bislang noch aus.

Grundsätzlich ist die Politik aufgefordert, die Weiterentwicklung und Diffusion von Innovationen zur Einsparung klimarelevanter Emissionen im Verkehrsbereich zu unterstützen. Hierzu bedarf es politischer Maßnahmen auf verschiedenen Ebenen (Bundes-, Länder- und/oder kommunaler Ebene). Diese können von der Förderung von Grundlagen- und anwendungsbezogener Forschung bis hin zu direkten bzw. indirekten finanziellen Anreizen (z. B. staatliche Prämien beim Erwerb von klimafreundlichen Fahrzeugen) reichen. Wichtig wird hierbei sein, etwaige Rebound-Effekte von Beginn an bei solchen Instrumenten zu antizipieren. Nur mit einem Überblick über die Gesamtwirkung der Maßnahmen können Politikinstrumente zielorientiert ausgestaltet werden.

32 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Wie klimafreundlich sind Elektroautos?, Berlin 2015, [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Verkehr/emob\\_klimabilanz\\_2017\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/emob_klimabilanz_2017_bf.pdf) (30.8.2018).

### Title: Climate Protection in the Transport Sector – Current Examples

**Abstract:** Decarbonising the transport sector will be one of the biggest challenges in the future. Current innovations in the transport sector will be used to identify greenhouse gas emission reduction methods and the associated costs. Economists from the German Aerospace Center (DLR) have compiled current research results from various DLR institutes which have revealed that a wide range of technological and organisational innovations for reducing climate-related emissions are available with varying market maturity. Increasing technological efficiency alone, however, is not enough to achieve the ambitious climate targets. Good policies are also essential to take things to the next level.

**JEL Classification:** Q54, Q55, R490