

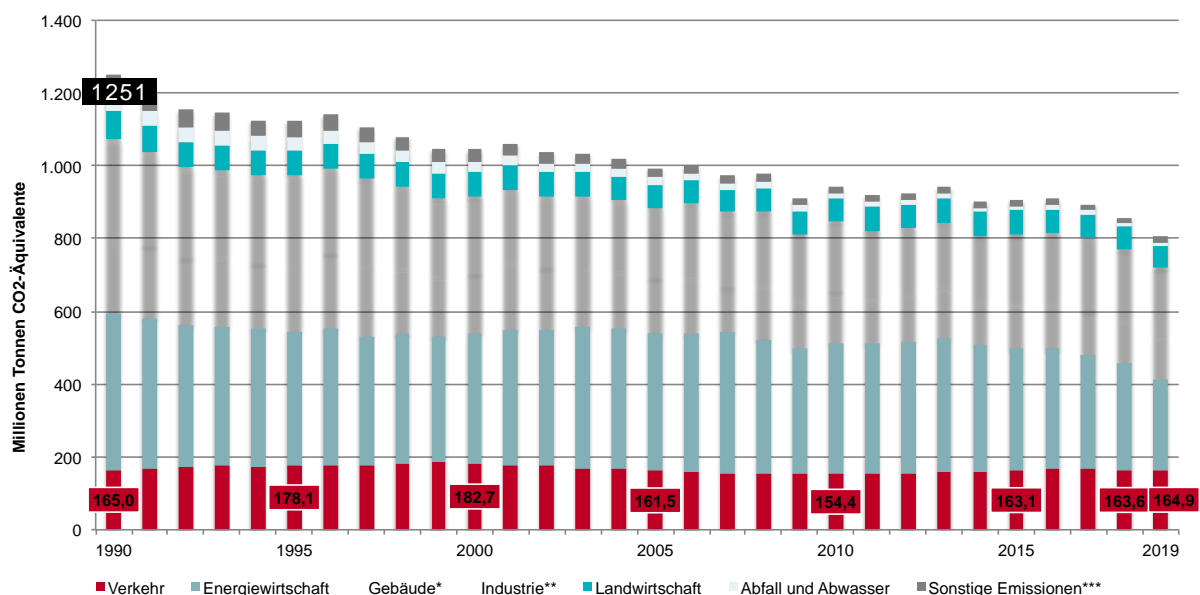
Inputpapier zur 1. Sitzung der AG Verkehr, 8.9.2020

1 Ausgangslage und Zielsetzungen

Nach den Zielen des Energiekonzepts der Bundesregierung soll der Endenergieverbrauch im Verkehr bis 2020 um 10 % und bis 2050 um rund 40 % (ggü. 2005) gesenkt werden. Die aktuelle Tendenz ist jedoch gegenläufig – seit 2010 steigt der Endenergieverbrauch im Verkehrsbereich an, im Jahr 2018 lag er mit 2.705 PJ über dem des Jahres 2005 (2.586 PJ). Der Endenergieverbrauch im Verkehr basiert dabei nahezu vollständig auf Mineralölprodukten (94,1 %) und nur zu einem geringen Anteil auf erneuerbaren Kraftstoffen (4,1 %), Strom (inkl. EE) (1,5 %) und (fossilem) Gas (0,2 %). (ABEB 2020)

Entsprechend stagnieren auch die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors mit kleineren Schwankungen seit 30 Jahren auf ähnlich hohem Niveau (1990: 165 Mio t CO₂-Äquivalente zu 164,9 Mio t CO₂-Äquivalente in 2019). Abb. 1 veranschaulicht diesen Aspekt deutlich; während die gesamten deutschen Treibhausgasemissionen über alle Sektoren hinweg zwischen 1990 und 2019 über ein Drittel reduziert werden konnten, haben sich die absoluten verkehrsbedingten THG-Emissionen nicht verändert. So hat sich der relative Anteil der verkehrsbedingten THG-Emissionen an den gesamten THG-Emissionen deutlich erhöht (1990: 13,2% zu 2019: 20,5 %).

Abbildung 1: Bedeutung des Verkehrssektors für die deutschen Treibhausgasemissionen (UBA 2020)



Wesentliche Treiber für den Anstieg sind deutlich gestiegene Verkehrsaufwände sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr, welche die durchaus vorhandenen Effizienzgewinne überkompensieren. Die Steigerung der Energieeffizienz variiert zwischen den Verkehrsträgern sowie zwischen Personen- und Güterverkehr: so ist der auf die Verkehrsleistung bezogene spezifische

Energieverbrauch zwischen 1995 und 2018 bei Güterzügen um 53%, bei Lkw um 27% je Tonnen-km zurückgegangen. Bei Pkw dagegen hat sich der spezifische Energieverbrauch je Personen-km nur um 8 % verringert (UBA 2020a). Dieser geringe Effizienzgewinn bei Pkw ist u.a. auf zunehmende Fahrzeugmassen und steigende Motorisierung zurückzuführen.

1.1 Herausforderungen im Verkehrsbereich

Minderungen des Energieverbrauchs im Verkehr sind durch eine Verringerung des Verkehrsaufkommens, die Verlagerung auf energieeffizientere Verkehrsmittel sowie Verbesserungen der spezifischen Effizienz von Fahrzeugen und Verkehrssystem möglich. Die zentralen Herausforderungen im Verkehrsbereich sind:

- Eine substantielle Verringerung der THG-Emissionen und langfristig vollständige Defossilisierung des Verkehrs: Hierzu ist auch ein Wechsel auf alternative Antriebe (z. B. Elektromobilität) inkl. Einsatz erneuerbarer Energieträger erforderlich. Vor dem Hintergrund der gleichfalls erforderlichen Defossilisierung der anderen Sektoren sowie Klimaschutzbestrebungen in anderen Ländern werden Nutzungskonkurrenzen bei den verfügbaren erneuerbaren Energieträgern sowohl zwischen verschiedenen Nachfragesektoren als auch im globalen Kontext auftreten, weshalb ein möglichst geringer Energiebedarf anzustreben ist.
- Um diese Herausforderungen zu bewältigen und die Klima- und Endenergieverbrauchsziele zu erreichen, muss der Energiebedarf im Verkehrsbereich in Zukunft erheblich reduziert werden. Gleichzeitig muss bis zum Jahr 2050 die Energieversorgung des Verkehrs nahezu vollständig durch erneuerbare Energien gedeckt werden, sowohl bei direkter Stromnutzung als auch beim Einsatz von Kraftstoffen. Dazu werden auch umfangreiche Importe notwendig werden.
- Darüber hinaus ist eine große Herausforderung, die Energieeffizienz zu steigern und THG-Emissionen zu reduzieren, und dabei gleichzeitig Mobilität weiterhin zu gewährleisten: Im Verkehrssektor sind die spezifischen Kosten der Energie- und THG-Einsparung vergleichsweise hoch und die Auswirkungen von Maßnahmen auf die Automobilindustrie potenziell hoch. Die Akzeptanz von Verhaltensänderungen ist nicht einfach herzustellen, da Anreize dafür aufgrund der Kombination von hoher Zahlungsbereitschaft mit hohen individuellen Vorteilen sehr gering sind.

2 Szenarien zur Entwicklung des Endenergie- und Kraftstoffbedarfs im nationalen Verkehrsbereich

Im Folgenden werden aktuelle Szenarien¹ zur Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor und die Zusammensetzung nach Energieträgern analysiert und zusammengefasst.

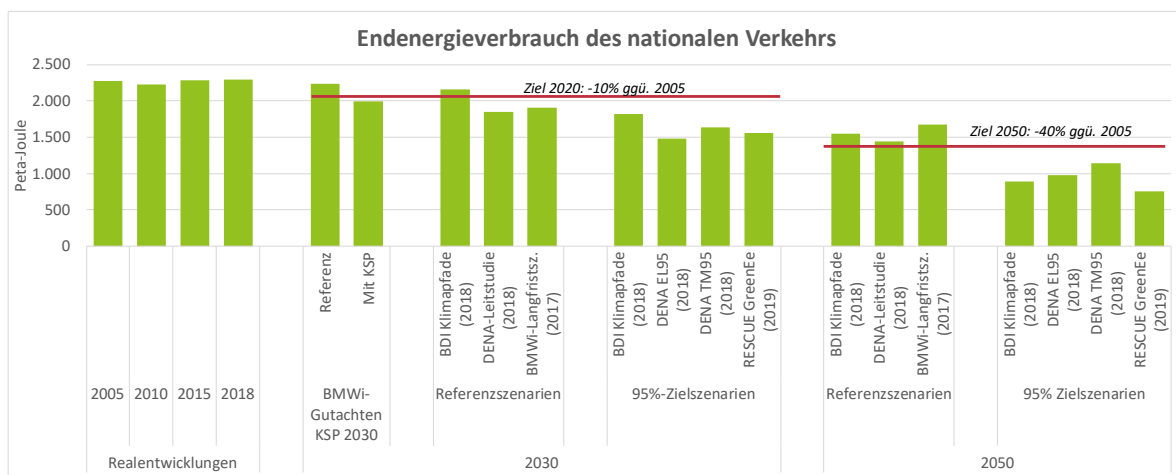
2.1 Gesamter Endenergiebedarf im nationalen Verkehr

- Die Endenergieziele im nationalen Energiekonzept für den Verkehr (rund -10 % bis 2020; - rund 40 % bis 2050) beziehen sich auf das Jahr 2005. Da der Energieverbrauch des nationa-

¹ Szenarien zum Endenergiebedarf im nationalen Verkehr: BDI-Klimapfade (BDI 2018), DENA-Leitstudie (Dena 2018), BMWI-Langfristszenarien (BMW 2017) UBA-RESCUE (UBA 2019a)

- len Verkehrs² im Jahr 2010 nur etwa 2 % niedriger lag als 2005 und seitdem wieder angestiegen ist, ist absehbar, dass das Energieziel für 2020 wohl nicht rechtzeitig erreicht wird.
- In den Referenzentwicklungen von Szenarienstudien der letzten Jahre sinkt der Endenergiebedarf im nationalen Verkehr zwischen 2010 und 2030 nur um 5-16 %. In Zielszenarien mit zusätzlichen ambitionierten Maßnahmen wird der Energieverbrauch bis 2030 um 20-35 % ggü. 2005 reduziert.
 - In einem BMWi-Gutachten zum aktuellen Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung (BMWi 2020) wurde für das Jahr 2030 ein Endenergiebedarf im nationalen Verkehr von 2.232 PJ (-2 % ggü. 2005) im Referenzszenario bzw. 1.999 PJ (-12 % ggü. 2005) im Szenario mit Klimaschutzprogramm abgeleitet. In diesem Szenario besteht auch mangels Konkretisierung der Ausgestaltung der beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen zum Zeitpunkt der Szenarioerstellung eine Lücke zur Erreichung des Klimaziels 2030. Demnach wird auch das Energieziel für 2020 erst 10 Jahre später mit den zusätzlichen Maßnahmen des 2019 beschlossenen Klimaschutzprogramms 2030 erreicht.
 - Auch das Endenergieziel für 2050 wird in den Referenzentwicklungen aktueller Szenarien mit Minderungen um 26-37 % verfehlt. In Zielszenarien, die sektorübergreifend eine nationale THG-Minderung um 95 % erreichen, wird im Jahr 2050 auch das Endenergieziel im Verkehr sicher erreicht.

Abbildung 2: Änderung des gesamten Endenergiebedarfs im nationalen Verkehr 2005-2050 in ausgewählten Referenz- und 95%-Zielszenarien



2.2 Entwicklung des Strom- und Kraftstoffbedarfs im nationalen Verkehr

Aktuelle Szenarien weisen insbesondere in der langfristigen Perspektive für das Jahr 2050 eine erhebliche Bandbreite bei den Endenergieverbräuchen im nationalen Verkehr insgesamt sowie bei den Anteilen verschiedener Endenergieträger auf. Wesentliche Gründe dafür liegen zum einen in abweichenden Erwartungen zukünftiger Verkehrsentwicklungen, zum anderen in den getroffenen Annahmen zum Einsatz alternativer Antriebe, hier insbesondere zur direkten Stromnutzung im Straßenverkehr und zu den Effizienzentwicklungen der Fahrzeuge.

Für eine vollständige Defossilisierung des nationalen Verkehrs stellen sich bei der Entwicklung des Energiebedarfs im Wesentlichen zwei Fragen:

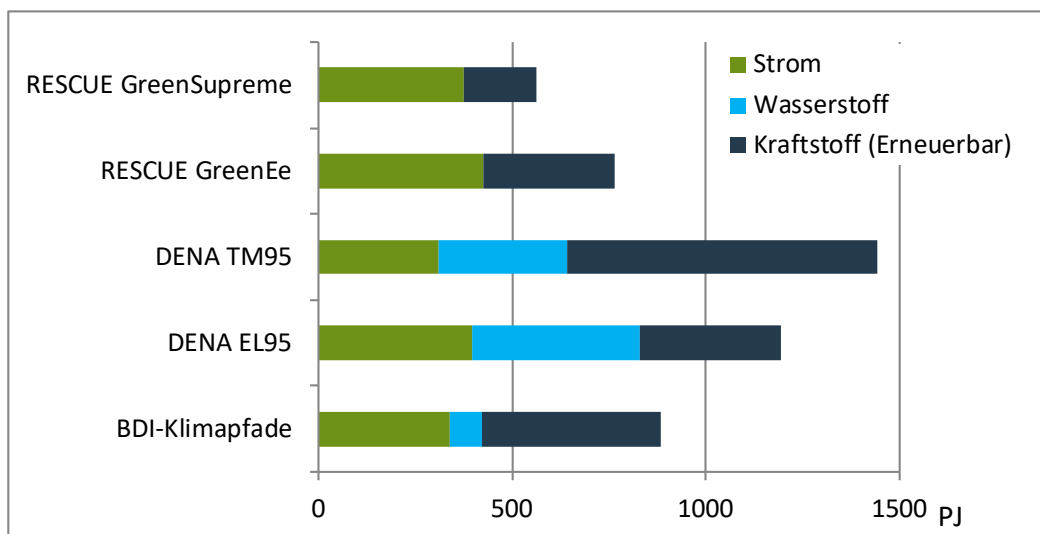
² Internationaler Flugverkehr wurde gemäß TREMOD vom gesamten Endenergieverbrauch lt. „Verkehr in Zahlen“ abgezogen.

1. Wie entwickelt sich die direkte Stromnutzung im Verkehr? Diese ist abhängig von den Annahmen zum Einsatz von Elektromobilität im Pkw- und Lkw-Verkehr sowie von den Annahmen zur Energieeffizienz von Elektrofahrzeugen.
2. Wie entwickelt sich der Kraftstoffbedarf? Für eine Defossilisierung des Verkehrs muss dieser langfristig vollständig durch erneuerbare Kraftstoffe (Biokraftstoffe, strombasierte PtX-Kraftstoffe) gedeckt werden.

Aktuelle 95%-Szenarien zeigen eine Reihe von Gemeinsamkeiten, es gibt aber auch deutliche Unterschiede in den Szenarienannahmen und damit dem resultierenden Strom- und Kraftstoffbedarf aus dem nationalen Verkehr. Der gesamte Endenergiebedarf des Verkehrs liegt in den ausgewählten Szenarien (Abbildung 3) zwischen 562 PJ und 1.444 PJ. Ein wichtiger Grund für diese große Bandbreite um Faktor 2,5 zwischen den Studien liegt neben den Annahmen zu den Fahrzeugflotten (Effizienz, Antriebsverteilung) auch in den abgeleiteten Verkehrsentwicklungen. So liegt die Bandbreite der Personenverkehrsleistungen im Jahr 2050 bei 840-1.115 Mrd. Pkm (30 % Unterschied), im Güterverkehr bei 584-945 Mrd. tkm (60% Unterschied).

- Die **direkte Stromnutzung** spielt in allen ausgewählten Szenarien eine wichtige Rolle. Ihr Anteil am Endenergieverbrauch im nationalen Verkehr steigt von heute ca. 2% bis fast 70 % (21- 67 %) auf 86-118 TWh an. Entscheidend dafür ist vor allem eine weitgehende Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs in allen Szenarien (vgl. Kap. 3). Auch bei Lkw setzen einige Szenarien auf eine starke Elektrifizierung, z.B. im schweren Güterverkehr durch den Einsatz von Oberleitungs-Lkw. In einigen Szenarien kommen jedoch auch zukünftig nur begrenzt Elektro-Lkw zum Einsatz.
- Der **Kraftstoffbedarf** (ohne Wasserstoff) beträgt im Jahr 2050 in den ausgewählten Szenarien zwischen 187 PJ und 803 PJ und liegt damit um etwa Faktor 4 auseinander. Im Vergleich zum heutigen Kraftstoffbedarf ist das eine Reduktion um ca. 70-90 %. Dabei wird dieser Kraftstoffbedarf vollständig mit erneuerbaren Kraftstoffen gedeckt.
- Ein zukünftiger Einsatz von **Wasserstoff** im Verkehr wird nur in einigen Szenarien gesehen und betrifft insbesondere den Lkw-Verkehr. In diesen Szenarien hat Wasserstoff einen erheblichen Anteil am gesamten Endenergiebedarf des Verkehrs.

Abbildung 3: Endenergieverbrauch im nationalen Verkehr im Jahr 2050 nach Energieträgern



3 Antriebe Pkw

3.1 Elektromobilität im Motorisierten Individualverkehr

Bei elektrisch erbrachten Verkehrsleistungen entstehen keine direkten THG-Emissionen, damit werden dem Verkehr in der Klimaberichterstattung aufgrund des Quellenprinzips in der rein sektoralen Betrachtung keine THG-Emissionen angerechnet. Je höher die Elektromobilität ist, umso geringer ist damit der verbleibende Kraftstoffbedarf, der zur Erreichung der Sektorziele im Klimaschutz anteilig (2030) bzw. vollständig (2050) durch erneuerbare Kraftstoffe gedeckt werden muss.

Gleichzeitig steigen mit zunehmender Elektromobilität die notwendigen Anstrengungen zur THG-Minderung in anderen Sektoren. Dies betrifft insbesondere die Bereitstellung von erneuerbarem Strom aus dem Energiesektor. Auch die Fahrzeugproduktion von einem Elektro-Pkw verursacht bisher höhere THG-Emissionen als bei einem Benzin- oder Diesel-Pkw. Insgesamt über den gesamten Lebensweg betrachtet hat dennoch ein neu hergestellter BEV-Pkw bereits heute nach aktuellen LCA-Studien deutlich niedrigere THG-Emissionen als ein vergleichbarer Benzin- oder Diesel-Pkw (z.B. Agora Verkehrswende 2019, RICARDO 2020). Mit zunehmendem Anteil erneuerbar erzeugten Stroms verbessern sich die Klimavorteile zukünftig weiter.

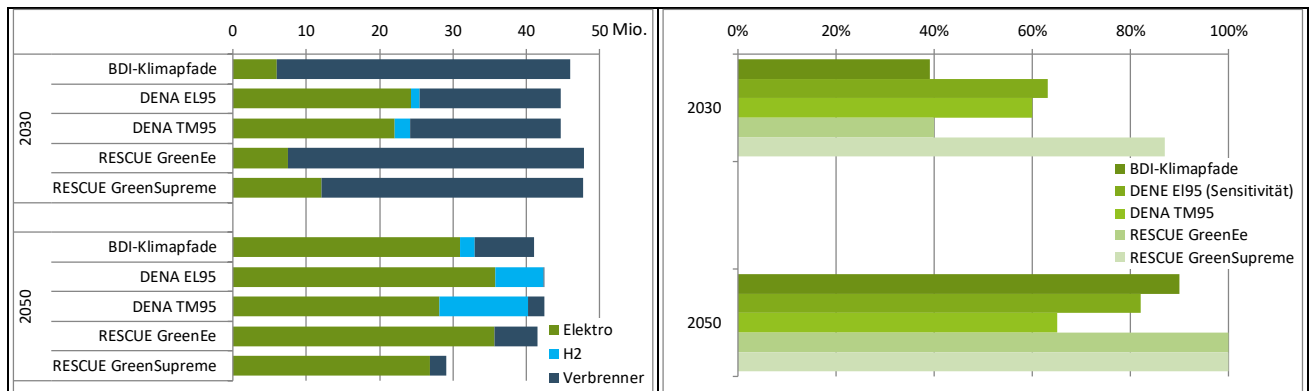
Elektrofahrzeuge sind auch in well-to-wheel-Betrachtung deutlich energieeffizienter als konventionelle Verbrennungsfahrzeuge – mit Wirkungsgraden von 65 bis zu 80% bei E-Fahrzeugen gegenüber Wirkungsgraden von 15 bis 25% bei Benzinfahrzeugen. Beim Einsatz erneuerbar erzeugter PtX-Kraftstoffe sinkt die Energieeffizienz von Verbrennungsfahrzeugen nochmals. H₂-Brennstoffzellenfahrzeuge liegen mit einem Gesamtwirkungsgrad von 25-35% zwischen beiden Antriebskonzepten (Wietschel et al. 2019, ICCT 2016, SRU 2017). Die deutlich höhere Energieeffizienz batterieelektrischer Fahrzeuge legt dementsprechend deren primären Einsatz in einem auf erneuerbarem Strom basierenden Energiesystem nahe. Ihr Einsatz hilft nicht nur bei der Erreichung von Klimazielen, sondern ebenso zur Reduktion von End- und Primärenergiebedarf im Verkehr. Gleichwohl gibt es aus Kundensicht aber andere, entscheidende Faktoren, die die Wahl und Nutzung von Fahrzeugen beeinflussen.

Pkw-Elektromobilität ist grundsätzlich ein zentraler Stellhebel in allen aktuellen Szenarien. Dennoch gibt es zwischen den Szenarien auch erhebliche Unterschiede.

- Im Jahr 2030 nehmen die meisten Szenarien etwa 6-12 Mio. Elektro-Pkw im Bestand an. In einigen Szenarien wird ein stark forcierter Markthochlauf von Elektro-Pkw unterstellt, hier sind 2030 bereits etwa die Hälfte der Pkw-Flotte Elektrofahrzeuge, davon 50-75% PHEV. Dafür werden in den Szenarien bis zum Jahr 2030 Neuzulassungsanteile von Elektro-Pkw zwischen 35 % und über 60 % benötigt. Voraussetzungen dafür sind die Bereitstellung entsprechender Fahrzeugmodelle in allen Fahrzeugklassen und Segmenten und der Ausbau privater und öffentlich verfügbarer Ladeinfrastruktur.
- Im Jahr 2050 liegt der Bestandsanteil der Elektro-Pkw zwischen 66% - 96% und ist damit die dominierende Technologie. Pkw-Neuzulassungen sind (mit Ausnahme von Szenarien, die in begrenztem Umfang auch Wasserstoff-Pkw annehmen) ausschließlich Elektro-Pkw (BEV/PHEV).

In einigen Studien wird als zweite Schlüsseltechnologie die mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle gesehen. In der DENA-Leitstudie und der BDI-Klimapfade-Studie wird ein stärkerer Hochlauf nach 2030 angenommen. Der Anteil der Brennstoffzellen-Pkw im Bestand erreicht bis 2050 5% (BDI) bzw. 16%/28% (DENA TM95/EI95).

Abbildung 4: E-Pkw im Bestand (links) und Neuzulassungsanteile (rechts) in aktuellen 95 %-Szenarien



3.2 Energieeffizienzentwicklung der Pkw-Flotte

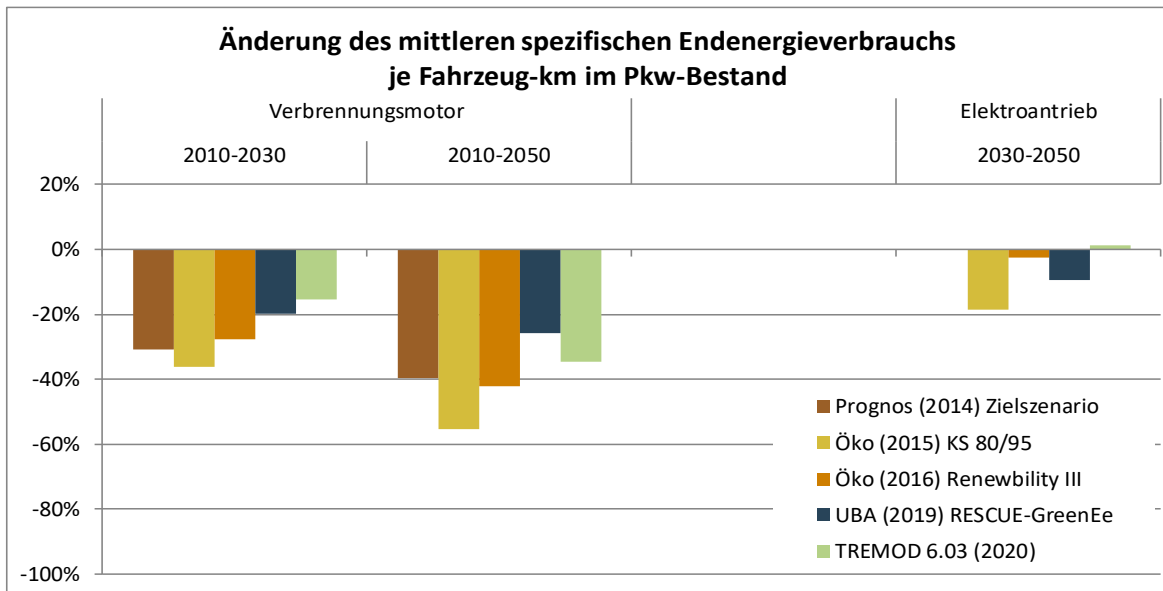
Je niedriger der Beitrag der Elektromobilität zu den Verkehrsleistungen ist, umso wichtiger sind Verbesserungen der Energieeffizienz bei verbrennungsmotorischen Pkw. Mit Blick auf das nationale Endenergieziel im Verkehr sowie die Herausforderungen der Sektorkopplung zur Bereitstellung von regenerativ erzeugtem Strom sind Effizienzverbesserungen auch bei Elektro-Pkw wichtig.

In den meisten Szenarienstudien wird auf Effizienzentwicklungen innerhalb der Antriebskonzepte nicht näher eingegangen. Für zukünftige Jahre werden Effizienzverbesserungen gegenüber der heutigen Situation angenommen, diese unterscheiden sich aber häufig in den Zielszenarien nicht ggü. der Referenzentwicklung. Wegen des begrenzten Detaillierungsgrads der Szenarienergebnisse sind auch Rückrechnungen spezifischer Verbräuche nur eingeschränkt möglich. Abbildung 5 zeigt Entwicklungen der mittleren spezifischen Verbräuche im Pkw-Bestand für Pkw mit Verbrennungsmotor sowie Elektro-Pkw aus verschiedenen, z.T. älteren Szenarien.

- Bei Pkw mit Verbrennungsmotor werden in allen Szenarien zukünftige Effizienzverbesserungen angenommen. In älteren Szenarien wurde für den Zeitraum zwischen 2010 und 2030 eine mittlere fahrzeugtechnische Effizienzsteigerung um 30 % bis knapp 40 % angenommen, bis 2050 um 40-55 %. Aktuelle Szenarien kommen dagegen zu deutlich geringeren Effizienzsteigerungen um 15-20 % (bis 2030) bzw. 25-35 % (bis 2050). Diese Bandbreite spiegelt auch unterschiedliche Szenarienansätze wider. Besonders hohe Effizienzverbesserungen beruhen z.B. auf Recherchen fahrzeugtechnischer Potenziale, ohne nähere Bewertung deren wirtschaftlicher Realisierbarkeit. Geringere Effizienzverbesserungen (z.B. in TREMOD 6.03) entsprechen i.A. den erwarteten Verbesserungen zukünftiger Fahrzeuge, die sich allein aus der bereits bestehenden Gesetzgebung und damit im Trend erwarteten Realisierung technisch-wirtschaftlicher Potenziale ergeben. Auch der Trend zu größeren Fahrzeugen (SUV statt Kleinwagen) wirkt sich in abgeschwächten Erwartungen zur Effizienzverbesserung aus.
- Für Elektro-Pkw können Szenarienstudien aktuell noch keine belastbaren Einschätzungen zu plausiblen zukünftigen Effizienzsteigerungen geben. In einigen Szenarien (z.B. Renewability III) werden nur minimale Effizienzsteigerungen bei Elektro-Pkw unterstellt, weil die derzeitige Regulierung praktisch keine Anreize zur Effizienzsteigerung setzt. Im TREMOD-Trendszenario resultiert im Mittel über alle Elektro-Pkw sogar eine leichte Effizienzverschlechterung, die auch mit steigenden Fahrzeuggrößen und -gewichten bei gleichzeitig fehlenden Effizienzreizen für Elektrofahrzeuge begründet ist. Andere Szenarien kommen zu Effizienzverbesserungen um ca. 10-20 %. Wichtig sind dabei nicht nur Verbesserungen der Energieeffizienz im Antriebsstrang und in der Energiespeicherung (z.B. Minimierung Ladeverluste), sondern auch antriebsunabhängige Verbesserungen am Gesamtfahrzeug (Leichtbau, Rollwiderstand, Nebenverbraucher).

Welche Rolle für zukünftige Effizienzverbesserungen die Digitalisierung des Verkehrs spielen kann (z.B. Stauvermeidung, verringerte Fahrzeuggrößen bei zunehmendem Ridesharing mit autonomen Kfz statt Pkw-Besitz) wird in aktuell vorliegenden Szenarien noch nicht abgebildet.

Abbildung 5: Energieeffizienzentwicklung der Pkw-Flotten



4 Antriebe Lkw

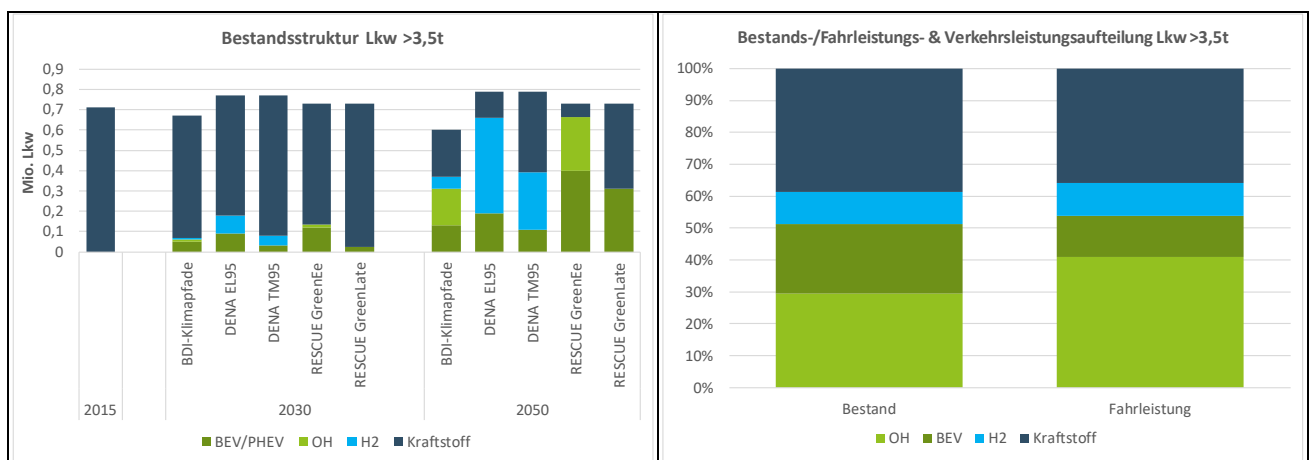
4.1 Alternative Antriebe

Im Straßengüterverkehr sind die zentralen Transformationspfade zur Erreichung der Klima- und Energieziele im Verkehr noch deutlich offener als bei Pkw.

- Bei leichten Nutzfahrzeugen sowie kleineren Lkw-Klassen gehen aktuelle Szenarien im Wesentlichen von einem steigenden Anteil **batterieelektrischer Fahrzeuge** aus.
- Größere Unterschiede gibt es in den Einschätzungen zum schweren Güterverkehr. Alle Studien betrachten **Oberleitungs-Lkw** grundsätzlich als eine Option zur Elektrifizierung des Lkw-Verkehrs. In einigen Szenarien (z.B. BDI-Klimapfade, RESCUE GreenEe) sind Oberleitungs-Lkw im Jahr 2050 im Straßengüterfernverkehr die dominierende Antriebstechnologie. In anderen Szenarien, z.B. in der DENA-Leitstudie, werden Oberleitungs-Lkw nur in Sensitivitäten untersucht.
- Als zweite Schlüsseltechnologie wird in einigen Studien die mit **Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle** gesehen. Die Studie BDI-Klimapfade nimmt für das Jahr 2050 einen Wasserstoff-Anteil von 10% im Bestand aller Lkw >3,5t an. Die DENA-Leitstudie kommt auf Anteile von 35 %/59 % (TM95/EI95).
- In der DENA-Leitstudie spielen bis 2040 auch **gasbetriebene Lkw** eine wichtige Rolle; deren Bedeutung erst ab 2040 durch mehr H₂-Lkw abnimmt
- In einigen Szenarien (z.B. RESCUE GreenLate) werden keine alternativen Lkw-Antriebe in größerem Umfang eingesetzt. Hier wird eine Defossilisierung des Straßengüterverkehrs nur über den großflächigen Einsatz erneuerbarer **PtX-Kraftstoffe** erreicht.

Die meisten Szenarien geben nur Auskunft über den Lkw-Bestand, nicht nach einzelnen Größenklassen und nicht für die nach Antriebskonzept differenzierten Fahrleistungen. Entscheidend für Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr sind allerdings vor allem die Last- und Sattelzüge. Abbildung 6, rechts zeigt exemplarisch für das 95%-Szenario der BDI-Klimapfade, dass BEV-Lkw, die nur in der Größenklasse <12 t angenommen werden, zwar im Jahr 2050 über 20 % Bestandsanteil haben, aber nur etwas mehr als 10 % Fahrleistungsanteil. Oberleitungs-Lkw haben dagegen bei etwa 30 % Bestandsanteil einen Fahrleistungsanteil von über 40 %. Aufgrund ihrer deutlich höheren spezifischen Verbräuche ist die Relevanz für den Energieverbrauch aus dem Verkehr nochmals deutlich höher.

Abbildung 6: Bestandsstruktur von Lkw >3,5t (links) und Aufteilung von Lkw-Bestand und Fahrleistung 2050 nach Antriebskonzepten (rechts) in ausgewählten Szenarien



Die direkte Nutzung von Strom in Elektro-Lkw ist deutlich energieeffizienter als über den Einsatz von Wasserstoff oder synthetischen Dieselmotoren. Nach aktuellen Publikationen (z.B. Öko 2020, T&E 2017) erreichen Elektro-Lkw (BEV, Oberleitung) etwa 73 % Wirkungsgrad, während die Wirkungsgrade bei Brennstoffzellen-Lkw mit 22-31 % bzw. Diesel-Lkw mit synthetischem Kraftstoff mit 13-21 % deutlich niedriger sind.

Für den Einsatz der verschiedenen alternativen Antriebe und Kraftstoffe sind teilweise umfangreiche Infrastruktur-, Entwicklungs- und Industrialisierungsschritte kurzfristig notwendig. Der Hochlauf der Lkw-Technologien ist dabei von folgenden Rahmenbedingungen abhängig:

- **Elektromobilität Lkw:** Eine zentrale Rahmenbedingung für Oberleitungs-Lkw ist der Aufbau einer umfassenden Oberleitungsinfrastruktur. Im Jahr 2030 sind in den ausgewählten Szenarien zwischen 400 km (BDI) und 3.200 km (DENA EI95) des deutschen Autobahnnetzes mit Oberleitungen ausgestattet, bis zum Jahr 2050 werden in den Szenarien insgesamt 4.000-8.000 km und damit etwa ein bis zwei Drittel des gesamten Autobahnnetzes elektrifiziert.
- **Wasserstoff und Gas** als Antriebstechnologien erfordern den Ausbau der Tankstelleninfrastruktur sowie eine deutliche Ausweitung der Produktion von Fahrzeugen mit diesen Antrieben. Bei Wasserstoff sind zudem deutliche Kostenreduktionen erforderlich. Für die nach DENA-Leitstudie benötigten Wasserstoffmengen (18-27 TWh im Jahr 2030) ist auch die großtechnische Herstellung von Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien erforderlich.
- **PtX-Kraftstoffe** haben den Vorteil, dass aktuelle Tankinfrastruktur und Fahrzeuge direkt weitergenutzt werden können. Jedoch sind hier die Weiterentwicklung der Technologien (Wirkungsgrad, Kosten), Erprobung in größeren Pilotanlagen sowie entsprechende Industrialisierung der Technologien erforderlich. Alle betrachteten 95%-Szenarien gehen davon aus, dass die eingesetzten PtX-Kraftstoffe überwiegend aus dem Ausland importiert werden. Daher ist

zusätzlich zum Aufbau großindustrieller PtX-Anlagen auch ein zügiger Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung im Ausland eine wichtige Rahmenbedingung. In keinem der ausgewerteten Szenarien werden bereits im Jahr 2030 größere PtX-Mengen in der Energieversorgung des Verkehrs eingesetzt.

4.2 Energieeffizienzpotenziale

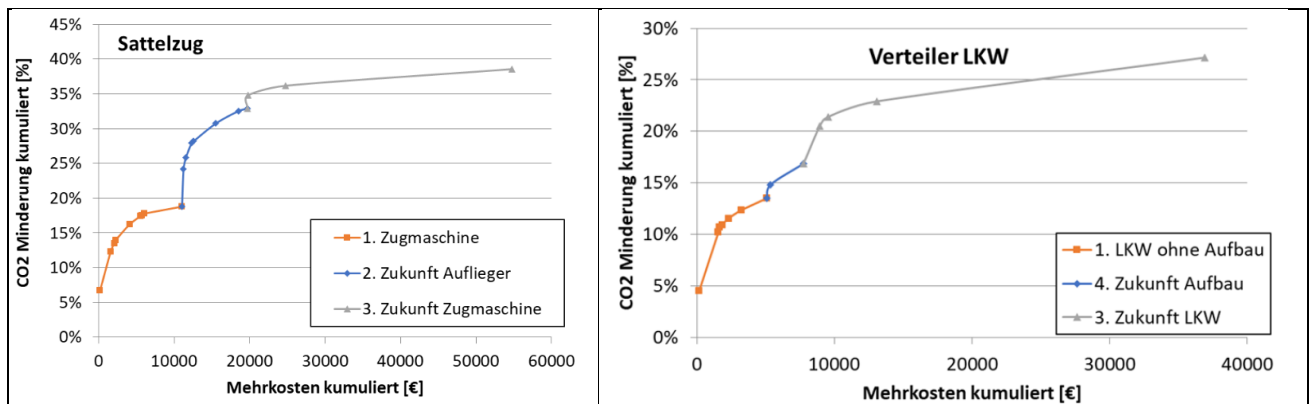
Bei Lkw ist ein zukünftiger großflächiger Einsatz alternativer Antriebsoptionen, die auch zu geringeren spezifischen Energieverbräuchen gegenüber Diesel-Lkw führen, bisher nicht sicher absehbar. Gleichzeitig betreffen verschiedene fahrzeugtechnische Einsparpotenziale, insbesondere an Aufbauten und Anhängern, alle Antriebsoptionen gleichermaßen. Eine Bewertung zukünftiger Effizienzpotenziale betrifft daher sowohl weitere Verbesserungen im derzeitigen Diesel-Antriebsstrang als auch antriebsunabhängige Potenziale.

Die EU hat im Jahr 2019 erstmalig CO₂-Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge beschlossen (EU 2019/1242). Bis zum Jahr 2030 soll bei neuen schweren Nutzfahrzeugen im Mittel eine CO₂-Minderung um 30 % ggü. 2019 erreicht werden. Zur Erreichung der Ziele werden auch emissionsfreie Lkw angerechnet. Aufgrund des Bezugs der EU-Regulierung auf die direkten Emissionen können auch Erdgas-Lkw leichte Emissionsvorteile bei der Flottenregulierung bringen. Bei einem ggü. Pkw deutlich verzögerten Markthochlauf alternativer Lkw-Antriebe wird aber voraussichtlich der Großteil der erforderlichen CO₂-Minderungen durch Effizienzverbesserungen bei Diesel-Lkw zu erbringen sein.

Der Nachweis der fahrzeugspezifischen CO₂-Emissionen erfolgt mit dem Simulationstool VECTO. Diese CO₂-Zertifizierung erfasst die CO₂-Emissionen des Gesamtfahrzeugs (Lkw mit Aufbau bzw. Sattelzugmaschine mit Auflieger). Verschiedene verbrauchsrelevante Komponenten werden dabei bisher nicht modellspezifisch berücksichtigt, sondern generisch festgelegt, da sie bei der Fahrzeugproduktion noch unbekannt sind (z. B. Auflieger) oder sehr aufwändig zu erfassen wären (z. B. Nebenverbraucher). Dementsprechend können in der aktuellen CO₂-Gesetzgebung nicht alle relevanten technischen Minderungspotenziale erfasst werden.

Nach Einschätzungen in der wissenschaftlichen Literatur (z.B. UBA 2019b, ICCT 2017) bestehen bei schweren Nutzfahrzeugen signifikante weitere technische Effizienzpotenziale über die europäische CO₂-Gesetzgebung hinaus. UBA 2019 sieht Potenziale von bis zu 40 % bei Sattelzügen und knapp 30 % bei kleineren Lkw (Abbildung 7). ICCT 2017 sieht langfristig bei allen Lkw-Größen Potenziale bei 35-45 %. Das betrifft sowohl antriebsspezifische Maßnahmen (z.B. Abgaswärmerückführung (WHR), Hybridisierung) als auch antriebsunabhängige an Fahrzeug und Anhänger (z.B. Aerodynamik, Leichtbau, effiziente Nebenverbraucher). Allerdings sind damit auch teilweise erhebliche Fahrzeugmehrkosten verbunden. Daher stellt sich auch bei Lkw die Frage, welche zukünftigen Effizienzverbesserungen unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten anzustreben sind.

Abbildung 7: CO₂-Minderungspotenziale kumuliert für Technologien für Sattelzüge (links) und Verteiler LKW (rechts) über erwarteten Kfz-Mehrkosten nach Technologieklassen



Quelle: UBA 2019b

5 Digitalisierung im Verkehr

In der Digitalisierung liegen vielfältige Chancen für eine energieeffiziente Mobilität. Wichtige Digitalisierungsfelder, die Bedeutung für den Energieverbrauch im Verkehrssektor haben, sind insbesondere:

- Intelligente Mobilitätsdienste, Mobility as a Service und intermodale Vernetzung
- Digitale Steuerung von Verkehrssystemen zur Kapazitätsoptimierung von Infrastrukturen
- Automatisiertes und autonomes Fahren, Car-to-X-Kommunikation
- Virtuelle Mobilität durch Homeoffice, Online-Shopping und virtuelle Dienstleistungen
- Digitalisierung des Stromnetzes und Lademanagement

Mit der Digitalisierung sind technische sowie auch verkehrsorganisatorische Konzepte verbunden, die unterschiedliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch und –effizienz im Verkehr haben können (BMVI 2018, Beckmann 2018):

- Steigerung der Energieeffizienz einzelner Fahrzeuge, etwa durch Platooning und die Optimierung von Fahrprofilen
- Einfluss auf Verkehrsaufkommen und –leistung: Verringerung von Verkehr und Energieverbrauch durch Optimiertes Routing, höhere Besetzungsgrade und weniger Parksuchverkehre, aber auch Reboundeffekte durch induzierten Verkehr aufgrund reduzierter Kosten und Fahrzeiten oder neuer Nutzungsmöglichkeiten von Fahrzeiten.
- Senkung des Energieverbrauchs durch Veränderung des Modal Split zugunsten des Umweltverbundes aufgrund einer Attraktivierung und Verknüpfung öffentlicher Mobilitätsdienste und durch zusätzliche Kapazitäten im Schienenverkehr, aber ggf. auch oben genannte Reboundeffekte zugunsten des Straßenverkehrs

Die Vielfalt an Maßnahmen und Wirkungen der Digitalisierung wird in bestehenden quantitativen Szenarien und Studien bisher nur ausschnittsweise betrachtet. Die Annahmen über mögliche Entwicklungspfade im Kontext einer Digitalisierung im Verkehr variiert zwischen verschiedenen Studien stärker als bei der Betrachtung von Fahrzeug- und Antriebskonzepten.

Untersuchungsbedarf besteht bezüglich der Frage, ob und wieviel Energie durch Digitalisierung im Trendszenario eingespart werden kann, und welche zusätzlichen Politikmaßnahmen sinnvoll sind, um Energieeinsparungen durch Digitalisierung zu ermöglichen oder zu optimieren.

Nachfolgend werden hier ausgewählte Maßnahmen und Ansätze vorgestellt und dazu qualitative oder soweit vorliegend quantitative Wirkungs-Abschätzungen und Szenarioergebnisse angeführt.

Intelligente Mobilitätsdienste, Mobility as a Service und intermodale Vernetzung

Smarte und vernetzte Mobilitätsdienste können bedarfsgerechte Verkehrsangebote in einer nahezu nahtlosen Wegekette schaffen. Hierzu zählen neben bereits etablierten Sharing-Angeboten auch neue On-Demand Dienste wie Ride-Hailing oder Ride-Pooling. Diese bündeln die individuellen Tür-zu-Tür Fahrtwünsche der Kunden auf dynamisch geplanten Routen und ermöglichen aufgrund ihres potenziell hohen Besetzungsgrades eine Effizienzsteigerung gegenüber privatem Pkw oder Taxi. Daraus können zukünftig insbesondere für regionale Verkehre erhebliche Änderungen der Mobilitätsstrukturen resultieren. Digitale Bedarfsverkehre bieten die Chance, klassische ÖPNV-Angebote sinnvoll ergänzen, insbesondere in nachfrageschwachen Nebenzeiten und Räumen und somit ein attraktives multimodales Komplettangebot von Tür-zu-Tür-Mobilität in Konkurrenz zum eigenen Pkw schaffen (z.B. IOKI, SSBflex). Andererseits sind für private Anbieter von Ridesharing- und Ridehailing-Diensten (z.B. UBER) gerade Relationen mit hoher Mobilitätsnachfrage wirtschaftlich interessant. Erfahrungen aus anderen Ländern zeigen erhebliche Risiken, dass ohne geeignete Regulierung die ÖPNV-Nachfrage in erheblichem Umfang substituiert wird und das Kfz-Verkehrsaufkommen steigt.

Verschiedene Angebote können via Smartphone zusammen mit dem Öffentlichen Verkehr zur Mobilität "aus einer Hand" verschmelzen. Zugleich wettbewerbsneutrale Echtzeit-Informationen zu Verkehrssituation oder Verspätungen Mobilitätsentscheidungen unterstützen. Ermöglicht werden kann dies durch einen von allen Mobilitätsanbietern geteilten Datenpool, interoperable eTickets und automatisierte Abrechnung. Hier besteht die Chance, dass durch damit verbundene erweiterte Wahlfreiheit, Zeit- und Komfortgewinne, der Abbau von Zugangshürden sowie mögliche Kostenreduktionen können dabei den Umweltverbund (aus Fuß- & Rad, ÖV und Sharing-Mobilität) attraktiviert wird. Notwendig ist hierfür eine wettbewerbsneutrale und anbieterübergreifende Bereitstellung der Daten.

Die UBA RESCUE-Studie nimmt in GreenLife und GreenSupreme an, dass Carsharing und Ridepooling im urbanen Raum in Integration mit dem öffentlichen Verkehr deutlich an Bedeutung gewinnen und privater Pkw-Besitz bis 2050 stark zurückgeht. Mehr als 60% der Pkw-Verkehrsleistung in Städten finde dann durch Ridepooling statt, sofern regulatorische Anpassungen diese ggü Ridehailing bevorzugen.

Digitale Verkehrssteuerung

Bereits zum Teil etabliert sind verschiedene digitale Verkehrssteuerungssysteme – sowohl als zentrale wie als dezentrale Systeme. Hierzu zählen adaptive Ampelsteuerungen und intelligente Verkehrsleitsysteme, Parkraummanagementsysteme, das Zugkontrollsystem ETCS oder auf die jeweilige Verkehrssituation reagierende Routing-Empfehlungen von Navigationsystemen.

Diese Maßnahmen können zu einer Kapazitätserweiterung von Infrastrukturen beitragen – etwa, indem Staus entzerrt oder umfahren werden, durch intelligente Bewirtschaftung weniger Parkflächen notwendig sind und Bahnstrecken in geringeren Sicherheitsabständen und von längeren Zügen befahren werden können. Die Wirkungsrichtung hinsichtlich der Energieeffizienz ist dabei nicht pauschal bestimmbar: Einerseits können optimierte Routenführung und verbesserte Verkehrsfluss sowie eine höhere Auslastung von Güterverkehren zunächst den Energieverbrauch senken. Grobe Schätzungen sehen hier ein Energieeinsparpotenzial von rund 20% (Fraunhofer ISI 2017). Zugleich kann hiermit jedoch eine verkehrsinduzierende Wirkung verbunden sein, die als Rebound-Effekt gesunkener Kosten sowie Fahr- und Transportzeiten die Verkehrsleistung auf der Straße steigern kann. Auf Seite des Schienenverkehrs kann ein dichter getakteter und Bahnverkehr eine Verlagerung auf die Schiene unterstützen.

Automatisiertes und Autonomes Fahren

Die zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen und Infrastruktur ist ein zentrales Feld der Digitalisierung im Verkehr. Während assistiertes und teilautomatisiertes Fahren (Level 1 und 2) bereits heute umgesetzt sind und Level 3 (hochautomatisiertes Fahren) in ersten Fahrzeugen möglich, aber rechtlich noch nicht zugelassen ist, ist noch unklar, wann die Level 4 (vollautomatisiert) bis 5 (autonomes Fahren) Einzug in den Straßenraum halten werden.

Durch automatisierte und miteinander sowie mit der Verkehrsinfrastruktur kommunizierende Fahrzeuge (C2X-Kommunikation) kann die Effizienz einzelner Fahrzeuge gesteigert werden (Bsp. Platooning), die Verringerung notwendiger Sicherheitsabstände erhöht die Kapazitäten der Infrastruktur insgesamt und verringert so Staus im Straßenverkehr.

Die verkehrliche Wirkung automatisierter Fahrzeuge kann je nach Einsatzfeld sehr unterschiedlich ausfallen: Autonome Fahrzeuge in Flotten von Mobilitätsdienstleistern bieten die Chance, Dienste wie Ridepooling deutlich günstiger machen und Grenzen bisheriger Dienste – wie etwa Taxi oder Carsharing – auflösen, wenn etwa autonome Fahrzeuge fahrerlos zum gewünschten Ort kommen. Sie eröffnen damit potenziell flexiblere und preiswerte Mobilitätsdienste und zu einer Verkehrsverlagerung auf diese Dienste beitragen. (vgl. Bratzel / Thömmes 2018).

Der Einsatz in privaten Pkw könnte einerseits durch optimierte Fahrprofile die Fahrzeugeffizienz erhöhen, andererseits auch verkehrsinduzierend wirken und zu einer Verlagerung vom Umweltverbund aufs Auto führen, da die Zeit im Auto freier genutzt werden kann und damit anders bewertet wird.

Mit Blick auf vollautomatisierte LkW besteht die Chance, Potenziale zur Verbrauchsminderung durch Platooning zu realisieren. Zugleich können die Kostensenkungen jedoch eine Verlagerung von der Schiene auf die Straße bzw. weiteres Wachstum des Güterverkehrs induzieren.

Virtuelle Mobilität: Mobiles Arbeiten, Online-Shopping und virtuelle Veranstaltungen

Die Notwendigkeit physischer Distanz in der Corona-Krise hat die Potenziale virtueller Mobilität aufgezeigt und deren Umsetzung einen Schub gegeben. Homeoffice, digital gestützt durch Videokonferenzen und Cloud-basierte Arbeitsplattformen, kann zur Reduktion von Verkehrsleistungen auf Arbeitspendelwegen beitragen und Dienstreisen ersetzen. 2017 haben laut IAB (2020) rund 22 % der Arbeitnehmer zumindest zum Teil im Homeoffice gearbeitet, zum Höhepunkt des Lockdown im März 2020 haben 49 % der Erwerbstätigen angegeben, im Homeoffice zu arbeiten (Bitcom 2020). An Bedeutung gewonnen haben zudem virtuelle Veranstaltungen wie Tagungen, Konferenzen oder Konzerte. Auch der Online-Einkauf, bereits vor der Pandemie im Wachstum begriffen, hat erneut Marktanteile gewonnen.

Eine Chance der Substitution physischer Wege durch virtuelle Mobilität liegt in der sinkenden Wegezahl. Zugleich besteht das Risiko, dass etwa durch die Möglichkeit von Homeoffice die Entfernungen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz steigen und die Einsparungen der Wegezahl durch längere Wege kompensiert werden. Zudem können durch die gewonnene Zeit Reboundeffekte durch zusätzliche (Freizeit-/Einkaufs-) Verkehre auftreten. Beim Online-Einkauf steht den reduzierten Einkaufswegen im Personenverkehr ein Wachstum von Güterverkehr und KEP-Diensten gegenüber.

Welche Auswirkung diese Tendenzen in der Gesamtbilanz auf die Verkehrsleistung haben, ist dabei noch nicht hinreichend untersucht.

Digitalsierung des Stromnetzes und Lademanagement

Der Digitalisierung kommt auch eine wichtige Rolle beim Management der Wechselwirkungen einer zunehmenden Elektromobilität mit dem Energiesystem zu, bzgl. der Anforderungen an eine lastabhängige Echtzeitsteuerung der Strombereitstellung (Laden von Elektro-Kfz, Tagesgang von OH-Lkw-Verkehr auf Autobahnen), aber auch bzgl. Potenzialen zur Minderung der Belastungen des Stromnetzes, wenn Elektro-Kfz als dezentrale Stromspeicher zur Zwischenspeicherung überschüssiger erzeugter EE-Strommengen genutzt werden (Smart Grid).

6 Quellen und Literatur

AGEB – AG Energiebilanzen (2020): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2018. Stand: März 2020. <https://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>

Agora Verkehrswende (2019): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. Berlin.

BDI (2018): The Boston Consulting Group - BCG / Prognos Klimapfade für Deutschland.

Beckmann, Klaus J. (2018): Digitalisierung und Mobilität – Chancen und Risiken für eine Verkehrswende, in Nachrichten der ARL 2/2018, S. 12-16.

Berylls Strategy Advisors (2017): The Revolution Of Urban Mobility. Studie zu urbaner Mobilität, München.

BMVI (Hg.) (2019): Verkehr in Zahlen 2019 / 2020, 48. Jahrgang. Bearbeitet von: Sabine Radke, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-pdf.pdf?__blob=publicationFile

BMVI (2018): Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Mobilität – Aktionsplan. Berlin.

BMWi (2020): BMWi-Gutachten: Klimaschutzprogramm bringt Deutschland in Reichweite seines Klimaziels für 2030. Pressemitteilung,
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200312-bmwi-gutachten-klimaschutzprogramm-bringt-deutschland-in-reichweite-seines-klimaziels-fuer-2030.html>

BMWi (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland.

Bratzel, Stefan / Thömmes, Jürgen (2018) : Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen: Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im Automobilsektor, Schriften zu Wirtschaft und Soziales, No. 22, Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin.

Dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf

ERP (2014): Prognos / EWI / GWS: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Endbericht. Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel/Köln/Osnabrück.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=7

Hartwig, Niels / Motzkus, Arnd / Stichts, Elmar / Wulfes, Steffen (2016): Digital. Vernetzt. Mobil. Der Dialog- und Stakeholderprozess im Rahmen der Initiative “Digitale Vernetzung des ÖPV” des BMVI, in: Der Nahverkehr 1-2/2016, S.11-16

Heß, Anne / Polst, Svenja (2017): Mobilität und Digitalisierung: Vier Zukunftsszenarien. Bertelsmann Stiftung, Gütersloh.

ICCT (2016): Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions. Working Paper 2016-14

ICCT (2017): Technologien zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von Lkw: die Situation heute und zukünftige Potenziale für den Zeitraum 2020-2030.

https://theicct.org/sites/default/files/EU-HDV-tech_Fact-Sheet_DE_vF.pdf

Öko (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Öko-Institut / Fraunhofer ISI. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.

<https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>

Öko (2016): RENEWABILITY III - Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Öko-Institut / DLR / Ifeu / Infrac. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin.

https://elib.dlr.de/109486/1/__bafiler1_VF-BA_VF_Server_neu_Projekte_PJ_laufend_RNB3_2-Ergebnisse_21-Berichte_Renewability-III_Endbericht.pdf

Öko (2020): Infografik „Klimaneutral, erneuerbar, effizient: E-Lkw liegen vorn“. Februar 2020.

<https://www.flickr.com/photos/oekoinstitut/49547582532/>.

Prognos (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose: Prognos, EWI, GWS; im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums; Juni 2014.

RICARDO (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through Life Cycle Assessment. RICARDO, ifeu, E4tech. Im Auftrag der Europäischen Kommission DG Climate Action. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles_en#tab-0-1

SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2017): Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Sondergutachten. Berlin.

T&E (2017): Roadmap to climate-friendly land freight and buses in Europe. A study by Transport and Environment. June 2017.

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Full_%20Roadmap%20freight%20buses%20Europe_2050_FINAL%20VERSION_corrected%20%282%29.pdf

UBA (2019a) Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE-Studie. Von Katja Purr, Jens Günther, Harry Lehmann und Philip Nuss. Climate Change 36/2019, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>

UBA (2019b) Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. UBA-Texte 12/2019, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-bewertung-von-massnahmen-zur>

UBA (2020a): Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#endenergieverbrauch-steigt-seit-2010-wieder-an>

UBA (2020b): Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase, <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten>

Wietschel, Martin; Matthias Kühnbach; David Rüdiger (2019): Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 02/2019