

»» Die Verkehrswende – Einblicke in die Mobilität der Zukunft

Nr. 201, 13. März 2018

Autor: Dr. Daniel Römer, Telefon 069 7431-6326, daniel.roemer@kfw.de

Deutschland steht vor einer Verkehrswende, die sowohl für die Bevölkerung als auch für die Industrie mit großen Veränderungen verbunden ist. Zu den wesentlichen **Treibern** der Entwicklung zählen die Ziele der Klimapolitik, die lokalen Belastungen durch steigende Verkehrsströme und die wachsende Attraktivität des digitalen Autos.

Die Entwicklung von effizienten Lösungen im Schwerlastbereich, die zuverlässige Bereitstellung von grünem Strom sowie eine Begrenzung der steigenden Verkehrsströme gehören zu den zentralen **Herausforderungen** der nächsten Jahre.

Die Veränderungen bieten dabei auch **Chancen**: etwa Effizienzgewinne im Verkehr, die Erschließung künftiger Märkte und neue Impulse für die Energiewende durch eine zunehmende Sektorenkopplung.

Deutschland braucht daher eine zukunftsfähige Strategie zur Etablierung emissionsfreier und effizient genutzter Formen der Mobilität. Der vorliegende Beitrag skizziert den aktuellen Stand der Entwicklung und beleuchtet mögliche Optionen und Herausforderungen für die Politik.

Verkehrswende – Phantom oder Realität?

Laut einer repräsentativen Umfrage der KfW sieht eine überwältigende Mehrheit der Bevölkerung in Deutschland den Bedarf für eine Verkehrswende. Aber über die Umsetzung herrscht noch keine Einigkeit. So glaubt nur etwa die Hälfte der Befragten, dass sich die Elektromobilität in den nächsten 20 Jahren durchsetzen wird.¹ Würde sich die Entwicklung der letzten 20 Jahre fortsetzen, wäre die Zukunft tatsächlich immer noch geprägt vom Verbrennungsmotor. Die Stromer machen heute noch immer weniger als 2 % der Neuzulassungen aus.² Auch ehemals gefeierte Antriebsformen wie die Brennstoffzelle haben sich bisher nicht durchgesetzt.

Experten aus Forschung und Industrie sind jedoch der Meinung, dass das Zeitalter der Elektromobilität immer näher rückt. Auch die deutschen Automobilkonzerne sprechen inzwischen öffentlich davon, dass der motorisierte Individualverkehr zukünftig primär elektrisch sein wird. Der „Economist“ erwartet sogar, dass bereits das Jahr 2018 eine Zäsur und den Beginn des Durchbruchs der E-Mobilität darstellt.

Künftige Generationen werden sich möglicherweise wundern, dass wir in Autos mit leicht entflammablem Tankinhalt und lärmendem Verbrennungsmotor saßen und dabei gesundheitsschädliche Abgase verursachten. Selbst die Vorteilhaft-

igkeit eines eigenen Autos oder des eigenen Führerscheins wird den heute geborenen Menschen nicht mehr selbstverständlich erscheinen. Wenn die Erwartungen der meisten Experten zutreffen, wird die Mobilität der Zukunft mit den folgenden Eigenschaften verbunden sein:³

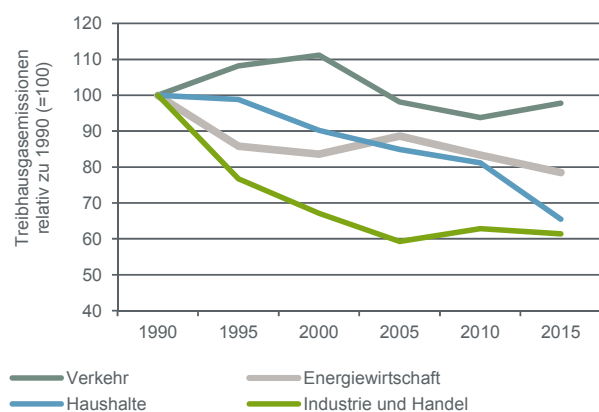
- Vernetzt: Die Fahrzeuge werden untereinander und mit dem Internet verbunden sein.
- Elektrifiziert: Der Elektromotor wird sich als zentrale Antriebstechnologie durchsetzen.
- Geteilt: Mobilität wird stärker zur Dienstleistung, die auch in geteilten und kollektiven Formen genutzt werden kann.
- Automatisiert: Langfristig werden die Fahrzeuge immer selbstständig fahren können.

Welche Faktoren treiben diese Entwicklung – und welche volkswirtschaftlichen Herausforderungen und Chancen sind damit verbunden?

1. Die Klimaziele 2050 drängen

Die Ziele der europäischen und der deutschen Klimapolitik sind ambitioniert: Für das Jahr 2050 wird eine nahezu CO₂-neutrale Volkswirtschaft angestrebt. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen konnten in Deutschland seit 1990 zwar bereits um ca. 25 % gesenkt werden,⁴ der Verkehr hat jedoch keinen Anteil an dieser Entwicklung (Grafik 1).

Grafik 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Handlungsfeld

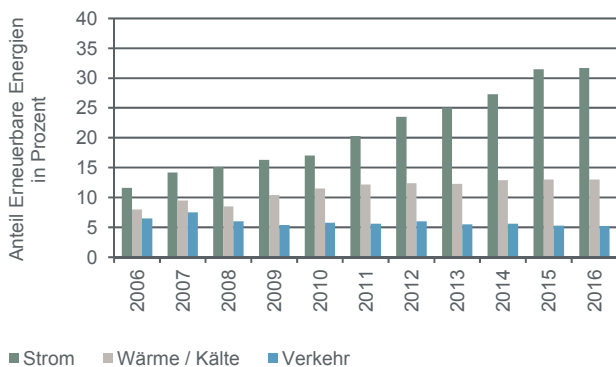


Anmerkungen: ohne diffuse Emissionen.

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von UBA (2017): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990–2015.

Dass sich die Emissionen im Straßenverkehr noch immer auf dem Niveau von 1990 bewegen, liegt zum einen an einem Trend zu leistungsstärkeren Pkws und an einem kontinuierlichen Zuwachs der Verkehrsströme.⁵ Zum anderen wird die benötigte Antriebsenergie nach wie vor fast ausschließlich aus fossilen Quellen gespeist. Während der Anteil der Erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch im Strom- und Wärmebereich kontinuierlich angestiegen ist, stagniert der Wert im Verkehr seit 10 Jahren bei rund 5 % (Grafik 2). Im Jahr 2015 sind dadurch mehr als 20 % der energiebedingten Treibhausgasemissionen dem Verkehrssektor zuzuordnen. Dies ist der höchste Wert seit 25 Jahren und unterstreicht den Handlungsdruck in diesem Sektor.

Grafik 2: Anteile Erneuerbare Energien



Anmerkung: Stand August 2017.

Quelle: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AEEG): Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland.

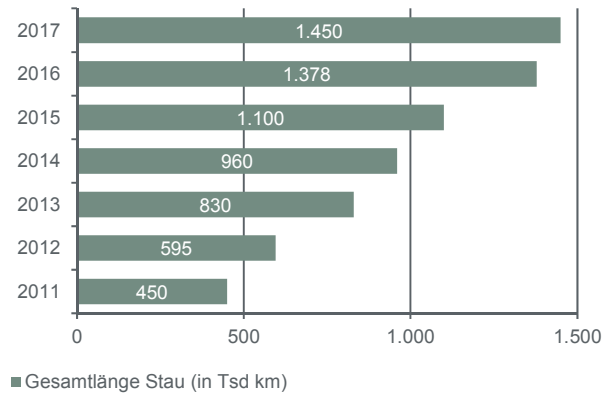
2. Lokale Belastungen aus steigenden Verkehrsströmen

Neben den globalen Klimafolgen rücken zunehmend auch die lokalen externe Effekte des Straßenverkehrs in den Fokus: Dies sind in erster Linie die Emissionen von Feinstaub, Stickoxiden sowie Lärm, von denen unmittelbare Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit ausgehen.⁶ Auch wenn die Messungen hier in den letzten 10 Jahren einen Rückgang der Belastungen ausweisen, werden die Tagesgrenzwerte noch deutlich häufiger überschritten als zulässig.⁷ Im Ausland sind bereits in verschiedenen Metropolen Fahrverbote für Dieselfahrzeuge geplant, zuletzt hat auch das Bundesverwaltungsgericht diese Option für zulässig erklärt.⁸

Zudem sind auch die steigenden Verkehrsströme per se problematisch, da sie immer häufiger zum Verkehrsstillstand führen: In den letzten 5 Jahren hat sich die jährliche Staulänge mehr als verdreifacht und betrug im Jahr 2016 knapp 1,4 Mio. Staukilometer (vgl. Grafik 3). Der wachsende Verkehrsstillstand verursacht volkswirtschaftliche Kosten im Milliardenbereich.⁹ Wenn sich der Trend der letzten Jahre fortsetzt, wird die Gesamtlänge der Staus auf deutschen Autobahnen auch in diesem Jahr wieder ein neues Rekordniveau erklimmen.

Eine Kehrtwende ist derzeit nicht in Sicht. Im Gegenteil, es ist mit einem weiteren Zuwachs der Verkehrsströme zu rechnen, der bis zum Jahr 2030 im Personenverkehr mit 10 % und im Güterverkehr mit rund 40 % beziffert wird.¹⁰

Grafik 3: Staukilometer in Deutschland



Quelle: ADAC Staubilanz 2011–2017.

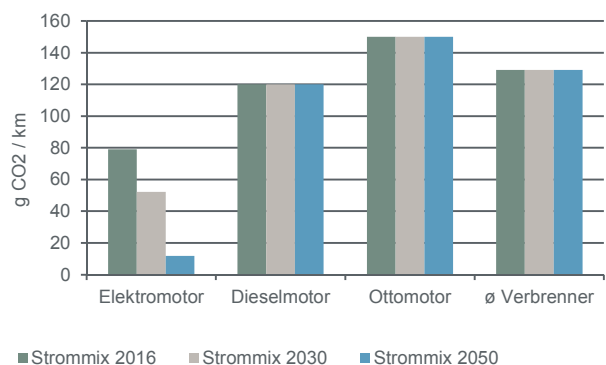
3. Der Elektromotor ist das attraktivste Antriebskonzept

Die Welt scheint sich für den Elektromotor als Antrieb der Zukunft entschieden zu haben. Fast alle Automobilhersteller planen bereits für 2025 mit einem substantziellen Absatz von elektrifizierten Fahrzeugen im Bereich von 25 %. Doch stellen Elektroautos überhaupt eine effiziente Lösung der genannten Probleme dar?

Laut einer aktuellen Umfrage der KfW führen knapp 40 % der Menschen in Deutschland Zweifel an der **Umweltbilanz** als Grund gegen den Erwerb von Elektroautos an. In der Tat sind zur Bewertung der Umweltauswirkungen verschiedene Aspekte zu berücksichtigen

In Bezug auf die Nutzungsphase ist davon auszugehen, dass Elektroautos bereits beim heutigen Strommix weniger CO₂-Emissionen verursachen als gleichwertige Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, etwa in einer Größenordnung von 50g CO₂/km (Grafik 4).¹¹

Grafik 4: CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase



Anmerkung: Ohne Produktion. Der CO₂-Faktor zukünftiger Strommixe basiert auf einem Szenario zur Reduktion der Emissionen bis 2050 um 80 %.¹²

Quellen: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Greiner & Hermann (2016), Kasten et al. (2016), KBA (2017), Kreyenberg et al. (2015) und UBA (2017).

Beim Elektroauto fallen jedoch in der Produktion durch die benötigte Batterie höhere Emissionen an. Dieser anfängliche Emissionsnachteil steigt mit der Batteriegröße an und beträgt bei einer Batterie von 30 kWh etwa 4–5 Tonnen CO₂.¹³ Unter diesen Annahmen wird das Elektroauto beim aktuellen

Strommix ab einer Laufleistung von 80 bis 100 Tkm klimaschonender als ein entsprechender Verbrenner – ein Wert, der leicht unterhalb der erwarteten Lebensdauer einer Batterie liegt. Die heute noch geringfügigen Umweltvorteile der Elektroantriebe wachsen mit der weiteren Dekarbonisierung der Stromerzeugung künftig weiter an (vgl. Grafik 4). Somit ist davon auszugehen, dass die heute in Deutschland zugelassenen Elektroautos über die gesamte Lebensdauer deutlich klimafreundlicher sind als entsprechende Verbrenner.

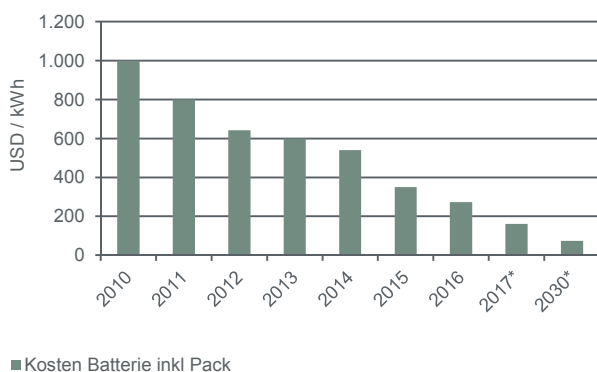
Die Betrachtung offenbart auch die wesentlichen Faktoren einer positiven Umweltbilanz: Dies ist zum einen der Anteil Erneuerbarer Energien am verwendeten Strom, zum anderen die Batteriegröße im Verhältnis zur Fahrleistung. Dadurch können derzeit auch Hybridfahrzeuge mit einer relativ kleinen Batterie die klimafreundlichste Lösung darstellen – wenn der verbaute Verbrennungsmotor nur selten genutzt wird.¹⁴

Hinsichtlich der **Stickoxid- und Feinstaubbelastungen**, die zur Versorgung von Elektroautos erwachsen würden, fällt die Einschätzung noch deutlicher aus. Diese sind deutlich geringer als bei Verbrennungsmotoren und werden zudem größtenteils aus den Ballungsräumen an den Ort der Stromerzeugung verlagert.¹⁵

Elektrofahrzeuge verursachen im unteren Geschwindigkeitsbereich weniger **Lärm**. Die Lärmvorteile nehmen jedoch mit steigender Geschwindigkeit ab, da dann die Abrollgeräusche des Fahrzeuges den Lärmpegel dominieren: Bei 30 km/h wurde ein Unterschied von 2 db gemessen, ab ca. 50 km/h sind die Unterschiede vernachlässigbar gering.¹⁶

Hinsichtlich der anfallenden **Gesamtkosten der Nutzung** gelten Elektrofahrzeuge derzeit als noch nicht konkurrenzfähig. Dies liegt vor allem an den höheren Anschaffungskosten. Ähnlich wie bei der Umweltbilanz ist das Elektroauto bei der Anschaffung aufwendiger und kann diesen Nachteil erst im Lauf der Nutzungsphase schmälern, da sie wartungsärmer sind und in der Regel auch der Strom kostengünstiger beschafft werden kann als Benzin oder Diesel.

Grafik 5: Entwicklung Batteriekosten (Li-Ion)



Anmerkung: Mit dem Stern sind prognostizierte Werte gekennzeichnet.

Quellen: Bloomberg New Energy Finance, Eigene Darstellung.

Die Differenz der Anschaffungspreise wird jedoch künftig sinken. Auch hier spielt die Batterie eine entscheidende Rolle:

Die Kosten pro kWh sind in den letzten Jahren stark gesunken. Allein zwischen 2013 und 2016 haben sich die Kosten pro kWh in etwa halbiert.¹⁷ Für die nahe Zukunft werden sogar Preise im Bereich von unter 100 USD/kWh erwartet.¹⁸ Dies bedeutet, dass der Anteil der Batterie an den Anschaffungskosten von derzeit über 40 % auf weniger als 20 % im Jahr 2030 fallen wird. Dadurch werden die Stromer auch rein ökonomisch die attraktivere Kaufoption. Für hohe Streckenleistungen können sie das sogar bereits heute sein.¹⁹ Die IEA erwartet für 2025, dass sich Elektroautos nach 4–6 Jahren Nutzung „rechnen“.

4. Alternative Antriebskonzepte im Schwerlastbereich

Klimafreundliche Energie liegt in der Regel in Form von Strom aus Erneuerbaren Energien vor. Dieser sollte idealerweise unmittelbar lokal genutzt werden, um Effizienzverluste durch Speicher und Weiterleitung über Verteilnetze zu vermeiden. Im Pkw-Bereich kann mit dem Lithium-Ionen-Akku eine effiziente mobile Speichertechnologie genutzt werden.²⁰ Dass die Batterie aufgrund ihrer heute noch relativ geringen Energiedichte im Vergleich zu einem Treibstofftank mit Diesel, Benzin oder Kerosin ein Vielfaches an Volumen und Gewicht erfordert, spielt bei den relativ leichten Pkws eine nachrangige Rolle.

Im Schwerlastbereich sieht das anders aus. Hier kommt das Konzept batterieelektrischer Fahrzeuge derzeit an seine Grenzen: Das Gewicht der erforderlichen Batterien würde die Tragfähigkeit von Flugzeugen bzw. Schiffen schlicht überfordern. Zwar werden bereits neue Generationen von Batterien entwickelt, etwa Festkörperbatterien, die durch eine höhere Energiedichte mehr Energie auf gleichem Raum speichern können, hier ist jedoch mittelfristig noch kein Durchbruch zu erwarten.²¹ Daher ist man hier auf alternative Konzepte angewiesen.

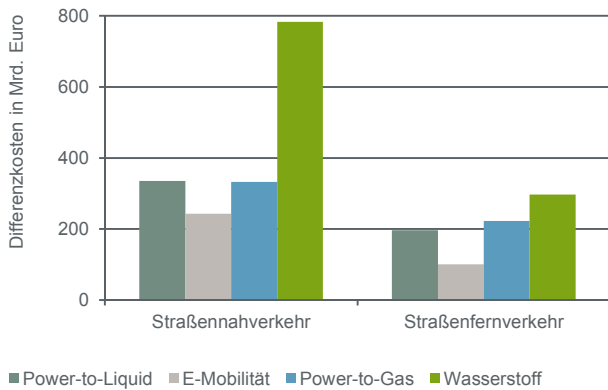
Regenerativer Strom kann auch zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen verwendet werden. Die Erstellung von Flüssigkraftstoffen (**Power-to-Liquid**) bietet den Vorteil, dass die bestehenden Verbrennungsmotoren und Tankeinrichtungen weiterhin genutzt werden könnten. Allerdings entstehen bei der Umwandlung große Effizienzverluste: hierzu wäre etwa das 6-fache an Energie erforderlich als bei der batterieelektrischen Lösung.²²

Weniger Verlustreich ist die strombasierte Herstellung von Methan oder Wasserstoff (**Power-to-Gas**), die nur etwa die doppelte Energie im Vergleich zum reinen Stromer erfordert. Hierbei wird neben der Nutzung in Verbrennungsmotoren derzeit auch wieder die **Brennstoffzelle** diskutiert, die beispielsweise Wasserstoff in elektrischen Strom umwandelt und somit als Energiequelle für einen Elektromotor dienen kann. Der Vorteil hiervon ist die hohe Energiedichte von Wasserstoff, die nicht nur höher ist als bei Batterien, sondern auch höher als bei den Flüssigbrennstoffen. Hierfür müssten jedoch neue Betankungsnetze aufgebaut werden.

Im Ergebnis sind die genannten Lösungen auf der Straße nach heutigem Stand weder ökologisch noch ökonomisch

vorteilhafter als elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Im Straßenfernverkehr steht mit dem **Oberleitungs-Lkw** eine alternative Form der Elektrifizierung bereit. Hierzu müssten auf den Autobahnen Oberleitungen verbaut werden, um die Lkws während der Fahrt – analog zur E-Lok – mit Strom zu versorgen. Diese zunächst etwas aufwändig erscheinende Lösung gilt trotz der hohen Investitionskosten als derzeit effizienteste Lösung im Lkw-Bereich (Grafik 6) und wird auch bereits auf verschiedenen Pilotstrecken getestet.²³

Grafik 6: Gesamtkosten der Dekarbonisierung bis 2050



Anmerkung: Tabellen II-29 bis II-36. Straßennahverkehr beinhaltet Pkw, Kraftäder, leichte Nutzfahrzeugen und Lkw im Nahverkehr, Straßenfernverkehr beinhaltet Sattel- und Lastzüge sowie Reisebusse. Differenzkosten zum Szenario ohne Dekarbonisierungsziel.²⁴

Quelle: Eigene Darstellung nach Kasten et al. (2016).

Lediglich im Bereich des Flug- und Schiffsverkehrs stellen nach heutigem Stand der Technik synthetische Kraftstoffe oder die Brennstoffzelle die bestmögliche Technologie zur Dekarbonisierung dar.²⁵

5. Sicherstellung der Strom- und Rohstoffversorgung

Für die Elektrifizierung werden zusätzliche Stromkapazitäten benötigt. Die erforderliche Leistung hängt vor allem von Art und Umfang der eingesetzten Fahrzeuge ab, deren Bedarf unterschiedlich groß ist und im Mittel mit circa 15 kWh pro 100 km angenommen wird.²⁶ Zur Elektrifizierung der gesamten aktuellen Fahrleistung der Pkw in Deutschland wären demnach circa 100 TWh pro Jahr erforderlich.²⁷ Für den gesamten Straßenverkehr (inkl. Oberleitungs-Lkw) wird zur Erreichung der Klimaziele 2050 ein Stromverbrauch von rund 130 TWh erwartet.²⁸ Angesichts der aktuell in Deutschland verbrauchten Strommenge von rund 600 TWh würde dies die Nachfrage um ca. 20 % erhöhen.²⁹ Da zudem mit einer sukzessiven Umstellung zu rechnen ist, wird der tatsächliche Anstieg in den nächsten Jahren kleiner ausfallen.

Allerdings erhöht sich hierdurch der langfristig erforderliche Zubau an Erneuerbaren Energiequellen.³⁰ Aufgrund von Flächenkonkurrenz und optischen Beeinträchtigungen sind hier grundsätzlich Akzeptanzprobleme denkbar, die sich durch den Nachfrageanstieg verstärken könnten.³¹

Neben der nachgefragten Strommenge bestimmt auch die Verteilung der Nachfrage, bzw. die hierdurch entstehende Spitzenlast, welche installierte Leistung erforderlich ist. Für

eine möglichst netzdienliche Einbindung der zusätzlichen Nachfrage sind intelligente Steuerungselemente erforderlich, etwa hinsichtlich des Ladezeitpunktes. Daher erscheint es sinnvoll, in diesem Zusammenhang auch die Digitalisierung im Bereich der Stromnetze voranzutreiben.

Zur Produktion von Elektroautos werden Rohstoffe benötigt, die teilweise unter fragwürdigen Umwelt- und Sozialstandards gewonnen werden. Dies gilt in besonderem Maß für Kobalt (erforderlich für Lithium Batterien), der größtenteils aus der Demokratischen Republik Kongo importiert werden muss und zu den kostenintensivsten Rohstoffen der Batterie zählt. Auch wenn die vorhandenen Bodenvorkommen als grundsätzlich ausreichend eingeschätzt werden,³² kann es zu temporären Preissteigerungen kommen, da die Nachfrage in den nächsten Jahren voraussichtlich schneller steigt als das verfügbare Angebot.³³

6. Begrenzung des Verkehrsvolumens

Die oben genannten Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanzen basieren auf der Annahme, dass ein Elektroauto einen Verbrenner ersetzt. Daher sollten Elektrofahrzeuge möglichst nicht zusätzlich bereitgestellt werden. Der globale Fahrzeugpark wächst bereits heute aufgrund von Urbanisierung und volkswirtschaftlichem Wachstum konstant an. Auch künftig wird mit einem deutlichen Anstieg der jährlichen Neuzulassungen gerechnet, von heute weltweit etwa 80 auf rund 120 Mio. Autos im Jahr 2040.³⁴ Selbst wenn bis dahin wie erwartet jedes zweite neue Auto ein Elektroauto ist, würden dann noch immer, wie heute, etwa 1 Mrd. Verbrenner weltweit auf den Straßen unterwegs sein – plus etwa 500 Mio. Elektroautos zusätzlich.

Dies veranschaulicht zum einen die Trägheit der Flottenumstellung, zum anderen die Relevanz der Verkehrsströme an sich: Auch das Verkehrsvolumen selbst muss begrenzt oder effizienter gestaltet werden. Mit der Fahrleistung steigen nicht nur der Flächenverbrauch, die Lärmbelastung und die Staus, sondern auch die benötigte Energie – die selbst bei einer Versorgung aus erneuerbaren Energiequellen nicht ohne Kosten ist. Die Erzeugung, Umwandlung, Weiterleitung und Speicherung von Strom erfordert verschiedene endliche Ressourcen wie Flächen, Rohstoffe und menschliche Arbeit. Eine vollständige Dekarbonisierung der Stromerzeugung bis Mitte des laufenden Jahrhunderts wird sich somit ohne ein Gegensteuern hinsichtlich der erforderlichen Endenergiemenge im Verkehr nicht erreichen lassen. Dies erfordert auch Veränderungen des Mobilitätsverhaltens an sich.

7. Effizienzgewinne durch gemeinschaftliche Mobilität

Die bisherigen Formen der Mobilität nähern sich an: Der Mobile Individualverkehr (MIV) wird gemeinschaftlicher genutzt, während im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) die Einbindung individueller Transporte geprüft wird. So plant die Deutsche Bahn beispielsweise, künftig „on-demand-Mobilität“ und autonome Busse anzubieten.³⁵ Im Schnittfeld ergeben sich vielfältige Dienstleistungen, die zu einer effizienteren Nutzung führen können:

Bereits seit einigen Jahren gibt es **Carsharing**-Anbieter. Hierbei teilen sich mehrere Personen ein Fahrzeug. Durch die Nutzung von geteilter Mobilität lassen sich die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge und dadurch auch die Umweltauswirkungen reduzieren. Derzeit werden die Autos in der Regel von privaten Unternehmen bereitgestellt. Es gibt jedoch auch bereits erste Plattformen, über die man sein eigenes Auto anderen Nutzern zur Verfügung stellen kann (**Peer-to-Peer-Carsharing**). Durch geteilte Mobilität lässt sich die Anzahl der Fahrzeuge deutlich reduzieren, auch die CO₂-Einsparungen pro Kopf fallen.³⁶ Zudem ermöglicht es Carsharing, jeweils das Fahrzeug zu verwenden, das für die konkrete Nutzung am besten geeignet ist. Somit können kleine Batteriefahrzeuge für die Stadt und Elektroautos mit großer Batterie oder Hybridantrieb für den Urlaub eingesetzt werden. Dies erhöht die Effizienz.

Auch neue taxiähnliche Dienste mit kommerziellen Fahrern und optional geteilten Fahrten, wie beispielsweise Uber, spielen eine wichtige Rolle. Dies wird häufig als **Ride-Hailing** bezeichnet. Daneben gibt es auch die verschiedenen Formen der privaten Mitfahrgelegenheiten (**Ride-Sharing**), die entweder informell im Bekanntenkreis oder über kommerzielle Plattformen organisiert werden. Diese Formen bieten durch Zusammenlegung von Fahrten Effizienz- bzw. Umweltvorteile.

Mit dem Elektroantrieb werden die Fahrzeuge auch zunehmend digital. Dies erleichtert die Kombination mit intelligenten Steuerelementen zum **automatisierten Fahren**. Diese Technologie, die in den 2030er-Jahren eine stärkere Rolle spielen soll, ist insbesondere als Ergänzung der beiden genannten Varianten gemeinschaftlicher Mobilität geeignet.

8. Teilhabe an den Märkten der Zukunft

Vielorts wurde das Marktpotenzial von innovativen Antriebs- und Mobilitätsformen erkannt, sodass es heute eine lange Liste von Start-ups und Unternehmenssparten gibt, die einen Teil des Mobilitätsmarktes ergattern wollen. Nicht nur aus diesem Grund erwarten viele Experten ein dynamisches Wachstum für alternative Antriebsformen.

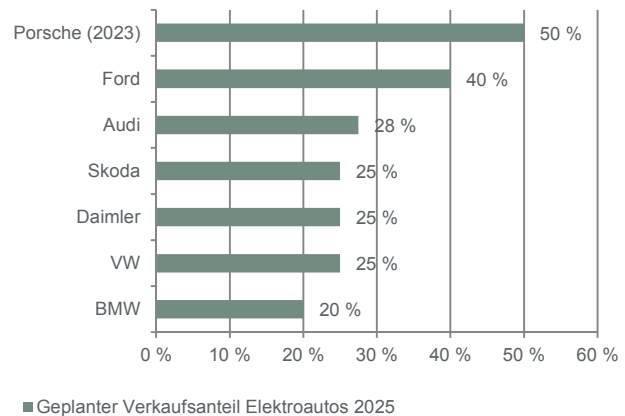
Inzwischen spiegeln sich die Erwartung auch bereits in realen Verkaufszahlen wider. 2016 gab es weltweit mehr als 760.000 Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen, 2017 ist der Wert erstmals auf über eine Million angestiegen.³⁷

Die weltweite Verteilung zeigt, dass China aktuell den größten Markt für Elektrofahrzeuge darstellt – und dies vermutlich auch künftig tun wird.³⁸ Dadurch verliert Europa als Mobilitätsstandort an Gewicht. Angesichts der vielen Start-ups in China und in den USA wird sich zeigen, ob sich der Standort Deutschland auch weiterhin behaupten kann.

In den unterschiedlichen Elektromobilitätsindizes wird Deutschland regelmäßig zu den Top 3 der Welt gezählt.³⁹ Die deutschen Automobilhersteller sehen sich ihrerseits gut gerüstet und planen bereits für 2025 mit substanziellen Verkaufsteilen von elektrifizierten Modellen (Grafik 7). Weitere

Anpassungen der Geschäftsmodelle erscheinen hierbei erforderlich: sie werden sich tendenziell vom Verkauf von Fahrzeugen zum Verkauf von intelligenten und flexiblen Mobilitätsdienstleistungen verlagern.

Grafik 7: Geplanter Verkaufsanteil elektrifizierter Modelle



Anmerkungen: Hybridmodelle werden mit eingerechnet. Bei Intervallen wurde der Mittelwert angegeben. Abweichende Jahresbezüge in Klammern.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Presseberichten.

9. Rückenwind für die Energiewende

Durch die Elektrifizierung der Mobilität entsteht eine zusätzliche Nachfrage nach Elektrizität – ähnlich wie durch die angestrebte Elektrifizierung von Wärme. Die neuen Verbräuche und Verbrauchsorte müssen im Rahmen einer Sektorkopplung integriert werden, die auch den Energiesektor als Ganzes verändern wird.

Im Rahmen der Energiewende soll in Deutschland auf eine Energieversorgung umgestellt werden, die überwiegend auf fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeugern basiert. Zum kosteneffizienten Betrieb eines solchen Systems wird auch eine Flexibilisierung der Nachfrage erforderlich. Die Einbindung des Verkehrs kann sich hierbei sogar positiv auswirken, da hier typischerweise mobile Energiespeicher verwendet werden: derzeit in Form eines Tanks, künftig häufiger in Form einer Batterie. Der Zeitpunkt der Betankung bzw. Ladung ist nicht an die eigentliche Nutzung gebunden, sondern genießt eine gewisse Flexibilität. Der Ladevorgang an Parkplätzen kann sogar in Abwesenheit initiiert werden – beispielsweise in der heimischen Garage, am Arbeitsplatz oder im Hotel. Durch eine entsprechende Anreizsteuerung ermöglicht dies, im Netz anfallende Überschusskapazitäten zu nutzen und dadurch die Netzauslastung zu optimieren. Entscheidend für den Erfolg sind hierfür „smarte“ Steuerungselemente sowie zeitabhängige Stromtarife.

Die noch kühnere Vorstellung, das netzdienliche Ein- und Ausspeichern von Energie, sprich die Verwendung der Akkus als Puffer für Nachfragen außerhalb des Verkehrssektors, erscheint jedoch wenig realistisch. Die Lebensdauer der auf hohe Kapazität und nicht auf häufiges Laden ausgelegten Akkus würde hiervon zu stark in Mitleidenschaft gezogen werden.

Fazit – was kann getan werden?

Deutschland braucht eine Verkehrswende. Der Automobilsektor steht vor einem Umbruch auf verschiedenen Ebenen: Die Fahrzeuge werden zunehmend vernetzt, autonom, elektrifiziert und geteilt genutzt. Hierdurch ändern sich auch die Wertschöpfungsprozesse in der Fahrzeugproduktion.

Durch den erwarteten Durchbruch der Elektromobilität wird die Produktion und Wartung des Antriebsstrangs an Komplexität verlieren. Gleichzeitig wird der Batterieproduktion eine zentrale Rolle zukommen. Tiefgreifende Änderungen im Bereich der Mobilität scheinen unausweichlich. Diese stellen jedoch eine Chance für Deutschland dar.

- Ladeinfrastruktur ausbauen:** Da eine unzureichende Ladeinfrastruktur als häufigster Grund gegen den Kauf eines Elektroautos genannt wird, erscheint ein Ausbau zwingend erforderlich. Investitionen haben hier sogar eine doppelte Dividende, denn mit steigender Ladepunktdichte fällt zudem die erforderliche Speicherkapazität. Und kleinere Batterien schonen nicht nur den Geldbeutel, sondern auch die Umwelt. Im Bereich der öffentlichen Ladeinfrastruktur sind bereits Maßnahmen angestoßen.⁴⁰ Die Ladung ist jedoch insbesondere während längerer Standzeiten attraktiv – und bietet hierbei durch zeitliche Flexibilisierung des Stromabrufes auch die Möglichkeit einer netzdienlichen Optimierung. Daher sollte die Ladeinfrastruktur auch an Orten gefördert werden, an denen sich das Fahrzeug sowieso eine längere Zeit aufhält: etwa in der heimischen Garage am Arbeitsplatz, beim Einkaufen oder auf dem Hotelparkplatz.
- Ausbauziel für Erneuerbare Energien anpassen:** Das kostengünstigste Szenario zur Erreichung der Klimaziele des Verkehrs ist nur mit hohen Anteilen vollelektrischer Pkw und Einführung des Oberleitungs-Lkw erreichbar. Hierzu braucht Deutschland höhere Ausbauziele für Erneuerbare Energien.
- Stromnetze intelligent steuern:** Zur erfolgreichen und effizienten Einbindung werden digitale Steuerungssysteme benötigt. Hierdurch können Erzeugung und Verteilung im Netz intelligent ausgestaltet werden.
- Regulierung anpassen:** Viele Fragen der Sektorenkopplung erfordern flexiblere Mechanismen am Strommarkt. Die regulatorischen Rahmenbedingungen sollten diesem Punkt Rechnung tragen, etwa zur Bereitstellung privater Ladeinfrastruktur in Mehrfamilienhäusern.
- Daten schützen:** Die stärkere Vernetzung der Mobilität kann dazu führen, dass Personen verstärkt mit ihren Daten „bezahlen“. Hierdurch kann einerseits die Mobilität günstiger werden. Andererseits eröffnen sich hierdurch aber auch neue Einfallstore, etwa für Schadsoftware und Datendiebstahl.
- Effizienz als Zielgröße verankern:** Es ist sicherzustellen, dass die effizientesten Formen der Mobilität am stärksten gefördert werden. Analog zu den zwei Säulen der Energiewende sollten auch hier sowohl der Anteil an Erneuerbaren Energien als auch die Energieeffizienz im Fokus stehen. Effizienz betrifft dabei nicht nur effizientere Antriebe, sondern

auch die Verkehrsströme selbst. Daher ist zu prüfen, ob es zielführend ist, in den Flottenanforderungen der EU Elektrofahrzeuge mit Null Emissionen anzusetzen. Hierdurch ist die erforderliche Endenergie und somit ein wichtiger Effizienzfaktor des Fahrzeugs irrelevant.

- Verkehrsströme optimieren:** Die geringen Grenzkosten der Elektroautos könnten dazu führen, dass sie mittelfristig attraktiver werden als der ÖPNV und dadurch zu steigenden Verkehrsströmen führen. Auch das automatisierte Fahren kann im Ergebnis die Anzahl der Fahrten erhöhen. Daher sollten Anreize geschaffen werden, die eine Übernutzung des öffentlichen Guts Straße verhindern, etwa durch eine streckenabhängige Maut. Darüber hinaus bestehen Fehlansätze in der Subventionierung von Diesel und in der Pendlerpauschale.
- Geteilte Mobilität unterstützen:** Da die ökonomischen und ökologischen Vorteile der Elektromobilität mit der Fahrleistung steigen, kann durch eine Bündelung der Mobilitätsnutzung auf weniger Fahrzeuge die Effizienz gesteigert werden. Die Politik kann hier mit regulatorischen Maßnahmen unterstützend agieren, um eine stärkere Nutzung dieser Möglichkeiten anzuregen, wie etwa durch das im September in Kraft getretene Carsharinggesetz.
- Güterverkehr miteinbeziehen:** Während die Diskussion derzeit vor allem auf den batterieelektrisch angetriebenen Pkw fokussiert, sollte der Güterverkehr nicht vergessen werden. Der Handlungsdruck ist hier sogar von besonders hoher Relevanz, da bis zum Jahr 2030 mit einem Anstieg von mehr als 40 % gegenüber 2010 gerechnet wird.⁴¹ Hier wurden bisher auch kaum regulatorische Maßnahmen ergriffen – anders als beim Pkw, wo schon die Mehrheit der weltweit zugelassenen Fahrzeuge bereits einer Effizienz-Regulierung unterliegt.
- Bewusstseinswandel fördern:** Für viele Menschen ist das Auto Rückzugsort, der durch seine Abgeschlossenheit Schutz und Freiheit zugleich bietet. Dadurch ist das Auto ein durchaus emotional aufgeladenes Gut. Daher ist unklar, ob und wie schnell sich beispielsweise eine effizientere geteilte Form der Nutzung überhaupt durchsetzen kann. Hinsichtlich Elektromobilität scheinen zudem Ängste aus Unwissenheit vorzuliegen: manche Vorurteile bauen sich erst nach den ersten eigenen Erfahrungen ab.⁴²
- Multimodale Infrastruktur:** Die öffentliche Infrastruktur wird derzeit immer stärker an ihre Belastungsgrenze geschoben. Gleichzeitig liegen hier substanzielle Investitionsrückstände vor. Durch die Anforderungen der Verkehrswende steigen die erforderlichen Investitionen tendenziell an. Daher sollten diese unterstützt werden, um langfristig eine effiziente Verkehrsinfrastruktur in den Kommunen zu gewährleisten. Neben den Straßen und dem ÖPNV ist hierbei auch an den Ausbau von Radwegen zu denken, um die Verkehrsdichte auf der Straße zu reduzieren und nachhaltige Verkehrsmittel zu fördern.⁴³ Kooperationen von lokalen Verkehrsbetrieben und anderen Mobilitätsanbietern bieten zudem Synergien. ■

- ¹ Zu beiden Aussagen vgl. Römer (2017), Deutschland – Land der Autofahrer: Wie steht die Bevölkerung zur Verkehrswende? Fokus Volkswirtschaft Nr. 187, KfW Research.
- ² Der Anteil der Elektrofahrzeuge und Plug-In-Hybride lag im Jahr 2017 allerdings mit rund 1,6 % allerdings mehr als doppelt so hoch wie im Vorjahr (Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt, 2018).
- ³ Vgl. beispielsweise die Definitionen von BMW (ACES: Automated, Connected, Electrified and Services), Daimler (CASE: Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric) und vom McKinsey Centre for Future Mobility (Electrification, Connectivity and IoT, Shared mobility, Autonomous driving).
- ⁴ Quelle: UBA (2017), Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990–2015, nur energiebedingte Emissionen, ohne diffuse Emissionen bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen.
- ⁵ Hatten 1997 nur rund 15 % der Neuzulassungen mehr als 121 PS, sind es 2017 rund 40 %. Zudem ist die Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs von 1997 bis 2017 um 15 % angestiegen, von rund 833 Mrd. auf rund 966 Mrd. Personenkilometern angestiegen. Quellen: BMVI (2014): Verkehr in Zahlen 2014–2015; BMVI (2017): Verkehr in Zahlen 2017–2018.
- ⁶ Vgl. Anenberg et al. (2017), Impacts and mitigation of excess diesel-related NOx emissions in 11 major vehicle markets, Nature 545, S. 167–171.
- ⁷ Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (August 2017): Stuttgart Am Neckartor 2004 bis 2016 – Messergebnisse an und im Umfeld der Messstelle.
- ⁸ In Paris sollen ab 2024, in Athen, Madrid, Mexico-Stadt sollen ab 2025 Dieselfahrzeuge aus der Stadt verbannt werden. Der Bundesverwaltungsgerichtshof hat am 27.2.2018 Fahrverbote für veraltete Dieselfahrzeuge für zulässig erklärt und somit den Weg geebnet, dass diese Maßnahme auch in deutschen Städten zum Einsatz kommt.
- ⁹ Die Kosten für Deutschland werden für 2017 mit mehr als 80 Mrd. EUR abgeschätzt (vgl. Cookson (2018), INRIX Global Traffic Scorecard).
- ¹⁰ Vgl. Schubert et al. (2015), Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Netzumlegungen, im Auftrag des BMVI.
- ¹¹ Auf Basis des Europäischen Strommixes liegen die Differenzen sogar noch etwas höher, vgl. Edwards et al. (2014), Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context; Version 4a, JRC Report EUR 26236.
- ¹² Flottenverbräuche für Verbrenner gemäß KBA (2017) und für Elektroautos gemäß Kreyenberg et al. (2015), Erneuerbare Energien im Verkehr, erstellt im Auftrag des BMVI. Der CO₂-Faktor des aktuellen Strommixes gemäß UBA (2017). Der CO₂-Faktor zukünftiger Strommixe basiert auf einem Szenario zur Reduktion der Emissionen bis 2050 um 80 %, vgl. Kasten et al. (2016), Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050, erstellt im Auftrag des UBA, und Greiner & Hermann (2016): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Stromerzeugung. Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“.
- ¹³ Die Abschätzung basiert auf Peters & Weil (2017), The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, S. 491–506, und Romare & Dahllöf (2017), The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries, Report C 243. In den beiden Metastudien werden die zu erwartenden Emissionen mit 110 kg bzw. 175 kg (Medianwert) CO₂-Äquivalente je kWh beziffert.
- ¹⁴ So geht eine Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes davon aus, dass Hybridfahrzeuge 2050 mehr als die Hälfte der Neuzulassungen ausmachen und somit den häufigsten Antriebstyp darstellen werden, vgl. Bergk et al. (2016), Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050.
- ¹⁵ Durch den Abrieb von Reifen, Fahrbahn, Bremsen und Kupplung fallen unabhängig von der Motorisierung Feinstaubbelastungen an, die bei Verbrennungsmotoren etwa die Hälfte der Gesamtemissionen entsprechen, vgl. Grigoratos & Martini (2014), Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM, European Commission Joint Research Centre.
- ¹⁶ Vgl. Campello-Vicente (2017), The effect of electric vehicles on urban noise maps, Applied Acoustics 116, S. 59–64.
- ¹⁷ Quelle: Horvath & Partners (2016), Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien von 2013 bis 2020 (in Euro/kWh).
- ¹⁸ Im Bloomberg New Energy Finance Report 2017 werden für 2025 Preise von 109 USD/kWh und für 2030 von 73 USD/kWh erwartet. Die Internationale Energieagentur erwartet in ihrem Energy Outlook 2017 eine langfristige Preisuntergrenze von 80 USD/kWh für batterieelektrische Fahrzeuge und von 100 USD/kWh für Plug-In-Hybride.
- ¹⁹ Konkrete Vergleichsmöglichkeiten bietet der ADAC-Autokostenrechner sowie der Kostenrechner für Elektrofahrzeuge des Öko-Instituts <http://emob-kostenrechner.oeko.de>.
- ²⁰ Hierbei kann ein Wirkungsgrad von 89 % erreicht werden, der allen anderen Speicher- oder Umwandlungsformen überlegen ist, vgl. Bergk et al. (2016), Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050.
- ²¹ Gleiches gilt für Lithium-Luft- und Lithium-Schwefel-Batterien, vgl. Meng et al. (2017), Advances in Structure and Property Optimizations of Battery Electrode Materials, Joule 1, S. 522–547.
- ²² Vgl. Agora Verkehrswende (2017), Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern, Abb. 6.1.
- ²³ Vgl. Bergk et al. (2016), Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050, erstellt im Auftrag des UBA; Kreyenberg et al. (2015), Erneuerbare Energien im Verkehr, erstellt im Auftrag des BMVI.
- ²⁴ Vgl. Kasten et al. (2016), Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050, erstellt im Auftrag des UBA.
- ²⁵ Vgl. Jacobson et al. (2016), A 100 % wind, water sunlight all-sector energy plan for Washington State, Renewable Energy 86, S. 76.
- ²⁶ Vgl. Kreyenberg et al. (2015), Erneuerbare Energien im Verkehr, erstellt im Auftrag des BMVI.
- ²⁷ Die Abschätzung basiert auf einer Fahrleistung von 650 Mrd. Pkw-km in 2016 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017).
- ²⁸ Zur Reduktion der CO₂-Emissionen um 80 % im Vergleich zu 1990 wird ein Strombedarf auf der Straße von 131 TWh/a gerechnet, vgl. Gerhardt et al. (2015), Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr, Endbericht.
- ²⁹ Brutto-Inlandsstromverbrauch gemäß BDEW (2017), Zahlen, Fakten, Grafiken.
- ³⁰ Für Szenarien zum erforderlichen Ausbau unter Einhaltung der Klimaziele 2050 vgl. beispielsweise Gerhardt et al. (2015), Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr, Endbericht; Elsner et al. (2015), Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 zur Für den erforderlichen Zubau von Erneuerbaren Energiequellen, Hacker et al. (2017), „Sektorkopplung“ – Optionen für die nächste Phase der Energiewende.
- ³¹ Vgl. dena (2017), dena-Leitstudie Integrierte Energiewende.
- ³² Vgl. Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen, Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende.
- ³³ Vgl. Palisade Research (2016), A brief cobalt primer.
- ³⁴ Vgl. Bloomberg New Energy Finance (2017), Electric Vehicle Outlook 2017; IEA (2017), New Energy Outlook 2017.
- ³⁵ Vgl. DB (2017): Presseerklärung „Mobil auf einen Klick auch ohne eigenes Auto“ http://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/15466886/d20171011_loki.html
- ³⁶ Vgl. Martin & Shaheen (2011), Greenhouse Gas Emission Impacts of Carsharing in North America, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 12, S. 1074–1086.
- ³⁷ Quellen: Navigant Research (2017), Market Data: EV Market Forecasts; sowie EVvolumes.com (2018).
- ³⁸ Auf China entfielen im Jahr 2016 mehr als 40 % der weltweiten Zulassungen von Elektroautos, vgl. IEA (2017), Global EV Outlook.

³⁹ Vgl. Roland Berger (2017), E-mobility Index Q2 2017, McKinsey (2017), Electric Vehicle Index (EVI).

⁴⁰ Das BMVI hat im Jahr 2017 mit dem Bundesprogramm Ladeinfrastruktur 300 Mio. EUR für öffentlich zugängliche Ladestationen bereitgestellt.

⁴¹ Quelle: Schubert et al. (2015), Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Netzumlegungen, im Auftrag des BMVI.

⁴² Ein weiterer besonderer Aspekt ist, dass die Vorteile der Elektromobilität von Außenstehenden oft nicht erkannt werden und stattdessen potenzielle Nachteile höher eingeschätzt werden als von Menschen, die ein Elektroauto tatsächlich nutzen, siehe Matthies et al. (2016), Zur besseren Verbreitung von Elektroautos – was können wir in Deutschland von Norwegen lernen? Policy Brief 01/2016, Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS.

⁴³ Im Verhältnis zu den gesamten Emissionen im Verkehr stellen dies in der Regel auf Kurzstrecken beschränkten Fortbewegungsmöglichkeiten allerdings nur einen relativ kleinen Beitrag dar (vgl. IEA, 2017).