

Bratzel, Stefan; Thömmes, Jürgen

Research Report

Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen: Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im Automobilsektor

Schriften zu Wirtschaft und Soziales, No. 22

Provided in Cooperation with:

Heinrich-Böll-Stiftung e.V., Berlin

Suggested Citation: Bratzel, Stefan; Thömmes, Jürgen (2018) : Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen: Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im Automobilsektor, Schriften zu Wirtschaft und Soziales, No. 22, ISBN 978-3-86928-174-2, Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/180991>

Standard-Nutzungsbedingungen:

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

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

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

Terms of use:

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

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

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



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de>



BAND 22

Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen

Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende
im Automobilsektor

Eine Studie von Stefan Bratzel und Jürgen Thömmes

ALTERNATIVE ANTRIEBE, AUTONOMES FAHREN, MOBILITÄTSDIENSTLEISTUNGEN

**HEINRICH BÖLL STIFTUNG
SCHRIFTEN ZU WIRTSCHAFT UND SOZIALES
BAND 22**

Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen

Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im
Automobilsektor

Eine Studie von Stefan Bratzel und Jürgen Thömmes

Im Auftrag und herausgegeben von der Heinrich-Böll-Stiftung



Diese Publikation wird unter den Bedingungen einer Creative-Commons-Lizenz veröffentlicht:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de> Eine elektronische Fassung kann heruntergeladen werden. Sie dürfen das Werk vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen. Es gelten folgende Bedingungen: Namensnennung: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen (wodurch aber nicht der Eindruck entstehen darf, Sie oder die Nutzung des Werkes durch Sie würden entlohnt). Keine kommerzielle Nutzung: Dieses Werk darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden. Keine Bearbeitung: Dieses Werk darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden.

Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen

Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im Automobilsektor

Eine Studie von Stefan Bratzel und Jürgen Thömmes

Im Auftrag und herausgegeben von der Heinrich-Böll-Stiftung

Band 22 der Schriftenreihe Wirtschaft und Soziales

Herausgegeben von der Heinrich-Böll-Stiftung

Cover-Foto: Luca Bravo – Unsplash

Gestaltung: feinkost Designnetzwerk, C. Mawrodiew (basierend auf Entwürfen von State Design)

Druck: ARNOLD group, Großbeeren

ISBN 978-3-86928-174-2

Bestelladresse: Heinrich-Böll-Stiftung, Schumannstr. 8, 10117 Berlin

T +49 30 28534-0 **F** +49 30 28534-109 **E** buchversand@boell.de **W** www.boell.de

INHALT

Vorwort	7
1 Einleitung	9
2 Innovationstrends der (Auto-)Mobilität und die infrastrukturellen Erfolgsbedingungen	11
3 Alternative Antriebe und deren Infrastrukturvoraussetzungen	16
3.1 Elektromobilität: Battery-Electric-Vehicles (BEV)	17
3.1.1 Klima-/Umweltrelevanz sowie Markttrends und Einflussfaktoren des Markthochlaufs	17
3.1.2 Thesen zu den Infrastrukturen der Elektromobilität (BEV)	27
3.2 Brennstoffzellen-Fahrzeuge/Fuel-Electric-Vehicles (FCEV)	32
3.2.1 Konzeptübersicht, Umwelt-/Klimawirkungen und Marktentwicklung	32
3.2.2 Thesen zu den Infrastrukturen von Brennstoffzellen-Fahrzeugen	35
3.3 Power-to-X-Pfade im Verkehrssektor	37
4 Autonomes Fahren	39
4.1 Konzeptübersicht, Klima-/Umwelteffekte, Markttrends	39
4.2 Thesen zu Infrastrukturen für Autonomes Fahren	46
5 Mobilitätsdienstleistungen und deren besondere Infrastrukturvoraussetzungen	51
5.1 Konzept, Klima-/Umweltrelevanz, Markttrends	51
5.2 Thesen zu Infrastrukturen für (intermodale) Mobilitätsdienstleistungen	57
6 Fazit	61
Literatur	63
Abbildungs- & Tabellenverzeichnis	70
Abkürzungen	71
Die Autoren	72

VORWORT

Eine gelingende Mobilität ist die Basis für eine erfolgreiche Wirtschaft. Die nun bevorstehende ökologische Transformation des Verkehrswesens in Deutschland, die sogenannte Verkehrswende, erfordert zahlreiche Innovationen auf verschiedenen Ebenen: digitale Vernetzung, Elektrifizierung, Ladeinfrastruktur für E-Mobilität und andere Antriebe usw. Sie alle müssen auf Infrastrukturen zurückgreifen, die es entweder noch nicht gibt oder die schon bekannt sind, aber beschleunigt und in größerem Rahmen bereitgestellt werden müssen. Aber ohne sie werden wir bis 2050 die Reduktionsziele des Pariser Klimaabkommens nicht erreichen und ebenso wenig den Ausstieg aus der Mobilität mit fossilbetriebenen Verbrennungsmotoren.

Nur eines steht fest: Der Fortschritt ist grün. Denn Innovationen, die eine CO₂-freie Mobilität ermöglichen, sind schlicht auf bestimmte Infrastrukturen angewiesen. Dieser Bedarf an Infrastrukturen ist nicht klar vorgegeben, einige Dinge treten aber bereits deutlich hervor: So muss für das autonome Fahren und die digitale Vernetzung 5G Standard werden. Anderes variiert je nach Pfad der Transformation; so ist zum Beispiel offen, wie viel Mobilitätsanteile die Elektromobilität für welche Regionen und welche Transporte übernehmen kann. Andere alternative Antriebstechnologien wie die Brennstoffzelle und E-Fuels benötigen komplett andere Infrastrukturen.

Wie noch nicht zusammengesetzte Teile eines Puzzles liegen die Elemente der Verkehrswende auf dem Tisch. Der Beitrag von Infrastrukturen zur Innovationsfähigkeit wird oft stillschweigend vorausgesetzt – in der vorliegenden Untersuchung spielen sie die Hauptrolle. Wir wollen zeigen, welche Infrastrukturen für die Innovationsfelder der kommenden Jahre «erfolgskritisch» sind und welche Anreize zur Weiterentwicklung heute gesetzt werden können und müssen.

Wir nehmen mit der vorliegenden Untersuchung die Autoindustrie in den Blick, hier ist der Handlungsbedarf und der potenzielle Gewinn an CO₂-Einsparungen und an Lebensqualität vor allem in den Städten am höchsten, bei gleichzeitig hohem Risiko. Denn ob der Wandel dieser für lange Zeit erfolgsgewohnten Industrie gelingt, ist offen. Doch viel hängt davon ab.

Unser Dank gilt dem Autorenteam Prof. Dr. Stefan Bratzel und Prof. Dr. Jürgen Thömmes für die gute Zusammenarbeit.

Berlin, im Juni 2018

Ellen Ueberschär
Vorstand
Heinrich-Böll-Stiftung

Ute Brümmer
Referentin Wirtschaft und Finanzen
Heinrich-Böll-Stiftung

1 Einleitung

Die Mobilität im Allgemeinen und das Auto im Besonderen stehen derzeit vor den größten Veränderungen ihrer rund 120-jährigen Geschichte. Die Herausforderungen für die Akteure, insbesondere der Automobilindustrie, lassen sich auf drei Ebenen beschreiben:

- Erstens steht die Branche vor weitreichenden technologischen Veränderungen wie der Elektromobilität, der Digitalisierung und dem Autonomen Fahren.
- Zum zweiten stehen derzeit auch die etablierten Geschäftsmodelle der Automobilindustrie in Frage. So wird im Zuge gesellschaftlicher Werte- und Einstellungsverschiebungen der Besitz von Automobilen unwichtiger, womit der Verkauf von Automobilen an Endkunden für die Hersteller künftig nicht mehr im Mittelpunkt steht. Vielmehr rücken verschiedene Nutzungsformen von Auto-Mobilität, wie Car-Sharing oder Fahrdienste, und damit Mobilitätsdienstleistungen als neues Geschäftsfeld in städtischen Regionen in den Blick.
- Zum dritten werden die ökologischen Effekte des Autoverkehrs und insbesondere ihr Beitrag zum Klimawandel von Politik und Öffentlichkeit zunehmend kritischer hinterfragt. Mit dem Pariser Klimaschutzabkommen wird etwa die weitgehende Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland bis zum Jahr 2050 verlangt. Gleichzeitig strebt die Bundesregierung im Klimaschutzplan bereits bis zum Jahr 2030 eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs bis 2030 um rund 40 Prozent gegenüber 1990 an.¹ Der Umfang der damit verbundenen Herausforderungen wird dadurch erkennbar, dass die CO₂-Emissionen des Verkehrs in Deutschland in den letzten Jahren keinen Klimaschutzbeitrag lieferten und im Vergleich zu 1990 sogar noch gestiegen sind.

Die Automobilindustrie steht entsprechend unter multiplem Veränderungsdruck. Dies umso mehr, als neue Akteure von Start-ups wie Tesla und Uber über Internetgiganten wie Google und Apple mit potenziell disruptiven Geschäftsmodellen die etablierten Automobilhersteller herausfordern und damit einen der wichtigsten Industriezweige in Deutschland bedrohen. Entsprechend ist die wirtschaftliche und ökologische Transformation der Automobilindustrie, vielfach als Verkehrswende bezeichnet, ausgesprochen voraussetzungsvoll. Wenngleich einige Bausteine einer CO₂-freien Mobilität bereits vorliegen, sind doch die genauen Pfade hin zu einer dekarbonisierten Mobilität nicht klar vorgegeben, sondern müssen vielfach noch definiert und beschritten werden.

¹ Vgl. Agora 2017, S. 12.

Sicher ist: Die anstehende Transformation verlangt von der Branche und deren Akteuren eine sehr hohe Wandlungsbereitschaft und Innovationsfähigkeit. Dies erscheint jedoch nicht hinreichend. Häufig gerät aus dem Blickfeld, dass Transformationsprozesse und -pfade sowie die Innovationskapazitäten von Akteuren abhängig sind bzw. erheblich beeinflusst werden von ermöglichenden Rahmenbedingungen bzw. spezifischen «Infrastrukturen».² Dabei lassen sich materielle, immaterielle oder institutionelle Infrastrukturen unterscheiden, die als Grundausstattung einer Volkswirtschaft spezifische Innovationen erst ermöglichen oder erleichtern.³ Materielle Infrastrukturen bezeichnen vor allem die technisch-baulichen Voraussetzungen, wie etwa Lademöglichkeiten für Elektromobilität. Immaterielle Infrastrukturen meinen im weiteren Sinne die Verfügbarkeit passenden Humankapitals bzw. personelle Kompetenzstrukturen, wie etwa die Verfügbarkeit von Kompetenzen der Batteriechemie an Forschungseinrichtungen in Deutschland. Institutionelle Infrastrukturen verweisen auf regulative Rahmenbedingungen wie Gesetze oder Standards, die beispielsweise die E-Mobilität beeinflussen bzw. ermöglichen können.

Das vorliegende Papier zielt darauf ab, vor dem Hintergrund der Veränderungen von Mobilität und Verkehr die Transformation der Automobilindustrie aus der Perspektive dieser Infrastrukturen zu beleuchten. Damit sollen die relevanten erfolgskritischen bzw. ermöglichenden oder erleichternden infrastrukturellen Rahmenbedingungen der Innovationsfähigkeit im Auto-Mobilitätssektor und die damit zusammenhängenden multiplen technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Herausforderungen in den Mittelpunkt rücken. Ziel ist es, wichtige infrastrukturelle Voraussetzungen in Kernfeldern der Zukunft der Branche zu benennen und thesenartig kritische Entscheidungspfade zu verdeutlichen.

In Kapitel 2 werden zunächst die relevanten Innovationstrends der Automobilitätsbranche aufgegriffen. Dadurch sollen die aktuellen technologischen Herausforderungen der Automobilindustrie sowie die Zukunftsstrategien der wichtigen Akteure für die wirtschaftliche und ökologische Transformation deutlich werden. Als zentrale erfolgskritische Innovationsfelder werden alternative Antriebe, Autonomes Fahren und Mobilitätsdienstleistungen herausgearbeitet und nachfolgend vorwiegend aus infrastruktureller Perspektive untersucht. Kapitel 3 befasst sich sowohl mit der Elektromobilität, der Brennstoffzelle sowie synthetischen Kraftstoffen. Kapitel 4 nimmt die Infrastrukturen für Autonomes Fahren in den Blick, während in Kapitel 5 das Thema der Mobilitätsdienstleistungen behandelt wird. Kapitel 6 fasst in einem Fazit die Ergebnisse zusammen.

² Zum Konzept der Innovationskapazität am Beispiel der Automobilzulieferindustrie vgl. Bratzel/Tellermann 2008.

³ Vgl. hierzu auch: Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Infrastruktur, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54903/infrastruktur-v9.html>

2 Innovationstrends der (Auto-) Mobilität und die infrastrukturellen Erfolgsbedingungen

Das Automobil und der stark angewachsene Autoverkehr prägen seit vielen Jahrzehnten die Mobilität in Deutschland und anderen westlichen Industriegesellschaften. Wohlstand und wirtschaftliche Entwicklung einer globalisierten und international arbeitsteiligen Welt sind eng verknüpft mit dem Anstieg des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und des motorisierten Güterverkehrs. Auch die aufstrebenden Wirtschaftsnationen, wie etwa China, folgen diesem westlichen Modell und weisen mit dem Anstieg der Wirtschaftsleistung auch ein hohes Verkehrswachstum und steigende Motorisierungsraten auf.

Gleichzeitig hat der zunehmende (Auto-)Verkehr negative Neben- und Folgeeffekte für Gesundheit und Umwelt. Insbesondere der Autoverkehr ist verantwortlich für viele Unfalltote und verursacht hohe Belastungen in Form von Luftschadstoffen, Lärm, Zersiedlung und Flächenbeanspruchung – trotz bemerkenswerter Erfolge durch sicherheits- und umwelttechnische Technologien und Maßnahmen. Außerdem ist der Verkehrsbereich in Deutschland größter Energieverbraucher und nach dem Energiesektor größter Verursacher von Treibhausgasen. Entsprechend hat er eine sehr wichtige Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele in Deutschland. Für die Automobilhersteller sind die aktuelle und künftige CO₂-Regulierung der EU wichtige Rahmenbedingungen, die die Innovationsstrategien vor allem im Antriebsbereich bereits heute massiv beeinflussen. In ähnlicher Weise spielen auch die regulativen Rahmenbedingungen im Umweltbereich in anderen automobilen Kernregionen wie China und den USA für die Branche eine wichtige Rolle.

Die klimapolitischen bzw. ökologischen Zielsysteme sind jedoch nur ein Treiber für Veränderungen. Die Automobilbranche – und damit das Verkehrssystem – steht aufgrund weiterer womöglich noch weitreichenderer Trends vor einem Paradigmenwechsel. So werden drei wesentliche Grundprinzipien, auf denen das gesamte Geschäftsmodell der Automobilhersteller bislang aufgebaut war, fast gleichzeitig infrage gestellt:

- Der Verbrennungsmotor ist Kern der automobilen Wertschöpfung.
- Endkunden haben den Wunsch zum Kauf und Besitz von Automobilen.
- Das Auto muss manuell durch einen ausgebildeten Fahrer gesteuert werden.

Diese lange Zeit geltenden Selbstverständlichkeiten verlieren derzeit aufgrund technologischer Innovationen sowie politisch-gesellschaftlicher Veränderungen zunehmend ihre Gültigkeit. So könnte erstens der Elektromotor innerhalb der nächsten 20 Jahre den Verbrennungsmotor als dominante Antriebstechnologie ablösen. Treiber sind hier die skizzierten klimapolitischen Ziele, aber auch wichtige Kernmärkte wie China, die die Elektromobilität auch aus industriepolitischen Motiven heraus vorantreiben.

Gleichzeitig verliert, zweitens, der Wunsch der Menschen zum Kauf und Besitz eines Autos vor allem in den Ballungsräumen an Bedeutung und in der jungen Generation das Auto zunehmend seinen Stellenwert als wichtiges Statussymbol, während alternative Nutzungsformen wie Car-Sharing und Fahrdienste an Bedeutung gewinnen.⁴

Und drittens ist für die Autonutzung künftig auch kein ausgebildeter Fahrer bzw. Chauffeur mehr notwendig, wenn – so die Testprojekte und Visionen – künftig Robotertaxis und «Robo-Busse» autonom fahren. Schon 2021 wollen verschiedene deutsche Automobilhersteller die ersten vollautonomen Serienfahrzeuge auf die Straße schicken. Auch andere Hersteller oder neue Akteure wie Uber peilen den Marktstart von Roboterautos in naher Zukunft an.

Die Erosion der Grundpfeiler der Automobilindustrie ist sehr weitreichend. Es lassen sich daraus drei Ansatzpunkte oder «Mobilitätsrevolutionen» ableiten, auf deren Grundlage künftig Innovationsstrategien und neue Geschäftsmodelle der Branche aufgebaut werden können:

- *Die Mobilitäts-Effizienz-Revolution:* Derzeit sind Autos rund 95 Prozent der Zeit ungenutzt. Und selbst während der fünfprozentigen Nutzungsphase haben sie hierzulande nur eine durchschnittliche Auslastung von rund 33 Prozent. Zudem verbrennen sie mit einem relativ geringen Wirkungsgrad endliche fossile Brennstoffe mit negativen Umwelt- und Klimaeffekten. Viele neue Geschäftsmodelle und Innovationen gehen im Kern auf diese Ineffizienzen zurück: Digitale Fahrdienstportale versprechen eine hohe Auslastung von Autos/Taxis bei niedrigen Kosten; Sharing-Konzepte ermöglichen ein Teilen ansonsten ungenutzter «Fahrzeug-Hardware», und durch Elektroautos können bei Verwendung von regenerativer Energie hohe Wirkungsgrade und geringe externe Umweltkosten erreicht werden.
- *Die Mobilitäts-Zeit-Revolution:* Laut einer Studie des französischen Autoherstellers Citroën verbringt der durchschnittliche Europäer im Laufe seines Lebens vier Jahre und einen Monat im Auto.⁵ Diese Zeit ist fast vollständig durch die Fahraufgabe gebunden, wobei dabei wenige andere Tätigkeiten ausgeübt werden können. Wenn dank autonomer Fahrfunktionen von Robo-Taxis die Fahraufgabe entfällt, lässt sich die frei gewordene Zeit im Auto anders nutzen, u.a. etwa mit einer Menge neuer attraktiver Dienstleistungen ausfüllen.

⁴ Vgl. Bratzel 2014

⁵ Citroën 2016

Solche individualisierten Dienstleistungen sind denkbar in den Bereichen Business, Information, Entertainment, Wellness oder auch Konsum.

- *Die Mobilitäts-System-Revolution:* Das Verkehrsverhalten war bislang sehr monomodal geprägt. Die Menschen realisierten ihre Mobilitätsziele meist mit einem dominanten Verkehrsträger, überwiegend dem privaten Auto. Es mangelte am Angebot alternativer Mobilitätsmöglichkeiten bzw. an der Information über deren Verfügbarkeit. In den letzten Jahren haben sich nicht nur neue Mobilitätsangebote (Car-Sharing, Ride-Sharing etc.) herausgebildet. Internet-fähige Smartphones mit ihrer Geolokalisierung (GPS) ermöglichen zunehmend über Mobilitätsportale Routenplanungen unter Einbeziehung sämtlicher Verkehrsträger, welche die jeweils schnellste und günstigste Fahralternative anzeigen. Künftig werden Informationen noch stärker vernetzt, sodass Softwaresysteme die Verfügbarkeit der Verkehrsträger inklusive der Schnittstellen in Echtzeit prüfen und eine verkehrsträgerübergreifende Abrechnung über einen automatisierten Bezahlvorgang kilometergenau abwickeln können. Das bisherige monomodale Verkehrsverhaltensmuster der Menschen verwandelt sich in ein intermodales bzw. multimodales Mobilitätsmuster.

Die skizzierten Entwicklungen des Geschäftsmodells der Branche aufgrund technologischer Neuerungen und politisch-gesellschaftlicher Trends sowie dem Aufkommen neuer Akteure⁶ im Mobilitätsbereich haben in den letzten Jahren zu einer Neudefinition von Zielen und Strategien der deutschen Automobilhersteller geführt. Das kann nicht zuletzt an den Innovationstrends der Branche abgelesen werden:

- Bei den 20 globalen Automobilkonzernen, die rund 80 Herstellermarken auf sich vereinigen, verdreifachte sich die Zahl der Innovationen in letzten 10 Jahren von rund 400 auf 1.200 Neuheiten.⁷
- Gleichzeitig fand eine tektonische Verschiebung des Innovationsfokus hin zu den Technologiefeldern Connectivity, Interfaces und Fahrerassistenzsysteme/Autonomes Fahren statt, die jetzt mehr als 50 Prozent der gesamten Innovationen der Automobilhersteller ausmachen. Im Jahr 2006 lag dieser Anteil noch bei 33 Prozent.⁸
- Die Automobilhersteller vollziehen auch im Antriebsbereich seit wenigen Jahren einen signifikanten Strategiewechsel. Die Forschungs- und Entwicklungsgelder werden immer stärker hin zu alternativen Antrieben, insbesondere der Elektromobilität, umgeschichtet.

⁶ Hierzu zählen «Digital Player» wie Apple, Google, Amazon, Alibaba oder Baidu, aber auch Start-up Unternehmen wie Uber oder Didi Chuxing. Hinzu kommen weitere Akteure wie die Deutsche Bahn, Verkehrsbetriebe u.a.

⁷ Bratzel/Tellermann 2017, S. 29

⁸ CAM 2017, S.4

Die Zukunftsstrategien der globalen Automobilhersteller verdichten sich auf die Felder Elektrifizierung, Vernetzung/Connectivity, Autonomes Fahren und Mobilitätsdienstleistungen. Beispielhaft ist dafür etwa Daimler mit seinem CASE⁹ genannten Ansatz (vgl. folgenden Kasten).

CASE – Zukunftsfelder der Daimler AG¹⁰

«CASE steht für die Zukunftsthemen Vernetzung (Connected), autonomes Fahren (Autonomous), flexible Nutzung (Shared & Services) und elektrische Antriebe (Electric). Und schon heute treibt Daimler jedes dieser Themen voran, um die Zukunft der Mobilität zu gestalten.

Connected. Durch die Vernetzung unserer Fahrzeuge erlauben wir unseren Kunden nicht nur den Zugriff auf ihr Auto, wir legen damit die Grundlage für neue Serviceangebote und Dienstleistungen. So gut wie alle unsere aktuellen Fahrzeuge sind heute schon vernetzt.

Autonomous. Das Autonome Fahren definiert die Rolle des Automobils neu. Es wird nicht nur die Sicherheit und den Komfort beim Fahren erhöhen. Es gibt uns die Zeit zurück, die wir bisher mit Fahren beschäftigt waren und die wir dann für andere Dinge nutzen können. Mit der neuen S-Klasse zeigen wir schon jetzt, wie weit das Auto den Fahrer unterstützen und entlasten kann.

Shared & Services. Die Mobilität der Zukunft bietet auch mehr Flexibilität: besitzen, teilen oder mieten, aus diesen Optionen kann man seine persönliche Mobilität zusammenstellen. Von car2go über myTaxi bis zur Mobilitätsplattform moovel bieten wir unseren Kunden bereits heute ein breites Angebot an Shared-Mobility Services.

Electric. Es ist sicher, dass die Zukunft der Mobilität elektrisch sein wird. Neben der Elektrifizierung der Verbrennungsmotoren, zum Beispiel über Plug-In-Hybride, wollen wir bis 2022 mehr als zehn batterie-elektrische Pkw auf den Markt bringen, vom smart bis zum großen SUV.»

Jedes dieser Strategiefelder verändert schon für sich genommen die Auto-Mobilität in erheblicher Weise. Entscheidend ist jedoch, dass diese Zukunftsthemen

⁹ Daimler nennt seine neuen Strategiepläne CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electrified) (Daimler 2017 www.daimler.com/innovation/case/das-ist-case.html; Abrufdatum 5.12.2017).
¹⁰ www.daimler.com/innovation/case/das-ist-case.html; Abrufdatum 5.12.2017

konvergieren, d.h. gleichzeitig auftreten und im Zusammenwirken neue Produkte und Dienstleistungen sowie Geschäftsmodelle ermöglichen. Ein Beispiel: Möglich wird ein elektrisch betriebenes Fahrzeug, das vollautonom und selbständig zu den (induktiven) Ladestationen fährt, vernetzt ist mit der Mobilitätsnachfrage von Kunden und als Dienstleistung – on Demand – als Robo-Taxi geordert und mit anderen auf der Fahrstrecke geteilt werden kann.

Die Automobilindustrie muss ihre Innovationskraft damit nicht nur auf neue Technologien in neuen und teils völlig unterschiedlichen Feldern lenken. Die Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen und der Druck von branchenfremden Wettbewerbern erfordert auch erhebliches organisatorisches Lernen, bei denen neue Kompetenzen, vor allem im Bereich Software und (Mobilitäts-)Dienstleistungen, erlangt werden müssen. Dies geht einher mit drastischen Veränderungen der Unternehmensstrukturen und -prozesse. Hinzu kommt: Die Transformation der Automobilindustrie in Deutschland findet vor dem Hintergrund gewachsener reifer Industriestrukturen und hoher Wirtschafts- und Wettbewerbsstärke statt, die nicht zuletzt zu einer hohen Zahl gut bezahlter Arbeitsplätze geführt haben. Dabei hat die Automobilindustrie nicht nur das klassische «Innovator's Dilemma» (Clayton Christensen) zu beachten und den schweren «Rucksack» bislang erfolgreicher Technologien und Kundenerwartungen zu tragen. Die Automobilindustrie muss die Transformationen auch gegen die nicht wenigen «Verlierer» des Wandels innerhalb der eigenen Unternehmen und auch in der eigenen Branche durchsetzen.

Die sich daraus ergebenden multiplen Anforderungen an die Innovationsfähigkeit der Akteure der Automobilindustrie machen gleichsam einfache Aussagen zu den notwendigen, den Wandel unterstützenden Infrastrukturen unmöglich. Vielmehr muss die Diskussion und Analyse der Infrastrukturen zur Stärkung der Innovationsfähigkeit der Automobilindustrie im Wissen um die Komplexität der interdependenten Handlungsfelder erfolgen. Die ökologischen Anforderungen bzw. CO₂-Ziele sind vor diesem Hintergrund zwar ein wichtiger Treiber für die Transformation der Automobilindustrie und des Verkehrssystems, jedoch nicht der alleinige. Die relevanten materiellen, immateriellen und institutionellen Infrastrukturbedarfe unterscheiden sich in den jeweiligen Zukunftsfeldern erheblich. Schon im Antriebsbereich werden für den Markthochlauf der Elektromobilität andere materielle Infrastrukturen benötigt als für Brennstoffzellenfahrzeuge. Ähnlich differieren die erfolgskritischen technischen Infrastrukturen und immateriellen Kompetenzfelder zwischen dem Bereich der alternativen Antriebe und den Zukunftsfeldern Connectivity, vollautonomes Fahren und Mobilitätsdienstleistungen.

Im Folgenden geht es um den Status und die Innovationsanforderungen der Zukunftsfelder «Alternative Antriebe», «Connectivity/Autonomes Fahren» sowie «Mobilitätsdienstleistungen» – und zwar aus der Perspektive der Infrastrukturen der Automobilindustrie bzw. Mobilitätsbranche.

3 Alternative Antriebe und deren Infrastrukturvoraussetzungen

Alternative Antriebe sind als Zukunftsfeld im Verkehrs- bzw. Automobilsektor von besonderer Bedeutung. Wichtige Treiber aus einer globalen Perspektive der Automobilhersteller sind technologische Trends im Antriebsbereich, z.B. die Verbesserung der Batteriespeichertechnologie, Akteure bzw. neue Wettbewerber der etablierten Automobilhersteller mit antriebstechnischen Innovationen (z.B. Tesla) sowie vor allem auch (umwelt-)politische Ziele und Regulationen zur lokalen Luftreinhaltung (z.B. in Städten) und zum Klimaschutz (CO₂).¹¹ Maßgebend sind dabei die wichtigen Automobilregionen EU, USA sowie China.

Für den Automobilsektor spielen klimapolitische Ziele bzw. die zu erreichenden Flottengrenzwerte in der EU von 95g CO₂/km bis zum Jahr 2021 und die weitere Reduzierung um 30 Prozent bis zum Jahr 2030 eine dominante Rolle für die Transformation der Antriebstechnologien. Trotz weiterer Effizienzverbesserungen im Bereich der konventionellen Verbrennungsmotoren können die Automobilhersteller diese Zielwerte nicht ohne einen hohen Grad an «Elektrifizierung» der verkauften Fahrzeuge erreichen.

Als zukünftige CO₂-sparsame Antriebsalternativen gelten sowohl in der öffentlichen Diskussion in Deutschland als auch mit Blick auf die Strategien der globalen Automobilhersteller derzeit vor allem reine Elektrofahrzeuge, sogenannte «Battery-Electric-Vehicles» (BEV), und in geringerem Maße «Plug-in Hybrid Electric Vehicles» (PHEV), die neben einem Elektroantrieb und einer an der Steckdose aufladbaren Batterie auch noch einen Verbrennungsmotor besitzen.¹² Darüber hinaus beschäftigen sich einige wenige Automobilhersteller (z.B. Toyota, Hyundai, Daimler) als weitere mögliche Zukunftstechnologie auch mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen, engl. «Fuel-Cell-Electric-Vehicles» (FCEV), um künftig die festgeschriebenen Beiträge zur CO₂-Reduzierung zu erreichen.¹³ Relativ neu in der politischen Diskussion sind ferner sogenannte «E-Fuels», also synthetische Kraftstoffe, die mittels Strom aus Wasser und Kohlendioxid (CO₂) hergestellt werden. Mittels E-Fuels können Verbrennungsmotoren prinzipiell klimaneutral

¹¹ Vgl. hierzu z.B. PwC 2017, S. 10 f.

¹² Zur Erreichung der Klimaziele, auf die Deutschland sich 2015 auf der Pariser Klimakonferenz verpflichtet hat, ist u.a. eine massive CO₂-Reduzierung im Straßenverkehr erforderlich. Die Abkehr von fossilen Brennstoffen, die sogenannte Dekarbonisierung, gelingt nur über Strom. Vgl. dena 2017b, S.11; NOW 2017a, S. 15

¹³ Vgl. NOW 2017a, S. 17

betrieben werden soweit der Strom aus regenerativen Quellen stammt und das CO₂ aus der Atmosphäre bzw. Biomasse entnommen wird.¹⁴

Im Folgenden findet entsprechend der Bedeutung eine breitere Diskussion der Elektromobilität statt und ein Blick auf FCEV und E-Fuels bzw. auf verkehrspolitisch relevante Power-to-X-Pfade; danach stellen wir uns der Frage nach Erfolgsbedingungen bzw. infrastrukturellen Implikationen.¹⁵

3.1 Elektromobilität: Battery-Electric-Vehicles (BEV)

3.1.1 Klima-/Umweltrelevanz sowie Markttrends und Einflussfaktoren des Markthochlaufs

Klima-/Umweltrelevanz von Elektrofahrzeugen (BEV)

Reine batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sind Kraftfahrzeuge, die mit einem Elektromotor angetrieben werden, der die zur Fortbewegung nötige Energie aus einer Traktionsbatterie bezieht. Bei der energie- bzw. klimapolitischen Bewertung von BEV als Alternative zum Verbrennungsmotor müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

Erstens besitzen BEV eine hohe Fahrzeugeffizienz (Tank-to-Wheel), d.h. der Wirkungsgrad von BEV bei der Umwandlung von Energie in Bewegung liegt mit 80 Prozent sehr viel höher als beim Verbrennungsmotor (30–40 Prozent) oder bei der Brennstoffzelle (35 Prozent)¹⁶.

Zweitens ist beim BEV auch die *Effizienz der Kraftstoffgewinnung* (Well-to-Tank) mit rund 95 Prozent sehr hoch, wenn der Strom regenerativ erzeugt wird.¹⁷ Durch Transport und Speicherung gehen nur etwa 5 Prozent verloren, da sie den durch Wind- und Sonnenenergie erzeugten Strom ohne weitere Umwandlungsschritte unmittelbar nutzen. Unter diesen Bedingungen geben Studien für den BEV einen Systemwirkungsgrad (Well-to-Wheel) von 73 Prozent an.¹⁸ Allerdings besteht der Energiemix in Deutschland derzeit nur zu rund einem Drittel aus regenerativen

¹⁴ Vgl. dena 2017a, S. 3

¹⁵ Damit werden nur die wichtigsten CO₂-neutralen Energiequellen ausgewählt, d.h. fossile Energieträger wie Öl und Gas und deren Anwendungen werden nicht explizit behandelt.

¹⁶ Vgl. T&E 2017 (Folie). Die Energieverluste des BEV entstehen vor allem beim E-Motor sowie beim Laden der Batterie.

¹⁷ Ebd.; eine Auswertung von Studien durch T&E ergibt, dass im Well-to-Wheel bei derzeitigem EU-Mix der Stromerzeugung BEV zwischen 60–76g CO₂-Äquivalent/km ausstoßen und damit deutlich weniger als Referenz-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (143g CO₂/km) (T&E 2017, S. 3). Im Falle der Energieerzeugung mit reinem Kohlestrom kommen BEV dagegen auf eine Well-to-Wheel Bilanz zwischen 143 und 175 g CO₂/km) (vgl. ebd.).

¹⁸ Vgl. T&E 2017 (Folie); PwC (2017, S. 14) kommt auf einen Well-to-Wheel Wirkungsgrad bei BEV von 70 Prozent (FCEV=36%; Synfuels 13%); Dechema (2017, S.9) geben einen höheren Gesamtwirkungsgrad (ohne Produktion) von 86 % an; Vgl. UBA 2013, S. 20f.

Quellen. Der CO₂-Footprint aus der Energieerzeugung liegt in Deutschland bei 410 g/kWh (2015), der EU-Durchschnitt bewegt sich bei 300 gCO₂.¹⁹

Drittens ist neben dem Lebenszyklus des Energieträgers, der zum Fahren notwendig ist, auch die Produktion und die Entsorgung des Fahrzeugs (inkl. des Antriebssystems), also der komplette Lebenszyklus, relevant. Entsprechend muss etwa bei BEVs auch die im Vergleich zu Verbrennungsmotoren deutlich höheren CO₂-Emissionen der energieintensiven Batterieherstellung integriert werden.²⁰

Eine Beispielrechnung auf Basis einer kompletten Lebenszyklusanalyse kommt unter realistischen Annahmen bei einem BEV auf die Hälfte der CO₂-Emissionen pro Kilometer (minus 55 Prozent) im Vergleich zu einem Diesel-Pkw (Referenzfahrzeug) (vgl. Abb. 1). Dabei stammen rund 70 Prozent der CO₂-Emissionen des BEV aus der Stromerzeugung (hier: EU-Strommix), während sich die übrigen 30 Prozent jeweils zu 15 Prozent auf die Produktion der Lithium-Ionen-Batterien und das Fahrzeug verteilen. Durch den CO₂-intensiveren Strommix in Deutschland verschlechtert sich die CO₂-Gesamtbilanz zwar etwas. Allerdings liegt danach der CO₂-Vorteil gegenüber einem Diesel-Referenzfahrzeug noch bei 45 Prozent.^{21, 22} In Summe erscheint damit der BEV unter Beachtung des gesamten Lebenszyklus klimafreundlicher, wenngleich der Anteil der regenerativen Stromerzeugung den wichtigsten Einflussfaktor darstellt. Die antriebstechnologische Wende hin zur E-Mobilität braucht also die Energiewende, um eine hohe Klimawirkung zu entfalten.²³

¹⁹ T&E 2017, S.10.

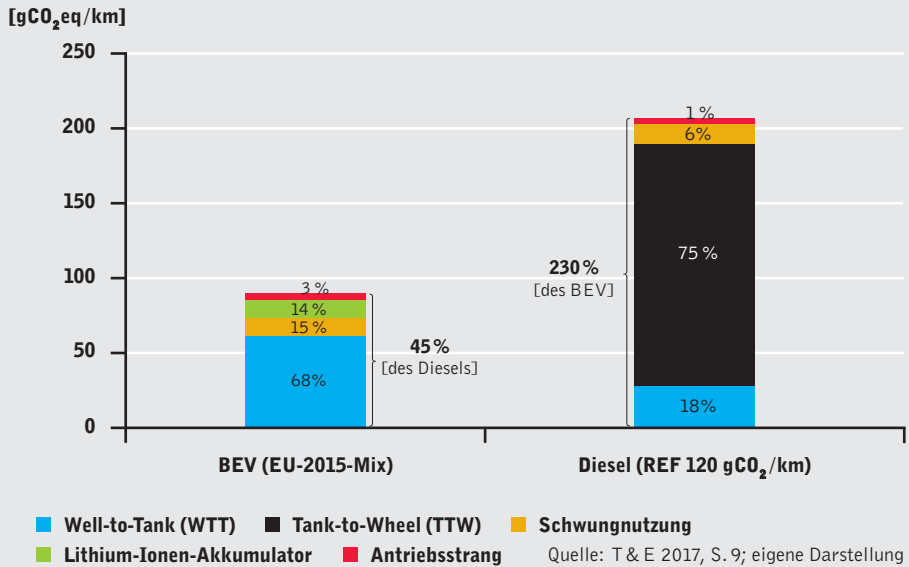
²⁰ Auf Basis des EU-Energiemixes kommen Moro und Helmers (2015) beim Vergleich der Greenhouse Gas (GHG) Emissionen eines BEV zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren auf folgendes Ergebnis: «The GHG savings due to the use of BEVs calculated with the WTW-4 range between 44 and 56 %, while according to the hybrid method the savings are lower (31–46 %). This difference is due to the GWP which arises as a result of the manufacturing of the battery pack for the electric vehicles», in: Alberto Moro, Eckard Helmers: *A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles*. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2015, doi:10.1007/s11367-015-0954-z.

²¹ T&E 2017, S. 11.; Vgl. auch Moro/Lonza 2017; zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch andere Studien auf Basis des US-Marktes, vgl. Nealer 2017. Die vom Bundesumweltministerium berechnete Klimabilanz Elektromobilität belegt den Vorsprung von Elektrofahrzeugen bei der Einsparung an CO₂-Emissionen. Die durchschnittlichen Emissionen des Elektroautos liegen demnach im Jahr 2015 zwischen 12 bis 23 Prozent und im Jahr 2020 zwischen 20 bis 29 Prozent unter denen des verbrennungsmotorischen Vergleichsfahrzeugs vgl. NPE, <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/themen/umwelt> (Abrufdatum: 9.12.2017).

²² Anmerkungen zur Grafik: «The basic assumptions are: a life time driven distance of 200.000 km and a weight of the glider of 1200kg. For the battery electric vehicle following assumption are considered: a real-life electricity consumption of 0,2 kWh/km and a 30 kWh LMO battery (average of 55 kgCO₂/kWh); 1,5 battery replacement is needed over the life time of the vehicle. The reference diesel vehicle emits 120 gCO₂/km on NEDC, which is augmented with 35 % to reflect real life driving conditions. The EU 28 mix of 2015 emits 300 gCO₂/kWh» (T&E 2017, S.9).

²³ Vgl. Agora 2017, S.13ff.

Abb. 1: Bedeutung des Lebenszyklus von BEV und Diesel-Fahrzeugen für den CO₂-Fußabdruck



Statt einer Verengung der Diskussion auf Energie- bzw. Klimaaspekte (CO₂) sind darüber hinaus weitere umweltwirksame Aspekte (z.B. negative Umweltwirkungen beim Abbau von Rohstoffen), soziale Fragen (z.B. Kinderarbeit) sowie strategische bzw. ökonomische Aspekte (z.B. Ressourcenverfügbarkeit, Rohstoffabhängigkeit) relevant und gegeneinander abzuwägen. Beispielhaft zeigen sich die Problematiken etwa an dem für Lithium-Ionen-Akkus notwendigen Rohstoff Kobalt. Neben möglicherweise lösbaren Preisanstiegen und Rohstoffabhängigkeiten²⁴ von Ländern wie Kongo und der dort üblichen Kinderarbeit beim Kobalt-Abbau (rund 60 Prozent der Kobalt-Produktion stammt aus dem Kongo), ist die Herauslösung des Metalls, das überwiegend als Nebenprodukt bei der Nickel- und Kupferproduktion anfällt, in hohem Maße umweltbelastend.

Um etwa eine verengte Umweltbetrachtung zu vermeiden, muss künftig die Ökobilanz der gesamten Lieferkette der Elektromobilität mitberücksichtigt werden. Sinnvoll ist auch die Prüfung entsprechender politischer Regulationen und die Festlegung von Standards. In jedem Fall sollten diese Aspekte in den Umweltberichten der Automobilhersteller dargestellt werden. So ist der Global Battery Alliance des Weltwirtschaftsforums, die globale Lieferketten für die Batterie-Rohstoffe zertifizieren und sicherstellen will, dass die Gewinnung etwa von Kobalt

²⁴ Vgl. Wall Street Journal: Will Tesla Die for Lack of Cobalt? www.wsj.com/articles/will-tesla-die-for-lack-of-cobalt-1511951403?mod=trending_now_1 (Abrufdatum: 10.12.2017)

mit geringerer Umweltbelastung und ohne Kinderarbeit auskommt, bislang als einziger Automobilhersteller nur Volkswagen als aktives Mitglied beigetreten.²⁵

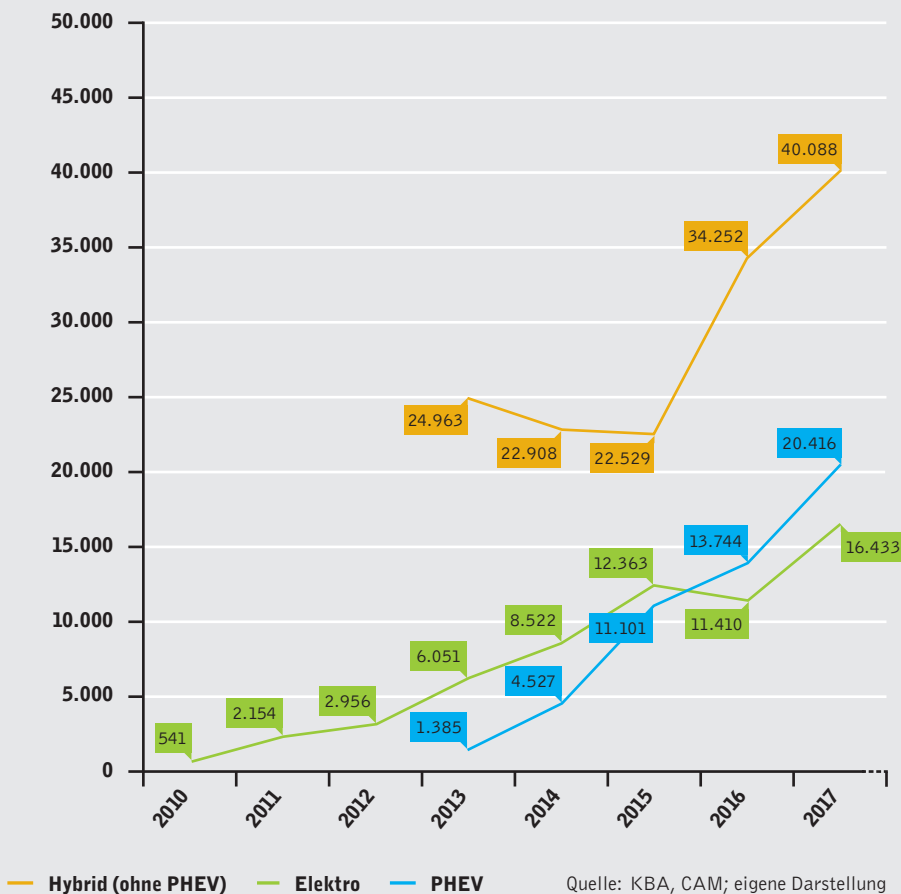
Markttrends: Schleppender Markthochlauf

Der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen kommt in Deutschland trotz einem seit Juli 2016 geltenden Umweltbonus von bis zu 4.000 Euro bislang nur schleppend voran. Im Gesamtjahr 2016 wurden insgesamt nur rund 25.000 BEV und PHEV neu

Abb. 2: Neuzulassungen von BEV, PHEV und Hybriden in Deutschland 2010–2017

Bis zum 3. Quartal 2017

[Neuzulassungen]

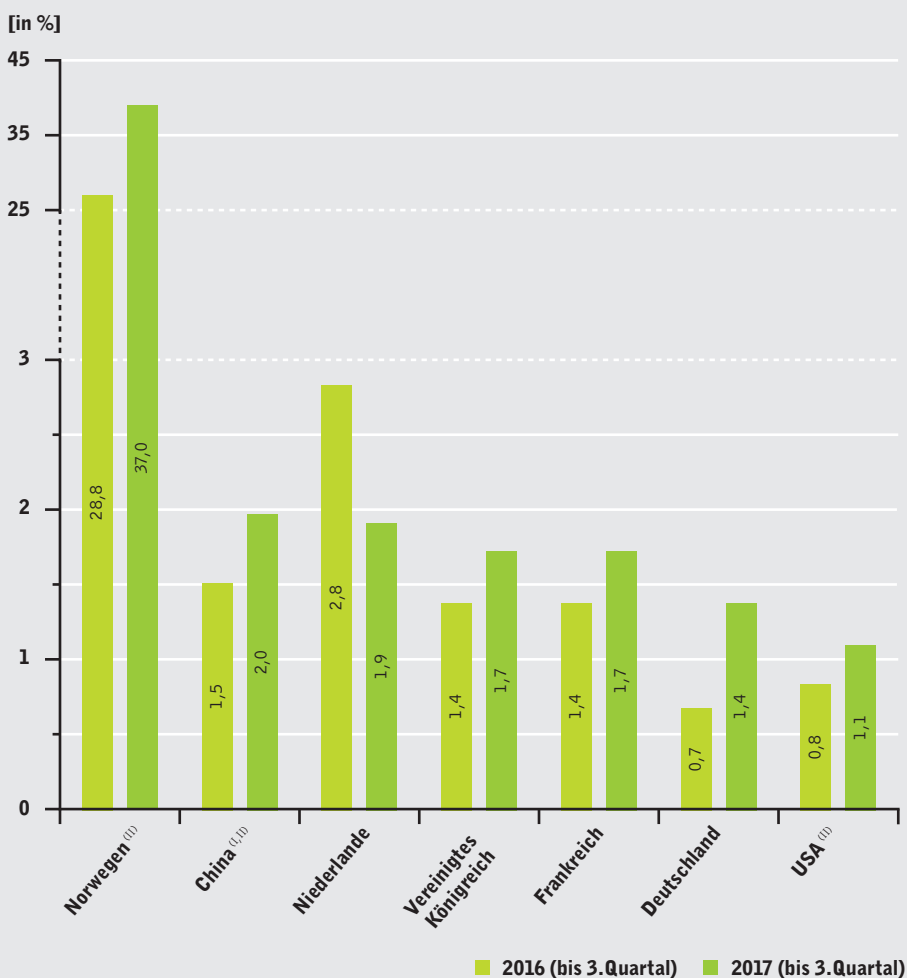


²⁵ Spiegel-Online 2017: Wettstreit um die weltweiten Kobaltreserven. Online unter: www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/autoindustrie-die-grosse-angst-vor-der-kobalt-knappheit-a-1181584-druck.html (Abrufdatum: 10.12.2017)

zugelassen, was zum Vorjahr einem stagnierenden Marktanteil von 0,75 Prozent an den Neuzulassungen entspricht (vgl. Abb. 2). Im Jahr 2017 ist auf niedrigem Niveau eine deutliche Steigerung feststellbar, so dass im Gesamtjahr 2017 die E-Fahrzeugneuzulassungen auf rund 50.000 angestiegen sind. Damit steigt der Marktanteil von E-Fahrzeugen in 2017 dann auf etwa 1,5 Prozent.

Abb. 3: Marktanteil von BEV- und PHEV-E-Fahrzeugen im Ländervergleich (2016/2017)

Vergleichszeitraum jeweils bis zum 3. Quartal



⁽¹⁾ Gerundet, inkl. kommerzielle Fahrzeuge

^(1,1) inkl. Brennstoffzelle, Hersteller in den USA teilw. geschätzt

Quelle: CAM; eigene Darstellung

Im internationalen Ländervergleich liegt Deutschland bei der E-Mobilität hinter dem größten Automobilmarkt China sowie hinter großen EU-Ländern wie Vereinigtes Königreich und Frankreich, jedoch vor den USA (vgl. Abb. 3).

Eine Ausnahmeerscheinung der E-Mobilität ist derzeit Norwegen, wo 2017 nach drei Quartalen bereits 37 Prozent E-Fahrzeuge neu zugelassen wurden. Insgesamt bewegt sich die E-Mobilität in Deutschland damit auch im internationalen Vergleich gleichwohl noch auf einem sehr niedrigen Niveau. Deutschland ist danach weit entfernt von dem Anspruch der Bundesregierung, Leitmarkt der Elektromobilität zu sein.

Aus Kundensicht liegen die Gründe für die schleppende Nachfrage vor allem an dem R-I-P-Syndrom Reichweite, (Schnelllade-)Infrastruktur und Preis, also eher an einem Angebots- bzw. Technologieproblem statt an einem Nachfrageproblem.²⁶ Danach sind E-Fahrzeuge Endkundenbefragungen zufolge im Wettbewerbsvergleich den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor meist funktional deutlich unterlegen. Insbesondere die geringe Reichweite wird zusammen mit der lückenhaften Infrastruktur als großes Hindernis gesehen.²⁷ Entsprechend ergibt es Sinn, die Modellangebots- und Technologieseite der E-Mobilität zu beleuchten.

Innovationsstärke und Produktpläne der Automobilhersteller

Das Produktangebot für E-Fahrzeuge, insbes. bei BEV, ist bislang noch sehr lückenhaft. E-Modelle werden bislang nur in wenigen Segmenten und von wenigen Herstellern angeboten, wobei diese preislich deutlich über vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren liegen.²⁸ Das ergibt sich auch aus der Analyse der Innovationen der Elektromobilität der globalen Automobilhersteller, die auf Basis der CAM-Innovationsdatenbank dargestellt werden kann. Darin werden die Neuerungen der Automobilhersteller inventarisiert und die Innovationsstärke nach einem systematischen quantitativen und qualitativen Muster bewertet.²⁹ Danach zeigt die (kumulierte) Innovationsstärke im Bereich der batterieelektrischen E-Mobilität (BEV, hier nur Serien-Innovationen, seit 2007), dass diese bislang nicht von deutschen Herstellern getrieben wird. Die höchsten Indexwerte erreichen derzeit Tesla und Renault sowie – mit deutlichem Abstand – General Motors. Es folgen mit BAIC und BYD chinesische Hersteller sowie der Renault-Allianzpartner Nissan und PSA. Die deutschen Herstellerkonzerne Daimler, Volkswagen (inkl. Audi, Porsche etc.) und BMW liegen im BEV-Innovationsranking auf den Plätzen 8–10 (vgl. Abb. 4). Deutschland ist mit seinen Herstellern entsprechend bislang auch kein Leitanbieter der reinen Elektromobilität, sondern findet sich eher im vorderen Mittelfeld (Fast Follower).³⁰ Demgegenüber können bei Plug-in-Hybriden (PHEV) die deutschen

²⁶ Vgl. hierzu: Bratzel 2017.

²⁷ Vgl. Roland Berger 2017, S. 9

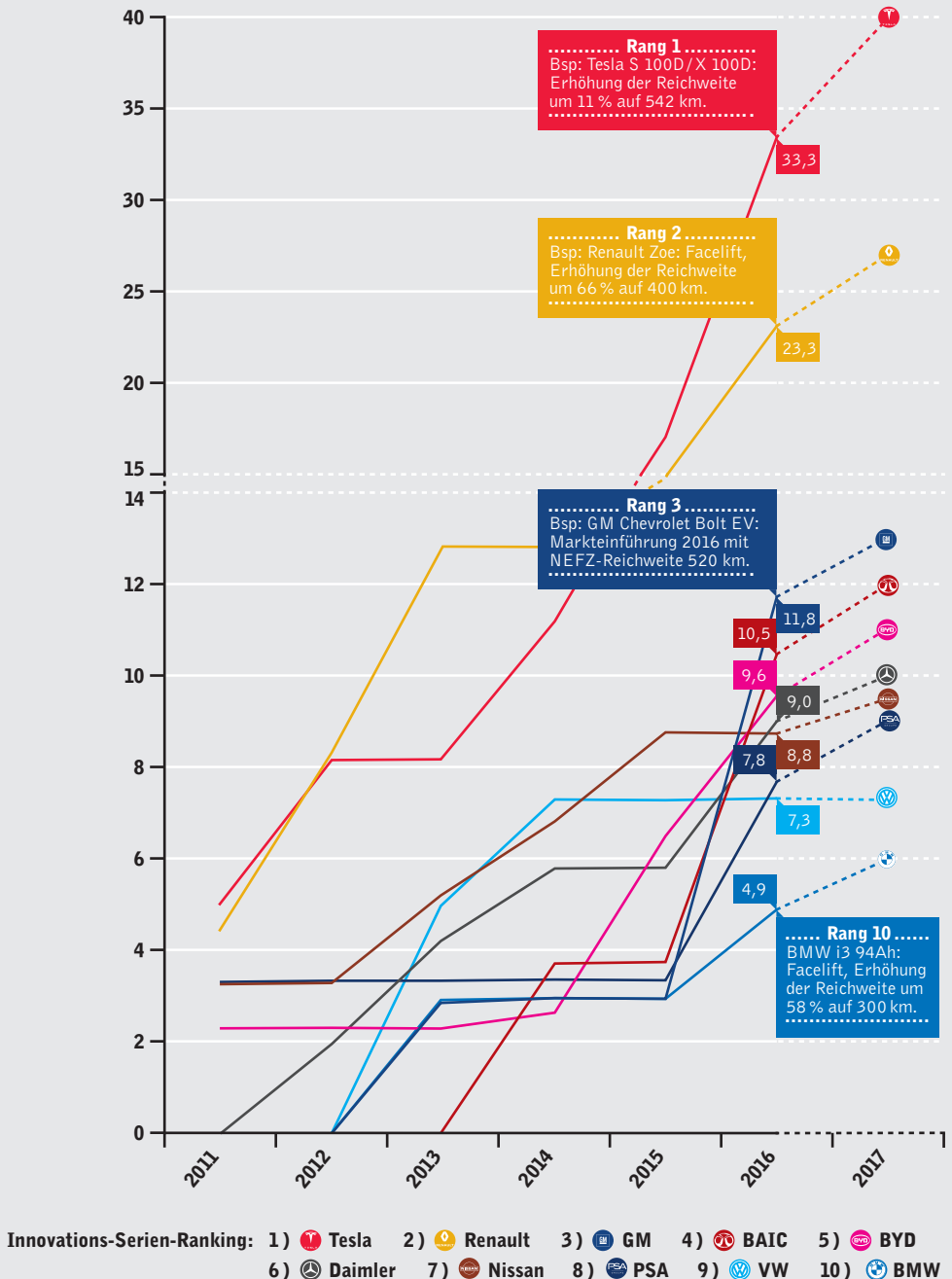
²⁸ Bratzel/Tellermann 2017, S. 56f.

²⁹ Danach erhält jede Innovation entsprechend der Seriennähe (Serie vs. Studie), der Originalität (weltneu- vs. konzern-/markenneu) und des Innovationsgrades (sehr hoch, hoch, mittel, niedrig) einen Indexwert (Score). Die Innovationsstärke eines Herstellers errechnet sich aus der Summe der bewerteten Einzelinnovationen.

³⁰ Zu einer ähnlichen Einschätzung kommt auch eine Studie von Roland Berger (vgl. Roland Berger 2017, S.10).

Abb. 4: Kumulierte Innovationsstärke von Serien-Innovationen im Bereich E-Mobilität (BEV)

[Innovations-Index]



(*) Die Innovationsstärke berechnet sich aus Serien-Innovationen: Nur BEVs (Battery Electric Vehicles).
Kumulierte Werte: Die Werte jeden Jahres werden zur Summe der Vorjahreswerte addiert. Ab 2016: Alle
Daten mit eingeschränkter Vergleichbarkeit zu den Vorjahren wegen leicht verändertem Bewertungsschema.

(**) VW-Konzern inkl. Marken: VW, Audi, Porsche (ab 2012) etc.

Quelle: CAM; eigene Darstellung

Hersteller die Innovationsführerschaft für sich reklamieren. Die kumulierte Innovationstärke bei PHEV seit 2009 zeigt, dass Volkswagen, BMW und Audi auf den vordersten Plätzen vor Herstellern wie Geely/Volvo oder General Motors rangieren.³¹

Allerdings ergibt sich aus der Auswertung der Produktpläne und -ziele von wichtigen globalen Herstellern, dass die Modellangebote für BEV und PHEV in den nächsten 10 Jahren erheblich ausgeweitet werden.³² Die deutschen Hersteller investieren derzeit massiv in die E-Mobilität (vgl. Tabelle 1). Insbesondere werden neue Technologieplattformen bzw. Baukastensysteme für E-Fahrzeuge entwickelt, auf deren Basis verschiedene Modelle unterschiedlicher Segmente gebaut werden sollen. Volkswagen, Daimler und BMW haben unisono das Ziel ausgegeben, dass im Jahr 2025 rund 15–25 Prozent ihrer weltweiten Neuzulassungen E-Fahrzeuge sein werden. Bis zum Jahr 2020 ist danach zwar nur mit einer moderaten Steigerung der Modellangebote zu rechnen. Ab 2020 steigt dagegen die Zahl der verfügbaren E-Modelle gemessen am Gesamtangebot der OEM exponentiell an. Entsprechend kann damit gerechnet werden, dass in den nächsten Jahren das Angebotsproblem nicht mehr besteht. Allerdings gibt es weitere erfolgskritische Einflussfaktoren des Markthochlaufs, die berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 1: E-Auto-Ziele und Strategien ausgewählter Hersteller

Konzern	Ziele/Strategien	Modelle und Zielwerte (Auswahl)	
		bis 2020	bis 2025
Volkswagen	■ Gründung einer neuen Modellfamilie für Elektromobilität «I.D.» ■ Weltmarktführer bei Elektromobilität ■ E-Auto soll zu einem neuen Markenzeichen des Konzerns werden: 2030 für alle weltweit ca. 300 Konzernmodelle in allen Segmenten mind. eine elektrifizierte Variante ■ Produktion des «I.D.» soll 25% effizienter sein	■ 2018: Audi Q6 e-tron («C-BEV») ■ 2019: VW Arteon (Phev) ■ 2019: Audi A3 (BEV) ■ 2020: Volkswagen «I.D.» ■ 2020: Porsche Mission E	■ 20–25% Anteil E-Autos am Gesamtabsatz (weltweit) ■ 2–3 Mio. E-Fahrzeuge p.a. ■ Roadmap E: 50 neue BEVs, 30 PHEVs ■ China: 40 Modelle mit alternativen Antrieben bis 2025, Jahresabsatz 1,5 Einheiten

³¹ Bratzel/Tellermann 2017, S. 62f.

³² Zur Analyse der mittelfristigen bis langfristigen Ziele und Strategien im Bereich der Elektromobilität wurden die entsprechenden Ankündigungen bzw. Produktpläne der relevanten Automobilhersteller für den deutschen Markt recherchiert. Untersucht wurden E-Mobilitätsvorhaben der deutschen Konzerne BMW, Daimler und Volkswagen und wichtiger globaler Hersteller wie GM, Toyota und Ford.

Konzern	Ziele/Strategien	Modelle und Zielwerte (Auswahl)	
		bis 2020	bis 2025
BMW Group	■ Sämtliche Baureihen können als reines E-Modell angeboten werden ■ E-Autos zum Preis eines vergleichbaren Benziners ■ Li-Ion-Akkus werden durch Nickel-Mangan-Kobalt-Akkus ersetzt (günstiger, ermöglichen größere Reichweiten) ■ Ab 2025 sollen auch Fahrzeuge mit Brennstoffzelle angeboten werden ■ 2017 sollen mehr als 100.000 elektrifizierte Autos abgesetzt werden	■ 2018: BMW iRoadster ■ 2019: Mini E ■ 2020: BMW X3 eDrive	■ 2021: BMW iNext ■ 15–25% des Absatzes der BMW-Group-Flotte sollen im Jahr 2025 elektrifiziert sein ■ Bis 2025 besitzen alle Verbrenner bei BMW Rekuperationssysteme (12 und 48 Volt)
Daimler	■ Neben herkömmlichen Verbrennern, verstärkter Einsatz von Plug-in-Hybriden ■ Elektrische Reichweite der Plug-in-Hybride soll auf reale 50 Kilometer steigen ■ 10 Mrd. Euro Gesamtinvestition in den Ausbau der E-Mobilität, davon 1 Mrd. Euro in Batterieproduktion	■ 2018: A-Klasse (BEV) ■ 2019: Mercedes EQC ■ 2020: Mercedes EQA	■ Bis 2022 >10 neue reine Elektromodelle ■ darunter 3 Smarts, wobei die Marke Smart zu einer reinen E-Auto-Marke werden soll
PSA Group	■ Aktuelle Modelle: Peugeot iOn, Citroen C-Zero, E-Mehari, Berlingo, Opel Ampera-e (noch unter GM)	■ Entwicklung der E-Auto-Plattform e-CMP (Common Modular Plattform) gemeinsam mit Dongfeng	■ Bis 2021: 7 Plug-in-Hybride und 4 reine Elektrofahrzeuge
Ford	■ Führender Anbieter von Elektrofahrzeugen, -Angeboten und -Lösungen ■ 4,5 Mrd. \$ Investitionen bis 2020 in neue Elektroautos und Plug-in-Hybride ■ 40% Hybrid, Plug-in-Hybrid oder BEV (bis 2020)	■ 13 elektrifizierte Modelle (u.a. Hybride) ■ 2019: Für Europa entwickeltes PHEV zum Personentransport/ als Taxi mit niedrigen Betriebskosten ■ 2020: Modell E (Crossover EV mit mind. 482 Kilometer Reichweite nach US-Norm)	■ 2021: autonom fahrendes Hybridfahrzeug für den Massenmarkt, entwickelt für die Anforderungen US-amerikanischer Car- und Ride-Sharing-Angebote

Quelle: CAM

Einflussfaktoren des Markthochlaufs der E-Mobilität

Auf den Markthochlauf der E-Mobilität haben vier Kategorien von Einflussfaktoren eine dominante Bedeutung³³: Relative Fahrzeugkosten der Elektroautos (BEV, PHEV) – im Verhältnis zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor –, Funktionalität (des E-Autos), Ladeinfrastruktur/-dauer und Regulierung/Förderung.

Die relativen Fahrzeugkosten der E-Autos (BEV, PHEV) sind ein zentraler Einflussfaktor sowohl im privaten als auch – in noch stärkeren Umfang – im gewerblichen Bereich. Hierbei vergleichen die Käufer bzw. Interessenten Anschaffungspreise sowie die Nutzungskosten von E-Autos mit denen von Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben in gleichen Segmentgruppen (z.B. Mittelklasse).³⁴ Eine dominante Bedeutung für die Endkundenpreise von E-Autos haben die Kosten für die Batterien, insbesondere für die Batteriezellen. Beim Verbrennungsmotor gibt es zwar relevante Anschaffungspreisdifferenzen zwischen benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeugen. Bei den Nutzungskosten übt insbesondere jedoch die Höhe der Kraftstoffpreise einen großen Einfluss auf die gesamten Fahrzeugkosten aus. Die relativen Fahrzeugkosten sind ein wichtiger Einflussfaktor des Markthochlaufs von E-Fahrzeugen, die vor allem durch die Batteriezellkosten determiniert wird. Derzeit sind E-Fahrzeuge noch signifikant teurer als konventionelle benzinbetriebene Modelle. Grundsätzlich wird in Studien jedoch mit weiteren deutlichen Kostensenkungspotenzialen bei Batteriesystemen gerechnet, sodass in der ersten Hälfte der 2020er Jahre die Endkundenpreise von E-Autos auf Höhe der konventionell betriebenen Fahrzeuge liegen können.³⁵

Die Funktionalität der Elektrofahrzeuge bzw. deren Alltagstauglichkeit ist aus Kundensicht eine wichtige Voraussetzung für den Kauf der Fahrzeuge. Zahlreiche Befragungen zeigen, dass hierbei insbesondere die im Vergleich zu herkömmlichen Antriebskonzepten begrenzte Reichweite der E-Fahrzeuge eine zentrale Rolle einnimmt. Privatkunden erachten eine reale Reichweite von 300–500 km als wichtige Voraussetzung für den Kauf eines E-Fahrzeugs.³⁶ Daneben ist die Breite des E-Fahrzeugangebots im Hinblick auf Segmentvielfalt und Markenvielfalt ein wichtiger

³³ Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass private und gewerbliche Käufer bzw. Nutzer nur eine begrenzt ökonomisch rationale Auswahl bestimmter Antriebsarten bei Kraftfahrzeugen in Abhängigkeit der Gesamtnutzungskosten (engl. TCO: total cost of ownership) treffen. Daneben sind weitere Faktoren wie Funktionalität (z.B. Reichweite) und infrastrukturelle Voraussetzungen (z.B. Ladeinfrastruktur) sowie erwartete regulative Rahmenbedingungen relevant. Bei gewerblichen Akteuren spielen Anschaffungspreise und Gesamtnutzungskosten freilich eine größere Rolle als bei privaten Käufern. In der notwendigerweise vereinfachten Modellierung wird angenommen, dass die Autokäufer bzw. Nutzer eine optimale Entscheidung zwischen Antriebsarten unter Berücksichtigung der für sie relevanten Parameter und Kosten treffen.

³⁴ Vgl. CAM/YouGov 2017, S. 28; McKinsey 2017, S. 13.

³⁵ Da rund 75 Prozent der gesamten Batteriekosten von der Produktionsmenge abhängen, werden Kostenreduktionen vor allem durch Massenproduktion (Economies-of-Scale-Effekte) erwartet (Vgl. eVchain.NRW 2014, S. 90). Gleichzeitig müssen die Hersteller steigenden Kosten für Abgasreinigungsmaßnahmen (Real Drive Emission Regulation von NO_x, Partikel etc.) einkalkulieren.

³⁶ Vgl. z.B. CAM/YouGov 2017.

Einflussfaktor.³⁷ Beide funktionalen Einflussfaktoren befinden sich jedoch durch die Aktivitäten der Automobilhersteller derzeit in intensiver Bearbeitung. Die Analyse der mittleren elektrischen Reichweite auf Basis der Innovationen (inkl. Studien) von 24 BEV ergibt bei neuen Modellen eine Verdopplung der Reichweite von 150 km (im Jahr 2009) auf fast 400 km in 2016.³⁸ Bei einer Norm-Reichweite von derzeit 400 km (2016) liegt der realistische Radius bei moderatem Fahrstil damit bei rund 270 km.

Die Ladeinfrastruktur ist ein weiterer relevanter Faktor, der in einem interdependenten Zusammenhang mit der Reichweite der Fahrzeuge steht. Die Verfügbarkeit bzw. Dichte von privaten und/oder öffentlichen Ladestationen sowie die Ladedauer sind kundenrelevante Faktoren, die die Einsatzmöglichkeiten von E-Autos stark determinieren. Hierbei besteht ein *Systemzusammenhang zwischen Ladeinfrastruktur und Reichweite*. Bei einer dichten Ladeinfrastruktur und kurzer Ladedauer (Schnelllademöglichkeiten) sind niedrigere Reichweiten der Fahrzeuge relativ unproblematisch, während umgekehrt geringe Lademöglichkeiten hohe Reichweiten voraussetzen.³⁹

Eine enorm wichtige Bedeutung für den Markthochlauf von E-Autos hat ferner der Faktor Regulierung und Förderung. Hierbei sind einerseits direkte und indirekte Anreize wie finanzielle Förderungen (Kaufprämien) oder Bevorzugungen wie Benutzung von Busspuren relevant. Andererseits können auch regulative Vorgaben bzw. Disincentives für konventionelle Fahrzeuge, wie etwa die CO₂-Gesetzgebung und Fahrverbote, die Wettbewerbspositionen der Antriebsalternativen entscheidend verändern.

3.1.2 Thesen zu den Infrastrukturen der Elektromobilität (BEV)

Die analytischen Anmerkungen zum Status quo der Elektromobilität, zur Klimarelevanz und zu den Einflussfaktoren des Markthochlaufs bilden die Basis für die thesenartige Diskussion erfolgskritischer Infrastrukturen. Reine Elektrofahrzeuge haben das Potential klimaneutraler Auto-Mobilität bei einem prinzipiell hohen energetischen Wirkungsgrad. Gleichzeitig zeigt sich, dass der Markthochlauf der E-Mobilität bislang in Deutschland nur schleppend vorankommt, auch weil wettbewerbsfähige BEV-Modelle von Automobilherstellern noch Mangelware sind. Allerdings sind Hersteller aus Deutschland und aus dem Ausland derzeit dabei, Technologieplattformen für E-Fahrzeuge aufzusetzen und das Modellportfolio deutlich zu erweitern.

³⁷ Vgl. CAM/YouGov 2017, S. 28; McKinsey 2017, S. 13; DLR 2015

³⁸ Vgl. Auswertungen der CAM-Innovationsdatenbank, vgl. Bratzel/Tellermann 2017.

³⁹ Vgl. CAM/YouGov 2017, S. 28; McKinsey 2017, S. 13. Zwar liegt die durchschnittliche tägliche Pkw-Fahrleistung statistisch in Deutschland unter 50 km, was prinzipiell alle BEV-Modelle auch real ermöglichen. Allerdings wollen Kunden meist die Möglichkeit haben, die Fahrzeuge auch für längere Strecken zu nutzen. Dies trifft gerade auch auf Haushalte mit nur einem Fahrzeug zu.

Vor dem Hintergrund der skizzierten Einflussfaktoren des Markthochlaufs erscheinen vor allem folgende infrastrukturelle Rahmenbedingungen als erfolgskritisch:

- Stärkere Förderung von integrierten (Schnell-)Ladeinfrastrukturen.
- Kommunale E-Flotten.
- Komplette Lebenszyklus- bzw. Well-to-Wheel-Perspektive bei Antriebskonzepten.
- Wertschöpfungsstufe Batteriezelle und Forschung/Entwicklung von Batteriezellen.
- Infrastrukturen der Sektorenkopplung fördern: Vehicle-to-Grid, Vehicle-to-Home.

Stärkere Förderung von integrierter (Schnell-)Ladeinfrastruktur

Für den Markthochlauf der E-Mobilität in Deutschland hat der Aufbau einer dichten und zuverlässigen Ladeinfrastruktur eine überragende Bedeutung. Dabei geht es gleichermaßen sowohl um materielle Infrastrukturen im öffentlichen bzw. halb-öffentlichen Raum als auch um institutionelle Rahmenbedingungen zum Aufbau und Betrieb von Ladestationen im privaten Bereich bzw. bei Unternehmen. Hier ist zwar einiges in Planung, jedoch braucht es eine erhebliche Beschleunigung und Ausweitung der Aktivitäten.

Studien ergeben auf Basis von Befragungen für verschiedene Nutzerprofile, dass prinzipiell das private Laden die höchste Attraktivität besitzt. Dort befindet sich derzeit auch mit 85 Prozent der größte Teil der Ladeinfrastruktur. Dagegen wird das Laden im öffentlichen Raum mit normaler Anschlussleistung als am unattraktivsten empfunden.⁴⁰ Entsprechend gilt es von Seiten der öffentlichen Hand und der Industrie, den Aufbau von Ladeinfrastrukturen (Wallbox) im privaten Bereich⁴¹ sowie bei Unternehmen durch entsprechende finanzielle Anreize und regulative Rahmenbedingungen zu unterstützen.

Eine große Bedeutung kann dem Peer-to-Peer-Laden künftig zukommen, also der Möglichkeit des Stromverkaufs von Privat an Privat zu Zeiten, an denen die Ladesäule nicht durch den Eigentümer selbst genutzt wird. Das Peer-to-Peer Laden würde erhebliche Anreize zum Aufbau privater Wallboxen schaffen, die Zahl und Dichte der Lademöglichkeiten drastisch erhöhen sowie den Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur senken. Hier müssen – als wichtige institutionelle Infrastruktur – rechtliche Grundlagen geschaffen werden, die es Privatnutzern gestatten, ihre Wallbox der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen und den Stromverbrauch ihrer

⁴⁰ Vgl. DLR/KIT 2016, S. 11 f.

⁴¹ Für Hausbesitzer mit Stellplatz/Garage und Stromanschluss sollte – aus Sicherheitsgründen – eine Wallbox Standard sein, die Ladeleistungen von 7,2 kW (Typ 2-Anschluss) ermöglicht, statt die üblichen 2,4 kW aus der Haushaltssteckdose. Für den Verkauf von E-Fahrzeugen an Privatkunden wären attraktive Kombi-Angebote sinnvoll, die den Kaufpreis des E-Autos mit der Wallbox (inkl. Installation) beinhalten.

«Kunden» abzurechnen. Entsprechende Internetanbieter könnten über Apps die Ladeangebote sammeln und Abrechnungsmöglichkeiten anbieten.

Ferner braucht es planungs- und baurechtliche Anpassungen zur Ladeinfrastruktur-Versorgung, sodass etwa bei Bauvorhaben wie Wohnanlagen, Tiefgaragen, Einkaufszentren etc. die Ladeinfrastruktur (Anschlüsse) vorgesehen werden müssen. Gleichsam erscheinen Abschreibungsmöglichkeiten für die Installation von Ladeinfrastruktur in Privathaushalten ebenso sinnvoll wie steuerrechtliche Anpassungen, sodass etwa Arbeitnehmer ihre Fahrzeuge auch beim Arbeitgeber laden können, ohne steuerliche Nachteile zu haben.

Zentrale Bedeutung für den Markthochlauf hat ferner die Verfügbarkeit und Qualität von öffentlichen Lademöglichkeiten: einerseits für Elektroauto-Interessierte in Städten, die häufig keine eigene Lademöglichkeit besitzen; andererseits, um das E-Auto langstreckentauglich zu machen. Der derzeitige Bestand an öffentlichen Ladepunkten in Deutschland liegt nach Angaben der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) bei 10.700 an rund 4.700 Ladesäulen. Darunter sind 530 Schnellladepunkte (Stand: September 2017).⁴² Durch ein 300 Mio. Euro umfassendes Förderprogramm, das im Februar 2017 vom Bundesverkehrsministerium aufgelegt wurde, sollen 5.000 Schnellladestationen und weitere 10.000 normale Ladesäulen entstehen.⁴³ Die Automobilhersteller BMW Group, Daimler AG, Ford Motor Company sowie des Volkswagen-Konzerns haben kürzlich das Joint Venture Ionity gegründet, um ein Netz von insgesamt rund 400 Schnellladestationen bis 2020 entlang der europäischen Hauptverkehrsachsen mit einer Leistung von bis zu 350 kW zu realisieren. Dadurch wird das Schnellladenetz auf der Langstrecke zwar dichter, allerdings sind weitere Anstrengungen für das Schnellladen auch im städtischen Bereich inklusive diskriminierungsfreier Zugänge bzw. Bezahl- und Abrechnungsmöglichkeiten notwendig, um die Kundenakzeptanz zu erhöhen.

Kommunale E-Flotten

Staatliche Institutionen und Betriebe in Bund, Land und Kommunen müssen eine Vorreiterrolle einnehmen und viel stärker als «Nachfrager» für E-Mobilität (Fuhrparks/Flotten) auftreten. In Ländern wie China hat die Regierung auf die freilich stärker abhängigen kommunalen Institutionen und Betriebe über verschiedene Instrumente erheblichen Druck ausgeübt und dadurch hohe Nachfrageimpulse nach Elektrofahrzeugen im gewerblichen Bereich bzw. öffentlichen Nahverkehr ausgelöst. In Deutschland befinden sich rund drei Millionen Fahrzeuge in öffentlichen Fuhrparks, wobei Schätzungen von einem Beschaffungsvolumen von 480 Milliarden Euro jährlich ausgehen.⁴⁴ Entsprechend müssen weitere Anreize

⁴² Vgl. NPE, <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/themen/ladeinfrastruktur> (Abruf: 30.11.2017).

⁴³ Durch eine entsprechende Einigung auf EU-Ebene unterstützt künftig jeder Ladepunkt in der Europäischen Union und jedes Fahrzeug europäischer Hersteller das Combined Charging System (CCS), mit dem die Nutzer sowohl normal- als auch schnellladen können.

⁴⁴ Bundesverband eMobilität 2017. Online unter: www.bem-ev.de/politischer-forderungskatalog-2017-2018 (Abrufdatum: 10.12.2017).

geschaffen werden, sodass in öffentlichen Ausschreibungen für Fahrzeuge Umweltaspekte eine deutlich größere Rolle spielen.

Komplette Lebenszyklus- bzw. Well-to-Wheel-Perspektive bei Antriebskonzepten
Zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit und der Klimaeffekte von Pkw-Antriebsalternativen ist eine komplette Lebenszyklus- bzw. Well-to-Wheel-Perspektive unabdingbar. Die bisherigen wissenschaftlichen Ergebnisse sind hierzu noch bruchstückhaft und teilweise auch schillernd, da unterschiedliche Annahmen in die Modellberechnungen einfließen. Entsprechend braucht es nicht nur weitere wissenschaftliche Untersuchungen zu dieser Thematik, sondern auch einen ideologiefreien öffentlichen Diskurs mit dem Ziel eines Konsenses zwischen Politik, Wissenschaft und Industrie zu den Ergebnissen. In der Folge müssen die regulativen Rahmenbedingungen von einem Output- bzw. End-of-Pipe Ansatz der Fahrzeugregulierung zu einem gesamthaften Input- bzw. Lebenszyklus-Ansatz der Fahrzeugregulierung ersetzt werden, die so weit wie möglich technologieneutral, also unabhängig von bestimmten Antrieben ist.

Wertschöpfungsstufe Batteriezelle und Forschung/Entwicklung von Batteriezellen
Zwei Drittel der Wertschöpfung des Antriebs eines reinen Elektroautos entfällt auf das Batteriesystem, wobei davon rund 70 Prozent die Batteriezelle (Lithium-Ionen) ausmacht. Dieses wichtige Wertschöpfungselement wird derzeit vor allem von Zulieferunternehmen aus Japan, Südkorea und China gefertigt. In Deutschland gibt es bislang keine relevante Batteriezellentwicklung und -fertigung. Damit begibt sich die Automobilindustrie in Deutschland in einem Kernbereich des Autos der Zukunft in große Abhängigkeit von asiatischen Unternehmen. Bei möglichen Produktionsengpässen der Batteriezellanbieter, die beim Markthochlauf der E-Mobilität entstehen können, oder bei Innovationsfortschritten könnte die deutsche (Premium-)Automobilindustrie das Nachsehen haben.

Entsprechend braucht Deutschland Infrastrukturen für eine nachhaltige Batteriezellforschung und -entwicklung. Bei namhaften Automobilzulieferunternehmen wie Bosch und Continental gibt es bereits entsprechende Überlegungen zum Aufbau dieser Kompetenz. Klar ist, dass die Rückstände in dieser Batteriegeneration nicht mehr aufgeholt werden können. Es geht also darum, die (vor allem immateriellen) Infrastrukturen in Forschung und Entwicklung für die nächste bzw. übernächste Batteriegeneration zu schaffen. So versprechen etwa Festkörperzellen im Vergleich zu heute eine doppelte Energiedichte bei einer Halbierung der Kosten. Allerdings ist auch klar: Hierfür wären Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen im Milliardenbereich notwendig, denen zunächst keine Einnahmen gegenüberstehen.

Unter Beachtung möglicher kartellrechtlicher Einschränkungen wäre eine konzertierte Aktion von Automobilindustrie, Bundesregierung und Gewerkschaften sinnvoll, um die Kompetenzen im Kernbereich der Wertschöpfung der Elektromobilität in Deutschland oder gar in Europa zu sichern. Entsprechende Vorschläge der EU-Kommission, ein Konsortium zur Batteriefertigung zu gründen

(«Airbus für Batterien»), sind nachhaltig zu unterstützen.⁴⁵ Die Bündelung der Nachfrage von Batteriezellen von deutschen Herstellern oder gar europäischen Herstellern erbrächte bereits enorme Umsatzpotenziale, wodurch auch die nötigen Produktivitätsverbesserungen bzw. Economy-of-Scale-Effekte erreichbar wären. Gleichzeitig braucht es den Aufbau einer universitären Ausbildungs- und Forschungsinfrastruktur auf allen Ebenen, z.B. im Bereich der Materialwissenschaften, Zellchemie und Produkttechnologie von Batterien.

Infrastrukturen der Sektorenkopplung fördern: Vehicle-to-Grid, Vehicle-to-Home Elektrofahrzeuge könnten zukünftig als mobile Speicher dienen und einen Beitrag zur Netzstabilität leisten.⁴⁶ Schwankungen, die durch den vermehrten Einsatz von Sonnen- und Windkraft entstehen, wären so auszugleichen. Elektrofahrzeuge könnten zukünftig beispielsweise dann geladen werden, wenn viel erneuerbarer Strom eingespeist oder durch das Laden eine lokale Überlastung des Netzes verringert wird. Dazu müssen die Fahrzeuge mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien in intelligente Stromnetze (Smart Grids) eingebunden werden. Neue Dienstleistungen könnten zudem dafür sorgen, dass die Autos geladen werden, wenn der Strom besonders günstig ist. Auch der umgekehrte Weg über dynamische Preismodelle könnte dazu führen, bei Spitzenbelastungen alle vom (teureren) Stromtanken abzuhalten, die nicht zwingend darauf angewiesen sind.

Sektorenkopplung bedeutet mehr als den Strombedarf des Verkehrs und den Ausbau der Erzeugungskapazitäten für Strom aus EE aufeinander abzustimmen. Die Kopplung der Sektoren Verkehr und Strom birgt auch die Gefahr, das Stromsystem zu destabilisieren. Dies könnte der Fall sein, wenn viele Elektrofahrzeuge dann geladen werden, wenn nur wenig Strom erzeugt wird oder andere Sektoren viel Strom nachfragen. Diese Ambivalenz wird deutlich, wenn man bedenkt, dass das Stromsystem nur dann von den Flexibilitätsoptionen des Verkehrssektors profitiert, wenn das Aufladen intelligent gesteuert wird und erst dann stattfindet, wenn das entsprechende Angebot vorhanden ist. Sektorenkopplung kann auch bedeuten, Strom aus der Batterie eines Elektroautos in das Netz zurück zu speisen. Dieses bidirektionale Laden ist technisch möglich. Elektrofahrzeuge erfüllen dann die Funktion eines wichtigen Kurzzeitenergiespeichers – wichtig deshalb, weil die zunehmend auf Wind und Sonne basierende Stromerzeugung wetterbedingt unstet ist.⁴⁷

Zuweilen wird mehr Strom erzeugt als nachgefragt, zuweilen wird aber auch zu wenig Strom erzeugt. Um die Lücken zwischen Angebot und Nachfrage beherrschbar zu machen, sind flexible Strukturen bei Verbrauchern und Erzeugern einzurichten. Gleichzeitig sind Stromspeicher nötig. Der potenziell erhebliche

⁴⁵ Süddeutsche Zeitung: Europas Autohersteller sollen zusammen Batterie bauen (18.7.2017). Online unter: www.sueddeutsche.de/wirtschaft/e-mobilitaet-europas-autohersteller-sollen-zusammen-batterie-bauen-1.3669877

⁴⁶ Vgl. www.energiezukunft.eu/e-mobilitaet/forschung/mobiler-pufferspeicher-elektrofahrzeug-gn101917 (Abruf zuletzt: 15.12.2017)

⁴⁷ Vgl. Agora 2017, S.74

Beitrag der auf Strom basierenden Power-to-X-Technologien im Bereich Wasserstoff und Synfuels wird in Kap. 3.3 dargestellt.

3.2 Brennstoffzellen-Fahrzeuge/Fuel-Electric-Vehicles (FCEV)

3.2.1 Konzeptübersicht, Umwelt-/Klimawirkungen und Marktentwicklung

Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) werden mit Elektromotoren betrieben, deren Strom aus einer Brennstoffzelle stammt. Wasserstoff und Sauerstoff reagieren in einem chemischen Prozess, bei dem Energie als Strom freigegeben wird. Die Antriebstechnologie ist als Elektrofahrzeug ohne Emissionen einzuordnen, welches im Fahrbetrieb nur Wasserdampf in die Umwelt entlässt.⁴⁸ Ein wesentlicher Unterschied im Technikkonzept eines FCEV (im Vergleich zum BEV) betrifft die Stromerzeugung bzw. -versorgung der Elektromotoren im Fahrbetrieb. In den Brennstoffzellen-Stacks wird Platin als Katalysator eingesetzt und dadurch in einem elektrochemischen Prozess Strom erzeugt.⁴⁹ Die in der Brennstoffzelle erzeugte elektrische Energie wird direkt in Elektromotoren in Bewegung umgewandelt und je nach Hersteller auch in einer Traktionsbatterie zwischengespeichert.⁵⁰ Als zentraler Energiewandler übernimmt die Brennstoffzelle dabei auch die Funktion der Lichtmaschine und liefert den Strom für die gesamte Elektronik und andere Verbraucher im Fahrzeug.⁵¹

Klima-/Umweltrelevanz von FCEV

Als Konzeptvorteile eines FCEV gelten die emissionsfreie Herstellbarkeit und Verbrennung von grünem Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien (EE) per Elektrolyse hergestellt wird. Hinzu kommen deutlich kürzere Tankvorgänge (etwa drei bis vier Minuten) als beim Batterieladen und die lokale Emissionsfreiheit sowie Reichweiten zwischen 400 und 800 km.⁵² Aus der Energie- bzw. CO₂-Perspektive sind FCEV beim Wirkungsgrad deutlicher ineffizienter als BEV. Beim Einsatz von EE (Fokus Wind und PV) entstehen bei der Wasserstoffgewinnung (Well-to-Tank) durch die Elektrolyse sowie bei der Speicherung und dem Transport des Wasserstoffs Wirkungsgradverluste von bereits rund 50 Prozent. Hohe Effizienzeinbußen erzeugt auch der Tank-to-Wheel-Prozess, vor allem durch die Konversion von Wasserstoff zu Strom. Der Gesamtwirkungsgrad (Well-to-Tank) liegt Studien zufolge nur zwischen 22 und 36 Prozent.⁵³ Mit einem Energiemix, der dem heutigen

48 Vgl. <https://cleanenergypartnership.de/h2-mobilitaet/brennstoffzellenantrieb/?scroll=true>

49 Vgl. www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/index.shtml

50 Vgl. www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf

51 Vgl. <https://cleanenergypartnership.de/h2-technologie/?techvar1=3&techvar2=1&techvar3=1>

52 Vgl. Schneider 2017, S. 867f.; Jülich 2013, S. 4

53 Vgl. PwC 2017, S. 14.; Dechema 2017, S. 9; T&E 2017 (Schaubild).

entspricht, etwa 1/3 EE, verschlechtert sich entsprechend die CO₂-Bilanz von FCEV – genau wie beim BEV.⁵⁴

Wasserstoff ist wie Strom ein Energieträger, keine Primärenergie-Ressource. Er kann Energie speichern und liefern, kommt aber in reiner Form in der Natur nicht vor. Entsprechend muss er aus anderen Stoffen gewonnen werden, in denen er enthalten ist.⁵⁵ Wasserstoff kann in unterschiedlichen technischen Verfahren hergestellt werden: (1) durch thermische Konversion fossiler Energieträger per Dampfreformierung, partielle Oxidation oder autotherme Reformierung, (2) durch biochemische Konversion aus Biomasse und (3) durch Elektrolyse aus Strom. Als Zwischenprodukt entsteht Synthesegas – daraus das Endprodukt Wasserstoff.⁵⁶ Heute wird Wasserstoff weltweit überwiegend auf fossiler Basis hergestellt, ca. 48 Prozent Erdgas, 30 Prozent Erdöl, 18 Prozent Kohle – und 4–5 Prozent aus Elektrolyse.⁵⁷ Relevant für einen wirkungsvollen Beitrag zur CO₂-Reduzierung als Beitrag des Verkehrssektors zur Energiewende ist jedoch ausschließlich Wasserstoff aus Elektrolyse von Wind- oder Solarenergie. Der langfristige Ausblick einer nahezu emissionsfreien Wasserstoffproduktion per Elektrolyse aus EE erscheint aus heutiger Sicht als eine Voraussetzung zur Erreichung der Klimaziele 2050. Neue Analysen zeigen, dass leistungsfähige Infrastrukturen für die Kraftstoffproduktion aus Wasserstoff realisierbar wären.⁵⁸

Zur **Speicherung** von Wasserstoff kommen eine Reihe unterschiedlicher Speichertechnologien⁵⁹ in Frage: (1) als LH₂ tiefkalt verflüssigt bei –253 °C in Lagertanks (hoher Energiegehalt und weniger Speicherbedarf, dafür rund 30 Prozent Energieverlust bei Verflüssigung) oder (2) als komprimiertes Wasserstoffgas (CGH₂) bei Umgebungstemperatur in Hochdruckbehältern (hoher Platzbedarf, weniger Energiedichte).⁶⁰ Neben Verflüssigung und Kompression gibt es stoffliche Verfahren wie bspw. LOHC zur Speicherung in Flüssigkeiten oder Feststoffen.⁶¹ Der Fokus der Darstellung liegt auf Wasserstoff, der per Elektrolyse aus überschüssigem erneuerbarem Strom gewonnen wird. Er kann bei entsprechendem Bedarf direkt als Energieträger genutzt werden.⁶² Im Verkehrssektor ergibt sich durch die Verwendbarkeit von Wasserstoff als Brennstoff und als Stromspeicher (unterschiedliche P2X-Technologien) die Chance, die Flexibilität in einem Gesamtsystem mit hohen Anteilen volatiler erneuerbarer Energien zu vergrößern.⁶³

⁵⁴ Vgl. NOW 2017a, S.17

⁵⁵ Vgl. <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>

⁵⁶ Vgl. Überblick in Shell 2017 Wasserstoffstudie, S.12

⁵⁷ Vgl. Jülich 2013, S. 4

⁵⁸ Vgl. Dechema 2017, S. 9 und S.11ff.: Überblick über Wirkungsgradunterschiede unterschiedlicher P2X-Pfade für die Mobilität und zu Produktionskomplexen Offshore und Photovoltaik

⁵⁹ Vgl. Shell 2017, S. 22ff.

⁶⁰ Vgl. Linde o.J., S. 9ff.

⁶¹ LOHC ist ein Forschungszeitweig mit ersten Anwendungen, derzeit aber im sehr frühen kommerziellen Pilotstadium. Vgl. Shell 2017, S. 24

⁶² Vgl. Shell 2017, S. 16

⁶³ Vgl. NOW 2017a, S. 38

Grundsätzlich bieten sich für Wasserstoff drei **Transportalternativen**, die teils in technischer Abhängigkeit vom Herstellverfahren stehen:

- 1) Pipelines, effizient bei großen On-Site-Anlagen und Wasserstoff-Verbundsystemen, die bislang irrelevant für die Infrastruktur an Wasserstofftankstellen sind.
- 2) Einspeisung in vorhandene Erdgas- oder Stadtgasnetze; hier gibt es Erprobungsphasen für Wasserstofftankstellen. Der Wasserstoff muss allerdings zuvor hochrein aufbereitet werden.
- 3) LKW-Transport, entweder mit speziellen LH₂-Tankwagen für tiefkalt verflüssigten Wasserstoff oder CGH₂-Hochdruck-Trailern. Der CGH₂-LKW-Transport ist bislang der präferierte Versorgungsweg für errichtete Infrastruktur an 700-bar-Wasserstofftankstellen.⁶⁴

Mitte 2017 waren in Deutschland lediglich 28 Wasserstoff-Tankstellen in Betrieb und 31 weitere im Bau. Auch weltweit war die Wasserstoff-Infrastruktur Ende 2016 mit lediglich 210 Tankstellen und rund 2.500 Brennstoffzellenfahrzeugen ein absolutes Nischenphänomen ohne kommerzielle Relevanz. Seit 2016 beginnt ein langsamer Hochlauf. Nach Planungen des privaten Konsortiums H₂ Mobility Deutschland sollen bis 2023 etwa 400 Tankstellen verfügbar sein. Im Rahmen des «Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie» (NIP) werden die ersten 50 davon öffentlich gefördert. Für eine breite Nutzung von FCEV kalkuliert die Strategieplattform «Power-to-Gas» mit einem Bedarf für Deutschland von insgesamt 1.000 Tankstellen.

Die Kosten für eine Wasserstofftankstelle haben sich zwischen 2008 und 2014 von zwei auf eine Million Euro im Jahr halbiert. Das Wuppertal Institut und Shell schätzen, dass weitere Kostensenkungspotenziale von rund 50 Prozent pro Tankstelle in den kommenden Jahren erreichbar sind. Um gasförmigen Wasserstoff tanken zu können, wird dieser bei Umgebungstemperatur auf 350 bar verdichtet. Der Tankvorgang lässt sich verkürzen, wenn in der Befüllstation der Druck auf 700 bar (für PKW) erhöht wird. Bezüglich der Tankinfrastruktur ist zu beachten, dass derzeit die meisten PKW-Hersteller die 700-bar-Technik bevorzugen, wobei es mit der Kyrowasserstoff-Tanktechnik jedoch noch eine technische Alternative gäbe.

Marktentwicklung und Strategien

Die Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen bewegt sich noch in einem Frühstadium. Zwar sind weltweit namhafte Hersteller wie Toyota (Toyota Mirai) oder Hyundai (Hyundai ix35 Fuel Cell) bereits mit kleineren Stückzahlen in Serie. Die Marktdurchdringung mit FCEV ist jedoch noch äußerst gering. Am 1.1.2016 waren etwa in Deutschland nur 215 FCEV zugelassen.⁶⁵ In den USA, Japan und Korea sind die Zulassungen nur unwesentlich höher.

⁶⁴ Linde o.J. / Airliquide o.J. unter www.the-linde-group.com/de/clean_technology/clean_technology_portfolio/hydrogen_energy_h2/h2_one_stop_shop/h2_distribution_and_storage/index.html und <https://industrie.airliquide.de/lieferformen/tankwagen> (Abruf 14.11.2017)

⁶⁵ Vgl. NOW 2017b, S. 20

Neben den Technologieführern Toyota und Hyundai zeigen im Bereich Brennstoffzelle noch Honda und Daimler merkliche Aktivitäten. Honda brachte in 2016 den Clarity Fuel Cell auf den japanischen Markt, der lediglich an ausgewählte Kunden (z. B. staatl. Einrichtungen) in Europa und Kalifornien verleast wird. Das Mittelklassemodell verfügt über eine um 33 Prozent verkleinerte Brennstoffzelle und eine Reichweite von 750 km (JC08-Standard). Unter den deutschen Automobilherstellern hat vor allem Daimler erhebliche Kompetenzen im Bereich FCEV und bringt aktuell einen GLC F-Cell auf den Markt, der sich mit einer neun kWh starken Lithium-Ionen-Batterie extern per Plug-in-Technologie aufladen lässt und damit eine kombinierte Reichweite von ca. 500 km im NEFZ erreicht.⁶⁶ Auch hier ist zunächst eine Kleinserie geplant (ca. 1000 Stück). Ansonsten handelt es sich bei den Aktivitäten der deutschen Hersteller BMW und Volkswagen (Konzern) wie auch von einigen anderen Herstellern vor allem um Studien, bei denen keine baldige breite Serieneinführung zu erwarten ist.

3.2.2 Thesen zu den Infrastrukturen von Brennstoffzellen-Fahrzeugen

Brennstoffzellenfahrzeuge haben unbestreitbare Konzeptvorteile (Reichweite, schnelle Betankung, lokale Emissionsfreiheit, bedingte CO₂-Neutralität) und können im Falle einer Wasserstoffproduktion aus EE prinzipiell zur CO₂-Minderung des Verkehrs beitragen. Allerdings sind folgende Herausforderungen zu meistern:

Zum Ersten ist der energetische Gesamtwirkungsgrad im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten (BEV) sehr viel geringer. Das bedeutet, dass der notwendige Energieeinsatz mittels regenerativer Quellen (Wind, Sonne) sehr viel höher ist. Das machen Szenarioanalysen deutlich: Im Falle einer kompletten Abwicklung der jährlichen Fahrten in Deutschland durch Brennstoffzellenfahrzeuge wäre ein zusätzlicher Strombedarf von 344 TWh notwendig, was rund 66 Prozent der derzeitigen Gesamtnachfrage (525 TWh) betragen würde. Die Kosten für Produktion, Speicherung und Infrastruktur wird auf 479 Mrd. Euro geschätzt, davon rund 344 Mrd. für neue Kraftwerke.⁶⁷ Zum Vergleich: Der zusätzliche Strombedarf im Falle der Durchführung aller Fahrleistungen in Deutschland mit BEVs läge nur bei 176 TWh (+33 Prozent), während sich die Kosten nur auf 301 Mrd. Euro belaufen (176 Mrd. Euro für neue Kraftwerke). Entsprechend wäre der Komplettaufbau einer materiellen Infrastruktur für FCEV wesentlich ineffizienter und teurer als jener für reine E-Fahrzeuge (BEV).⁶⁸

Zum Zweiten sind die Infrastrukturen für die Betankung noch nicht ausreichend. Während die Nutzung von Elektrofahrzeugen auf eine zum Teil bestehende Strominfrastruktur aufbauen kann (Leitungsnetz, Privathaushalte/Garagen), muss die H₂-Infrastruktur in Deutschland mit hohen Kosten praktisch völlig neu

⁶⁶ Vgl. Daimler 2017b: Mercedes-Benz GLC F-CELL, <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Unter-der-Lupe-Mercedes-Benz-GLC-F-CELL-Die-Brennstoffzelle-bekommt-einen-Stecker.xhtml?oid=11111320> (Abrufdatum: 7.12.2017)

⁶⁷ Vgl. PwC 2017, S.15 f.

⁶⁸ Ebd.

errichtet werden. Gleichzeitig wäre ein nationaler Infrastrukturausbau nicht ausreichend, da z.B. im Urlaub Privatanutzer ihre Brennstoffzellenfahrzeuge auch grenzüberschreitend benutzen wollen.

Zum Dritten sind die variablen Kosten für die Wasserstoff-Betankung durch die aufwendige Produktion, Speicherung und Lieferung von Wasserstoff noch höher als beim BEV. Die erreichbaren Kosten der Wasserstoffherstellung für PKW künftiger Generationen schätzt Shell jedoch mittel- und langfristig auf 7,5 bis 9,5 Euro/kg. Dadurch lägen in einem Kraftstoffkosten-Vergleich der Antriebskonzepte Brennstoffzellenfahrzeuge dann nur wenig über den Betriebskosten für BEV.⁶⁹

Zum Vierten müssen die Kosten der Brennstoffzelle, insbesondere des «Stacks», noch deutlich günstiger werden, damit diese im Vergleich zu anderen Antriebsalternativen wettbewerbsfähig sein können. Hier sind entsprechend weitere Prozessinnovationen der Hersteller notwendig, um etwa den Anteil von Platin weiter zu reduzieren. Elf deutsche Unternehmen der Autoindustrie haben dafür Mitte 2017 die Initiative «Autostack-Industrie» gegründet, die das Ziel hat, durch Kostensenkungen bis 2020 die Basis für eine breite kommerzielle Einführung von FCEV in Deutschland und Europa zu legen.⁷⁰

Fazit

Ein (bezogen auf BEV) zeitlich nachgezogener Aufbau einer Wasserstoff-Verkehrsinfrastruktur und die Verbreitung von FCEV als weitere klimaneutrale Elektroauto-Technologie könnte einen zweiten, komplementären Entwicklungspfad darstellen (BEV plus FCEV). FCEV könnten unter bestimmten Bedingungen mittel- und langfristig zur Marktreife gebracht werden.

Ein langfristiges Nebeneinander der beiden Elektro-Antriebskonzepte könnte technisch und ökonomisch sinnvoll sein: BEV für kürzere Strecken und leichtere Fahrzeuge, die nicht im Dauerbetrieb sind, FCEV für längere Strecken und stark genutzte höhere Fahrzeugsegmente, bei denen die Entkopplung von Stromerzeugung und -verbrauch und schnelles Tanken für den funktionalen Nutzwert entscheidend sind. Zu denken wäre u.a. an (mittel-)schwere Busse, Nutzfahrzeuge, Einsatzfahrzeuge usw., bei denen zudem besonders hohe CO₂-Einsparungen zu erwarten wären. Für eine Unterstützung des FCEV Markthochlaufs wären u.a. der weitere gezielte punktuelle Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur in Städten bzw. an Autobahnen und Regelungen zur Bevorzugung bei der Beschaffung im öffentlichen Sektor mit entsprechenden Kaufanreizen denkbar. Durch den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur würden FCEV auch für Unternehmen und Privatkunden attraktiver, wenn die Total Cost of Ownership (TCO) der Brennstoffzellenfahrzeuge durch Kostenreduktionen der Technologie (ähnlich wie bei BEV) weiter fallen würden.

⁶⁹ Vgl. Shell 2017, S. 49. In einem Kraftstoffkosten-Vergleich der Antriebskonzepte lägen danach Benziner unter der Annahme einer Preisspanne zwischen 1,50 und 2,50 Euro/l bei den 100km-Kraftstoffkosten zwischen 9 und 14 Euro, Benziner Hybride zwischen 6 und 9 Euro, BEV bei Strompreisen von 20–35ct/kWh zwischen 3 und 5,50 Euro und FCEV bei den o.g. Wasserstoffkosten zwischen 4 und 6 Euro (vgl. ebd.).

⁷⁰ NOW 2017a, S. 22

Entsprechend wären einerseits weitere Grundlagenforschungen und Testprojekte sinnvoll. Andererseits sollte jedoch der regulatorische Rahmen so angelegt sein, dass unternehmerische Anreize zur Herstellung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit von FCEV bestehen bleiben.

3.3 Power-to-X-Pfade im Verkehrssektor

Die Konvertierung von erneuerbaren Energien (EE) über Wasserstoff in andere Energieträger wird unter Power-to-X (P2X) zusammengefasst und in mehrere Nutzungsrouten aufgeteilt. Power-to-Gas als Methanpfad, Power-to-Liquid als Pfad synthetischer Kraftstoffe oder Power-to-Power als Rückverstromung in Brennstoffzellen. P2X ist derzeit aber eher ein Forschungsfeld als eine marktreife Technologie. Die größten Hürden beim Aufbau neuer Infrastrukturen sind die energetischen Verluste durch die Vielzahl erforderlicher Umwandlungsschritte.⁷¹

Synthetische Kraftstoffe oder Synfuels sind ein Sammelbegriff für synthetische Kohlenwasserstoffe, die durch Strom hergestellt werden.⁷² Synfuels werden in Verarbeitungsprozessen wie der Fischer-Tropsch-Synthese zu Benzin, Diesel oder Kerosin umgewandelt und können in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Dieses Thema wird intensiv beforscht und im kleinen Maßstab in Pilotanlagen technologisch verfeinert. Der Gesamtwirkungsgrad von Synfuels liegt jedoch nur bei 11–13 Prozent und ist damit niedriger als bei FCEV (36 Prozent) und BEV (70 Prozent).⁷³ Es entstehen im Well-to-Tank Prozess hohe Energieverluste durch die Kraftstoffproduktion (Elektrolyse und Verarbeitung) und entsprechende Umwandlungsverluste durch den Verbrennungsmotor (Tank-to-Wheel).⁷⁴ Ein Ersatz der gesamten Fahrleistungen in Deutschland auf Basis von synthetischen Kraftstoffen würde nach einem Szenario von PwC einen zusätzlichen Energiebedarf von 1.079 TWh erfordern, also etwa doppelt so viel wie der gesamte derzeitige Strombedarf in Deutschland.⁷⁵ Damit wären die in Verbrennungsmotoren eingesetzten Synfuels doppelt so teuer wie die Wasserstoffbereitstellungskosten für die Brennstoffzellenfahrzeuge und dreimal so teuer wie die Stromkosten bei BEV.⁷⁶

Wasserstoff kann entweder in Brennstoffzellen direkt genutzt oder über P2X-Technologien in andere Energieträger konvertiert werden. Damit kann Überschuss-Strom aus EE, der sonst verloren wäre, auf unterschiedliche Weise gespeichert werden.⁷⁷ Insofern geht die Bedeutung von Wasserstoff für die Energiewende über den Betrieb von FCEV deutlich hinaus, denn Wasserstoff als Speichermedium mit seinen vielfältigen Umwandlungsoptionen ermöglicht den beschleunigten

⁷¹ Vgl. Shell 2017, S. 16; Deutscher Bundestag 2018, S. 4 ff.

⁷² Vgl. PwC 2017, S. 15

⁷³ PwC 2017, S. 14 f.; Die T&E Studie kommt auf ein Gesamtwirkungsgrad von 13 Prozent (T&E Grafik).

⁷⁴ Ebd.

⁷⁵ PwC 2017, S. 15

⁷⁶ Vgl. ebd., S. 17

⁷⁷ Vgl. ebd., S. 13

Ausbau und die Nutzung überschüssiger erneuerbarer Energien. Insofern sind die P2X-Nutzungspfade auf dem Weg zur treibhausgasneutralen Energiewirtschaft von erheblicher Bedeutung.⁷⁸

Mit dem erwähnten niedrigen Wirkungsgrad, einem sehr hohen Bedarf an Strom für die Produktion und derzeit fehlenden großtechnischen Herstellungsanlagen scheiden Synfuels (zur Verwendung in Verbrennungsmotoren) nach derzeitigem Forschungsstand für eine kommerzielle Nutzung aus.⁷⁹ Wasserstoff aus Elektrolyse, hergestellt mit Strom aus Erneuerbaren, hat hingegen in FCEV das Potenzial, zur Energiewende im Verkehrssektor beizutragen. Die Wasserstoffmobilität könnte zu einer zweiten tragenden Säule in einem emissionsarmen, dekarbonisierten Verkehrssystem werden. Im Sinne der Energieeffizienz ergibt sich nämlich eine klare Rangfolge. Ein Vergleich des Energiebedarfs aus EE für jeweils 100 km zeigt für die vier Antriebs-/Kraftstoffkombinationen folgendes Bild: 15 kWh für BEV, 31 für FCEV, 93 für Power-to-Gas (Methan) und 103 für Power-to-Liquid (Synfuels).⁸⁰ Dies unterstreicht die Potenziale des Wasserstoffpfads für PKW in der mittleren und längerfristigen Perspektive. Angesichts des großen Wirkungsgradabstands von BEV zu FCEV zeigt sich aber auch, dass es sich nicht um Äquivalente für reine Elektromobilität handelt. Hervorzuheben ist jedoch, dass Wasserstoff aus EE im Gegensatz zum heutigen Energiemix in Deutschland kaum Treibhausgasemissionen verursacht und effiziente FCEV-Antriebe auf bis zu 90 Prozent geringere Emissionen als Verbrennungsmotoren kommen können.⁸¹ Power-to-Gas und Synfuels erscheinen in dieser Energieeffizienz-Betrachtung so weit abgeschlagen, dass ein mittelfristiger Beitrag zur Energiewende im Verkehr unwahrscheinlich ist. Weitere Grundlagenforschungen zu beiden Technologien erscheinen jedoch sinnvoll.

⁷⁸ Vgl. Shell 2017, S. 16

⁷⁹ Vgl. PWC 2017, S. 17

⁸⁰ Vgl. Agora 2017, S. 52; S. 61

⁸¹ Vgl. Shell 2017, S. 61

4 Autonomes Fahren

Beim «Autonomen Fahren» und dem damit zusammenhängenden Thema «Connectivity» geht es nicht nur um eine neue Technologie im Fahrzeug. Vielmehr greifen diese Zukunftstrends tief in das bisherige Grundverständnis und Paradigma von (Auto-)Mobilität ein und verändern das Mobilitätsverhalten der Menschen. Sie ermöglichen etwa Quantensprünge einer effizienteren Fahrzeugnutzung (z.B. höhere Auslastung von vernetzten Robo-Taxis) und können die Mobilitätskosten erheblich reduzieren (Mobilitätseffizienz-Revolution). Gleichzeitig erweitern sie auch die Mobilitätsmöglichkeiten, indem die Technologie neue Nutzungsformen der Fahrzeit im autonom fahrenden, vernetzten Fahrzeug erlaubt (Mobilitätszeit-Revolution).

Darüber hinaus verändern sich in Kombination mit Mobilitätsdienstleistungen auch die Geschäftsmodelle der Automobilbranche fundamental. Elektrifizierung, Connectivity, autonomes Fahren und neue Mobilitätsdienstleistungen sind vier Zukunftstrends mit wechselseitiger Verstärkung und vielen Abhängigkeiten. Dabei sind die umwelt- bzw. klimapolitischen Auswirkungen durchaus schillernd und bislang kaum thematisiert. So kann das Autonome Fahren im Sinne der Verkehrswende sowohl positive Effekte auf die Klimabilanz des Verkehrs haben (z.B. effizientere Nutzung der Fahrzeuge) als auch zusätzlichen Verkehr induzieren (z.B. durch geringere Mobilitätskosten, Verkehrsverlagerung auf MIV) und negative Umwelteffekte für die Siedlungsstrukturen haben. Für die Infrastrukturen des Autonomen Fahrens ergeben sich dadurch vielfältige Anforderungen.

4.1 Konzeptübersicht, Klima-/Umwelteffekte, Markttrends

Beim Autonomen Fahren sind zunächst unterschiedliche Stufen zu unterscheiden. Allgemein werden fünf Levels der Automatisierung unterschieden.⁸² (vgl. Abb. 5). Fahrzeuge des Premiumsegments besitzen bereits heute teilautomatisierte Funktionen der Quer- und Längsführung (Level 2), bei denen jedoch der Fahrer ständig in der Pflicht ist, das Fahrzeug zu überwachen und die Hände am Lenkrad zu halten. Dagegen darf der Fahrer bei der «Hochautomatisierung» (Level 3) in definierten Nutzungssituationen die Fahraufgabe an das Fahrzeug abgeben und sich mit anderen Dingen beschäftigen. Er muss jedoch nach einer kurzen Zeit

⁸² Die Society of American Engineers (SAE) hat in sechs Level (0 bis 5) eingeteilt. SAE standard J3016, www.sae.org/news/3544 (Abruf: 4.12.2017)

wieder in der Lage sein die Fahrzeugkontrolle zu übernehmen, wenn das System dies signalisiert.⁸³

Abb. 5: Die Stufen des Autonomen Fahrens



⁸³ Der vor Kurzem vorgestellte Audi A8 besitzt als eines der ersten Fahrzeuge hochautomatisierte Fahrfunktionen nach Level 3, wobei diese bislang aus rechtlichen Gründen noch nicht nutzbar gemacht wurden.

Autonomes Fahren nach Level 4, also «Vollautomatisierung», und Level 5, «Fahrerlos», auf den sich die weiteren Ausführungen in diesem Abschnitt beziehen, unterscheidet sich von den vorhergehenden Stufen nochmals deutlich. Beim vollautomatisierten Fahren kann die Fahraufgabe das Fahrzeugsystem in den definierten Nutzungssituationen vollständig übernehmen, ohne dass der Fahrer eingreifen muss. Allerdings besitzen die Fahrzeuge noch Lenkrad und Pedalerie, da sie eben noch nicht in allen Nutzungssituationen ohne Fahrer auskommen und auch manuell gesteuert werden können. Dagegen gibt es bei fahrerlosen Fahrzeugen oder Roboterautos («Robo-Cars») grundsätzlich nicht mehr die Möglichkeit einer manuellen Steuerung. Vollautomatisierte Fahrzeuge bzw. fahrerlose Fahrzeuge sind derzeit vor allem in Test- oder Pilotprojekten verschiedener Länder und Städte im Einsatz, die mit Ausnahmegenehmigungen auch auf öffentlichen Straßen fahren dürfen.

Für die Entwicklung autonomer Fahrzeuge (Level 4,5) bis hin zur Marktreife sind zunächst noch weitere technologische Schritte von Herstellern und Zulieferunternehmen notwendig. Diese betreffen etwa Hardware und Softwarekomponenten wie die verschiedenen Sensoren (Radar, Lidar etc.), die Rechenleistung, Mensch-Maschine Schnittstellen, Softwareplattformen, Connectivity/Anbindung der Sensorik und hochauflösende Kartendaten zur exakten Standortbestimmung sowie künstliche Intelligenz (KI) zur Verbesserung der Software-Algorithmen.⁸⁴

Aus funktional-technischer Sicht liegen die Herausforderungen für die Serienreife autonomer Fahrzeuge vor allem beim Fahren mit höheren Geschwindigkeiten und dem Beherrschen komplexer Fahrsituationen sowie in der Mischung von autonomen und manuellen Fahrzeugen im Straßenverkehr. Autonome Fahrzeuge haben teilweise noch Probleme bei schlecht markierten Straßen bzw. bei Baustellen oder ungünstigen Wetterbedingungen sowie beim Erkennen anderer Fahrzeuge, die sich vom Hintergrund wenig abheben. Ferner besteht durch stark vernetzte autonome Fahrzeuge ein erhöhtes Cybersecurity-Risiko, wenn sich etwa Unbefugte Zugang zum fahrenden Fahrzeug verschaffen.

Klima-/Umwelteffekte

Die Umwelt- und Klimaeffekte des autonomen Fahrens sind aufgrund der vielschichtigen Zusammenhänge mit anderen Technologien (z.B. Elektromobilität) und Dienstleistungen (z.B. Fahrdiensten, Car-Sharing-Angebote) sowie den Wechselwirkungen auf die Fahrzeugnutzung und das Mobilitätsverhalten nicht eindeutig bestimmbar. Grundsätzlich werden das künftige Mobilitätsverhalten und die Klimaeffekte wesentlich abhängig sein von den durch die Technologien und abgeleiteten Mobilitätsdienstleistungen zu erwartenden autonomen Fahrangeboten sowie den Kostenstrukturen künftiger Mobilitätsdienstleistungen und von den künftigen regulativen Rahmenbedingungen.

Positive Klimaeffekte durch autonomes Fahren sind zunächst durch eine Reduzierung des Fahrzeugbesitzes und des privaten Autoverkehrs zu erwarten.

⁸⁴ Vgl. McKinsey 2016a, S.33ff.

Städtische Mobilitätsangebote von autonomen Fahrdiensten (Roboter-Taxifloten), die die Kunden abholen und zum gewünschten Zielort bringen, vermindern die Notwendigkeit zum Kauf eines privaten Fahrzeugs, das im Schnitt 95 Prozent der Zeit ungenutzt parkt.⁸⁵ Dabei verwischen die traditionellen Grenzen zwischen den Verkehrssystemen, weil das autonome Fahrzeug im Prinzip alles sein kann: privates Auto, Taxi, Bus, Car-Sharing-Fahrzeug oder Sammeltaxi.

Verschiedene Studien versuchen in Szenarien zu berechnen, wie viele private Pkw sich durch Robo-Taxen bzw. Robo-Busse ersetzen ließen. So kommt eine Studie für die Stadt München zum Ergebnis, dass eine autonome Stadtflotte von 18.000 Fahrzeugen den gesamten Individualverkehr innerhalb des festgelegten Servicegebiets sowie 20 Prozent des Pendlerverkehrs abdecken könnte. Damit wären theoretisch bei einer zeitlichen Auslastung der Robo-Flotte von über 50 Prozent ca. 200.000 der 700.000 in München gemeldeten Fahrzeuge zu ersetzen.⁸⁶

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch andere Studien: Im Falle gemeinschaftlich genutzter autonomer Fahrdienste wären danach nur 10 bis 30 Prozent des heutigen Fahrzeugbestandes notwendig, ohne dass es Einschränkungen in der Mobilität gäbe.⁸⁷ Für die EU und USA erwarten aktuelle Untersuchungen bereits zwischen 2020 und 2030 einen Rückgang des Fahrzeugbestandes um 25 Prozent, vor allem ausgelöst durch eine intensive Nutzung von autonomen Fahrdiensten (inkl. Ride-Sharing).⁸⁸ Gleichwohl bliebe auch danach privater Pkw-Besitz von dann häufig auch autonomen Fahrzeugen noch wichtig. Bis 2040 könnten anderen Szenarien zufolge bereits 50 Prozent der Autos autonom fahren, der Besitz an privaten PKW um 50 Prozent sinken, da jedes gemeinsam genutzte fahrerlose Auto nicht weniger als sieben traditionelle Autos ersetzen könnte.⁸⁹ Gleichzeitig würde durch Robo-Taxis auch der Parksuchverkehr entfallen, der ja in den Innenstädten

⁸⁵ Sowohl ein Rückgang der Privatnutzung von PKW als auch höhere Auslastung pro gefahrenem Kilometer erscheinen auf der Zeitachse zunächst durch autonom betriebene Taxen realisierbar – und damit eine Reduzierung der Schadstoff- und Raumbelastung insbesondere in dicht besiedelten Städten, vgl. Deloitte 2017.a, S.3

⁸⁶ Berylls Strategy Advisors 2017a, S.10. Es wäre danach nur mit durchschnittlichen Wartezeiten von 3 Minuten und Vollkosten von 0,16 Euro pro Kundenkilometer zu rechnen, d.h. in der Höhe vergleichbar mit dem ÖPNV. Um das Grundproblem zu lösen, dass zu Spitzenzeiten mehr Nachfrage als beim Rest des Tages besteht, braucht es jedoch eine intelligente Steuerung durch Nutzerdaten und Algorithmen, die die Zahl der Leerfahrten effektiv reduzieren (vgl. ebd.). Eine Studie von ITF kommt zum Ergebnis, dass die Robofloten eine hohe Nutzungsintensität haben: «Under all of our scenarios, vehicles are used much more intensely than before. From currently 50 minutes and 30 kilometres, daily use would increase to 12 hours and nearly 200 kilometres» (ITF 2016, S. 33). Eine weitere Studie von Berylls kommt zum Ergebnis, «dass im Jahr 2035 autonom fahrende Autos in verschiedenen Sharing-Modellen bis zu 28 Prozent der innerstädtischen Fahrten übernehmen können, das Potenzial, den gesamten Individualverkehr zu ersetzen, haben sie jedoch nicht». (Berylls Strategy Advisors 2017b, S. 4).

⁸⁷ Agora 2017, S. 44; ITF 2016, S. 5; vgl. auch die dort untersuchten Studien (ITF 2016, S. 13).

⁸⁸ Vgl. Strategy& 2017, S.18. Gleichwohl gehen andere Untersuchungen davon aus, dass Autonomes Fahren und neue Mobilitätsdienstleistungen in der Hochlaufphase bis 2030 (noch) nicht zu einem Rückgang der weltweiten PKW-Produktion führen (vgl. McKinsey 2016a, S. 7).

⁸⁹ «Disruptive Mobility – A Scenario for 2040» der Barclay Bank (2015). Zitiert nach: Schaeffer 2017, S. 62

rund 30 Prozent der Verkehrsbelastung ausmacht. Positiv aus Energiesicht wirkt auch, dass autonome Fahrzeugflotten durch Vernetzung eine flüssigere und gleichmäßigere Fahrweise ermöglichen.

Ein zentraler künftiger Wettbewerbsvorteil von autonomen Fahrzeugflotten sind die geringeren Gesamtkosten, die in Form verschiedener Mobilitätsdienstleistungen angeboten werden können. Da ein wesentlicher Kostenpunkt von manuell gesteuerten Taxis mit rund 50–60 Prozent die Fahrer ausmachen, können die Kosten von Robo-Taxis trotz der Mehrkosten für die autonomen Fahrfunktionen deutlich sinken. Während etwa für die USA die Kosten pro Meile für Uber-Taxis in San Francisco bei 2,86 Dollar liegen, könnten diese bei Robo-Taxis auf nur noch 0,35 Dollar sinken. Die Gesamtkosten für einen privaten Pkw der Mittelklasse liegen zum Vergleich bei 0,70 Dollar pro Meile.⁹⁰ Wenn die Fahrten mit einem autonomen Robo-Taxi dann noch mit anderen Fahrgästen geteilt werden, würden sich die Fahrtkosten noch einmal deutlich reduzieren. So rechnen Studien mit Kilometerkosten pro Passagier bei 2 bzw. 3 Mitfahrern zwischen 11 und 17 Euro-Cent in Europa, was dann sogar teils unter dem Niveau der Kosten des ÖPNV läge.⁹¹

Daraus ergeben sich erhebliche Geschäftsmöglichkeiten für Akteure aus unterschiedlichen Branchen. Im Unterschied zum ÖPNV bieten Robo-Taxis aus Kundensicht noch weitere Vorteile, etwa durch einen besseren Transportservice mit Tür-zu-Tür-Routen und On-Demand-Service im Vergleich zu fahrplangebundenen Angeboten. Solche flächendeckenden Angebote von Robo-Taxiflotten könnten die funktionalen Mehrwerte von privatem Autobesitz (manuelles Fahren) in Frage stellen, da erstere nicht nur kostengünstiger wären, sondern die Fahrzeit auch für andere Aktivitäten genutzt werden könnte (Mobilitätszeit-Revolution).

Kosteneffizienterer und bequemerer Transport durch Robo-Taxis bzw. -Busse kann jedoch aus Klimasicht auch nichtintendierte negative Folgeeffekte auslösen:

- *Erstens* können neue Fahrten, z.B. zu Freizeit Zwecken, und damit Mehrverkehr ausgelöst werden, wenn die Mobilitätskosten sinken und das Fahren dadurch attraktiver wird.
- *Zweitens* ist eine Verkehrsverlagerung von Fahrten hin zu Robo-Taxis denkbar, die vorher mit dem öffentlichen Verkehr bzw. mit dem Fahrrad zurückgelegt wurden. So könnten autonome Fahrangebote wegen des besseren, weil komfortableren Service präferiert werden. Dies könnte zu höheren Pkw-Fahrleistungen führen.⁹²
- *Drittens* können sich längerfristig auch raumintensivere Siedlungsstrukturen und damit weitere Wege zu den Aktivitätsorten (Wohnen, Arbeit, Freizeit) entwickeln. So erleichtern autonome Fahrzeuge längere Pendelwege, da

⁹⁰ ARK Investment 2016. Online: <https://ark-invest.com/research/shared-autonomous-vehicles-ride-services-attractive>

⁹¹ BCG 2016: Online: www.bcg.com/publications/2016/transportation-travel-tourism-automotive-will-autonomous-vehicles-derail-trains.aspx (Abrufdatum, 10.12.2017).

⁹² ITF geht etwa beim Einsatz von geteilten Robo-Taxis von 6 Prozent mehr Autokilometern im Vergleich zu heute aus, u.a. da auch vorherige Busverkehre ersetzt werden (vgl. ITF 2016, S. 5).

die Mobilitätszeit durch den Wegfall der Fahraufgabe anders oder effizienter, z.B. zum Arbeiten oder zum Schlafen, genutzt werden kann. Dadurch können Wohnorte in stadtfernen Regionen künftig weit attraktiver werden, zumal nicht mit sinkenden Mietpreisen in Metropolen zu rechnen ist.

■ *Viertens* können autonome Fahrzeuge auch privat bzw. als Firmenfahrzeuge gekauft und verwendet werden.⁹³ Vorstellbar sind kundenindividuelle Robo-Shuttles oder etwa «autonom fahrende Arbeits- und Schlafplätze», die etwa von Außendienstmitarbeitern genutzt werden. Dadurch könnten die Zahl der Fahrzeuge sowie die Verkehrsleistungen steigen und weitere negative Umwelteffekte entstehen (z.B. «Autonome Schlafwagenflotten», die Hotelübernachtungen einsparen).

Insgesamt wird deutlich, dass bei autonomen Fahrzeugen bzw. Fahrdiensten sowohl positive als auch negative Klima- bzw. Umwelteffekte möglich wären. Hier braucht es noch weitergehende Untersuchungen, um durch wirksame regulative Rahmenbedingungen ggf. unerwünschte Umweltfolgen zu verhindern.

Szenarien und Marktaussichten

Die Marktaussichten von autonomen Fahrzeugen und Fahrdiensten (vgl. auch Kapitel 5) werden in Studien als sehr gut eingeschätzt. So könnten in der EU bereits in 2030 über 40 Prozent der gefahrenen Kilometer von Robo-Taxis und privaten autonomen Fahrzeugen absolviert werden.⁹⁴ McKinsey schätzt etwa, dass 2030 bis zu 15 Prozent der Neuwagen voll autonom fahren.⁹⁵ 2030 könnten in China, der EU und den USA zusammen 81 Mio. autonome Fahrzeuge auf den Straßen sein.⁹⁶

Daraus entstehen enorme Geschäftspotenziale im Bereich Mobilität. Der durch autonome Fahrzeuge eröffnete neue digitale Mobilitätsmarkt soll Berechnungen zufolge für das Jahr 2030 bereits zwischen 1,5 und 2,2 Billionen US-Dollar betragen,⁹⁷ was etwa der Höhe des heutigen weltweiten E-Commerce-Umsatzes entspricht. Durch autonome Fahrzeuge werden dabei Ertragsquellen auf unterschiedlichen Ebenen ermöglicht:

1. Hardware & Software für autonome Fahrzeuge.
2. Entwicklung und Produktion der (autonomen) Fahrzeuge.
3. Betrieb der autonomen Fahrzeugflotten.
4. Mobilitätsdienste für autonome Fahrdienste (Digitale Mobilitätsplattform).
5. Content Provider: Zusatzdienste im autonomen, vernetzten Fahrzeug (Entertainment, Business etc.).

⁹³ Prognosen gehen für das Jahr 2030 davon aus, dass in Europa der Anteil der privaten Robo-Fahrzeuge am höchsten ist und rund 15 Prozent der Personenkilometer ausmacht (Strategy& 2017, S.17).

⁹⁴ Vgl. ebd.

⁹⁵ Vgl. McKinsey 2016b, S. 5

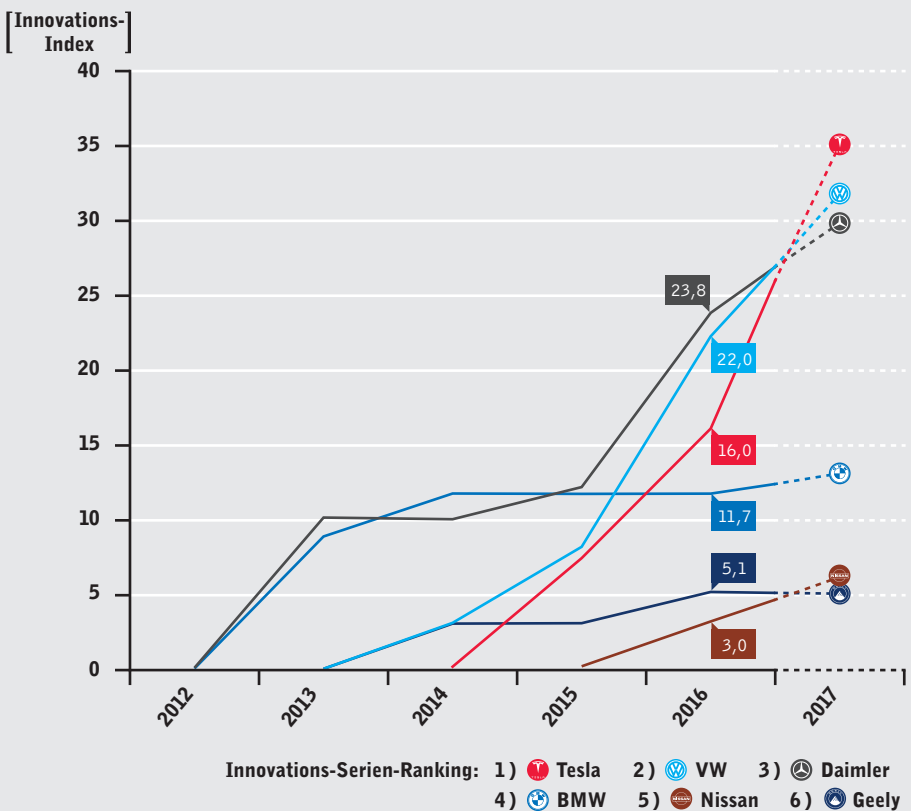
⁹⁶ Vgl. Strategy& 2017, S. 9

⁹⁷ Vgl. ebd., S. 4; McKinsey 2016, S.11; McKinsey 2016b, S. 6.

Entsprechend gibt es unterschiedliche Profit-Pools künftiger autonomer Fahrzeuge, die weit über die Technologie der Automatisierung der Fahrzeuge hinausgeht und eng mit Mobilitätsdienstleistungen verbunden ist (vgl. Kapitel 5).

Technologisch zählen die deutschen Automobilhersteller Daimler, BMW und der Volkswagen-Konzern zu den Vorreitern bei autonomen Fahrzeugen (vgl. Abb. 6). Daneben gelten auch die US-amerikanischen Fahrzeughersteller General Motors sowie Tesla und weitere Digitalplayer aus den USA wie Waymo (von Alphabet bzw. Google) oder Uber zu den Pionieren des Autonomen

Abb. 6: Serien-Innovationsstärke von Automobilherstellern beim Autonomen Fahren (Level ≥ 2)



Die Innovationsstärke berechnet sich aus Serien-Innovationen. Haupttyp: Autonomes Fahren (z.B. Stau-Assistenten, Autonome Fahrzeuge der Stufen 2–5). Kumulierte Werte: Die Werte jeden Jahres werden zur Summe der Vorjahreswerte addiert. Daten ab 2016 mit eingeschränkter Vergleichbarkeit zu den Vorjahren, wegen leicht verändertem Bewertungsschema.

VW-Konzern inkl. Marken: VW, Audi, Porsche (ab 2012) etc.

Quelle: CAM; eigene Darstellung

Fahrens.⁹⁸ Allerdings ist das Technologie- bzw. Fahrdienstumfeld hochdynamisch, wobei die globalen Automotive OEM und die Digitalgiganten mit ihren jeweiligen Geschäftsmodellen in dieser neuen Wettbewerbsarena gerade erst beginnen, sich miteinander und/oder gegeneinander zu positionieren.⁹⁹

Die derzeitigen Vorreiter des Autonomen Fahrens kündigen an, spätestens zu Beginn der 2020er Jahre auch in europäischen bzw. deutschen Städten kommerzielle autonome Fahrdienste anzubieten.¹⁰⁰ Damit treten Fragen in den Vordergrund nach der technischen Zuverlässigkeit und Sicherheit autonomer Fahrzeuge, Haftungsthemen, aber auch der regulatorische Rahmen, um eine Akzeptanz von Kunden und eine geordnete Marktentwicklung zu ermöglichen. Entsprechend müssen die infrastrukturellen Voraussetzungen für einen geordneten Markthochlauf von autonomen Fahrzeugen in Deutschland geschaffen werden.

4.2 Thesen zu Infrastrukturen für Autonomes Fahren

Die Entwicklung der Zukunftstechnologien und des Markthochlaufs von autonomen Fahrzeugen (Level 4, 5) erfordert neben der Weiterentwicklung von Fahrzeugtechnologien für Autonomes Fahren (Level 5) auch materielle (5G, Datenstandards,) immaterielle (z.B. Software/AI-Kompetenzen) und institutionelle Infrastrukturen (rechtlich-regulativer Rahmen) als Erfolgsvoraussetzungen.¹⁰¹

Materielle Infrastrukturen: Datenübertragung (5G), Datenstandards

Als wesentliche technische Voraussetzungen für autonomes Fahren gelten Sensortechnologien, Software-Algorithmen und hochauflösende Karten. Für letzteres haben die deutschen Hersteller durch den Kauf des Kartenanbieters Here bereits die Voraussetzungen geschaffen. Gleichzeitig ist jedoch auch die Datenkommunikation zwischen Fahrzeug und Straßeninfrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure) sowie der Fahrzeuge untereinander (Vehicle-to-Vehicle) und zu großen Rechenzentren (z.B. der Hersteller) fundamental. Das autonom fahrende Auto muss zu anderen Fahrzeugen eine Verbindung herstellen und ihnen Dinge mitteilen können, die es selbst gelernt hat.¹⁰² Reaktionsschnelle Mobilfunknetze (5G) sowie Datenstandards

⁹⁸ Bratzel/Tellermann 2017. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch Roland Berger 2017, S. 7. In Deutschland und den USA forcieren einerseits die Autohersteller und ihre Zulieferpartner das autonome Fahren; in den USA sind jedoch zusätzlich Digitalgiganten wie Apple, Google, Uber involviert, die zwar selbst (noch) keine Autos herstellen, aber den Markt mit Mobilitätsdienstleistungen als Wachstumschance sehen, in den sie massiv investieren, einschließlich eigener Programme zum Autonomen Fahren (vgl. Lashinsky 2017, S.175ff.).

⁹⁹ Vgl. Deloitte 2017a, S.11ff.; McKinsey 2017b, S. 13f.

¹⁰⁰ Vgl. für einen Überblick: www.driverless-future.com/?page_id=384

¹⁰¹ Vgl. Strategy& 2017, S. 10.

¹⁰² Vgl. <https://iq.intel.de/5g-der-kommunikationsschlüssel-zu-autonomen-fahren>; hinzu kommt, dass Informationen zwischen autonom fahrenden PKW in Form von Kurzstreckenfunkverbindungen (C2C) und von Fahrzeugen zu externen Infrastrukturkomponenten (C2I) außerdem zu völlig neuen Komplexitätsanforderungen an Software führen (Deloitte 2017a, S.5)

für einen breitbandigen und sicheren Datenaustausch sind hierfür essentiell.¹⁰³ So produzieren autonome Fahrzeuge exponentiell ansteigende Mengen an Daten durch ihre Sensorik wie Laser- (Lidar), Radarsensoren und Kameras, die sich auf 4.000 Gigabyte täglich summieren können. In cloudbasierten Datenpools werden diese Datenströme der autonom fahrenden Autos in Echtzeit in Datensätze verwandelt und an das Auto zurückübermittelt, damit es seine gesamte Umgebung erkennt. Dabei spielen Anwendungen der Künstlichen Intelligenz (KI) und des maschinellen Lernens eine entscheidende Rolle.¹⁰⁴

Gleichzeitig stellen 5G-Funkkomponenten für autonome Fahrzeuge eine zusätzliche Schutzebene bereit, indem diese mit Fahrzeugen im näheren Umfeld und der Infrastruktur am Straßenrand zuverlässig und schnell kommunizieren, z.B. wenn die Sensoren keine Sichtverbindung haben oder nachteilige Wetterbedingungen herrschen.¹⁰⁵ Darüber hinaus könnten 5G-Netze mit geringen Latenzzeiten auch die Fernsteuerung autonomer Fahrzeuge ermöglichen. Flottenbetreiber von autonomen Fahrdiensten könnten dann in Fällen, in denen das Fahrzeug überfordert ist, mittels Fernsteuerung eingreifen. Allerdings dürften künftig sicherheitskritische Funktionen von autonomen Fahrzeugen nicht auf Mobilfunkverbindungen angewiesen sein. So gibt etwa die Google-Tochter Waymo an, dass ihre Fahrzeuge auch ohne eine ständige Verbindung sicher funktionieren würden.

Prinzipiell sieht auch das Bundesverkehrsministerium 5G in der Mobilität als zwingende Infrastrukturvoraussetzung,¹⁰⁶ wobei das geplante 5G-Netz für zahlreiche Zukunftstechnologien ein Engpassfaktor darstellt, darunter das Internet of Things (IoT).¹⁰⁷ Heutige Festnetz-, Mobilfunk- und Satellitennetze sind nicht für Datenaufkommen, Reaktionsgeschwindigkeiten und die Versorgungssicherheit des Autonomen Fahrens ausgelegt. Automobilhersteller wie VW, Daimler und BMW haben sich bereits 2016 in der 5G Automotive Association (5GAA) zusammengeschlossen, um die notwendige Standardisierung für vernetzte und autonome Fahrzeuge voranzutreiben. Allerdings gibt es selbst zwischen den in der 5GAA versammelten Herstellern noch Wettstreite um technische Konzepte und Kommunikationsstandards.¹⁰⁸ Prognosen gehen daher davon aus, dass die Hochlaufphase für 5G sich erst ab 2023 stark intensiviert und dann bis 2028 auch alle regulatorischen Fragen abgeschlossen sein werden.¹⁰⁹

Insgesamt sind 5G-Netze für Autonomes Fahren und das vernetzte Fahrzeug von großer Bedeutung, da dadurch erst sichere kommerzielle Anwendungen von vernetzten und autonomen Fahrzeugen möglich sind. Entsprechend muss deren Aufbau beschleunigt und weiter intensiviert werden. Die Investitionen in den

¹⁰³ Deloitte 2017a, S. 5

¹⁰⁴ Vgl. Strategy& 2017, S. 11

¹⁰⁵ Intel 2017. Online: <https://iq.intel.de/5g-der-kommunikationsschlüssel-zu-autonomem-fahren>

¹⁰⁶ www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/5g-aktivitaeten-in-deutschland.html

¹⁰⁷ Vgl. Schaeffer 2017, S. 38 (tabellarischer Überblick)

¹⁰⁸ Vgl. Golem. Online: www.golem.de/news/mobilfunkallianz-5gaa-5g-soll-fernsteuerung-autonomer-autos-ermöglichen-1710-130844.html

¹⁰⁹ Strategy& 2017, S. 10; McKinsey 2016b, S. 12

5G-Aufbau werden in einer 2016 veröffentlichten Studie für die EU-Kommission bis 2025 auf rund 56 Mrd. Euro veranschlagt. Dieselbe Studie prognostiziert im Gegenzug bis zu 113 Mrd. Euro zusätzliche Umsätze durch 5G in vier Sektoren, darunter auch Automotive, sowie die Schaffung von 2,3 Mio. Arbeitsplätzen europaweit.¹¹⁰

Autonomes Fahren braucht regulative Rahmenbedingungen

Studien sehen Deutschland bei den regulatorischen Rahmensetzungen des autonomen Fahrens nur in einer «Verfolgerposition».¹¹¹ Danach zeichnen sich etwa in Asien klarer frühe und konsequente regulatorische Eingriffe und wirtschaftspolitische Impulse ab als in Deutschland. Hierzu zählen gesetzliche Rahmenbedingungen für Fahrdienste bzw. Ride-Sharing in China, staatlich gestützte Entwicklungen eines Grundlagensystems für Autonomes Fahren in Singapur usw.¹¹² Im Sinne infrastruktureller Voraussetzungen sind neben technischen Lösungen für den 5G-Datenverkehr und der Standardisierung auch weitere rechtliche Grundlagen und Teststrecken wesentlich für den Ausbau des Autonomen Fahrens.

Zwar hat der deutsche Gesetzgeber am 21. Juni 2017 neue Regeln zum automatisierten Fahren in Kraft gesetzt, die die Voraussetzungen für hochautomatisierte Systeme schafft. Der Fahrer muss jedoch auch bei Level-3-Fahrzeugen (Vollautomatisierung) übernahmebereit bleiben. Die gesetzliche Grundlage für fahrerloses Fahren, d.h. Robo-Taxis (Level 5) fehlt bislang noch, bei denen es weder Lenkrad noch Pedale gibt. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, sodass auch in Deutschland kommerzielle Anwendungen von Robo-Taxis stattfinden können.

Gleichzeitig herrschen noch unterschiedliche nationale Bestimmungen zum autonomen Fahren. Damit autonome Fahrzeuge auch Landesgrenzen überqueren können, braucht es einen international harmonisierten Rechtsrahmen. Momentan gibt es z.B. in den einzelnen US-Bundesstaaten und auch in den EU-Mitgliedsländern hierzu unterschiedliche Bestimmungen.¹¹³

Zur weiteren Erprobung der Fahrzeuge sowie zur Steigerung der Akzeptanz in der Bevölkerung muss der Ausbau von Teststrecken bzw. Testgebieten ausgeweitet werden. Bereits in Betrieb sind Teststrecken in Bremen, Wuppertal und Bad Birnbach sowie auf der Autobahn zwischen München und Nürnberg. Ab 2018 sollen weitere Testgebiete eröffnet werden.¹¹⁴ Noch weiter geht Großbritannien. Dort soll es bereits 2019 möglich sein, selbstfahrende Autos auf öffentlichen Straßen zu testen, ohne dass ein Mensch die Technik beaufsichtigen muss. Von 2021 an sollen sich diese Fahrzeuge dann völlig frei über britische Straßen bewegen dürfen.

¹¹⁰ Vgl. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/5g-deployment-could-bring-millions-jobs-and-billions-euros-benefits-study-finds>

¹¹¹ Vgl. Roland Berger 2017, S. 9

¹¹² Vgl. Roland Berger 2017, S. 10 (tabellarischer Überblick)

¹¹³ Vgl. Daimler 2017a. Online: www.daimler.com/innovation/case/autonomous/rechtlicher-rahmen.html

¹¹⁴ Für einen Überblick: www.check24.de/kfz-versicherung/autonomes-fahren

Dies wäre das erste Mal, dass Autonomes Fahren der Stufe 5, bei dem kein Fahrer mehr erforderlich ist, in einem Land ohne Einschränkungen möglich wäre.¹¹⁵

Eine wichtige Bedeutung kommt – als immaterielle infrastrukturelle Voraussetzung – zusätzlich Initiativen zur Steigerung der Akzeptanz von Autonomem Fahren in der Gesellschaft zu. So haben autonome Fahrzeuge zwar das Potenzial, die Zahl von Unfällen und Verkehrstoten erheblich zu reduzieren. Allerdings zeigen Befragungen, dass es noch erhebliche Skepsis und Ablehnung gibt, wie etwa auch im Bereich ethischer Fragen.¹¹⁶ Das bedeutet auch, dass die Debatte um Autonomes Fahren vom technologischen Kopf auf gesellschaftliche Füße gestellt werden muss. Bürger und künftige Kunden müssen stärker an Autonomes Fahren herangeführt werden, u.a. durch die Eröffnung von weiteren Foren für öffentliche Diskurse.

Datensicherheit und Datenintegrität von autonomen, vernetzten Fahrzeugen ist auch für die Herstellung einer breiten gesellschaftlichen Akzeptanz ein weiteres wichtiges Handlungsfeld. So könnten Fehlfunktionen oder potenzielle Hackerangriffe das Vertrauen der Kunden in autonome Fahrzeuge nachhaltig gefährden. Entsprechend müssen die Aktivitäten rund um Cybersecurity verstärkt werden.¹¹⁷ Hier könnte der in der Entwicklung befindliche Standard ISO 21434 weiterhelfen, der jedoch zunächst in Entwicklungsverfahren in der gesamten Wertschöpfungskette umgesetzt und im Weiteren überwacht werden muss.¹¹⁸ Gleichzeitig ist der Schutz personenbezogener Daten sicherzustellen. So fallen bereits heute bei Car-Connectivity-Anwendungen sehr viele persönliche Daten an, deren Umfang mit steigendem Autonomie-Level der Fahrzeuge weiter sprunghaft größer wird.¹¹⁹ Es wird daher darum gehen, eine Balance zu finden zwischen einer möglichst stark eingeschränkten Nutzung personenbezogener Daten und der bestmöglichen Customer Experience.¹²⁰ Doch Kundennutzen wird differenziert wahrgenommen: Im Vergleich zu älteren Bevölkerungsgruppen tendieren jüngere Kundengruppen beim Trade-off zwischen Komfort und Datenschutz eher Richtung Komfort; unabhängig davon sind Fahrer mit hohen Fahrleistungen tendenziell offener für datengetriebene Connectivity Services. Auch bezüglich der Kategorie von Daten sind die

115 Süddeutsche Zeitung (19. November 2017): Großbritannien testet von 2019 an Roboterautos ohne Fahrer. Online: www.sueddeutsche.de/auto/autonomes-fahren-grossbritannien-testet-von-an-roboterautos-ohne-fahrer-1.3755690

116 In diesem Zusammenhang zu erwähnen ist die Arbeit einer beim Bundesverkehrsministerium angesiedelten Ethik-Kommission, die unter Leitung von Udo di Fabio Mitte 2017 einen Bericht mit Leitlinien zum Autonomen Fahren vorgelegt hat. Die dort festgeschriebenen Kernpunkte werden öffentlich stark wahrgenommen und diskutiert. Für künftige Gesetzgebungsvorhaben und Regulierungsrahmen bezüglich des Autonomen Fahrens ist die Arbeit der Kommission als grundlegend einzuschätzen. Vgl. BMVI, online: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/084-dobrindt-bericht-der-ethik-kommission.html (Abruf: 12.12.2017)

117 Gleichzeitig ist dafür Sorge zu tragen, dass Diebstahl von Kundendaten verhindert wird, wie dies kürzlich millionenfach beim Fahrdienstanbieter Uber geschehen ist.

118 Deloitte 2017a, S. 9

119 Vgl. Deloitte 2017a, S. 7

120 Deloitte 2017a, S. 7

Sensibilitäten unterschiedlich, am geringsten bei Kartendiensten, am höchsten bei vernetzten persönlichen Kalendern und Kommunikationsinhalten.¹²¹

Ferner müssen die Umwelt- und Klimaeffekte des Autonomen Fahrens noch weiter wissenschaftlich untersucht werden. Deutlich scheint jedoch schon jetzt, dass sich positive Umwelt- und Klimaeffekte nur dann einstellen werden, wenn dieses Feld nicht politisch ungesteuert dem freien Spiel der Marktkräfte überlassen bleibt. Szenarioanalysen zeigen, dass sich im Falle des Verzichts auf Verkehrssteuerung und der kollaborativen Steuerung vernetzter autonomer Fahrzeuge sowie bei fehlenden relevanten regulatorischen Steuerungsimpulsen das Verkehrsaufkommen erhöhen wird, inklusiver negativer Effekte für Umwelt und Klima.¹²² Entsprechend muss analysiert werden, welche regulativen und planerischen Instrumente am geeignetsten sind, um sowohl die Wettbewerbskräfte und Innovationfähigkeiten der Akteure zu stärken als auch positive Klima- und Umweltbeiträge zu ermöglichen.

¹²¹ Vgl. McKinsey 2016a, S. 15f.

¹²² Roland Berger 2017, S. 15f.

5 Mobilitätsdienstleistungen und deren besondere Infrastrukturvoraussetzungen

5.1 Konzept, Klima-/Umweltrelevanz, Markttrends

Mobilitätsdienstleistungen sind ein zentrales Zukunftsfeld für Automobilhersteller, Digitalplayer wie Google, Start-ups wie Uber sowie von Städten und Kommunen gleichermaßen. Die Vision eines «Mobility as a Service» (MaaS) beschreibt die Vision einer bruchlosen, hoch vernetzten Reise- bzw. Mobilitätskette über verschiedene Verkehrsträger hinweg: von der intermodalen Routenplanung über die Buchung on Demand und der Bezahlung bis hin zur Abwicklung der Fahrten.¹²³ Darüber hinaus können noch weitere Services wie Parkplatzdienste, Charging-Dienste oder Entertainment-Dienste hinzugezählt werden (vgl. für eine Übersicht Abb. 7).

Aus Kundensicht erweitern sich durch die neuen Mobilitätsangebote wie Car-Sharing, Bike- und Ride-Sharing die Mobilitätsangebotsoptionen. War bis vor kurzem ein eher monomodales Verkehrsverhalten dominant, das alle Fahrten entweder mit dem privaten Auto oder mit dem ÖPNV vorsah, entwickelt sich mittels internetfähiger Smartphones ein intermodales oder gar multimodales Mobilitätsmuster: D.h. Kunden können ihren Mobilitätsbedarf individuell und schnell per Fingertipp mit einer breiten Vielfalt von Mobilitätsangeboten befriedigen und dabei nach ihren Präferenzen die günstigste, schnellste oder komfortabelste Kombination von Verkehrsmitteln auswählen. Durch multimodale Apps wie Moovel, Qixxit, Ubigo oder Whim kann die Reisekette mit dem Smartphone künftig in Echtzeit einfach und sicher geplant, gebucht und teilweise bereits bezahlt werden. Das Fernziel ist Interoperabilität, also die bruchlose Übersicht, Verfügbarkeit und Buchbarkeit als kundenindividuell optimierter Mix aus allen Mobilitätsangeboten – ÖPNV, Taxi, Car-Sharing, Ride-Hailing und Ride-Sharing, Leihwagen oder Bike-Sharing etc. – für die urbane Mobilität.¹²⁴

Mobilitätsdienstleistungen bzw. MaaS begründen gleichzeitig neue Geschäftsmodelle auf Basis der Mobilitätseffizienz-, der Mobilitätszeit- und der Mobilitätssystem-Revolution. Für Automobilhersteller ergibt sich durch Mobilitätsdienstleistungen in Kombination mit dem Autonomen Fahren die Chance von neuen

¹²³ Vgl. Deloitte 2017b, S. 114

¹²⁴ Vgl. MaaS Alliance 2017, S.1; S. 5

Abb. 7: Mobilitätsdienstleistungstypen, Akteure und Services (Auswahl)

11 HAUPTTYPEN	~ 50 SERVICETYPEN	~ 100 AKTEURE	~ 500 EINZELNE SERVICES
 Carsharing	Free-Float-Carsharing, Peer-to-Peer-Carsharing, etc.	19 globale OEM · BMW · Daimler · Fiat-Chrysler · Ford · Honda · Hyundai · Geely · GM · Mazda · Mitsubishi · Nissan · PSA · Renault · Subaru · Suzuki · Tata · Tesla · Toyota · VW	· Car2Go · UberPOP · UberBLACK · Koolicar · ParkNow · DriveNow · Moovel · Lyft Premier · Fliinc · Tesla Supercharger · Mercedes-Benz Rent · Maven · Audi Shared Fleet · Apple CarPlay · Haha Pinche · MyBoxMan · nuTonomy · Free2move · Book N Drive · Cambio · Greenwheels · Fluidtime · moovit · Moia · Grab · BVG BerlKönig · Clevershuttle · Call a bike · FordPass · parkpocket · Find My Car · taxiify · BlaBlaCar · BMW Connected · Drive · Volkswagen Car Net · OnStar · Waymo · etc.
 Aufladedienste			
 Datendienste	Gefahrendaten, Verkehrsdaten, etc.		
 Infotainment	Office & Messaging, Entertainment, Lokale Informationen, etc.		
 Fahrdienstvermittlung	Privattaxi, Ride Sharing, etc.	20 nicht-globale/ chinesische OEM · BYD · Chery · Mahindra · Aston Martin · etc.	
 Intermodale Dienste			
 Logistikdienste	Logistik, Marktplatz, Temporärer Schlüssel, etc.	10 Big-Data-Player · Google · Apple · Baidu · Samsung · Alibaba · Amazon · Facebook · Microsoft · Huawei · Tencent	
 Parkplatzdienste	Parkplatz-Bezahlsystem, Parkplatz-Finder (abseits der Straße), etc.		
 Vermietung		49 Mobilitäts-Player · Uber · Deutsche Bahn · Didi Chuxing · Sixt · Avis Budget · Enterprise · Gett · Moovit · etc.	
 Remote-Dienste	Notrufservice, Software-Car-Update, Car-Finder, etc.		
 Sonstiges			

Quelle: CAM; eigene Darstellung

Geschäftsfeldern als Ersatz für die sich perspektivisch auflösenden bisherigen kommerziellen Pfeiler, die wesentlich auf den Autokauf bzw. Autobesitz und Freude am manuellen Autofahren angelegt waren.¹²⁵ Gleichsam erweitert sich jedoch auch das Wettbewerbsumfeld durch Digitalplayer wie Apple, Google oder Alibaba und Baidu, die ihre Ökosysteme aus Kommunikations- und Entertainment-Services um Mobilitätsdienste erweitern wollen. Außerdem drängen Start-ups wie Uber, Lyft, BlablaCar und andere mit innovativen Services einer digitalen Mobility-on-Demand auf den Plan.

Hinzu kommt, dass künftig mit den oben skizzierten Trends von Elektromobilität und autonomen Fahrzeugen bzw. Robo-Taxis weitere innovative und kostengünstige Mobilitätsangebote marktreif sein werden. Diese werden nicht nur das Spektrum von Mobilitätsdienstleistungen erweitern. Sie führen auch zu einem Verschmelzen von öffentlichem und privatem Verkehr, weil das autonome Fahrzeug prinzipiell sowohl privat genutzt als auch als Taxi, Car-Sharing-Fahrzeug oder Rufbus eingesetzt werden kann.¹²⁶ Dabei stellt sich auch die Frage, ob durch die sich entwickelnden autonomen Fahrdienste der ÖPNV kannibalisiert wird oder ob diese einen positiven Beitrag zur Minderung des Autoverkehrs bzw. der Klimabelastung des Verkehrs leisten können.

Umwelt-/Klimarelevanz

Die lokale bzw. regionale Ebene wird eine wichtige Rolle bei der Ausgestaltung der Mobilitätsdienstleistungen der Zukunft spielen und damit auch bei der Frage, ob die neuen Angebote einen positiven Beitrag für den Klimaschutz im Verkehrsbereich erbringen können.¹²⁷ Städte und Kommunen sind nicht nur mit der Verkehrsplanung, den baulichen Infrastrukturen von Straßen und Parkplätzen und dem Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs betraut. Sie können auch über die Ausgestaltung von integrierten Mobilitätsdienstleistungen mitentscheiden. Dabei ist der verkehrsplanerische Handlungsdruck in urbanen Gebieten aufgrund zunehmender Flächenknappheit bei einem gleichzeitig wachsenden Verkehr und Mobilitätsbedürfnis der Menschen hoch.

Eine zentrale Bedeutung kommt den Robo-Taxis bzw. autonomen Fahrangeboten zu, bei denen noch nicht klar ist, ob sie in der Gesamtbilanz positive oder negative Umwelt- und Klimaeffekte haben werden (vgl. Kapitel 4). So werden zu Beginn der 2020er Jahre erste autonom fahrende Shuttles auf deutschen Straßen unterwegs sein und sich wahrscheinlich dynamisch entwickeln.

¹²⁵ Holmberg u.a. 2016, S.14

¹²⁶ Da der entstehende Markt für MaaS sehr lukrativ ist für unterschiedlichste Anbieter, etwa etablierte Autohersteller, Sharing-Anbieter, ÖPNV, Tech-Unternehmen und Startups, besteht eine hohe Wettbewerbsintensität. Fehlende Marktreife führt bislang dazu, dass es kaum flächendeckende Angebote gibt (Vgl. Deloitte 2017c, S. 118 und Polis 2017, S. 4).

¹²⁷ Vgl. Strategy& 2017, S. 15

Studien rechnen bis zum Jahr 2030 damit, dass bereits 37 Prozent des PKW-Verkehrsaufkommens autonom bzw. in geteilten Systemen (Car Pooling, Ride-Sharing) absolviert werden könnten.¹²⁸ Es ist damit zu rechnen, dass die Automatisierung des Fahrens erhebliche Auswirkungen auf das Preisgefüge und damit die Nutzung der Mobilitätsservices besitzen wird.¹²⁹ Robo-Taxen könnten Berechnungen zufolge bis zu 60 Prozent günstiger betrieben werden als konventionelle.¹³⁰ In den Möglichkeiten der Kombination von autonomen Taxen und Sharing-Konzepten liegt dabei enormes Potenzial für die Reduzierung des Fahrt-aufkommens. Unter heute geltenden Regulierungsvorschriften (u.a. Personenbe-förderungsgesetz, gesetzliche Regelungen für autonomes Fahren) ist allerdings unklar, ob und wie dieses Potenzial gehoben werden kann.¹³¹ Es wird hierbei wesentlich auch auf eine umweltgerechte Flankierung und Ausrichtung der poli-tischen Regulation bzw. Anreizstrukturen ankommen, insbesondere auch auf Ebene der Kommunen. Dabei müssen autonome Fahrangebote in ein multimo-dales Verkehrssystem integriert werden.

Szenarien/Markttrends

Deutschland wird bei Mobilitätsdienstleistungen im internationalen Vergleich eher eine Verfolger-Position zugeschrieben. Dies gilt sowohl im Hinblick auf mangelnde wirtschaftspolitische Impulse als auch bezüglich der Akzeptanz der Nutzer. Bei den regulatorischen Rahmenbedingungen wird Deutschland gar nur als Nachfolger gesehen. Danach übernehmen Länder wie China, die USA oder Singapur derzeit die Pionierrolle.¹³²

Dies gilt jedoch nicht für die deutschen Automobilhersteller. So zeigt eine vergleichende Bewertung von über 100 wichtigen Akteuren, darunter auch Digi-tal Player, dass Daimler, BMW und der Volkswagen-Konzern bislang das brei-teste Angebot an Mobilitätsservices bieten, deutlich vor amerikanischen OEM wie GM, Tesla und Ford (vgl. Abb. 8). Allerdings weisen einige Big-Data-Player wie Uber oder Didi Chuxing bei bestimmten Diensten eine bessere Leistungstiefe mit weitaus höheren Kundenzahlen auf.¹³³ Das stärkste Angebotsspektrum unter den Automobilherstellern hat derzeit Daimler, die etwa mit MyTaxi, Car2Go oder Moovel attraktive Mobilitätsservices anbieten. Vor dem Hintergrund paradigmatischer Veränderungen der Geschäftsmodelle arbeiten viele Hersteller derzeit intensiv an einem Ausbau des Mobilitätsportfolios. Neue Geschäftsmodelle oder Produkte lassen sich dabei nicht mehr im Alleingang entwickeln oder betreiben. Lange hat die Automobilindustrie versucht, sich gegen die neuen Player zu wehren, ist aber

¹²⁸ Vgl. Strategy& 2017, S. 4

¹²⁹ Vgl. Roland Berger 2017, S. 5

¹³⁰ Vgl. Roland Berger 2017, S. 6

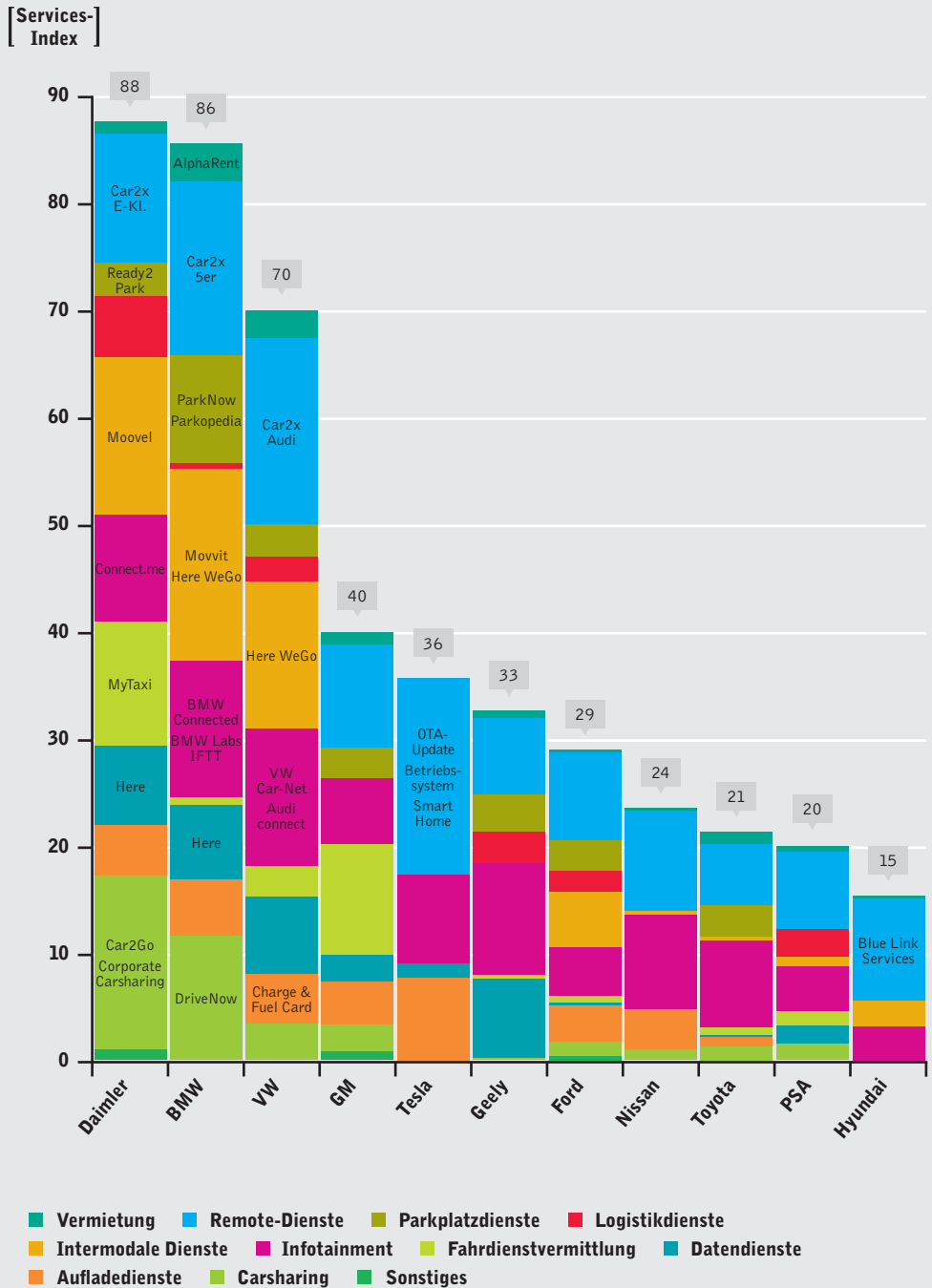
¹³¹ Einen Zwischenschritt könnten Genehmigungen nach der Experimentierklausel in § 2 Abs. 7 PBefG ermöglichen. Vgl. KCW 2017, S. 35f.

¹³² Vgl. Roland Berger 2017, S. 10.

¹³³ CAM 2017, S. 10

Abb. 8: Mobilitätsdienstleistungsstärke der globalen Automobilhersteller 2017

Ausgewählte Dienste als Beispiele für die genannten Haupttypen



Quelle: CAM; eigene Darstellung

zu der Erkenntnis gelangt, dass man aus Feinden besser «Frenemies» macht – also sie akzeptiert und mit ihnen am besten kooperiert, um neue Technologien voranzutreiben. Entsprechend spielen Kooperationen mit Big-Data-Playern wie Apple, Baidu oder Start-ups wie Lyft, Gett u.a. eine wichtige Rolle beim weiteren Ausbau von Mobilitätsdienstleistungen.¹³⁴

Mobilitätsdienstleistungen werden sich in den nächsten 10-20 Jahren sehr dynamisch entwickeln und erhebliche Auswirkungen auf die Mobilität in Städten wie auf dem Land ausüben. Die Entwicklungstendenzen lassen sich dabei am besten über Szenarien darstellen, da bei wichtigen Einflussfaktoren noch erhebliche Unsicherheiten über deren Entwicklung bestehen (z.B. Höhe der Infrastrukturförderung, Regulatorische Eingriffe, Kostenstrukturen). Roland Berger hat kürzlich versucht, in Szenarien die urbane Mobilität im Jahr 2030 zu beschreiben. Anarchie und Hypereffizienz bilden dabei entgegengesetzte Entwicklungstrends ab:

- «Das Szenario «Anarchie» beschreibt einen Zustand, in dem es keine gezielte Verkehrssteuerung, keine kollaborative Steuerung vernetzter autonomer Fahrzeuge und keine planerischen und regulatorischen Steuerungsimpulse gibt. Angebote autonomer Taxiflotten sind danach attraktiver als Angebote des ÖPNV.» Im Ergebnis erhöht sich «das Verkehrsaufkommen erheblich, weil autonome Taxiflotten gegenüber dem ÖPNV durch das Zusammenspiel aus Komfort und geringerem Preis attraktiver sind als heutige Taxis und Ride-Sharing ein Nischenphänomen bleibt».¹³⁵
- «Im Szenario «Hypereffizienz» fahren Menschen in einem hochvernetzten System verstärkt gemeinsam, weshalb es zu einer Gesamtsystemoptimierung kommt. Ein aktives Verkehrsflussmanagement, die kollaborative Steuerung autonomer Fahrzeuge und eine nachfrageorientierte Preispolitik des ÖPNV sowie der autonomen Taxiflotten (über City-Maut) optimieren das Verkehrssystem. Die Nutzung von Ride-Sharing-Angeboten hat sich stark erweitert – mit reduzierender Wirkung auf das Verkehrsaufkommen. [...] In Summe verringern sich das Verkehrsaufkommen und die durchschnittlichen Beförderungszeiten.»¹³⁶

Im Ergebnis zeigt sich, dass für eine Verhinderung des Szenarios «Anarchie» – geprägt durch eine Erhöhung des Verkehrsaufkommens – die Akteure aus Wirtschaft und Politik frühzeitig Richtungsentscheidungen treffen müssen. Wenn dies gelingt, etwa durch finanzielle Förderungen und rechtliche Rahmensetzungen für Ride-Sharing sowie durch verkehrsplanerische Steuerungsimpulse, könnte sich das Verkehrsaufkommen reduzieren, und negative Umwelt- und Klimaeffekte wären zu vermeiden.¹³⁷

¹³⁴ Ebd., S. 7

¹³⁵ Roland Berger 2017, S. 15

¹³⁶ Roland Berger 2017, S. 16

¹³⁷ Ebd., S. 19

5.2 Thesen zu Infrastrukturen für (intermodale) Mobilitätsdienstleistungen

Konzept Mobility-as-a-Service (MaaS)

Intermodale Mobilitätsdienstleistungen bergen ein enormes wirtschaftliches Potenzial für die Akteure und können positive Klima- und Umwelteffekte im Verkehr ermöglichen. Die Kernidee MaaS sollte oberstes Prinzip bei regulatorischen Rahmensetzungen sein, also attraktive Mehrwertangebote für alle Bürger durch Sicherstellung eines nahtlosen, sicheren und kosteneffizienten Verkehrsträgermix, der das Nutzen des privaten PKW zunehmend unattraktiv macht. Zur Förderung der Innovationsfähigkeit im Mobilitätssektor muss einerseits zu viel und zu starre Regulierung verhindert werden, da dies private Investitionen und Beteiligungen behindern würde. Andererseits zeigt sich, dass es bei zu wenig Regulierung in einem hochdynamischen, erst im Entstehen begriffenen Markt zu unerwünschten Nebeneffekten einer höheren Umwelt- und Verkehrsbelastung käme.¹³⁸ Überlegungen zu notwendigen Infrastrukturen für MaaS müssen daher berücksichtigen, dass zukünftige Festlegungen zur Rolle öffentlicher Anbieter für die Markt- und Verkehrsentwicklung weitreichende Folgen haben werden.¹³⁹

ÖPNV und private Anbieter

Für die ÖPNV-Betreiber eröffnen Mobilitätsdienstleistungen bspw. die Möglichkeit, sich bestehende Preisvorteile durch konsequente Einbindung privat betriebener autonom fahrender Taxen zu sichern. Sie könnten in der Folge intermodale Tür-zu-Tür-Angebote unterbreiten, wenig frequentierte Busverkehre einstellen und zeitgleich die Versorgungssicherheit und den Komfort für Fahrgäste erhöhen. Pilotprojekte mit Bus-on-demand (regelbar nach § 42 PBefG, Bedarfsflächenverkehr) laufen bereits.¹⁴⁰ Eine begleitende Regulierungsaufgabe könnte dann bspw. sein, private Betreiber zu Rund-um-die-Uhr-Verfügbarkeit zu verpflichten.¹⁴¹ Die Chancen solcher Modelle für private Mobilitätsdienstleister liegen auf der Hand: Geschäftsausweitung gekoppelt mit garantierten Einnahmen, daraus resultierend Planungssicherheit für die nötigen Investitionen.

Materielle und immaterielle Infrastrukturvoraussetzungen

Viele materielle Infrastrukturvoraussetzungen für MaaS sind teilweise identisch mit denen für autonomes Fahren, insbesondere hinsichtlich der 5G-Infrastruktur. Die Daten für eine Vielzahl von Anbietern mit unterschiedlichsten Kapazitäten und Fahrplänen in Echtzeit zu aggregieren, per Algorithmen für den individuellen Kunden nach seinen Vorgaben zu optimieren und ihm sowohl die Buchung

¹³⁸ Vgl. Deloitte 2017b, S. 123

¹³⁹ Vgl. Holmberg u.a. 2016, S. 7

¹⁴⁰ Vgl. www.deutschlandfunk.de/bus-auf-bestellung-duisburg-experimentiert-mit-stadtbus-on.697.de.html?dram:article_id=398681

¹⁴¹ Vgl. Roland Berger 2017, S. 21

als auch eine einzige digitale Bezahltransaktion zu ermöglichen, stellt hohe infrastrukturelle Anforderungen. Um dies zu ermöglichen, müssen ganz unterschiedliche Akteure, wie Mobilitätsdienstleister, Telekommunikationsanbieter, öffentliche und private Verkehrsunternehmen und Verkehrs- und Stadtplanungsbehörden miteinander kooperieren. Entsprechend attestieren Studien einem möglichst kooperativen Zusammenspiel innovativer Privatunternehmen mit öffentlichen Anbietern von ÖPNV und Behörden bei der Realisierung von MaaS höchste Wichtigkeit. Hier sind neue Kooperationsformen einzuüben, da derartige Modelle der Zusammenarbeit etwa bei Verwaltungsbehörden bislang nicht üblich waren.¹⁴²

Offener Datenaustausch

Im Sinne eines fairen Wettbewerbs muss der Zugang zu den Schnittstellen der Anwendungen (APIs) der Verkehrsanbieter für alle MaaS-Initiativen identisch, d.h. ohne Exklusivrechte, gestaltet werden, unabhängig von der Größe der Anbieter. Nur so kann verhindert werden, dass monopolartige Strukturen entstehen, die es einzelnen Anbietern erlauben würden, geschlossene Ökosysteme zu etablieren und Wettbewerber auszuschließen. Die Innovationskraft und Kreativität kleiner Anbieter sollte nicht durch Kunden-Lock-in von bereits etablierten Playern begrenzt werden.¹⁴³

Auch Daten-Provider werden für den (Mobility-)Plattformbetrieb zu einer wichtigen Infrastrukturkomponente. Ihre Funktion in MaaS-Geschäftsmodellen ist die eines unabhängigen Dritten, der zwischen den gelisteten Mobilitätsanbietern und den Fahrgästen vermittelt. Diese «Zwischenetage» bekommt entscheidende Bedeutung bei der Beseitigung von Kooperationsbarrieren, da offener Datenaustausch zwischen MaaS-Anbietern, die im direkten Wettbewerb stehen, nicht zu erwarten ist.¹⁴⁴ Offenlegung aller relevanten Daten anbieterunabhängig, Echtzeitauswertungen, offene Programmierschnittstellen und Datenschutzrichtlinien sind Kernaufgaben der Data Provider.¹⁴⁵ Im Zusammenspiel öffentlicher und privater Anbieter von MaaS ist auch die Regulierung der Datennutzung zu lösen. Für die weitere Entwicklung von MaaS wird es entscheidend sein, dass den Anbietern von Integrationsplattformen (Mobility Operator) offener Zugang zu Statusdaten aller eingebundenen Verkehrsmittel möglich ist.¹⁴⁶

Die kommerziellen Kooperationsregeln zwischen den diversen MaaS-Anbietern sind ebenfalls zu regeln. Wenn ein Plattformanbieter wie Moovel oder Qixxit für eine Fahrt mehrere Anbieter wie bspw. Bahn, Fahrradverleih und Fahrdienst-Anbieter koppelt, muss geregelt werden, welche Provisionen fließen und wem welcher Anteil am Gesamtticketpreis zuzurechnen ist. Hinzu kommen Regelungen zu den Bezahlmodellen, die den Kunden vom Betreiber einer multimodalen App angeboten werden: Tages-, Wochen-, Monatskarten im Abo oder Pay-as-you-go-

¹⁴² Vgl. Polis 2017, S. 2

¹⁴³ Vgl. MaaS Alliance 2017, S. 16

¹⁴⁴ Vgl. MaaS Alliance 2017, S. 12

¹⁴⁵ Vgl. Deloitte 2017b, S. 118

¹⁴⁶ Vgl. MaaS Alliance 2017, S. 14

Lösungen. Solche Regelungen zwischen allen Anbietern kooperativ zu vereinbaren, ist in der Praxis oft ein Stolperstein.¹⁴⁷ In diesen Themenkreis gehören wechselseitiger digitaler Zugang der Anbieter zu Routen, Fahrplänen, Haltepunkten, Preisen und Bezahlmodalitäten. Eine EU-weite Harmonisierung von Passagierrechten in multimodalen Verkehrsketten würde Anbietern und Kunden Sicherheit geben und könnte 2018 Realität werden.¹⁴⁸

Notwendigkeit flexibler Regulierung

Die Regulierung von Verkehrssystemen erfolgt bis heute auf der Basis historisch gewachsener Strukturen, die sektorspezifisch und nicht aufeinander abgestimmt sind, was die Entwicklung von intermodalen Mobilitätskonzepten tendenziell behindert.¹⁴⁹ Diese neuen Angebote sind mit bisher geltenden Regulierungen der gewerblichen Personenbeförderung schwer in Einklang zu bringen bzw. wurden in Einzelfällen bereits auf dem Rechtsweg verboten (UberPop).¹⁵⁰ Für den intelligenten urbanen Verkehrsmix der Zukunft erscheinen hochvernetzte Verkehrssysteme in Kooperation von öffentlichen und privaten Unternehmen unverzichtbar. Dazu gehören regulatorische Rahmenbedingungen zur Steuerung von Verkehrsflüssen, die keine einseitige Bevorzugung eines Sektors zur Folge haben.¹⁵¹

Auf europäischer Ebene liegen seit September 2017 generische Wertkettendarstellungen für MaaS vor, die geeignet erscheinen, das Zusammenspiel zwischen Verkehrsträgern (Service Provider), Daten-Aggregatoren (B2B Aggregator) und Plattformbetreibern (MaaS Operator) zu schematisieren und regulatorische Eingriffe zu steuern.¹⁵² Auf dieser Basis lässt sich grob umreißen, wo künftiger Regulierungsbedarf besteht und welche begleitende Forschung sinnvoll wäre.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass MaaS für Städte und Regionen sehr attraktiv sind, um den drohenden urbanen Verkehrskollaps zu verhindern, Klimaschutzziele zu erreichen, Raumnutzung zu rekonfigurieren und damit mehr Lebensqualität zu sichern.¹⁵³ Zudem ist hohe Attraktivität für Kunden gegeben im Sinne bezahlbarer, flexibler, individuell konfigurierbarer Tür-zu-Tür-Mobilität. Die dazu notwendigen Technologien sind bereits da oder kurz

¹⁴⁷ Vgl. Deloitte 2017b, S. 121

¹⁴⁸ Vgl. MaaS Alliance 2017, S. 17

¹⁴⁹ Vgl. MaaS Alliance 2017, S. 13 und Polis 2017, S. 4

¹⁵⁰ Vgl. KCW 2017, S. 5

¹⁵¹ Vgl. Roland Berger 2017, S. 21. Zwei unterschiedliche Entwicklungspfade für MaaS beschreibt Polis 2017, S. 4f. In einem 2017 erstellten Gutachten von KCW für Bündnis 90/Die Grünen sind mehrere Empfehlungen aufgelistet, u.a. die Abgrenzung zwischen zulässiger «Gefälligkeitsmitnahme» und «Beförderung im Anwendungsbereich des PBefG» gesetzlich eindeutig zu regeln. Auch Pilotversuche sollten durch Überarbeitung der Erprobungsregelung aus § 2 Abs. 7 PBefG ermöglicht werden. Zudem empfehlen die Gutachter, auf spezifische Regelungen für Ride-sharing und Ride-selling zu verzichten, solange nicht klar ist, welches neue Potenzial diese Verkehrsträger haben werden (Vgl. KCW 2017, S. 6f).

¹⁵² Vgl. Maas Alliance 2017, S. 8

¹⁵³ Vgl. Holmberg u.a. 2016, S. 10ff.

vor Markteinführung. Gleichzeitig besteht auch die Notwendigkeit für einen innovativ regulierten Mobilitätsmix, damit die neuen MaaS-Angebote nicht einseitig zulasten des ÖPNV und des Taxigewerbes gehen.¹⁵⁴

154 Vgl. KCW 2017, S. 58

6 Fazit

Auto-Mobilität und Verkehr werden sich in den nächsten 10 bis 15 Jahren mehr verändern als in den vergangenen 120 Jahren zuvor. Klimapolitik als Treiber, neue Technologien, sich verändernde Werte und Einstellungen und neue Akteure führen zu Mobilitätsrevolutionen, die die Grundpfeiler der Geschäftsmodelle der Automobilbranche wegbrechen lassen. Die Automobilhersteller stehen erstmals vor disruptiven Veränderungen, die erhebliche Auswirkungen auf die Wertschöpfung und die Arbeitsplätze in Deutschland haben können. Im Kern müssen sich die Akteure von Automobilproduzenten zu Mobilitätsdienstleistern transformieren. Während zuvor Hardware- und Produktionskompetenzen gefragt waren, stehen nunmehr Software und Dienstleistungskompetenzen im Mittelpunkt. Ob die Transformation der Branche gelingt, hängt wesentlich ab von erfolgreichen Strategien in den Zukunftsfeldern der Elektromobilität, der Vernetzung und des Autonomen Fahrens sowie der Mobilitätsdienstleistungen.

Die Ausgestaltung dieser Zukunftsfelder hat gleichsam auch erheblichen Einfluss auf die Verkehrsentwicklung und das Mobilitätsverhalten der Menschen sowie auf den daraus resultierenden Umwelt- und Klimabeitrag des Verkehrsbereichs in Deutschland. Entsprechend spielt die Innovationsfähigkeit in der derzeitigen kritischen Transitionsperiode sowohl für die künftige Wettbewerbs- und Überlebensfähigkeit der Unternehmen der Automobilbranche als auch für ein nachhaltiges, den Umwelt- und Klimazielen verpflichtendes Mobilitäts- und Verkehrssystem der Zukunft eine entscheidende Rolle. Vor diesem Hintergrund wurden in dieser Studie die Strategiepfade in den Zukunftsfeldern der Auto-Mobilität diskutiert und danach gefragt, durch welche erfolgskritischen Infrastrukturen bzw. ermöglichende Rahmenbedingungen die Innovations- und Transformationsfähigkeit im Auto-Mobilitätssektor unter Berücksichtigung der Klimaziele erhöht werden kann.

Das Papier analysiert die für die Automobilbranche und den Verkehrssektor erfolgskritischen Zukunftsfelder der Elektromobilität, der Brennstoffzellentechnologie sowie des Autonomen Fahrens und der Mobilitätsdienstleistungen. Dabei wird deutlich, dass sich die Klima- und Umweltwirkungen innerhalb der Zukunftsfelder je nach strategischer Ausrichtung stark unterscheiden:

Im Bereich der Elektromobilität zeigt sich, dass bei batterieelektrischen Fahrzeugen der komplette Lebenszyklus (Well-to-Wheel) berücksichtigt werden muss und die antriebstechnologische Wende gleichsam die Energiewende braucht, um eine hohe positive Klimawirkung zu entfalten. Außerdem ist eine Verengung der Diskussion der Elektromobilität auf Energie- bzw. Klimaaspekte kritisch. Vielmehr müssen auch weitere umweltwirksame Aspekte wie negative Effekte beim Abbau von Rohstoffen, soziale Fragen sowie strategische bzw. ökonomische Aspekte

(z.B. Ressourcenverfügbarkeit, Rohstoffabhängigkeit) gegeneinander abgewogen werden.

Bei autonomen Fahrzeugen sind die Umwelt- und Klimaeffekte bislang noch kaum untersucht. Die Analyse von Szenarien zeigt jedoch, dass je nach Ausgestaltung das Autonome Fahren bzw. Robo-Taxis sowohl zu einer Reduzierung des Fahrzeugbestands und des Verkehrsaufkommens als auch zu mehr Verkehr und zu Verkehrsverlagerungen vom ÖPNV hin zu autonomen Shuttles wie auch zu raumintensiveren Siedlungsstrukturen führen können.

In ähnlicher Weise können die sich dynamisch entwickelnden Mobilitätsdienstleistungen – gerade über die Innovationswirkung von kostengünstigen Robo-Taxi-Fahrdiensten – in einem anarchischen Szenario ohne koordinierende Steuerungen zu deutlichen Verkehrssteigerungen und negativen Umwelt- und Klimaeffekten führen. Demgegenüber könnten mittels steuernden Anreizstrukturen intermodale Mobilitätskonzepte – auch unter Berücksichtigung von autonomen Fahrzeugen – steigende Mobilitätsoptionen und gleichsam effizientere Mobilitätsmuster sowie ein geringeres Verkehrsaufkommen bewirken.

Die Zukunftsfelder unterscheiden sich naturgemäß bezüglich der notwendigen Infrastrukturen, die die Innovationsfähigkeit der Akteure bzw. des Mobilitätssystems erhöhen und nachhaltige, klimaschonende Entwicklungen begünstigen. Als erfolgskritische Infrastrukturen für die Elektromobilität (BEV) sind – neben der erwähnten Lebenszyklus-Perspektive – etwa integrierte (Schnell-)Ladeinfrastrukturen, der Aufbau kommunaler Elektroflotten, die Förderung der Sektorenkopplung sowie der Aufbau der Wertschöpfungsstufe «Batteriezelle» in Deutschland zu empfehlen. Damit einhergehen sollte der Aufbau einer Grundlagenforschungs- und Entwicklungslandschaft, die z.B. Kompetenzen im Bereich der Zellchemie herausbildet. Für das autonome Fahren spielt neben schnellen Mobilfunknetzen (5G) und Datenstandards die Flankierung durch regulative Rahmenbedingungen eine zentrale Rolle. Ähnliches gilt für das Zukunftsfeld der intermodalen Mobilitätsdienstleistungen. Hier ist die Gestaltung der institutionellen Infrastrukturen von entscheidender Bedeutung. Dazu zählen rechtliche Anpassungen (z.B. Personenbeförderungsgesetz), die Sicherstellung eines diskriminierungsfreien Zugangs zu Daten und Schnittstellen, kommerzielle Kooperationsregeln und vieles mehr.

Insgesamt gilt zur Förderung der Innovationsfähigkeit für alle Zukunftsfelder: Es braucht eine Balance zwischen – einerseits – zu viel und zu starrer Regulierung, die Kreativität lähmt und Investitionen von Unternehmen behindert; und – andererseits – zu wenig Regulierung, die in einem hochdynamischen, erst im Entstehen begriffenen Markt zu unerwünschten Nebeneffekten und höheren Umwelt- und Klimabelastungen des Verkehrs führen würde. Deutlich ist, dass die Steigerung einer am Gemeinwohl orientierten Innovationsfähigkeit gerade in der kritischen Transitionsphase der Auto-Mobilitätswirtschaft einer politischen Steuerung mit Augenmaß und klaren, auch klimapolitischen Leitplanken bedarf, die technologieneutral ausgerichtet und zukunfts offen sein müssen.

LITERATUR

- AGORA 2017 – Agora Verkehrswende: Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende, Berlin 2017, online: www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- AIRLIQUIDE O.J. – Online: <https://industrie.airliquide.de/lieferformen/tankwagen> (Abruf zuletzt: 11.12.2017)
- ARK INVESTMENT 2016 – ARK Investment: Shared Autonomous Vehicles Will Make Ride Services 30 Times More Attractive (Tasha Keeney), online: <https://ark-invest.com/research/shared-autonomous-vehicles-ride-services-attractive> (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- AUSTRIAN MOBILE POWER – Online: www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_02_Antriebsarten_E-Fahrzeuge.pdf (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- AUTOSAR – Online: www.autosar.org (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- BERYLLS 2017a – Berylls Strategy Advisors: Simulation einer urbanen Mobilitätslösung, basierend auf autonom fahrenden E-Robotaxen in München, München 2017, online: https://gallery.mailchimp.com/b0f6f085b5aa38a5d7497a40b/files/565eae68-626a-4b66-acbc-61c62db0d71d/Berylls_Studie_Robotaxi_Apr2017.pdf (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- BERYLLS 2017b – Berylls Strategy Advisors: The Revolution Of Urban Mobility. Studie zu urbaner Mobilität, München (Juni 2017), online: www.berylls.com/studie_mobilitaet (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- BLOOMBERG.COM – Online: www.bloomberg.com/news/articles/2017-11-07/waymo-driverless-cars-are-now-driverless-in-ground-breaking-test (Abruf zuletzt: 16.12.2017)
- BOSTON CONSULTING GROUP 2016 – Hazan, J.; Lang, N.; Ulrich, P.; Chua, J.; Doubara, X.; Stefens, T.: Will Autonomous Vehicles Derail Trains? Online: www.bcg.com/publications/2016/transportation-travel-tourism-automotive-will-autonomous-vehicles-derail-trains.aspx (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- BRATZEL 2014 – Bratzel, S.: Die junge Generation und das Automobil – neue Kundenanforderungen an das Auto der Zukunft? In: Ebel, B.; Hofer, M. B. (Hrsg.): Automotive Management. Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft, 2. Auflage, Heidelberg 2014, S. 93–108
- BRATZEL 2017 – Bratzel, S.: Elektromobilität als Herzensangelegenheit. Leidet die E-Mobilität an einem Nachfrage- oder Angebotsproblem? In: Handelsblatt Journal, Sonderveröffentlichung zum Thema «Die Zukunft der Automobilindustrie», Mai 2017, S. 10–11
- BRATZEL/TELLERMANN 2008 – Bratzel, S.; Tellermann, R.: Erfolgsfaktoren der Innovationsfähigkeit von Automobilzulieferern. Ein Konzept zur Messung der Innovationskapazität, Schriftenreihe des Center of Automotive, Bergisch Gladbach: Arbeitspapier 2008–01 (100 S.) (gefördert durch die Hans-Böckler-Stiftung)
- BRATZEL/TELLERMANN 2017 – Bratzel, S.; Tellermann, R.: Die Innovationen der globalen Automobilkonzerne. Eine Analyse der Zukunftstrends und Innovationsleistungen der globalen Automobilhersteller und Zulieferer, Bergisch Gladbach, CAM Arbeitspapier 2017/06
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR – Online: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/5g-aktivitaeten-in-deutschland.html (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR – Online: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/084-dobrindt-bericht-der-ethik-kommission.html (Abruf zuletzt: 15.12.2017)

- BUNDESVERBAND EMOBILITÄT – Online: www.bem-ev.de/politischer-forderungskatalog-2017-2018 (Abrufdatum: 10.12.2017)
- CAM 2017: CCI 2017 – Connected Car Innovation Studie 2017 (Summary), Bergisch Gladbach, CAM Arbeitspapier in Zusammenarbeit mit carIT, Juli 2017 (online: <https://cci.car-it.com>)
- CAM/YOUGOV 2017 – CAM/YouGov 2017: E-Mobility – vom Ladenhüter zum Erfolgsmodell. Faktoren zur Steigerung der Akzeptanz und Kaufbereitschaft von Elektroautos, YouGov Reports, Köln
- CITROEN 2016 – CSA Research/Citroen: Our Lives Inside Our Cars. European Survey (August 2016) Clean Energy Partnership, online: <https://cleanenergypartnership.de/h2-mobilitaet/brennstoffzellenantrieb/?scroll=true>; <https://cleanenergypartnership.de/h2-technologie/?techvar1=3&techvar2=1&techvar3=1> (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- CIO – Online: www.cio.de/a/drei-laender-teststrecke-fuer-computerautos-geplant,3562645 (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- DAIMLER 2017 – CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electrified), online: www.daimler.com/innovation/case/das-ist-case.html (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- DAIMLER 2017a – Online: www.daimler.com/innovation/case/autonomous/rechtlicher-rahmen.html (Abruf zuletzt: 16.12.2017)
- DAIMLER 2017b – Online: Mercedes-Benz GLC F-CELL, <http://media.daimler.com/marsMedia-Site/de/instance/ko/Unter-der-Lupe-Mercedes-Benz-GLC-F-CELL-Die-Brennstoffzelle-bekommt-einen-Stecker.xhtml?oid=11111320> (Abruf zuletzt: 7.12.2017)
- DECHEMA 2017 – Wagemann, K.; Ausfelder, F.: E-Fuels – Mehr als eine Option, Whitepaper, hrsg. von DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt am Main 2017, online: http://dechema.de/dechema_media/WhitePaper_E_Fuels-p-20002780.pdf (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- DECHEMA 2017a – «Power-to-X» – a vision moving towards application, online: <https://dechema.wordpress.com/2017/09/04/power-to-x-a-vision-moving-towards-application> (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- DELOITTE 2016a – The future of mobility: What's next?, Deloitte University Press 2016, online: www2.deloitte.com/de/de/pages/manufacturing/articles/the-future-of-mobility.html (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- DELOITTE 2016b – Gearing for change. Preparing for transformation in the automotive ecosystem, Deloitte University Press 2016, online: https://dupress.deloitte.com/content/dam/dup-us-en/articles/3474_Future-of-mobility-gearing-for-change/DUP_Future-of-mobility-gearing-for-change.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- DELOITTE 2017a – Automotive Software Quality. Was OEMs heute für morgen beachten müssen, Studie 2017, online: www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/risk/Risk-Risk-Advisory-Automotive-Software-Quality-DE-s.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- DELOITTE 2017b – The rise of mobility as a service, Deloitte Review, 20, 2017, online: www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/consumer-business/deloitte-nl-cb-ths-rise-of-mobility-as-a-service.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- DELOITTE 2017c – Governing the future of mobility, Deloitte Center for Government Insights 2017, online: <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/future-of-mobility/federal-government-and-transportation-of-the-future.html> (Abruf zuletzt: 6.12.2017)
- DENA 2017a – Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) und Ludwig Bölkow Systemtechnik, E-Fuels Studie (Summary deutsch 6 S.): Das Potenzial strombasierter Kraftstoffe für einen klimaneutralen Verkehr in der EU, Auftraggeber Verband der Automobilindustrie (VDA), Berlin/München/Ottobrunn 2017, online: www.vda.de/de/services/Publikationen/%C2%ABe-fuels%C2%BB-studie---das-potenzial-strombasierter-kraftstoffe-f-r-einen-klimaneutralen-verkehr-in-der-eu.html (Abruf zuletzt: 8.12.2017)
- DENA 2017b – Siegemund, S.; Tromler, M.; Kolb, O.; Zinnecker, V.; (dena); Schmidt, P.; Weindorf, W.; Zittel, W.; Raksha, T.; Zerhusen, J. (LBST): E-Fuels Study, The Potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU, expertise (176 S.) funded by Verband der Automobilindustrie (VDA), Berlin/München/Ottobrunn 2017, online: <https://shop.dena.de/fileadmin/>

- denashop/media/Downloads_Dateien/verkehr/9219_E-FUELS-STUDY_The_potential_of_electricity_based_fuels_for_low_emission_transport_in_the_EU.pdf (Abruf zuletzt: 8.12.2017)
- DENA 2017c – Kurzzusammenfassung Roadmap Power-to-Gas, hrsg. von Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin 2017, online: www.dena.de/newsroom/meldungen/2017/power-to-gas-dena-roadmap-empfehl-technologieoffenheit-und-verbesserung-der-rahmenbedingungen (Abruf zuletzt: 8.12.2017)
- DEUTSCHER BUNDESTAG 2018 – Dokumentation E-Fuels, Deutscher Bundestag, Dokumentation WD5-3000-008/18, online: www.bundestag.de/blob/544092/dab1b2ac5f0264e4b35ea370d197922e/wd-5-008-18-pdf-data.pdf
- DEUTSCHLANDFUNK – Online: www.deutschlandfunk.de/bus-auf-bestellung-duisburg-experimentiert-mit-stadtbus-on.697.de.html?dram:article_id=398681 (Abruf zuletzt: 9.12.2017)
- DIE BRENNSTOFFZELLE – Online: www.diebreinstoffzelle.de/zelltypen/index.shtml (Abruf zuletzt: 3.12.2017)
- DLR 2015 – Frenzel, I.; Jarass, J.; Trommer, S.; Lenz, B.: Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Online: www.dlr.de/vf/Portaldata/12/Resources/dokumente/projekte/pakt2/Ergebnisbericht_E-Nutzer_2015.pdf
- DÜTSCHKE U.A. 2017 – Dütschke, E.; Schneider, U.; Krail, M.; Peters, A.: Akzeptanz für automatisiertes Fahren. Die Chance auf eine nachhaltige Verkehrswende? Internationales Verkehrswesen (69) 3/2017, S. 60–63.
- EMOBILITAETBLOG – Online: <http://emobilitaetblog.de/teststrecken-fuer-autonomes-fahren>
- ENERGIEAGENTUR NRW – Information Wasserstoffspeicher, Distribution, Tankstellen, online: www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/netzwerk-brennstoffzelle/wasserstoffspeicher_distribution_tankstellen?mm=Wasserstoff#ts (Abruf zuletzt: 6.12.2017)
- ENERGY.GOV – Online: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production> (Abruf zuletzt: 11.12.2017)
- EVCHAIN.NRW 2014 – Modellierung der zukünftigen elektromobilen Wertschöpfungskette und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Stärkung des Elektromobilitätsstandortes NRW (EM1006 – eVchain.NRW); Bearbeitung: Institut für Kraftfahrzeuge (RWTH Aachen University), Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, ISATEC GmbH, Wirtschaftsförderung Wuppertal. Gemeinschaftlicher Abschlussbericht
- EUROPEAN COMMISSION – Online: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/wide-range-spectrum-authorisation-approaches-will-help-achieve-full-benefits-future-5g-use> (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- EUROPEAN COMMISSION – Online: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/5g-deployment-could-bring-millions-jobs-and-billions-euros-benefits-study-finds> (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION – Online: www.fcc.gov/news-events/blog/2015/08/03/leading-towards-next-generation-5g-mobile-services (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- 5G PPPa – Online: <https://5g-ppp.eu> (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- 5G PPPb – The European 5G Annual Journal 2017, online: <https://bscw.5g-ppp.eu/pub/bscw.cgi/d204796/Euro%205G%20Annual%20Journal%202017-web.pdf> (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON – Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Infrastruktur, online: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54903/infrastruktur-v9.html> (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- GERMANY 2009 – Joest, S.; Fichtner, M.; Wietschel, M.; Bünger, U.; Stiller, C.; Schmidt, P.; Mer-ten, F.: GermanHy, Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050, Studie (62 S.), im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und in Abstimmung mit der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin/Stuttgart/München/Wuppertal 2009, online: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Produktbilder/verkehr/9060_MOB_Studie_Woher_kommt_der_Wasserstoff_in_Deutschland_bis_2050_Abschlussbericht_.pdf

- GOLEM – Online: www.golem.de/news/mobilfunkallianz-5gaa-5g-soll-fernsteuerung-autonomer-autos-ermoeneglichen-1710-130844.html
- GREENPEACE 2015a – Sterner, M.; Thema, M.; Eckert F.; Lenk, T.; Götz, P.: Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland, Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES) der OHT Regensburg und Energy Brainpool, Studie (Kurzfassung 21 S.) im Auftrag von Greenpeace Energy eG, Regensburg/Hamburg/Berlin August 2015, online: www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/Windgas-Studie_2015_Kurzfassung.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- GREENPEACE 2015b – Sterner, M.; Thema, M.; Eckert F.; Lenk, T.; Götz, P.: Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland, Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES) der OHT Regensburg und Energy Brainpool, Studie (Langfassung 96 S.) im Auftrag von Greenpeace Energy eG, Regensburg/Hamburg/Berlin August 2015, online: www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/2015_FENES_EBP_GPE_Windgas-Studie.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- HOLMBERG U.A. 2016 – Holmberg, P.E.; Collado, M.; Sarasini, S.; Williander, M.: Mobility as a Service – MaaS, Vitoria Swedish ICT AB, funded by Vinnovia, Januar 2016, online: www.viktoria.se/sites/default/files/pub/www.viktoria.se/upload/publications/final_report_maas_framework_v_1_0.pdf (Abruf zuletzt: 8.12.2017)
- INTEL CORPORATION – Online: <https://iq.intel.de/5g-der-kommunikationsschlüssel-zu-autonomem-fahren> (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM 2016 – Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic. OECD 2016, online: www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- JÜLICH 2013 – Ramchandra, B.; Clemens, A.; Zapp, P.: Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Electrolysis – A Review, STE Preprint, Jülich 2013, online: www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-STE/DE/Publikationen/research_reports/2012/report_06_2012.pdf?__blob=publicationFile (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- KCW 2017 – Gutachten Reformbedarf PbefG. Rechtsrahmen für Mobilitätsangebote mit flexibler Bedienung unter besonderer Berücksichtigung des Bedarfs in Räumen und für Zeiten mit schwacher Nachfrage, Endbericht erstellt für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen, Berlin 2017, online: www.kcw-online.de/content/6-veroeffentlichungen/90-kcw-gutachten-zum-reformbedarf-des-personenbeforderungsgesetzes-pbefg/2017-06-02-reformbedarf-pbefg-flexible-bedienung_gutachten.pdf (Abruf zuletzt: 8.12.2017)
- LASHINSKY 2017 – Lashinsky, A.: Wild Ride. Inside Uber's Ques for World Domination, Ramdom House, New York 2017
- LINDE O.J. – Der sauberste Energieträger, den es je gab. Hydrogen Solutions von Linde Gas (Brochure), online: www.the-linde-group.com/de/clean_technology/clean_technology_portfolio/hydrogen_energy_h2/h2_one_stop_shop/h2_distribution_and_storage/index.html (Abruf zuletzt: 3.12.2017)
- LINZ U.A. 2017 – Linz, C.; Müller-Stewens, G.; Zimmermann, A.: Fit für die Zukunft, in: Harvard Business Manager, Juli 2017, S.45–55
- MAAS ALLIANCE 2017 – Guidelines & Recommendations to create the foundations for a thriving MaaS Ecosystem, White Paper, MaaS Alliance, Brussels, September 2017, online: https://maas-alliance.eu/wp-content/uploads/sites/7/2017/09/MaaS-WhitePaper_final_040917-2.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- MCKINSEY 2015 – How the sharing economy can make its case, online: www.mckinsey.com/business-functions/strategy-and-corporate-finance/our-insights/how-the-sharing-economy-can-make-its-case (Abruf zuletzt: 6.12.2017)
- MCKINSEY 2016a – Monetizing car data. New service business opportunities to create new customer benefits, Advanced Industries September 2016, online: www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Monetizing%20car%20data/Monetizing-car-data.ashx (Abruf zuletzt: 5.12.2017)

- MCKINSEY 2016b – Automotive revolution – perspective towards 2030. How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry, online: www.mckinsey.de/files/automotive_revolution_perspective_towards_2030.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- MCKINSEY 2017 – Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability; Advanced Industries January 2017, online: www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/electrifying-insights-how-automakers-can-drive-electrified-vehicle-sales-and-profitability (Abruf zuletzt: 15. Dezember 2017)
- MORO/HELMERS 2015 – Moro, A.; Helmers, E.: A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles. In: The International Journal of Life Cycle Assessment. 2015, online: doi:10.1007/s11367-015-0954-z. (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- MORO/LONZA 2017 – Moro, A.; Lonza L.: Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment. An International Journal. July 2017 (<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.012>)
- NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT – NEP Online: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/themen/umwelt> (Abruf zuletzt: 9.12.2017)
- NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT – NEP Online: <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/themen/ladeinfrastruktur> (Abruf zuletzt: 30.11.2017)
- NEALER U.A. 2015 – Nealer, R.; Reichmuth, D.; Anair, D.: Cleaner Cars from Cradle to Grave. How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emissions, Union of Concerned Scientists 2015, online: www.ucsusa.org/sites/default/files/attach/2015/11/Cleaner-Cars-from-Cradle-to-Grave-full-report.pdf (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- NEALER ET AL. 2017 – Nealer, R., Reichmuth, D.; Anair, D.: Cleaner Cars from Cradle to Grave. How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emissions; November 2015 (online: www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/life-cycle-ev-emissions)
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT, VERKEHR UND DIGITALISIERUNG – Online: www.mw.niedersachsen.de/aktuelles/presseinformationen/autonomes-fahren---startschuss-fuer-das-testfeld-niedersachsen-151791.html (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- NITSCH/FISCHEDICK 2002 – Nitsch, J.; Fischedick, M.: Eine vollständig regenerative Energieversorgung mit Wasserstoff – Illusion oder realistische Perspektive? Hrsg. vom DLR-Institut für Technische Thermodynamik und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2002, online: www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Wasserstoff-Essen.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- NGIN MOBILITY – Online: <http://ngin-mobility.com/artikel/uber-deutschland-kommentar> (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- NOW 2017a – Elektromobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle. Stand der Entwicklung und Markteinführung bei PKW in Deutschland, hrsg. von Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin 2017, online: www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/elektromobilitaet-mit-wasserstoff-2017_de_310817.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- NOW 2017b – 10 Jahre NIP – 2007 bis 2016, Jahresbericht, hrsg. von Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin 2017, online: www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/2-now-jahresberichte/now_10-jahre-nip.pdf (Abruf zuletzt: 5.12.2017)
- POLIS 2017 – Hoadley, S. (Ed.): Mobility as a Service: Implications for urban and regional transport, Discussion Paper offering the perspective of Polis member cities and regions on Mobility as a Service (MaaS), Brussels, September 2017, online: www.polisnetwork.eu/uploads/Modules/PublicDocuments/polis-maas-discussion-paper-2017---final_.pdf (Abruf zuletzt: 4.12.2017)
- PWC 2017 – Bollmann, O.; Neuhausen, J.; Stürmer, F.A.; Kluschke, P.: From CO₂ neutral fuels to emission free driving, Published by PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungs-

- gesellschaft, November 2017, online: www.pwc.de/de/automobilindustrie/alternative-fuels-powertrains-v2.pdf (Abruf zuletzt: 14.12.2017)
- REUTERS – Online: www.reuters.com/article/us-uber-tech-results/ubers-revenue-hits-6-5-billion-in-2016-still-has-large-loss-idUSKBN17G1IB (Abruf zuletzt: 4.12.2017)
- ROLAND BERGER 2017 – Roland Berger, Urbane Mobilität 2030: zwischen Anarchie und Hyper-effizienz, Szenario Analyse Oktober 2017, online: www.rolandberger.com/de/Publications/pub_urban_mobility_2030.html (Abruf zuletzt: 14.12.2017)
- RWTH AACHEN – Pressemitteilung Kopernikus, online: www.rwth-aachen.de/cms/root/Die-RWTH/Aktuell/Pressemitteilungen/April/~kvvv/Mit-Kopernikus-in-die-Energiewende (Abruf zuletzt: 4.12.2017)
- SAE INTERNATIONAL – SAE standard J3016, online: www.sae.org/news/3544 (Abruf zuletzt: 4.12.2017)
- SCHAEFFER 2017 – Schaeffer, E.: Industry X.0. Digitale Chancen in der Industrie nutzen, Redline, München 2017
- SCHMIDT 2015 – Schmidt, S.: Synthetische Kraftstoffe im Wartestand, in: Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 76,6 2015, S.8–13
- SCHNEIDER 2017 – Schneider, U.: User perceptions of the emerging hydrogen infrastructure for fuel cell electric vehicles, hrsg. vom Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), ECEE 2017 Summer Study – Consumption, Efficiency & Limits, Stuttgart 2017, online: www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/ECEEE/4-289-17_Schneider.pdf (Abruf zuletzt: 30.11.2017)
- SHELL 2017 – Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂ (online: www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/0c6e4c3c838e73351b155afa848c829977d9f0348d9bf21fdfe9643a0fde3151/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf)
- SPIEGEL-ONLINE – Wettstreit um die weltweiten Kobaltreserven, 9.12.2017, online unter: www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/autoindustrie-die-grosse-angst-vor-der-kobalt-knappheit-a-1181584-druck.html (Abruf zuletzt: 10.12.2017)
- STATISTA – Online: <https://de.statista.com/outlook/368/137/ride-sharing/deutschland#> (Abruf zuletzt: 10.12.2017)
- STRATEGIEPLATTFORM POWER TO GAS – Online: www.powertogas.info/power-to-gas/power-to-gas-produkt-wasserstoff/wasserstoff-in-der-mobilitaet (Abruf zuletzt: 15.12.2017)
- STRATEGY& 2017 – The 2017 Strategy& Digital Auto Report, September 2017, online: www.strategyand.pwc.com/media/file/2017-Strategyand-Digital-Auto-Report.pdf (Abruf zuletzt: 14.12.2017)
- STONE 2017 – Stone, B.: The Upstarts. How Uber, Airbnb and the Killer Companies of the New Silicon Valley are Changing the World, Bantam Press, London 2017
- SÜDDEUTSCHE ZEITUNG – Europas Autohersteller sollen zusammen Batterie bauen, 18.7.2017, online: www.sueddeutsche.de/wirtschaft/e-mobiliaet-europas-autohersteller-sollen-zusammen-batterie-bauen-1.3669877 (Abruf zuletzt: 16.12.2017)
- SÜDDEUTSCHE ZEITUNG – Großbritannien testet von 2019 an Roboterautos ohne Fahrer, 19. November 2017, online: www.sueddeutsche.de/auto/autonomes-fahren-grossbritannien-testet-von-an-roboterautos-ohne-fahrer-1.3755690
- TECHCRUNCH – Online: <https://techcrunch.com/2017/04/10/how-blablacar-faced-growing-pains-and-had-to-change-its-focus> (Abruf zuletzt: 14.12.2017)
- TRANSPORT & ENVIRONMENT (T&E) – Messagie, M.: Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles, Vrije Universiteit Brussel 2014, online: www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf (Abruf zuletzt: 14.12.2017)
- TRIVECTOR 2016 – Emma Lund u.a.: Feasibility study MaaS. A Business Case for EC2B, Trivector, Lund/Göteborg/Stockholm, 2016, online: http://en.trivector.se/fileadmin/user_upload/Trafic/Rapporter/Feasibility_study_EC2B_1.0.pdf (Abruf zuletzt: 13.12.2017)

- UBA 2013 – Umweltbundesamt. Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen, von Jöhrens, J. und Helms, H., (ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung GmbH), Berlin (Texte 95/2013)
- UBER – Online: <https://uberestimator.com/cities> (Abruf zuletzt: 4.12.2017)
- UNITED NATIONS – World Urbanization Prospects 2014, online: <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.pdf> (Abruf zuletzt: 4.12.2017)
- WALL STREET JOURNAL – Will Tesla Die for Lack of Cobalt? 29.11.2017, online: www.wsj.com/articles/will-tesla-die-for-lack-of-cobalt-1511951403?mod=trending_now_1 (Abruf zuletzt: 10.12.2017)
- WURSTER 2016 – Wurster, R.: Hydrogen Safety: An overview, in: Compendium of Hydrogen Energy, Volume 4 Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy, ed. by Ball, M.; Basile, A.; Veziroğlu, T.; Woodhead Publishing Series in Energy Number 86, 2016, pp.195–213

ABBILDUNGS- & TABELLENVERZEICHNIS

Abb. 1:	Bedeutung des Lebenszyklus von BEV und Diesel-Fahrzeugen für den CO ₂ -Fußabdruck	19
Abb. 2:	Neuzulassungen BEV, PHEV und Hybriden in Deutschland 2010-2017	20
Abb. 3:	Marktanteil von BEV- und PHEV-E-Fahrzeugen im Ländervergleich (2016/2017)	21
Abb. 4:	Kumulierte Innovationsstärke von Serien-Innovationen im Bereich E-Mobilität (BEV)	23
Abb. 5:	Die Stufen des Autonomen Fahrens	40
Abb. 6:	Serien-Innovationsstärke von Automobilherstellern beim Autonomen Fahren (Level ≥2)	45
Abb. 7:	Mobilitätsdienstleistungstypen, Akteure und Services (Auswahl)	52
Abb. 8:	Mobilitätsdienstleistungsstärke der globalen Automobilhersteller 2017	55
Kasten 1:	CASE – Zukunftsfelder der Daimler AG	14
Tabelle 1:	E-Auto-Ziele und Strategien ausgewählter Hersteller	24-25

ABKÜRZUNGEN

BEV	Battery Electric Vehicle
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CAM	Center of Automotive Management
CO ₂	Kohlendioxid
DB	Datenbank
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
CGH ₂	Compressed Hydrogen (Komprimierter Wasserstoff)
GPS	Global Positioning System
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KWH	Kilowattstunde
KI	Künstliche Intelligenz
LH ₂	Liquid Hydrogen (Flüssiger Wasserstoff)
LIDAR	Light Detection and Ranging
MAAS	Mobility-as-a-Service
MDL	Mobilitätsdienstleistungen
MIV	Mobilisierter Individualverkehr
MWH	Megawattstunde
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzelle
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
P2X	Power-to-X
P2G	Power-to-Gas
P2L	Power-to-Liquid
PV	Photovoltaik
SYNFUEL	Synthetic Fuel (Synthetischer Kraftstoff)
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
TWH	Terawattstunde
UBA	Umweltbundesamt

DIE AUTOREN

Prof. Dr. Stefan Bratzel ist Direktor des Center of Automotive Management (CAM) in Bergisch Gladbach. Studium der Politikwissenschaft an der Freien Universität Berlin. Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsstelle für Umweltpolitik an der Freien Universität Berlin. Promotion zum Dr. rer. pol. bei Prof. Dr. Martin Jänicke. Preis der Stiftung der deutschen Städte, Gemeinden und Kreise für seine Dissertation «Erfolgsbedingungen von umweltorientierter Verkehrspolitik». Berufliche Stationen: u.a. smart, Quam, PTV, (seit April 2004) Dozent und Studiengangsleiter für Automotive Management an der privaten Fachhochschule der Wirtschaft (FHDW) in Bergisch Gladbach, Gründer und Direktor des Center of Automotive Management.

E-Mail: stefan.bratzel@auto-institut.de

Prof. Dr. Jürgen Thömmes, Center of Automotive Management (CAM), dort Wissenschaftlicher Projektleiter. Studium BWL, Soziologie, Romanistik in Trier und Paris. Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Trier, dort 1995 Promotion. Berufliche Stationen: Projektleiter INFPC Luxemburg, Berater Kienbaum Gummersbach, Geschäftsführer Refaconsult Dortmund, Vorstand IFAO AG Karlsruhe, Professor BWL/Mittelstand FHDW Bergisch Gladbach.

E-Mail: juergen.thoemmes@auto-institut.de

Alternative Antriebe, Autonomes Fahren, Mobilitätsdienstleistungen

Neue Infrastrukturen für die Verkehrswende im Automobilsektor

Die Zeit des fossilen Verbrennungsmotors läuft ab. Klimaschutz und Ressourcenmangel treiben die ökologische Transformation des Verkehrswesens in Deutschland (und weltweit) voran. Das erfordert allerdings zahlreiche Innovationen: digitale Vernetzung, Elektrifizierung, Ladeinfrastruktur für E-Mobilität und andere Antriebe. So muss beispielsweise für das autonome Fahren und die digitale Vernetzung 5 G Standard werden. Elektromobilität und Brennstoffzellenantrieb benötigen komplett unterschiedliche Infrastrukturen.

Die vorliegende Studie schaut auf die Innovationsfelder der kommenden Jahre und zeigt, welche Anreize zur Weiterentwicklung der entsprechenden Infrastruktur gesetzt werden müssen.

ISBN 978-3-86928-174-2