

Sophia Appl-Scorza, Jana Lippelt und Christina Littlejohn

Kurz zum Klima:

Herausforderungen der Elektrifizierung von Schwer- und Langstreckenverkehr

E-MOBILITÄT UND SEKTORKOPPLUNG

Mit einem Anteil von 18% an den gesamten Treibhausgasemissionen ist der Transportsektor derjenige Sektor, der im deutschen Kontext nach dem Stromsektor am zweitstärksten zum Klimawandel beiträgt. Bezüglich der nationalen Klimaziele hinkt er damit stark hinterher: Der Energieverbrauch im Verkehr ist von 1990 bis heute um etwa 20% gewachsen, der Anteil erneuerbarer Energien stagniert bereits seit Jahren auf einem niedrigen Niveau von 5% (vgl. BCG 2018). Damit hängt ein Erreichen der Klimaziele – einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80–95% gegenüber 1990 – auch maßgeblich von den zukünftigen Entwicklungen im Verkehrssektor ab.

Eine Strategie zur Reduktion der Emissionen im Verkehrssektor stellt die fortlaufende Substitution fossiler Kraftstoffe durch emissionsneutralen, aus erneuerbaren Energien gewonnenen Strom (ca. 30% Anteil am Strommix 2016) dar. Obgleich eine rein strombasierte Energieversorgung des Verkehrssektors unwahrscheinlich scheint, spielt doch in allen Technologieszenarien Elektrifizierung bzw. die Kopplung des Stromsektors mit dem Verkehrssektor eine Schlüsselrolle in der Reduktion von THG-Emissionen (vgl. Appl-Scorza et al. 2018).

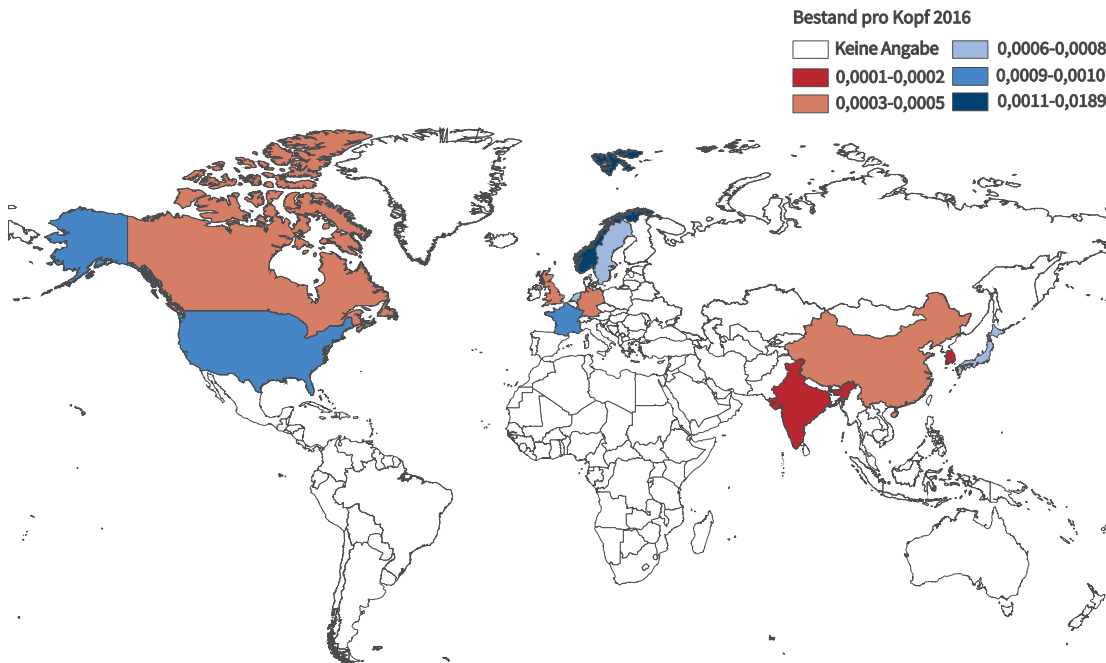
Viel Aufmerksamkeit ist hier den technischen Fortschritten und der Kostendegression der Batterieproduktion und damit einhergehend vor allem der langsamen, aber wachsenden Elektrifizierung von Pkw zugekommen (vgl. Abb. 1). Weniger im Fokus standen in der Vergangenheit Schwer- und Langstreckenverkehr: Dabei generieren Flug- und Schiffsverkehr sowie der Gütertransport über Lkw aktuell mit 40% einen beträchtlichen Anteil der Emissionen im deutschen Verkehr. Trends suggerieren auch in Zukunft einen starken Anstieg der Nachfrage nach Flugreisen und steigenden Güterverkehr auf der Straße. Im Vergleich zum Pkw-Segment bestehen in diesen Teilen des Verkehrssektors außerdem zusätzliche technische Hemmnisse, und die bisherigen Lösungsansätze sind von einer Marktreife noch weit entfernt. Dieser Artikel möchte daher auf zentrale EU-Regularien, Herausforderungen und Möglichkeiten zur Sektorkopplung in

diesen bisher weniger beachteten Segmenten des Verkehrssektors aufmerksam machen und einen Überblick bieten.

TECHNOLOGIEN ZUR ERZEUGUNG VON STROM FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT

Die Nutzung von Power-to-X-Kraftstoffen (PtX) stellt derzeit die energieintensivste Art der Elektrifizierung dar. Damit hängen die zukünftige Stromnachfrage, und damit auch zukünftige Stromimporte, entscheidend davon ab, welchen Anteil PtX an den gesamten Energieträgern in Zukunft ausmachen wird. Um das 95%-Reduktionsziel zu erreichen, schätzen sowohl die BCG-Studie als auch die Studie des Öko-Instituts den Einsatz von PtX-Kraftstoffen als notwendig ein. Damit würde PtX mit 124 TWh 2050 den größten Einzelposten in der Stromnachfrage darstellen. Entscheidend für den drastischen Anstieg sind der Flug- und Schiffsverkehr, die in den 80%-Szenarien noch durch konventionelle fossile Kraftstoffe angetrieben werden. Um das 95%-Ziel zu erreichen, müssten fossile Kraftstoffe vollständig durch synthetische ersetzt werden. Die Elektrifizierung des Verkehrssektors bedeutet jedoch nicht notwendigerweise eine Reduktion von THG-Emissionen. Diese tritt nur dann ein, wenn Elektrifizierung und der Ausbau erneuerbarer Energien bzw. die Erhöhung ihres Anteils am Strommix Hand in Hand gehen. Mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge etwa wären nur dann weniger klimaschädlich als herkömmliche Pkw, wenn im Prozess der Stromerzeugung höchstens 300 g CO₂/kWh emittiert würden – im Fall synthetischer Kraftstoffe liegt der entsprechende Schwellenwert noch niedriger. Derzeit beträgt der Anteil erneuerbarer Energien an der gesamten Stromerzeugung 30%, Braun- und Steinkohle machen gemeinsam ein weiteres Drittel aus. Bei diesem Strommix mit durchschnittlichen Emissionen von 527 g CO₂/kWh wäre sowohl der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen als auch von synthetischen Kraftstoffen aus einer Klimaschutzperspektive nicht sinnvoll. Batteriebetriebene Elektroautos dagegen sind bereits heute weniger emissionsintensiv als konventionelle Pkw mit Verbrennungsmotor (vgl. ESYS 2017).

Abb. 1

Weltweiter Bestand an Elektroautos 2016

Es werden hier nur Daten entsprechend der Electric Vehicles Initiative (EVI) abgebildet

Quelle: IEA (2017) – International EV Outlook 2017; Worldbank (2018).

© ifo Institut

HERAUSFORDERUNGEN BEI DER EMISSIONS-REDUKTION IM SCHWER- UND LANGSTRECKEN-VERKEHR

Flugverkehr

Zurzeit machen die Emissionen aus dem Flugverkehr mit 3% der Treibhausgase in der EU nur einen geringen Anteil am Gesamtvolumen aus. Die International Air Transport Association prognostiziert jedoch schon für 2036 eine Verdopplung der Anzahl der weltweiten Flugreisenden von 4 Billionen auf 7,8 Billionen pro Jahr (vgl. IATA 2017). Seit 2012 schließt das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) auch den Luftverkehr mit ein, wenn auch geographisch auf den Raum der Europäischen Wirtschaftszone begrenzt. Im Rahmen des EU ETS sind die Fluggesellschaften verpflichtet, ihre THG-Emissionen zu überwachen, zu melden und zu verifizieren (MRV-System: Monitoring, Reporting, Verification) und erhalten eine bestimmte Menge an CO₂-Zertifikaten. Bisher ist es den Fluggesellschaften nur begrenzt gelungen, diese Ausstoßmengen einzuhalten – vornehmlich durch Verbesserungen der Energieeffizienz und CO₂-Ausgleichsmaßnahmen. Da kein Substitut mit derselben Schnelligkeit und Flexibilität wie der Flugverkehr existiert, sind technologische Innovationen notwendig, um die Emissionen aus dem Flugverkehr zu senken (vgl. Europäische Kommission 2016). Der Lösungsansatz, den Energiemix wie im Fall des Straßenverkehrs zu verändern und den Flugverkehr direkt zu elektrifizieren, ist auf den

Luftverkehr schwierig zu übertragen. So ist etwa die Herausforderung, die begrenzte Reichweite batteriebetriebener Fahrzeuge im PKW-Bereich zu erhöhen, ein unüberwindliches Hindernis bei den benötigten Distanzen im Flugverkehr. Die einfachste Lösung wäre derzeit, Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe mit den bisher genutzten fossilen Kraftstoffen zu verbinden. Allerdings kann die Herstellung der Mengen an Biokraftstoff, die für eine Kraftstoffmischung mit einem Biokraftstoffanteil von 10% benötigt werden, negative Auswirkungen etwa in Form von Getreide- und Trinkwassermangel in potenziell gefährdeten Regionen hervorrufen. Damit synthetische Kraftstoffe eine Möglichkeit zur Emissionsreduktion darstellen, muss der Ausbau erneuerbarer Energien so stark erweitert werden, dass die Nachfrage des Stromsektors gedeckt werden kann und zusätzlich genug Überschussstrom generiert wird, um große Mengen synthetischer Kraftstoffe zu erzeugen. Zusätzlich zur Substitution des Kraftstoffs hat die International Air Transport Association verschiedene Modifikationen des Flugzeugdesigns vorgeschlagen. Darunter sind etwa verbesserte Motorlüfter, um die Kraftstoffverbrennung zu reduzieren, und Blended-Wing-Body-Konfigurationen, die die Aerodynamik verbessern sollen (vgl. IATA 2017). Abschließend ist es wichtig, das Aufkommen eines neuen Typs des Flugverkehrs ebenfalls im Auge zu behalten: Noch befindet sich der urbane Flugverkehr im Entwicklungsstatus, könnte aber vereinzelt schon 2020 eingeführt werden. Dieser Transportmodus ist für kurze Strecken in urbanen Gebieten gedacht (vgl. Agouridas 2017). Er soll rein

elektrisch betrieben werden, so dass sein Beitrag zu THG-Emissionen vornehmlich vom Strommix abhängen wird.

Schifffahrt

Vor dem Hintergrund gestiegener Anforderungen an umweltfreundliche und emissionsarme Antriebe steht auch die Schifffahrt vor neuen Herausforderungen. Aufgrund verschärfter Vorschriften in den Emissionskontrollgebieten Europas, Nordamerikas (ab 2020) sowie einigen asiatischen Städten sind daher zunehmend Antriebe mit flüssigem Erdgas (LNG) sowie mit elektrischem Antrieb in den Vordergrund gerückt. Neben dem Potenzial, die Schwefeldioxidemissionen gegenüber Dieselmotoren mit Hilfe von LNG um bis zu 100% zu senken, kann auch der Ausstoß an Kohlendioxid um ca. 20% gesenkt werden (vgl. World Ports Climate Initiative 2016). Die weltweite LNG-Flotte wuchs anfangs unter anderem aufgrund der erheblichen Kosten für die Umrüstung bisheriger Motoren nur langsam. So waren 2016 nur 90 Schiffe weltweit registriert, bis Ende 2017 ist die Zahl jedoch bereits auf 119 gestiegen (vgl. The Maritime Executive 2018). Als Hürde ist im Bereich LNG zudem die oft noch unzulängliche Tankinfrastruktur in vielen Häfen zu sehen.

Seit Beginn 2018 gilt in EU-Häfen neben den Regulierungen der Schadstoffemissionen eine CO₂-Meldepflicht für große Seeschiffe (vgl. VDMA 2017). Dieses MRV-System wurde parallel zu weltweit ebenfalls seit 2018 existierenden Maßnahme der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (IMO) eingeführt und schreibt den Reedereien die Erstellung eines Monitoringkonzepts vor. Durch die Überwachung des CO₂-Ausstoßes und die Einführung neuer Technologien im Bereich Antriebe und Kraftstoffe können hier bis zu 75% der Emissionen eingespart werden (vgl. IMO 2009). Die elektrische Mobilität in der Schifffahrt spielt dabei seit einiger Zeit eine zunehmend wichtige Rolle. Vor allem die Binnenschifffahrt profitiert seit einigen Jahren von der Entwicklung elektrischer Schiffe, wie zum Beispiel im Fährbetrieb. Daneben werden zudem einige wenige Hochseeschiffe zum Teil bereits mit vollelektrischen Antrieben entwickelt. In der EU ist dies vor allem im Bereich des Kurzstreckenseeverkehrs von Bedeutung. Aufgrund hoher Kosten und der noch nicht flächendeckend gewährleisteten Landstromversorgung kann der Großteil der rein elektrisch betriebenen Schiffe bisher jedoch nur in Verbindung mit beispielsweise synthetischen Kraftstoffen bzw. Flüssigerdgas betrieben werden. Herausforderungen liegen zudem in der Sicherung der Stromversorgung sowie dem Umgang mit Stromausfällen an Bord.

Lkw-Verkehr

Aktuell entfällt etwa ein Drittel der gesamten Energienachfrage aus dem deutschen Verkehrssektor auf den Lkw-Verkehr. Da es sich bei der primären Energiequelle

um fossile Kraftstoffe (97%) handelt, trägt er damit stark zu den globalen THG-Emissionen bei: Die kürzlich erschienene Studie *The Future of Trucks* der International Energy Agency schätzt, dass die mit dem Lkw-Verkehr verbundenen Emissionen weltweit für 7% der globalen Emissionen aus Energienutzung verantwortlich sind (vgl. IEA 2017). Derzeit existiert in der EU im Gegensatz zu China, USA und Japan kein verbindlicher Grenzwert für die CO₂-Emissionen aus dem Schwerlastverkehr. 2019 soll analog zum Schiffs- und Flugverkehr ein EU-weites MRV-System für die Hersteller von für Lkw über 7,5 Tonnen eingeführt werden, durch das der Wettbewerb zur Steigerung der Energieeffizienz gefördert wird. Dies soll als Grundlage für weitere Regelungen dienen, zu denen dieses Jahr erste Entwürfe angekündigt sind (vgl. Europäische Kommission 2017).

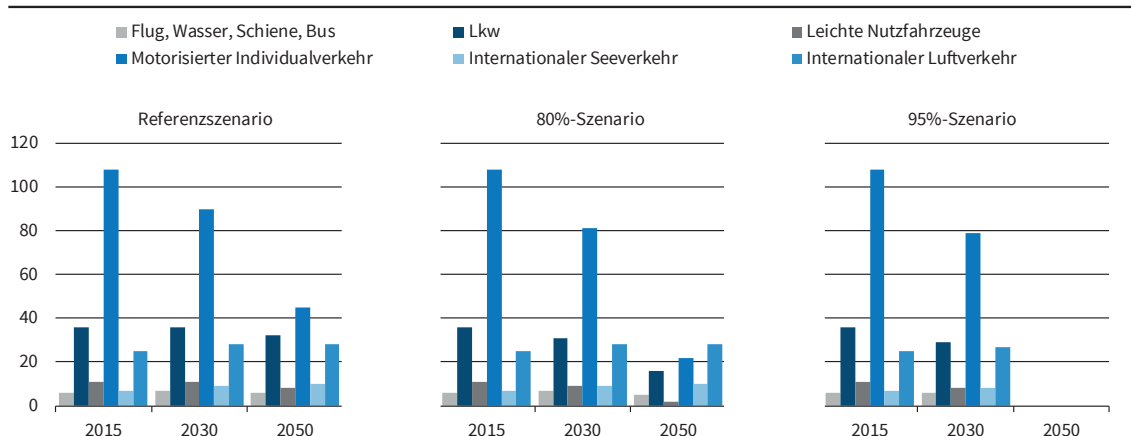
Von der heutigen Warte aus zeichnet sich keine dominante alternative Technologie zum Antrieb mit fossilen Kraftstoffen im Lkw-Segment ab. Die Studie der Boston Consulting Group *Klimapfade für Deutschland* schätzt für verschiedene Klimapfade Technologiemixe des Schwerlastverkehrs der Zukunft (vgl. BCG 2018). Für Reduktionsszenarien zwischen 80 und 95% fällt der Mix sehr heterogen aus: Unter den prognostizierten Technologien sind Brennstoffzellenfahrzeuge, Batterieantriebe, Lkw-Oberleitungen und CNG/LNG, aber auch Diesel und Benzin kommt weiterhin eine zentrale Rolle zu (vgl. Abb. 2). Die verschiedenen Technologien unterscheiden sich bezüglich ihres THG-Reduktionspotenzials, Kosten und Marktreife.

Da 60% der Emissionen aus dem deutschen Schwerlastverkehr auf 2% des deutschen Straßennetzes generiert werden, bietet sich die Installation von Oberleitungsinfrastruktur auf den meistbefahrenen Autobahnkilometern an. Deutschland und Schweden haben hier 2017 ein gemeinsames Pilotprojekt gestartet, in dessen Rahmen bis Ende 2018 in Kooperation mit Siemens erste Teststrecken gebaut werden sollen. Auch wenn nach mehreren Studien der Aufbau eines Oberleitungsnetzes aus heutiger Perspektive als kostengünstigste Alternative gesehen wird, ist diese Option jedoch mit erheblichen Risiken verbunden. Investitionsentscheidungen müssten früh, vor Mitte des kommenden Jahrzehnts getroffen werden – auf der anderen Seite könnten zukünftige Kostendegressionen alternativer Technologien diese zu einer günstigeren Alternative machen. Oberleitungen würden in jedem Falle aber nur einen kleinen Teil des gesamten Straßennetzes versorgen und müssten auf dem Rest des Netzes mit Antrieben über Batterien, Brennstoffzellen oder Hybriden ergänzt werden.

Trotz der mit der hohen notwendigen Energiedichte verbundenen technischen Hindernisse im Batterieantrieb von Lkw haben die großen Truck-Hersteller im letzten Jahr hier bereits erste Modelle vorgestellt: MAN präsentierte seinen e-Truck im Februar 2017, Tesla seinen »Semi-Truck« im November desselben Jahres. Ein Vorteil der Batterietechnik sind die signifikant niedrigeren Energiekosten und der wesentlich höhere ener-

Abb. 2

Treibhausgasemissionen nach Transportmodus 2015–2050
In Mt CO₂-Äquivalent



Quelle: Boston Consulting Group 2018.

© ifo Institut

getische Wirkungsgrad (85%) gegenüber den Energieträgern Diesel und Benzin (30%).

Der Brennstoffzellenantrieb hat bislang noch mit recht hohen Kostenhürden zu kämpfen. Bei dem gegenwärtigen deutschen Strommix sind Brennstoffzellen-Lkw außerdem noch emissionsintensiver als gewöhnliche Verbrenner. Einen zentralen Vorteil gegenüber dem Batterieantrieb mit besonderer Relevanz für das Lkw-Segment stellt jedoch die etwa sechsfach höhere Energiedichte pro Volumeneinheit gegenüber Batterien dar. Insgesamt existieren heute weltweit etwa 500 Brennstoffzellenrucks in verschiedenen Demonstrationsprojekten, eine baldige Marktreife ist jedoch aufgrund der mit der Tankgröße, hohen Materialkosten und komplizierten Tankprozessen verbundenen Hindernisse noch nicht abzusehen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aufgrund steigender Nachfrage nach Flugreisen und Gütertransport wächst die Bedeutung der Emissionen aus Flugverkehr, Schifffahrt und Lkw-Verkehr für den Klimawandel. Regulierungen auf EU-Ebene beschränken sich vorwiegend auf das MRV-System ohne verbindliche Abgasnormen. Dabei steht der Langstrecken- und Schwerverkehr noch vor grundlegenden technischen Herausforderungen: Wesentlich höhere Gewichte und längere Strecken machen Lösungen aus dem Pkw-Bereich oft nur schwer übertragbar. Für den Flug- und Schiffsverkehr ist in technologischer Hinsicht vor allem der Einsatz synthetischer Kraftstoffe zur Emissionsreduktion denkbar. Dabei handelt es sich aber um eine noch nicht marktreife Technologie, die zudem große Mengen an Strom zu ihrer Herstellung benötigt. Um diesen erhöhten Strombedarf zu decken, bedürfte es entweder eines sehr kostenintensiven Ausbaus der heimischen erneuerbaren Energien oder eines starken Anstiegs von Stromimporten. Auch der Import von PtX-Kraftstoffen ist hierbei denkbar. Im Lkw-Verkehr herrscht größere technologische Heterogenität:

Studien prognostizieren für 2050 einen Technologiemix mit Lkw-Oberleitungen auf den meist befahrenen Strecken, in Kombination mit Batterieantrieben, Brennstoffzellenfahrzeugen und CNG/LNG. Mit den technischen und wirtschaftlichen Potenzialen von Wasserstoff sowie synthetischen Kraftstoffen wird sich der nächste Artikel der Kurz zum Klima-Reihe beschäftigen.

LITERATUR

Agouridas, V. (2017), »Urban Air Mobility«, verfügbar unter: <https://eu-smartcities.eu/initiatives/840/description>.

Appl-Scorza, S., J. Pfeiffer, A. Schmitt und Chr. Weissbart (2018), »Kurz zum Klima: »Sektorkopplung« – Ansätze und Implikationen der Dekarbonisierung des Energiesystems«, *ifo Schnelldienst* 71(10), 2018, 49–53.

Boston Consulting Group (2018), »Klimapfade für Deutschland«, verfügbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>.

Europäische Kommission (2016), »Reducing Emissions from Aviation«, verfügbar unter: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en.

Europäische Kommission (2017), »Reducing CO₂ emissions from Heavy-Duty Vehicles«, verfügbar unter: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en.

IMO (2009), *Second IMO GHG Study 2009*, verfügbar unter: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>.

International Air Transport Association (2017), »2036 Forecast reveals Air Passengers will Nearly Double to 7.8 Billion«, verfügbar unter: <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-10-24-01.aspx>.

International Energy Agency (2017), *The Future of Trucks. Implications for energy and the environment*, verfügbar unter: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TheFutureofTrucksImplicationsforEnergyandtheEnvironment.pdf>.

The International Council on Clean Transportation (2014), »Europe’s global leadership on vehicle emission standards at risk in the truck sector«, verfügbar unter: <https://www.theicct.org/blogs/staff/europes-global-leadership-vehicle-emission-standards-at-risk-truck-sector>.

The Maritime Executive (2018), »Will 2018 be the ‘tipping year’ for LNG bunkering?«, verfügbar unter: <https://www.maritime-executive.com/article/will-2018-be-the-tipping-year-for-lng-bunkering#gs.92nobkl>.

VDMA (2017), »Ab Januar 2018: CO₂-Meldepflicht für Schiffe in europäischen Gewässern ab 2018«, verfügbar unter: <http://mus.vdma.org/viewer/-/article/render/20540007>.

World Ports Climate Initiative (2016), »LNG fuelled vessels – Benefits of LNG«, verfügbar unter: <http://www.lngbunkering.org/lng/environment/benefits-of-LNG>.