

Auto tankt Internet

Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur

ANALYSE



Impressum

Auto tankt Internet.

Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur.

ERSTELLT IM AUFTRAG VON

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

PROJEKTLEITUNG

Marena Pützschler
Projektmanagerin Neue Mobilität,
Agora Verkehrswende
marena.puetzschler@agora-verkehrswende.de

DURCHFÜHRUNG

Auftragnehmer

Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe

Autor

Dr. Michael Krail

Lektorat: Eva Berié

Satz: Juliane Franz und Marica Gehlfuß,
Agora Verkehrswende

Titelbild: iStock.com/oonal

Version: 1.0

Veröffentlichung: Dezember 2020

52-2021-DE

Bitte zitieren als:

Agora Verkehrswende (2020): *Auto tankt Internet. Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur.*

Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

„Auch das Internet hat einen Auspuff“, so lautete vor etwa drei Jahren der Titel eines Artikels im Feuilleton einer großen deutschen Tageszeitung.¹ Es ging darin um die Besonderheiten der Architektur von Rechenzentren und um den wachsenden Stromverbrauch durch die alltägliche Nutzung von Smartphones und Computern. Denn auch wenn an den Endgeräten keine Abgase zu sehen sind, entstehen doch an anderer Stelle Emissionen. Jede Suchanfrage im Internet, jedes Foto und jeder Film auf Social Media, jede Videokonferenz und jeder Streaming-Abend verbraucht Strom, der erst erzeugt werden muss – im besten Fall aus Windkraft- und Solaranlagen, häufig aber auch aus Gas- und Kohlekraftwerken.

Das Auto wird immer mehr zu einem Teil dieser Gleichung. Es wandelt sich zu einem Computer auf Rädern. Es hilft bereits beim Einparken und Navigieren, mehr und mehr wird es auch das Fahren übernehmen. Dafür erfasst es Daten vom Fahrzeug und von der Umgebung, lädt Informationen über die Verkehrslage aus Datenplattformen herunter und gibt selbst Daten an diese Plattformen weiter. So bringt das Auto der Zukunft seine Fahrgäste automatisch, sicher und pünktlich ans Ziel, aber es tankt Strom nicht nur für die Fortbewegung, sondern auch für die Datenverarbeitung. Es tankt gewissermaßen Internet – und das hat, siehe oben, auch einen Auspuff. Selbst wenn der Strom komplett aus erneuerbaren Quellen käme und deshalb keine Emissionen verursachen würde, ist der Energieverbrauch ein kritischer Faktor. Denn erneuerbarer Strom ist ein kostbares Gut und wird an vielen Stellen dringend benötigt, um Klimaneutralität zu erreichen.

Die Diskussion über die Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch steht erst am Anfang. Immerhin, der Digitalgipfel der Bundesregierung stand Ende 2020 im Zeichen der Nachhaltigkeit und ging dabei auch auf Mobilität ein. Die Literatur betont bisher vor allem die Hoffnung, dass automatisierte Fahrzeuge effizienter fahren können und deshalb gegenüber herkömmlichen Pkw Energieeinsparpotenziale haben. Wenig Beachtung findet dagegen der zusätzliche Energieverbrauch, der mit der Automatisierung der

Fahrzeuge und der Vernetzung dieser miteinander, mit Datenplattformen und der Infrastruktur einhergeht.

In der Analyse „Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen“ von August 2020 haben wir uns bereits übergreifend mit den Chancen und Risiken der Fahrzeugautomatisierung für nachhaltige Mobilität beschäftigt. Dabei wurde deutlich, dass die Automatisierung nicht von selbst zur Verkehrswende führt; dass es notwendig ist, die Entwicklung und Anwendung der Technologie im Sinne der Verkehrswende genau zu untersuchen, offen zu diskutieren und, darauf aufbauend, gezielt zu steuern. Das gilt erst recht in der Frage nach dem Energieverbrauch und den Treibhausgasemissionen.

Die vorliegende Analyse soll einen ersten Anstoß geben, die energierelevanten Aspekte des automatisierten und vernetzten Fahrens ins Auge zu fassen. Ziel ist es, die Potenziale ganzheitlich zu betrachten, die Herausforderungen klarer herauszuarbeiten und damit die öffentliche Diskussion und die politische Entscheidungsfindung zu unterstützen. Denn wenn wir es richtig machen, kann die Automatisierung durchaus einen Beitrag zur Verkehrswende leisten und den Energieverbrauch im Verkehr reduzieren. Sie tut es nur nicht automatisch.

Christian Hochfeld

für das Team von Agora Verkehrswende
Berlin, 11. Januar 2021

1 Maak, Niklas: Auch das Internet hat einen Auspuff, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung (13.1.2018), S. 9.

Handlungsempfehlungen

Automatisierte und vernetzte Pkw und die damit verbundenen Infrastrukturen und Datenströme können sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Energiebilanz im Verkehr haben. Sie können den Energieverbrauch senken, wenn sie effizient gefahren und eingesetzt werden; sie können den Energieverbrauch aber auch deutlich erhöhen. Die Kriterien für einen effizienten Einsatz der Technologien müssen jetzt, in der Frühphase der Entwicklung, von allen beteiligten Seiten diskutiert und von der Politik definiert werden. Auf Basis der vorliegenden Analyse empfiehlt Agora Verkehrswende, dabei auf folgende Punkte zu achten:

1

Zusätzlichen On-board-Energieverbrauch automatisierter Fahrzeuge durch die Auswahl effizienter Komponenten minimieren und dies in den Flottengrenzwerten berücksichtigen.

Durch zusätzliche Systemkomponenten steigt der Energieverbrauch automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen an. Besonders stark ins Gewicht fallen die in den Steuergeräten verbauten Prozessoren (Central Processor Units, CPUs und Graphics Processor Units, GPUs) und Speicher. Für batterieelektrische Fahrzeuge spielt die Energieeffizienz der Komponenten eine bedeutende Rolle: Je weniger Strom sie verbrauchen, desto größer die Reichweite beim Fahren. Die vorliegende Analyse baut auf Schätzungen auf, dass sich der zusätzliche On-board-Energieverbrauch vollständig automatisierter Fahrzeuge bei stetiger Effizienzverbesserung im Jahr 2050 auf 270 Wattstunden pro 100 Kilometer begrenzen lässt. Die europäischen Flottengrenzwerte sollten in Zukunft von einer CO₂-Emissionsmetrik auf eine Energieeffizienzmetrik umgestellt werden. Dabei sollte auch der On-Board-Energieverbrauch der Automatisierungskomponenten berücksichtigt werden.

2

Automatisierte Fahrzeuge vernetzen: so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich.

Je mehr Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) sowie zwischen Fahrzeug und Datenplattform (Vehicle-to-Cloud, V2C) notwendig ist, desto höher sind nicht nur die damit verbundenen Investitionskosten, sondern auch der daraus resultierende Energieverbrauch. Auch aus Sicherheitsgründen sollten die Fahrzeuge so konzipiert sein, dass sie unabhängig von weiteren Sensoren in der Infrastruktur fahren können. Bei der Optimierung des Gesamtsystems sollten mögliche Vorteile durch eine weitere Vernetzung gegen die Nachteile eines möglichen Anstiegs des Energieverbrauchs abgewogen werden. Eine Datenübertragung per lokalem Funknetz (Wireless Local Area Network, WLAN) sollte einer Übertragung per 5G-Mobilfunknetz aus Effizienzgründen vorgezogen werden, wo dies technisch möglich ist.

3

Big-Data-Analyseverfahren entwickeln, die die Menge der zu übertragenden Daten geringhalten.

Aus heutiger Sicht könnten pro automatisiertem Fahrzeug Datenmengen von 1,4 bis 19 Terabyte pro Stunde (TB/h) anfallen. Insbesondere die Datenmengen, die an andere Verkehrsteilnehmer oder die Plattform übertragen werden, sollten möglichst geringgehalten werden, um einen effizienten Betrieb zu ermöglichen. Sie sind eine entscheidende Größe für den Energieverbrauch des Gesamtsystems. Bereits eine übertragene Datenmenge von 0,8 TB/h kann sämtliche Energieeffizienzvorteile, die das automatisierte Fahren an anderer Stelle bringt, zunichtemachen. Daher gilt es für die Pkw-Hersteller, Zulieferer und Softwareentwickler, effiziente Lösungen für den Umgang mit großen Datenmengen zu finden. Nur mit effizienten Big-Data-Analyseverfahren lassen sich die beim automatisierten und vernetzten Fahren gesammelten Daten so nutzen, dass die Verbesserung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses nicht gleichzeitig zu einem Anstieg des Energieverbrauchs führt.

4

Automatisierte Fahrzeuge gemeinschaftlich nutzen und in den öffentlichen Verkehr integrieren, um einem Anstieg der Fahrleistung entgegenzuwirken.

Der motorisierte Individualverkehr wird durch automatisierte Fahrzeuge komfortabler und für neue Nutzergruppen zugänglich. Außerdem könnten Fahrzeuge leer herumfahren, statt auf einem kostenpflichtigen Parkplatz zu stehen. Das würde zu einem weiteren Anstieg von Fahrleistung und Energieverbrauch führen. Bereits ein Anstieg der Fahrleistung um nur 1 bis 2,6 Prozent im Jahr 2050 würde mögliche Energieeffizienzgewinne der Automatisierung zunichtemachen. Daher gilt es, den Betrieb möglichst effizient zu gestalten, die Fahrzeuge gemeinschaftlich zu nutzen und in den öffentlichen Verkehr zu integrieren.

5

Energieverbrauch der digitalen Infrastruktur gesondert regulieren.

Wie automatisierte und vernetzte Pkw sich auf den Energieverbrauch im Verkehr auswirken, hängt von vielen Faktoren ab: von Effizienzsteigerungen sowohl im Bereich der Hardware als auch der Software sowie einer Optimierung des Gesamtsystems. In den Anfangsjahren zehrt der Energieverbrauch der Infrastruktur selbst bei optimistischen Annahmen die Effizienzgewinne im Fahrbetrieb weitgehend auf oder überwiegt diese sogar. Erst langfristig erreicht die gesamte Energieeinsparung bei Minimalvernetzung einen Wert von bestenfalls 10 Prozent der Antriebsenergie eines heute üblichen mittleren Elektroautos; bei weitgehender Vernetzung sind es auch unter Berücksichtigung steigender Effizienz lediglich 4 Prozent. Deshalb sollte der Energieverbrauch der digitalen Infrastruktur einer gesonderten Effizienzregelung unterworfen werden. Die Auswirkungen solcher Regelungen auf den Energieverbrauch sollten von Anfang an berücksichtigt und fortlaufend ausgewertet werden, damit frühzeitig nachgesteuert werden kann.

Inhalt

Handlungsempfehlungen	5
1 Einleitung	9
1.1 Definitionen	10
1.2 Vorgehensweise	11
2 Automatisierungs- und Vernetzungsszenarien	13
3 Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung auf den Energieverbrauch	17
3.1 Energieeffizienz im Fahrbetrieb	18
3.2 On-board-Energieverbrauch durch Automatisierungssysteme	19
3.3 Energieverbrauch durch die Vernetzung im Mobilfunk	21
3.4 Energieverbrauch durch die Vernetzung mit dem Backend	23
3.5 Gesamte Wirkungen auf den Energieverbrauch	24
3.6 Potenzielle Reboundeffekte durch AVF	26
4 Handlungsempfehlungen und Ausblick	29
5 Literatur	31

1 | Einleitung

Der Einfluss der zunehmenden Digitalisierung im Verkehrssektor ist bereits heute in der alltäglichen Mobilität spürbar. Sie beeinflusst die Wahl der Verkehrsmittel, ermöglicht die Optimierung von Routen und vereinfacht die multimodale Nutzung von Mobilitätsdienstleistungen. Dabei steht der Verkehrssektor erst am Anfang eines umfassenden digitalen Wandels. Insbesondere die rasante Entwicklung der Automatisierung und Vernetzung wird nach Einschätzung von Experten noch wesentlich weiter reichende Veränderungsprozesse im Mobilitätsverhalten und Verkehrssystem in Gang setzen.

Weltweit arbeiten Automobilhersteller, Zulieferer und IT-Unternehmen seit vielen Jahren bereits an der Idee automatisierter und vernetzter Fahrzeuge. Die Evolution der Fahrzeugautomatisierung vollzieht sich dabei in den meisten Fällen über fünf Stufen der Automatisierung (SAE-Levels des automatisierten Fahrens) mit unterschiedlichen Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten für den Fahrer beziehungsweise die Systeme. Bei der finalen Stufe (Stufe 5), dem fahrerlosen Fahren, entsteht dann spätestens ein Wandel: Der Fahrer wird vollumfänglich zum Beifahrer beziehungsweise zum Passagier.

Während fahrerloses Fahren auf der Schiene, beispielsweise auf U-Bahn-Linien, bereits seit vielen Jahren weltweit Realität ist und es ebenfalls seit Langem bereits vollautomatisierte Systeme (Stufe 4) im Luftverkehr gibt, befindet man sich heute im Straßenverkehr noch auf der Schwelle zum hochautomatisierten Fahren (Stufe 3). Wegen der Komplexität der Anwendung im Straßenverkehr und der geforderten Interaktion mit allen möglichen Verkehrsteilnehmern sind noch einige Hürden auf dem Weg zum fahrerlosen Fahren zu überwinden. Die Einschätzungen zum Fahrplan für die Einführung der finalen beiden Automatisierungsstufen, dem vollautomatisierten und dem fahrerlosen Fahren, variieren die Aussagen der Hersteller und der Forschung. Während ERTRAC die Einführung des vollautomatisierten Fahrens in der Stadt im Zeitraum zwischen 2020 und 2026 erwartet (ERTRAC 2019), rechnet beispielsweise der VDA damit erst zwischen 2025 und 2030.

Parallel zur Entwicklung der Automatisierung im Straßenverkehr arbeitet die Industrie auch an der Vernetzung der Fahrzeuge miteinander (V2V), der Vernetzung mit einer Cloud beziehungsweise einem Backend (V2C) und der Vernetzung mit der Infrastruktur (V2I). Obwohl

beide Technologien prinzipiell unabhängig voneinander sind, werden Automatisierung und Vernetzung meist in Kombination gedacht. Dies bedeutet, dass bei der Entwicklung der Automatisierungsfunktionen die Vernetzung der Fahrzeuge, und damit ein Informationsaustausch für den sicheren und komfortablen Betrieb der Fahrzeuge, nicht zwingend notwendig ist. Allerdings kann der Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen ein wichtiges Puzzlestück hin zu einem energieeffizienten und noch komfortableren Verkehrssystem sein. Daher arbeiten nahezu alle Hersteller daran, diese zusätzlichen Informationen in den Systemen zum Mehrwert der Fahrer nutzbar zu machen.

Insgesamt schwingen bei der Entwicklung der Automatisierung und der Vernetzung im Straßenverkehr weit mehr Hoffnungen mit als nur der Wunsch nach mehr Komfort und zusätzlichen Mobilitätsdienstleistungen. In der Strategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2015 sind diese Hoffnungen formuliert: Man erwartet durch automatisiertes und vernetztes Fahren (AVF) eine Steigerung der Verkehrseffizienz, eine Erhöhung der Verkehrssicherheit, eine Reduktion mobilitätsbedingter Emissionen und eine Stärkung des Innovations- und Wirtschaftsstandorts Deutschland (BMVI 2015). Fahrerlose Verkehrssysteme sollen die Einführung neuer, nachfrageorientierter Mobilitätsdienstleistungen ermöglichen und damit zusätzliche Alternativen für eine multi- und intermodale Mobilität eröffnen. Der Pkw im Privatbesitz könnte dadurch zukünftig an Bedeutung verlieren, was den Wandel hin zu einer energieeffizienten und treibhausgasreduzierten Mobilität beschleunigen kann. Gleichzeitig besteht jedoch auch die Gefahr, dass eine unregulierte Einführung neuer, automatisierter und vernetzter Verkehrssysteme auf der Straße den ohnehin schon dominierenden motorisierten Individualverkehr (MIV) noch attraktiver werden lässt und den Öffentlichen Verkehr zunehmend kannibalisiert. Ein Aspekt, der bislang nur unzureichend Beachtung findet, ist der zusätzliche Energieverbrauch der mit der zunehmenden Automatisierung der Fahrzeuge und deren Vernetzung mit einem Backend und der Infrastruktur einhergeht. Diese Analyse soll diesen Aspekt näher beleuchten und die Auswirkungen der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr auf Fahrzeugebene, aufseiten des Backends sowie des Mobilfunks auf den Energieverbrauch quantifizieren. Der Fokus der Analyse liegt dabei auf der Nutzungsphase der Automatisierung und

Vernetzung in Pkw. Die Wirkungen der Herstellung und Entsorgung von Systemkomponenten auf den Energieverbrauch werden dabei nicht betrachtet.

Die Wirkungsanalyse wird dabei trotz der noch vorherrschenden Ungewissheit über die Entwicklung des AVF als dringend notwendig betrachtet, um mögliche negative Effekte auf den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen frühzeitig zu erkennen. Vor diesem Hintergrund soll diese Analyse von Agora Verkehrswende dazu beitragen, die Betrachtung von Klima- und Umwelteffekten automatisierter und vernetzter Fahrzeuge im politischen und öffentlichen Diskurs zu stärken und die Notwendigkeit etwaiger Effizienzstandards für die Automatisierung von Fahrzeugen zu diskutieren. Zu diesem Zweck werden in diesem Papier die Implikationen der Automatisierung und Vernetzung des MIV auf Einzelfahrzeugebene mit dem Zeithorizont bis zum Jahr 2050 verdeutlicht. Es sollen explizit nicht die Auswirkungen eines eingeschwungenen Systems mit 100 Prozent vollautomatisierten beziehungsweise fahrerlosen und vernetzten Pkw untersucht werden, sondern die bis 2050 zu erwartende Diffusion der deutschen Pkw-Flotte unter realen Marktbedingungen.

Ziel des Papiers ist es darüber hinaus, weiterführenden Forschungsbedarf und erste mögliche Handlungsoptionen aufzuzeigen, um mit der Fahrzeugautomatisierung und -vernetzung einen Beitrag zu klimafreundlichem Verkehr leisten zu können.

1.1 Definitionen

Die Entwicklung der Automatisierung im Verkehr geschieht in den meisten Fällen evolutiv über fünf Stufen. Ausnahmen davon stellen Fahrzeugkonzepte dar, die bereits von Anfang an auf den Fahrer verzichten, wie beispielsweise fahrerlose Kleinbusse. Bei den fünf Stufen der Automatisierung orientieren sich die Bundesregierung, der VDA sowie die Hersteller und Zulieferer an der Systematik der SAE International (2018), die den Stufen sowohl Funktionalitäten der Systems als auch die Verantwortlichkeiten zwischen Fahrer und System zuordnet:

- Stufe 1 – Assistiertes Fahren:
Hierbei übernimmt das System entweder die Längs- oder die Querverführung des Fahrzeugs, wobei der Fahrer das System dauerhaft überwachen und zum Eingreifen bereit sein muss.
- Stufe 2 – Teilautomatisiertes Fahren:
Das System übernimmt sowohl die Längs- als auch die Querverführung des Fahrzeugs für einen gewissen Zeitraum oder in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe in der Lage sein.
- Stufe 3 – Hochautomatisiertes Fahren:
Das System übernimmt die Längs- und Querverführung des Fahrzeugs im spezifischen Anwendungsfall und erkennt Systemgrenzen. Der Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen, aber jederzeit in der Lage sein, die Fahraufgabe nach Aufforderung in einer angemessenen Zeit wieder vollständig und sicher zu übernehmen.
- Stufe 4 – Vollautomatisiertes Fahren:
Beim vollautomatisierten Fahren übernimmt das System die Fahrzeugführung in einem definierten Anwendungsfall vollständig und bewältigt alle damit verbundenen Situationen automatisch.
- Stufe 5 – Fahrerloses Fahren:
Beim fahrerlosen Fahren übernimmt das System die Fahrzeugführung vollständig vom Start bis zum Ziel auf allen Straßentypen, in allen Geschwindigkeitsbereichen und bei allen Umfeld- und Wetterbedingungen.

Bei der Vernetzung von Fahrzeugen miteinander (V2V), mit einem Backend/einer Cloud (V2C) oder mit der Verkehrsinfrastruktur (V2I) gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten der Datenübertragung: WLAN oder Mobilfunk. WLAN wird vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) unter der Bezeichnung 802.11 standardisiert. Es gibt mittlerweile zahlreiche Weiterentwicklungsstufen, die sich unter anderem in ihrer Bandbreite und dem genutzten Frequenzband unterscheiden. Mit dem Standard 802.11p wurde für die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander sowie mit der Verkehrsinfrastruktur ein eigener Substandard festgelegt. Dieser wird in Europa auch als ITS-G5, in den USA hingegen als Dedicated Short Range Communication (DSRC) oder Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) bezeichnet. Er ermöglicht die Kommunikation bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von bis zu 200 km/h und

einer Reichweite bis zu 1000 Meter. Die WLAN-Kommunikation kann zur V2V-, zur V2C- und zur V2I-Vernetzung genutzt werden. Neben dem Datentransfer über WLAN besteht noch die Möglichkeit der Nutzung des Mobilfunks. Der Mobilfunk eignet sich beispielsweise ebenfalls für eine V2V- und V2C-Vernetzung. Idealerweise wird dabei der 5G-Standard benutzt, der mit bis zu 10 Gbit/s einen deutlich schnelleren Datendurchfluss ermöglicht als LTE Advanced mit bis zu 1 Gbit/s (Herrmann und Brenner 2018). 5G-Netze haben den Vorteil, dass dezentral Rechenoperationen an den Basisstationen durchgeführt werden können. Dadurch sinken die Latenzzeiten auf 10 bis 100 Millisekunden, was besonders im hohen Geschwindigkeitsbereich bei automatisierten Fahrzeugen die Sicherheit erhöhen kann.

Da WLAN-Technologie unabhängig von der Netzabdeckung des Mobilfunks ist, eignet sich diese Technologie insbesondere für den Einsatz in automatisierten Fahrzeugen zur Steigerung der Sicherheit (Kollisionswarnungen, Unfallvermeidung), aber auch lokal zur Verbesserung der Effizienz und des Verkehrsflusses (Kreuzungsmanagement). Mobilfunksysteme sind hingegen besonders gut für die Vielzahl von globalen Diensten wie Verkehrsmanagementsysteme, Stauprognosen oder dem kooperativen Fahren geeignet. Sie ermöglichen auch die Erstellung von Updates oder Erweiterungen des digitalen HD-Kartenmaterials, das automatisierte Fahrzeuge zum sicheren Fahren benötigen. Letztere lassen sich aber auch über WLAN vor Antritt der Fahrt übertragen.

1.2 Vorgehensweise

Die Ermittlung der Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf den Energieverbrauch basiert auf einer Auswertung einschlägiger Sekundärliteratur zum Thema Energieverbrauch sowie zum technischen Design des Systems des automatisierten und vernetzten Fahrens. Ausgehend von den Erkenntnissen dieser Recherche wurden zwei Szenarien erarbeitet, die die unterschiedlichen Entwicklungspfade der Automatisierung und vorrangig der Vernetzung im Straßenverkehr darstellen sollen. Ziel dieser Szenarientwicklung ist zum einen das Verdeutlichen der heute noch bestehenden Unsicherheit bezüglich der technischen Entwicklung des Systems in der Zukunft sowie der daraus resultierenden Implikationen auf den Endenergieverbrauch eines automatisier-

ten und vernetzten Fahrzeugs gegenüber einem Fahrzeug ohne diese Funktionalitäten. Um die Storylines hinter den beiden Szenarien zu validieren beziehungsweise zu verfeinern, wurden in einem weiteren Arbeitsschritt sechs nationale und internationale Experten aus den Bereichen Forschung und Industrie befragt. Die Erkenntnisse dieser Interviews sind dabei sowohl in die Entwicklung der Szenarien als auch in die Berechnung der Wirkungen auf den Endenergieverbrauch eingeflossen.

Im finalen Arbeitsschritt wurden für diese Analyse die Auswirkungen des AVF auf die Effizienz der Fahrzeuge im Betrieb sowie deren Endenergieverbrauch durch zusätzliche elektrische Verbraucher (Sensoren, etc.) und deren zusätzliches Gewicht auf Ebene der Einzelfahrzeuge berechnet. Um die Wirkungen auf das gesamte System zu berücksichtigen, wurden sie um die Implikationen auf den Endenergieverbrauch durch die Vernetzung über den Mobilfunk sowie den zusätzlichen Endenergieverbrauch für das Backend und die vernetzte Infrastruktur ergänzt. Auf Basis der Ergebnisse der Wirkungsanalyse und der Erkenntnisse aus den qualitativen Experteninterviews wurden abschließend Handlungsempfehlungen für die Politik und die Industrie erarbeitet und weiterer Forschungsbedarf ermittelt.

2 | Automatisierungs- und Vernetzungsszenarien

Ein zentraler Aspekt von Technikfolgenabschätzungen ist der Umgang mit der Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung von Innovationen. Während man bei den Automatisierungsstufen erst die Schwelle zum hochautomatisierten Fahren (Stufe 3) überschritten hat, gibt es bezüglich der Erwartungen des Zeitpunkts der Markteinführung von Stufe 4 beziehungsweise Stufe 5 noch Unsicherheiten. Noch größere Unsicherheiten bestehen in Bezug auf den Umfang und die Geschwindigkeit der Vernetzung der Fahrzeuge untereinander (V2V), mit dem Backend beziehungsweise der Cloud (V2C) oder der Verkehrsinfrastruktur (V2I). Neu zugelassene Pkw sind heute bereits „keine isolierten Gefährte“ mehr, aber der Umfang der Vernetzung wird zukünftig deutlich größer sein (Hermann und Brenner 2018). Ist es heute nur der von der EU seit 2018 vorgeschriebene automatische Emergency Call bei Unfällen, eröffnet die Vernetzung zukünftig noch viele weitere Funktionen bis hin zum kooperativen Fahren. Um diese Unsicherheiten und die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen aufzuzeigen, wurden für die Wirkungsanalyse der Fahrzeugautomatisierung zwei Szenarien auf Basis der Literaturanalyse und der qualitativen Interviews entwickelt und verfeinert.

Trotz der Unterschiede bei der Entwicklung und dem Design der Automatisierungssysteme in Pkw zwischen den Herstellern und Zulieferern gibt es eine von allen befolgte Prämisse: Es muss jederzeit ein für die Fahrzeuginsassen und die anderen Verkehrsteilnehmer sicherer Fahrbetrieb möglich sein. Diese Grundvoraussetzung bei der Entwicklung der Automatisierung bedingt, dass die Fahrfunktionen bei jeglicher anvisierten Automatisierungsstufe des Fahrzeugs unabhängig sein müssen von zusätzlichen Daten, die über eine mögliche Vernetzung (V2X) dem Fahrzeug bereitgestellt werden. Diese Prämisse gilt zumindest so lange, bis alle Fahrzeuge mit entsprechender Vernetzungsfunktion ausgestattet sind, ein lückenlos installiertes Backend beziehungsweise eine Cloud aufgebaut ist, die durch einen schnellen und ebenfalls lückenlosen Mobilfunk mit 5G-Standard oder WLAN erreichbar sind sowie die Verkehrsinfrastruktur (Verkehrsschilder, Lichtsignalanlagen) vollständig vernetzt sind. Während die Kosten für die Entwicklung der Automatisierung bei den Herstellern, Zulieferern sowie den beteiligten IT-Unternehmen durch den Markthochlauf gedeckt werden, ist die Frage der Übernahme der Investitionskosten für das Backend heute noch nicht

geklärt. Bisher gibt es hierzu weder eine Kooperation zwischen den Herstellern noch ist sicher, ob und in welchem Umfang die öffentliche Hand diese Investitionskosten tätigt. Die befragten Experten vertreten sehr unterschiedliche Ansichten. Ein weiterer noch nicht vollumfänglich geklärter Aspekt, der eine stärkere Nutzung der Vernetzung behindert, sind die Lizenzgebühren für die Nutzung des Mobilfunks für V2X durch Patente.

Auf der anderen Seite ist der Mehrwert einer kombinierten Nutzung der Automatisierung mit Vernetzung unbestritten. Der Datenaustausch der Fahrzeuge über Sonderereignisse wie Gefahrensituationen oder gar Unfälle kann die Sicherheit des Gesamtsystems zusätzlich verbessern. Darüber hinaus ermöglicht die V2X-Vernetzung die Verbesserung des Verkehrsflusses und kooperatives Fahren. Dadurch kann die vorhandene Straßeninfrastruktur effektiver genutzt werden, die Kapazität erhöht sich um bis zu 40 Prozent (Krause et al. 2017). Dies setzt jedoch einen sehr hohen Anteil mindestens vollautomatisierter (Stufe 4) und vernetzter Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte voraus.

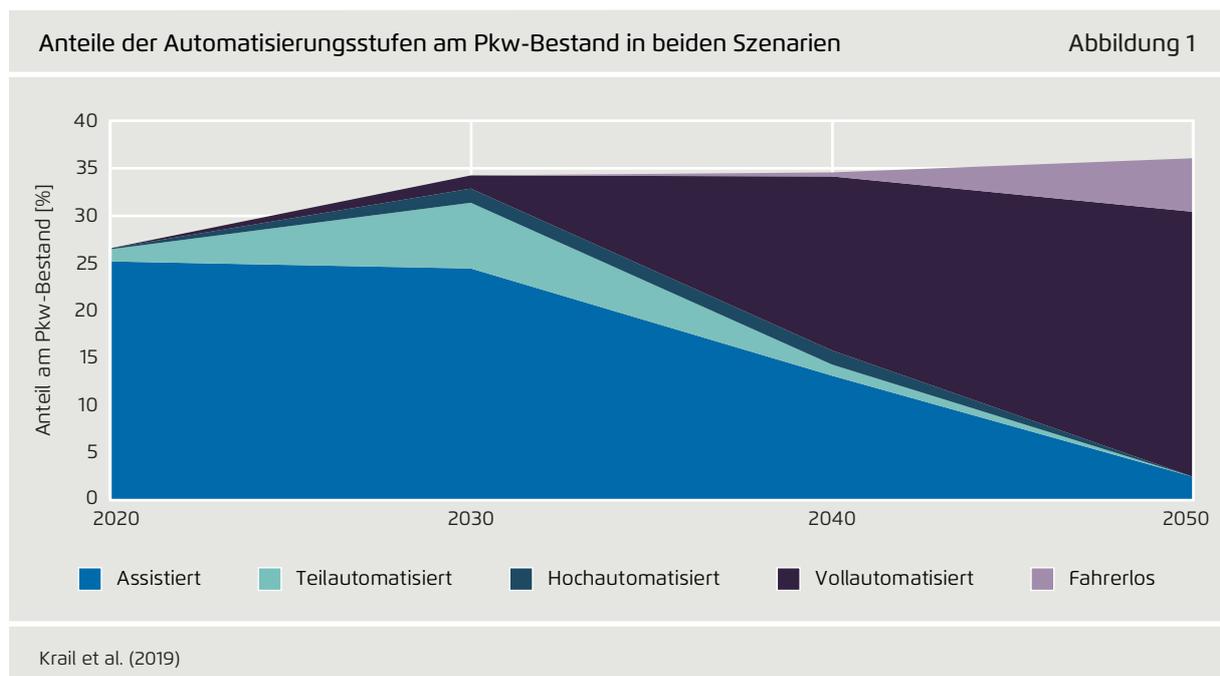
Bei der Abschätzung des Markthochlaufs gibt es zwischen den betrachteten Studien noch Unterschiede hinsichtlich der Markteinführungszeitpunkte und der Geschwindigkeit in der die jeweiligen Automatisierungsstufen in den Fahrzeugbestand diffundieren. Während manche Studien von einer 100-prozentigen Diffusion der Stufe 4 und zum Teil sogar der Stufe 5 in die Fahrzeugbestände bis 2050 ausgehen, kommen andere Studien zum Ergebnis, dass bis 2050 nur ein kleiner Teil der Pkw-Flotte mit Automatisierungsfunktionen der Stufe 4 oder gar 5 ausgerüstet sein wird. Letztere Studien berücksichtigen dabei die Nutzerakzeptanz sowie die Bereitschaft der Käufer, für diese Ausstattung deutliche Aufpreise zu bezahlen. Trommer et al. (2016) geht beispielweise von einer Durchdringung von Pkw der Stufen 4 und 5 in Deutschland bis zum Jahr 2035 von 17 Prozent aus. Altenburg et al. (2018) gibt ein mögliches Spektrum der Bestandsanteile von Pkw der Stufen 4 und 5 von bis zu 35 Prozent im Jahr 2050 aus. Kraill et al. (2019) berechnet auf Basis von Nutzerakzeptanz, Mehrpreisbereitschaft und einer detaillierten Analyse der zu erwartenden Kostendegression der Automatisierungssysteme einen wahrscheinlichen Anteil von Pkw der Stufen 4 und 5 am deutschen Fahrzeugbestand von 36 Prozent. Auf Grund der Aktualität und des Detaillierungsgrades

wird für beide Szenarien der Markthochlauf aus Krail et al. (2019) übernommen (siehe Abbildung 1). Die Studie geht davon aus, dass Stufe 3 ab dem Jahr 2020, Stufe 4 ab dem Jahr 2025 und Stufe 5 ab dem Jahr 2035 frühestens und zunächst in den sogenannten Technologieträgern in der Pkw Oberklasse und erst mit zeitlichem Verzug von 5 beziehungsweise 10 Jahren danach in der Mittelklasse beziehungsweise der Kompaktkwagen-/Kleinwagenklasse verfügbar sein wird.

Während der Markthochlauf der Automatisierungsfunktionen für beide Szenarien identisch ist, unterscheidet sich die Entwicklung und Ausprägung der Vernetzung in den beiden Szenarien. Im Szenario „Minimalvernetzung“ wird davon ausgegangen, dass es außer der Vernetzung der Fahrzeuge untereinander (V2V) über Ad-hoc-Netzwerke mit dem Standard 802.11p oder über Mobilfunk keine weitere Vernetzung mit einer Cloud beziehungsweise einem Backend oder der Infrastruktur geben wird. Der Datenaustausch ist hierbei auf den unmittelbaren Umkreis der Fahrzeuge (300 bis 1.000 Meter) beschränkt – außer im Falle eines benötigten Updates des digitalen Kartenmaterials. Im Szenario „Minimalvernetzung“ wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge nur zum Zweck der Updates der HD-Karten mit einem Backend oder einer Cloud (V2C) über Mobilfunk vernetzt sind und die Ver-

kehrsinfrastruktur (V2I) bis 2050 nicht entscheidend vernetzt wird. Das Szenario ist geprägt von der Skepsis, ob die Investitionskosten in eine vernetzte Infrastruktur bis 2050 aufgebracht werden können, welche teilweise von den befragten Experten geäußert wurde.

Der Gegenpol zur „Minimalvernetzung“ stellt das Szenario „Effiziente Vernetzung“ dar. Hier wird angenommen, dass sowohl die Vernetzung der Fahrzeuge (V2V) als auch die Vernetzung mit einem Backend beziehungsweise einer Cloud (V2C) und die Vernetzung mit der Infrastruktur (V2I) bis 2050 größtenteils realisiert werden kann. Die Vernetzung mit dem Backend ist in diesem Szenario über den Datentransfer der Fahrzeugdaten zu und von einem dezentralen, lokalen Frontend-Server (Mobile Edge Computing, kurz MEC) via 5G-Mobilfunk oder über den WLAN-Standard 802.11p konzipiert. Die MEC-Technologie ermöglicht es dabei, Informationen zu Ereignissen, weitere Informationen sowie Updates von HD-Karten oder Informationen aus herstellerspezifischen Datenbanken von und zu den vernetzten Fahrzeugen im Zielgebiet zu transferieren. Entscheidend sind hierbei die kurzen Latenzzeiten, die mit einer zentralen Cloud/einem zentralen Backend nicht realisierbar sind. Gerade bei höheren Geschwindigkeiten kann dieser Faktor sicherheitsrelevant sein. Die MEC-Technologie



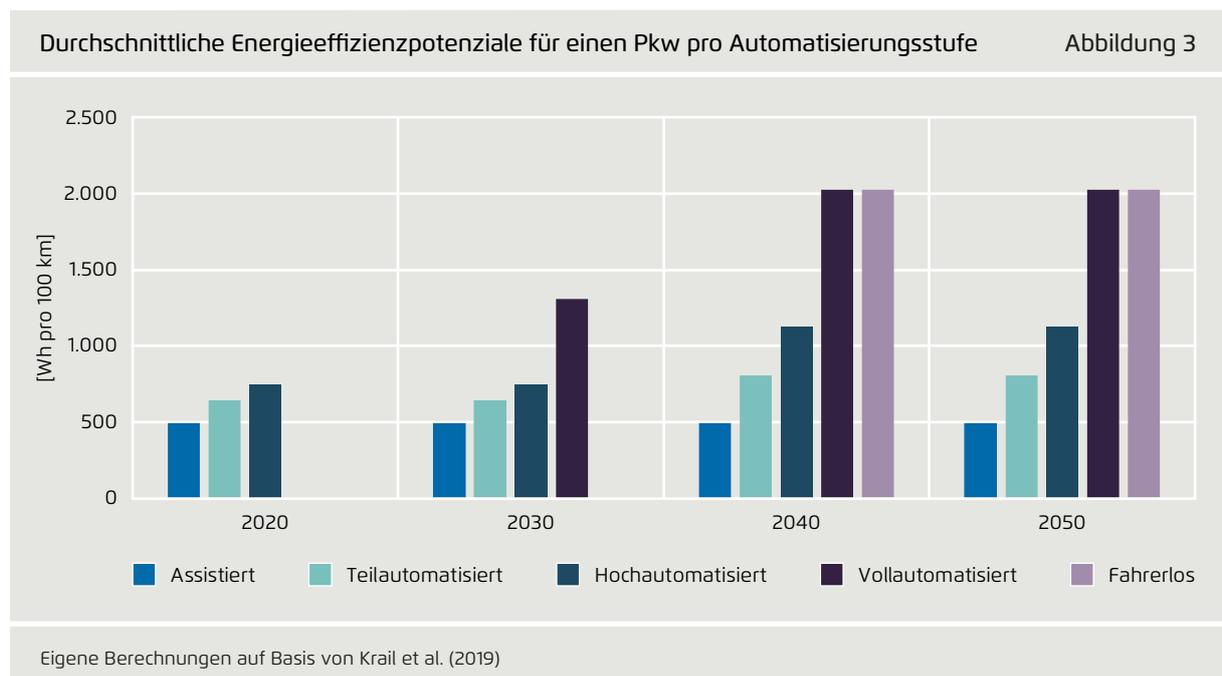
3 | Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung auf den Energieverbrauch

Seit einigen Jahren bereits beschäftigt sich die Forschung neben der reinen technischen Entwicklung auch mit den potenziellen zukünftigen Wirkungen des AVF auf das Verkehrssystem, die dadurch entstehenden Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch. Bekannte Arbeiten sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Lissabon-Studie des ITF (OECD/ITF 2015) oder die MEGA-FON-Studie (Friedrich et al. 2017), bei denen unter anderem die Wirkungen einer vollständigen Umstellung des heutigen Verkehrssystems auf automatisierte, vernetzte und geteilte Fahrzeuge untersucht wurden. Andere Studien wie e-mobil-BW (2017), Lee et al. (2019) oder Krail et al. (2019) betrachten die Wirkungen nicht nur für geteilte Fahrzeugkonzepte und berücksichtigen dabei neben den verkehrlichen Wirkungen auf den Modal Split auch Effizienzgewinne und Effizienzverluste durch AVF. Die Studie Krail et al. (2019) geht dabei besonders detailliert auf die Effizienzgewinne ein. Nahezu alle betrachteten Studien im Rahmen dieser Analyse haben jedoch gemein, dass die Wirkungsabschätzungen an der Grenze des Verkehrssektors enden. Potenzielle Wirkungen auf den Endenergieverbrauch durch die Vernetzung (V2X) im Mobilfunk, im Bereich der IT durch das angeschlossene Backend beziehungsweise durch die vernetzte Verkehrsinfrastruktur (V2I) bleiben außen vor. Mögliche Effizienzgewinne im Verkehrssektor könnten daher durch einen steigenden

Endenergieverbrauch außerhalb des Verkehrssektors aufgefangen werden. Um die gesamten Wirkungen auf Ebene eines Einzelfahrzeugs zu beleuchten, hat sich diese Studie den folgenden Wirkungen gewidmet:

- Wirkungen auf die Energieeffizienz im Fahrbetrieb durch das AVF,
- Wirkungen auf den zusätzlichen Endenergieverbrauch on board durch die AVF Systeme,
- Wirkungen auf den Endenergieverbrauch im Mobilfunk durch AVF sowie
- Wirkungen auf den Endenergieverbrauch des vernetzten Backend und der Verkehrsinfrastruktur.

Dabei wird für beide Szenarien die Differenz im Endenergieverbrauch eines einzelnen Mittelklasse-Pkw mit AVF-Systemen mit einem Mittelklasse-Pkw ohne AVF-System pro 100 gefahrene Kilometer verglichen. Die Analyse berücksichtigt dabei die potenzielle Entwicklung der AVF-Systeme über die Zeit gemäß der Definition der Szenarien. In den folgenden Kapiteln werden die Vorgehensweise, die zugrundeliegenden Annahmen sowie die Ergebnisse für die vier Teilbereiche beschrieben.



3.1 Energieeffizienz im Fahrbetrieb

Große, herstellerübergreifende europäische Feldstudien wie euroFOT (Benmimoun et al. 2012), AdaptIVe-IP (Fahrenkrog et al. 2017) oder L3Pilot (2020) haben die Wirkungen verschiedener Automatisierungsfunktionen in Pkw (Stufe 2 bis Stufe 4) auf den Endenergieverbrauch der Fahrzeuge in der Praxis analysiert. Dabei wurden mit Testfahrzeugen mehrere Millionen Testkilometer auf europäischen Straßen zurückgelegt, die Ergebnisse dokumentiert und mit von Menschen gesteuerten Fahrzeugen mit vergleichbaren Fahrprofilen verglichen. Es zeigten sich bereits für assistierte und teilautomatisierte Pkw Effizienzvorteile beim Verbrauch gegenüber menschlich gesteuerten Pkw. Diese werden bei Pkw, die durch AVF-Systeme gesteuert werden vor allem durch harmonisierte Fahreigenschaften wie angepasstes Beschleunigen und Abbremsen, durch eine optimierte Motoransteuerung und eine Berücksichtigung der Topografie erzeugt. Zusätzliche Potenziale können durch die aufgrund der beschränkten Reichweite der Sensoren für automatisierte Fahrzeuge derzeit machbaren Maximalgeschwindigkeiten von 130 km/h gegenüber nicht automatisierten Fahrzeugen entstehen, sind aber in den Feldstudien durch die Annahme ähnlicher Fahrprofile nicht berücksichtigt.

Weitere Effekte in Form eines verbesserten Verkehrsflusses können durch kooperatives Fahren entstehen, welche jedoch in den Feldstudien nicht untersucht wurden. Kooperatives Fahren bedeutet, dass einzelne Fahrzeuge und Fahrer sich kooperativ im Verkehr bewegen und dass die AVF-Systeme individuelle Mikroziele und deren Ausführung im Sinne einer besseren makroskopischen Gesamtwirkung (zum Beispiel zur besseren Ausnutzung der Kapazität der Infrastruktur) abstimmen. Dieses zusätzliche Effizienzpotenzial des AVF lässt sich jedoch erst dann realisieren, wenn nahezu alle Straßenfahrzeuge vernetzt und zumindest automatisiert sind. Da jedoch bei der Quantifizierung der Szenarien der angenommenen Markthochlauf verdeutlicht, dass nur ein Teil des Pkw-Bestandes bis 2050 diese Eigenschaften erfüllt, ist eine Umsetzung dieser Potenziale bis 2050 unrealistisch und wurde bei der Quantifizierung nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund ist das Einsparpotenzial durch AVF im Szenario „Minimalvernetzung“ identisch mit dem Szenario „Effiziente Vernetzung“.

Auf Basis dieser Erkenntnisse aus den erwähnten Feldstudien wurde in Krail et al. (2019) eine Abschätzung der gesamten Wirkungen für alle Automatisierungsstufen bis zum fahrerlosen Fahren vorgenommen. Die betrachteten Feldstudien sowie weitere Analysen aus der Studie zeigen, dass die Effizienzpotenziale bei automatisierten und vernetzten Pkw von zahlreichen Faktoren wie dem Straßentyp, der Verkehrsdichte, der Automatisierungsstufe sowie dem Anteil automatisierter und vernetzter Fahrzeuge am gesamten Fahrzeugbestand abhängen. Daher wurden diese Faktoren bei der Ermittlung von repräsentativen Effizienzpotenzialen über alle Fahrsituationen hinweg anhand von Fahrleistungserhebungen berücksichtigt. Abbildung 3 zeigt die ermittelten durchschnittlichen Energieeinsparpotenziale in Wh/100 km für einen Pkw der Mittelklasse über alle Automatisierungsstufen hinweg bis zum Jahr 2050. Durch die steigende Anzahl an Pkw mit Automatisierungsfunktionen bis 2050 steigt bei Pkw auch das Effizienzpotenzial. Dies liegt darin begründet, dass ineffiziente Fahrsituationen mit sinkendem Anteil an menschlich gesteuerten Fahrzeugen abnehmen (Krause et al. 2017). Fehlende Einsparpotenziale im Jahr 2020 für Stufe 4 und 5 beziehungsweise 2030 für Stufe 5 sind damit begründet, dass die Markteinführung dieser Funktionen erst ab 2025 beziehungsweise 2035 angenommen wird.

Die sich ergebenden Einsparpotenziale für die beiden Szenarien zeigen sich bereits bei assistiertem Fahren (Stufe 1) und steigern sich mit den Automatisierungsstufen von 493 Wh/100 km für Stufe 1 auf bis knapp über 2.000 Wh/100 km für Stufe 4 und Stufe 5 im Jahr 2050. Umgerechnet auf den Verbrauch eines Diesel-Pkw wären dies ein zwischen 0,2 und 0,8 Liter geringerer Verbrauch pro 100 Kilometer. Die ermittelten Einsparpotenziale können jedoch nur dann erreicht werden, wenn die in den Pkw vorhandenen Automatisierungsfunktionen durch die Nutzer auch bei allen Fahrsituationen angewendet werden, die dies erlauben. Das bedeutet beispielsweise, dass durch die Annahme der Einführung eines City Pilot erst ab 2035 auch erst ab diesem Zeitpunkt automatisiertes Fahren innerhalb geschlossener Ortschaften möglich sein wird und erst dann das Potenzial dieser Fahrsituationen eingerechnet wird.

3.2 On-board-Energieverbrauch durch Automatisierungssysteme

Neben den Effizienzpotenzialen durch AVF im Pkw müssen bei einer gesamten Betrachtung der Wirkungen auch die gegenteiligen Effekte berücksichtigt werden. Diese entstehen durch den Endenergieverbrauch der AVF-Systemkomponenten im Fahrzeug sowie durch einen Mehrverbrauch in Folge eines höheren Fahrzeuggewichts oder eines steigenden Luftwiderstands durch Aufbauten, wie beispielsweise Lidare auf dem Dach der Fahrzeuge. Letztere Auswirkungen wurden bei der Abschätzung jedoch nicht berücksichtigt, weil die Positionierung der Lidare nicht bei allen Herstellern zu einer Verschlechterung des Luftwiderstands des Fahrzeugs führen.

Für die Abschätzung des Mehrverbrauchs eines automatisierten und vernetzten Pkw gegenüber einem nicht automatisierten und nicht vernetzten Pkw müssen zunächst Abschätzungen über die Anzahl und die Art der verbauten Systemkomponenten getroffen werden. Hierbei zeigen sich zumindest für die bisher auf dem Markt verfügbaren Pkw der Stufen 2 und 3 teils deutliche Unterschiede. Während Tesla stark auf den Einsatz von zahlreichen Kameras setzt, bauen deutsche Hersteller auf Mittel- und Fernbereichsradare in Kombination mit zumeist einem Lidar und Kameras. Anhand der Experteninterviews und der Annahmen aus Krail et al. (2019) wurden die in Tabelle 1 dokumentierten Annahmen zur Anzahl und Art der verbauten Systemkomponenten getroffen. Für hochautomatisierte Pkw (Stufe 3) ent-

spricht die Anzahl der Komponenten denen des Audi A8, eines der ersten Stufe-3-Serienfahrzeuge.

Im Anschluss an diese Festlegung wurde für jede benötigte Systemkomponente des AVF eine Bandbreite des Endenergieverbrauchs ermittelt. Die jeweilige Bandbreite der Energieverbräuche pro Systemkomponente wurde aus Gawron et al. (2018) und Liu et al. (2019) entnommen. Anhand der Bandbreiten und der Annahmen zur Anzahl der benötigten Sensoren, Funk- und Recheneinheiten konnten minimale und maximale Energieverbräuche pro Pkw bezogen auf 100 gefahrene Kilometer berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden anschließend mittels der Angaben aus den qualitativen Interviews mit Experten aus der Forschung und der Industrie validiert. Ebenfalls eingerechnet wurden dabei der aus dem zusätzlichen Gewicht der Sensoren, Funk- und Recheneinheiten resultierende Mehrverbrauch der Fahrzeuge.

Die Ergebnisse der Berechnung sind dabei deutlich näher an den Ergebnissen von Gawron et al. (2018) und den Einschätzungen der Experten als an den Ergebnissen aus Liu et al. (2019). Der Grund für diesen Unterschied ergibt sich hauptsächlich aus der angenommenen Anzahl der benötigten Komponenten sowie der Einrechnung bestimmter Komponenten in beiden Studien. Liu et al. (2019) rechnet beispielweise den Endenergieverbrauch von TFT-Monitoren im Cockpit hinzu, welche aber unabhängig von Automatisierungs- und Vernetzungsfunktionen schon in Fahrzeugen verbaut werden. Angesichts der Experteninterviews und der Ergebnisse der Stakeholder-Beteiligung

Annahmen zur Anzahl der AVF-Systemkomponenten pro Automatisierungsstufe

Tabelle 1

Komponenten	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Ultraschall	9	9	9	9	9
Radar	2	4	4	8	8
Lidar	0	0	1	1	1
Kamera	0	2	5	5	5
DSRC	1	1	1	1	1
GNSS-Positioning	1	1	1	1	1
V2X-Modul	1	1	1	1	1
Steuergeräte	1	1	2	3	3

Fraunhofer ISI (abgeleitet aus Krail et al. 2019)

aus der Studie Krail et al. (2019) kann davon ausgegangen werden, dass die getroffenen Annahmen valide sind.

Beim Endenergieverbrauch der Komponenten fallen die in den Steuergeräten verbauten Recheneinheiten (CPUs und GPUs) sowie die Speichereinheiten besonders stark ins Gewicht. Nach Gawron et al. (2018) wird zwischen 41 und 53 Prozent des gesamten zusätzlichen Endenergieverbrauchs durch diese Komponenten erzeugt. Sensoren wie Radare, Ultraschall, Lidare oder Kameras haben dagegen nur zwischen 2 und 7 Prozent Anteil am zusätzlichen Energieverbrauch der AVF Systeme. Das zusätzliche Gewicht der AVF-Komponenten ist für ca. 14 bis 15 Prozent des zusätzlichen Energieverbrauchs verantwortlich. Nach eigenen Berechnungen auf Basis von Gawron et al. (2018) verbraucht ein Stufe-3-Pkw heute zwischen 310 und 656 Wh/100 km. Ein Stufe-4-Pkw würde aus heutiger Perspektive zwischen 555 und 800 Wh/100 km Energie verbrauchen. Für den Ausblick auf die Entwicklung des Energieverbrauchs durch die AVF-Komponenten on board bis zum Jahr 2050 ist es jedoch sinnvoll, die Entwicklung der Energieeffizienz der Komponenten abzuschätzen und einzubeziehen. Hierzu wurde für die Sensoren, das DSRC, GNSS-Positioning und das V2X-Modul aus Einschätzungen der befragten Experten Annahmen getroffen und in die Berechnung

des Energieverbrauchs für die Jahre 2030, 2040 und 2050 einbezogen. Es wird davon ausgegangen, dass die Energieeffizienz der genannten Komponenten bis zum Jahr 2050 um 10 Prozent verbessert werden kann. Bei den Steuergeräten beziehungsweise den Rechen- und Speichereinheiten basiert die Annahme der Entwicklung der Energieeffizienz auf dem Gesetz von Koomey (Koomey et al. 2011). Danach verdoppelt sich die Energieeffizienz von Rechnern gemessen an der Rechenleistung alle 1,57 Jahre seit dem Jahr 1975. Für die Berechnungen in dieser Studie wurde aber eine konservativere Annahme getroffen und eine Verdopplung nur alle 5 Jahre angenommen. Parallel geht die Studie aber auch von einer Erhöhung der Rechenleistung von 20 Prozent alle 5 Jahre aus. Neben den erwähnten notwendigen Komponenten ist es durchaus denkbar, dass aus rechtlichen Gründen die Nutzung eines sogenannten Drive Recorders vorgeschrieben wird. Sollte diese Speicherung der Fahrdaten über einen längeren Zeitraum gesetzlich vorgeschrieben werden, dann kann sich der zusätzliche Endenergieverbrauch on board nochmals erhöhen. Die Größenordnung dieser Erhöhung hängt jedoch vom vorgeschriebenen Zeitrahmen für die Datenspeicherung ab und ist daher in den Berechnungen nicht berücksichtigt worden.

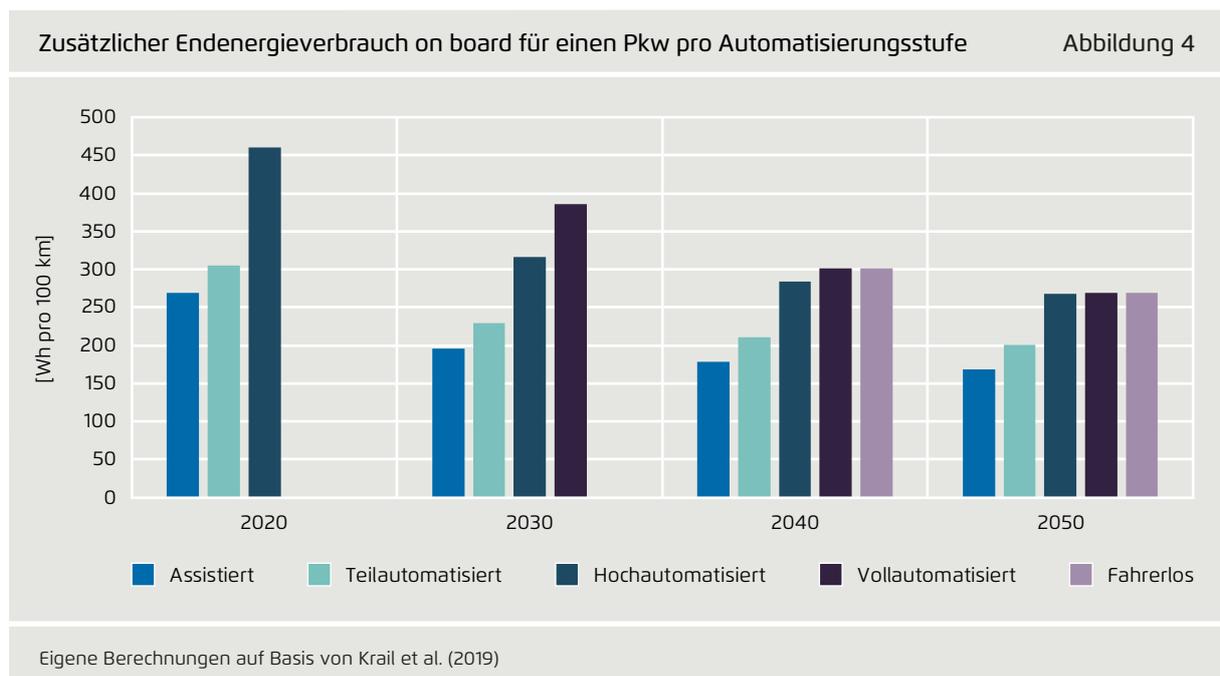


Abbildung 4 zeigt die abgeschätzten Wirkungen der AVF-Komponenten in Form des durchschnittlichen zusätzlichen Endenergieverbrauchs gemessen in Wh/100 km für einen Mittelklasse-Pkw. Die Abschätzungen unterscheiden sich nach den Automatisierungsstufen auf Basis der unterschiedlichen Ausstattung mit Komponenten. Während sich in 2020 der zusätzliche Verbrauch noch zwischen 269 Wh/100 km für assistierte Pkw und 460 Wh/100 km für hochautomatisierte Pkw, sinkt der zusätzliche Energieverbrauch bis 2050 auf Werte zwischen 170 für assistierte und 270 Wh/100 km für fahrerlose Pkw. Umgerechnet auf den Verbrauch eines Diesel-Pkw würde dies einen zusätzlichen Verbrauch zwischen 0,17 und 0,27 Liter/100 km bedeuten.

3.3 Energieverbrauch durch die Vernetzung im Mobilfunk

Die Menge der Daten, die ein automatisiertes und vernetztes Fahrzeug mit seinen vielen Sensoren erzeugt, ist riesig. Nach Einschätzungen von Experten (u. a. Heinrich 2017) liegt die gesamte Datenmenge zumindest bei AVF-Testfahrzeugen zwischen 1,4 TB/h und 19 TB/h. Intel (2017) geht von ca. 5 TB/h an Datenvolumen aus. Alleine der Speicherplatz für eine digitale hochaufgelöste (HD-)Karte für eine Großstadt kann schon bis zu 1,5 TB betragen und hochaufgelöste Karten sind eine Grundvoraussetzung für sicheres automatisiertes Fahren. Dazu müssen diese Karten bei Änderungen regelmäßig aktualisiert und angepasst werden. Die Menge an generierten Sensorsignalen in einem einzelnen Fahrzeug übersteigt bei weitem eine kosteneffektive Übertragungs- und Speicherkapazität aktueller Technologien (Gatzke et al. 2016). Heutige Mobilfunknetze mit 4G/LTE-Standard und einer Datenübertragungsrate von ca. 300 MB/s würden angesichts dieser Datenmengen schon deutlich an ihre Grenzen stoßen, wenn man davon ausgehen würde, dass die Fahrzeuge über Mobilfunk mit der Umwelt alle Daten austauschen. Selbst mit dem neuen 5G-Standard lässt sich diese Datenmenge bei Datenübertragungsraten von 1 bis maximal 10 GB/s nicht immer verarbeiten beziehungsweise übertragen. Selbst wenn die in automatisierten Fahrzeugen gesammelten Daten im Rohzustand in den abgeschätzten Datenmengen übertragbar wären, stellt sich die Frage, ob diese Datenmengen nicht den Endenergieverbrauch im Mobilfunk durch die Mobilfunk-

kinfrastruktur und die Rechenzentren der Mobilfunkanbieter zu sehr in die Höhe treiben.

Um diese Frage zu beantworten, wurde in der Studie zunächst der durchschnittliche Endenergieverbrauch durch das Mobilfunksystem inklusive der Rechenzentren pro übertragener Datenmenge für das heutige Mobilfunksystem, aber auch für ein zukünftiges, flächendeckend auf 5G basierendes Mobilfunksystem ermittelt. Nach Einschätzungen der Mobilfunkbetreiber (zum Beispiel Vodafone 2019) und bestätigt durch weitere Untersuchungen (zum Beispiel Höfer et al. 2019) sinkt der Energieverbrauch durch den Umstieg auf 5G von ca. 3,5 Wh pro übertragenes GB an Daten bei 4G auf 1 Wh pro GB. Dieser Rückgang erscheint auf den ersten Blick überraschend, weil zum Beispiel auch die Berechnungen der RWTH Aachen (Höfer et al. 2019) einen steigenden Energieverbrauch durch 5G aufzeigen. Dieses Ergebnis ist jedoch maßgeblich durch die Annahmen zur Entwicklung der Datenmengen beeinflusst, welche in den Berechnungen die Entwicklung der Energieeffizienz der Datenübertragung im 5G-Netz deutlich übersteigen. Eigene Berechnungen aus dem Energieverbrauch von Telefonica (O2) und der deutschen Telekom und den jeweils im Mobilfunknetz pro Jahr übertragenen Datenmengen bestätigen jedoch die berücksichtigten Angaben zur Entwicklung der Energieeffizienz. Für die Berechnungen des Endenergieverbrauchs durch AVF wurde angenommen, dass die Mobilfunksysteme bis 2030 zu 100 Prozent auf 5G-Standard umgestellt sein werden.

Während die für die Studie definierten Vernetzungsszenarien für automatisierte Fahrzeuge sich bei den Potenzialen der Energieeffizienz im Fahrzeug sowie dem Mehrverbrauch durch die AVF im Fahrzeug nicht unterscheiden, wurden für den Energieverbrauch im Mobilfunk durch die Vernetzung unterschiedliche Annahmen getroffen. Dies spiegelt die noch vorherrschende Unsicherheit über die zukünftig tatsächlich anfallenden Datenmengen aus den Sensoren der AVF wider. Die Forschung ist sich einig darüber, dass es ein kosteneffektiver Datenaustausch bei V2X nur über den Einsatz von Big-Data-Analyseverfahren möglich ist (Gatzke et al. 2016). Wie sehr die zu übertragenden Datenmengen sich durch dieses Verfahren jedoch reduzieren lassen, ist aus der verwendeten Sekundärliteratur nicht erkennbar. Daher geht die Studie im Szenario „Minimalvernetzung“ davon aus, dass der Datenaustausch zwischen den

Fahrzeugen nicht über den Mobilfunk realisiert wird und dass die Fahrzeuge nur dann Daten über den Mobilfunk gesendet bekommen, wenn ein Update des HD-Kartenmaterials vonnöten ist. Der Normalfall sowohl im Szenario „Minimalvernetzung“ als auch im Szenario „Effiziente Vernetzung“ sieht jedoch vor, dass die benötigten Karten vor Fahrtantritt über WLAN im Heimnetzwerk geladen werden. Es wird dabei angenommen, dass ca. die Hälfte aller vernetzten Fahrzeuge darüber ihre Updates aufspielt bekommen können. Die für diese Updates anfallenden Stromverbräuche der WLAN-Repeater für die Garagen werden in Kapitel 3.4 dem Endenergieverbrauch des Backend zugerechnet. Für alle im öffentlichen Raum abgestellten Fahrzeuge besteht diese Möglichkeit nur in Einzelfällen. Für die notwendigen Updates des Kartenmaterials dieser Fahrzeuge wird entweder der Mobilfunk oder im Szenario „Effiziente Vernetzung“ die Vernetzung mit den MEC-Frontend-Servern genutzt. Durch die beschriebenen Minimalanforderungen wird im Szenario „Minimalvernetzung“ angenommen, dass durchschnittlich lediglich 12 GB Daten pro Tag über den Mobilfunk an die AVF übertragen werden. Einige OEMs arbeiten zurzeit beispielweise mit Kartenanbietern an Möglichkeiten eines effizienten Updates der hochauflösenden Karten durch den Einsatz der Sensoren in den AVF.

Im Gegensatz dazu wird im Szenario „Effiziente Vernetzung“ angenommen, dass die Vernetzung zwischen den Fahrzeugen (V2V) und dem Backend (V2C) auch zum Teil über Mobilfunk stattfindet, wenn die System Einschränkungen des WLAN-Standards 802.11p aufgrund größerer Distanzen der Fahrzeuge überschritten werden. Da die zu Beginn des Kapitels beschriebenen Einschätzungen zu den gesamten Datenmengen aus den Sensoren eines AVF jedoch weder technisch noch kostenseitig effizient sind, wird davon ausgegangen, dass sich der Datendurchfluss auf die minimal notwendigen Datenmengen beschränkt. Das Automotive Edge Computing Consortium (AECC), das sich aus zahlreichen namhaften Playern aus dem Bereich der IT und dem Mobilfunk zusammensetzt, hat für die Entwicklung der Datenmengen drei Szenarien entwickelt (AECC 2020). Im Low-Range-Szenario wird dabei die Datenmenge, die über die Mobilfunkvernetzung verschickt wird, auf 0,383 TB pro Stunde pro Fahrzeug geschätzt. AECC erachtet dabei dieses Szenario am nächsten am kooperativen Fahren ein, weshalb diese Datenmenge in die Berechnung des Endenergieverbrauchs für den Mobil-

Endenergieverbrauch durch V2X im Mobilfunk – Szenario „Minimalvernetzung“

Abbildung 5



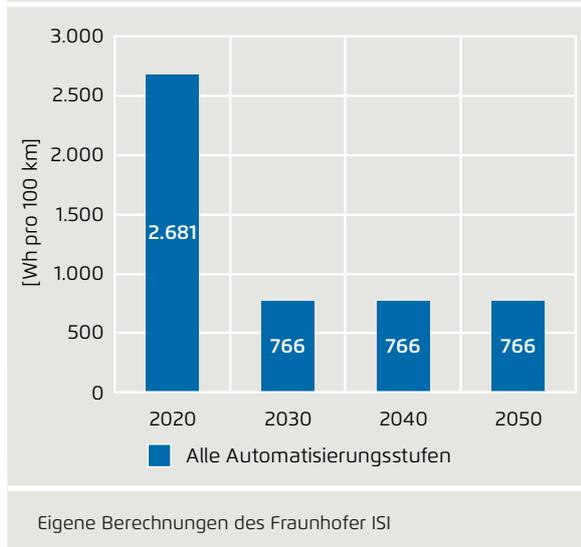
funk eingeht. Eine Annahme in diesem Szenario ist, dass die Fahrzeuge nicht permanent und vollumfänglich alle Daten aus den Sensoren an das Backend senden, sondern dies nur gezielt tun.

Die resultierenden zusätzlichen Endenergieverbräuche durch die Datenübertragung im Mobilfunk für das Szenario „Minimalvernetzung“ und das Szenario „Effiziente Vernetzung“ pro Fahrzeug pro 100 Kilometer sind in den Abbildungen 5 und 6 für den zeitlichen Verlauf bis 2050 skizziert. Der Rückgang des Energieverbrauchs ist das Resultat aus der Umstellung der Mobilfunksysteme auf 5G-Technologie. Während die Annahmen im Szenario „Minimalvernetzung“ zu einem marginalen zusätzlichen Endenergieverbrauch bezogen auf ein Einzelfahrzeug in Höhe von 26 Wh pro 100 Fahrzeugkilometer führen, verursacht der große Datenfluss im Szenario „Effiziente Vernetzung“ einen spürbaren Anstieg des Endenergieverbrauchs in Höhe von 766 Wh pro 100 Fahrzeugkilometer im Jahr 2050.

Würden zukünftig keine Big-Data-Verfahren zur Optimierung der Datenmengen aus den Fahrzeugen für die Vernetzung angewandt werden, könnten die dadurch entstehenden zusätzlichen Energieverbräuche die in Kapitel 3.1 skizzierten Energieeffizienzpotenziale des

Endenergieverbrauch durch V2X im Mobilfunk – Szenario „Effiziente Vernetzung“

Abbildung 6



automatisierten und vernetzten Fahrens auffressen. Werden durchschnittlich mehr als 0,8 TB an Daten pro Stunde von einem beziehungsweise zu einem automatisierten und vernetzten Pkw versendet, dann würde dieser Fall bereits eintreten. Im Falle des Mid-Range-Szenarios der AECC (2020) wäre diese Grenze bereits überschritten und würde die gesamte Energiebilanz der Fahrzeugautomatisierung von einem positiven zu einem negativen Gesamteffekt umkehren.

3.4 Energieverbrauch durch die Vernetzung mit dem Backend

Pkw mit Automatisierungsfunktionen werden von allen Herstellern so entwickelt, dass sie im spezifischen Anwendungsfall stets in der Lage sind auch ohne Vernetzung mit einem Backend die Passagiere sicher zu befördern. Diese Annahme ist im Minimalvernetzungszenario verankert, sodass hier kein zusätzlicher Energieverbrauch pro gefahrenem Kilometer eines automatisierten und vernetzten Fahrzeugs entsteht. Sowohl im Szenario „Minimalvernetzung“ als auch im Szenario „Effiziente Vernetzung“ entsteht durch die Annahme des Updates der HD Karten vor Fahrtantritt im heimischen WLAN über zusätzliche WLAN-Repeater für 50 Prozent

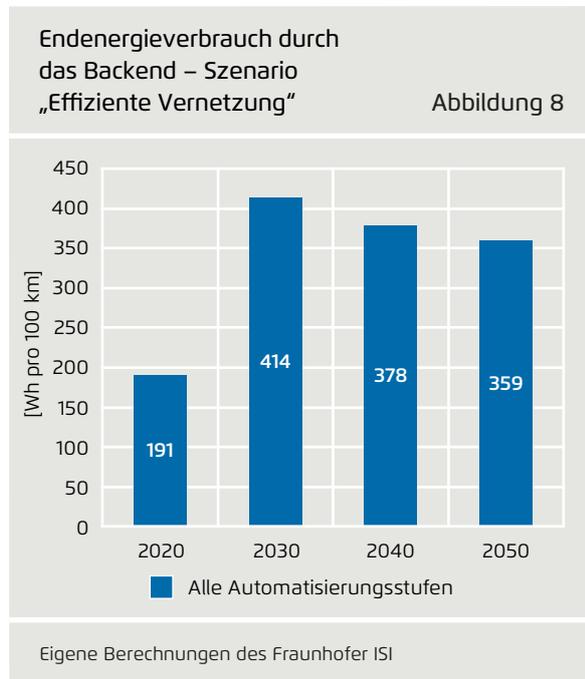
der Fahrzeuge ein zusätzlicher Energieverbrauch im Bereich des Backends. Bei einem maximalen jährlichen Verbrauch dieser Repeater in Höhe von 35 kWh (Stiftung Warentest 2018) entstehen damit bezogen auf einen automatisierten und vernetzten Pkw und 100 gefahrene Kilometer, ca. 125 Wh im Jahr 2020. Durch die Annahme der Verbesserung der Energieeffizienz dieser Geräte um 10 Prozent sinkt der Endenergieverbrauch bis 2050 auf 113 Wh pro 100 km (siehe Abbildung 7).

Im Szenario „Effiziente Vernetzung“ wurde angenommen, dass sowohl die Vernetzung der Fahrzeuge (V2V) als auch die Vernetzung mit einem Backend beziehungsweise einer Cloud (V2C) und die Vernetzung mit der Infrastruktur (V2I) bis 2050 größtenteils realisiert werden kann. Die Vernetzung mit dem Backend ist in diesem Szenario über den Datentransfer der Fahrzeugdaten zu und von einem dezentralen, lokalen Frontend-Server (MEC) via 5G-Mobilfunk oder über den WLAN-Standard 802.11p konzipiert. Die MEC-Technologie ermöglicht es dabei Informationen zu Ereignissen, weitere Informationen sowie Updates von HD-Karten oder Informationen aus herstellerspezifischen Datenbanken von und zu den vernetzten Fahrzeugen im Zielgebiet zu transferieren. Entscheidend sind hierbei die kurzen Latenzzeiten, die mit einer zentralen Cloud/einem zentralen Backend nicht realisierbar sind.

Endenergieverbrauch durch das Backend – Szenario „Minimalvernetzung“

Abbildung 7





Die Annahmen zur Abdeckung des deutschen Straßennetzes mit entsprechenden MEC-Stationen ist in Kapitel 2 beschrieben. Um den Endenergieverbrauch durch die MEC-Infrastruktur abzuschätzen, wurden die von den Experten in den qualitativen Interviews gemachten Angaben zu den Anforderungen an diese Infrastruktur verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass alle 20 Kilometer eine MEC-Basisstation entlang des deutschen Straßennetzes aufgebaut wird. Die Verteilung der insgesamt bis 2050 angenommenen Anzahl von 2.930 MECs entlang der deutschen Straßeninfrastruktur wurde bereits in Kapitel 2 beschrieben. Eine Basisstation besteht dabei aus drei Rechnern mit einem jährlichen Stromverbrauch in Höhe von jeweils 780 kWh für das Jahr 2020 (Berechnungen auf Basis von BMWi 2020) plus einem jährlichen Verbrauch des Sendemoduls von jeweils 88 kWh pro Jahr pro MEC. Durch die in Kapitel 3.2 beschriebenen Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz von Rechnern ergibt sich dann eine Reduktion des durchschnittlichen jährlichen Energieverbrauchs einer Recheneinheit bis auf 245 kWh im Jahr 2050.

Neben der Vernetzung mit dem Backend beziehungsweise der Cloud wird im Szenario „Effiziente Vernetzung“ zusätzlich angenommen, dass Teile der Verkehrsinfrastruktur vernetzt werden. Diese Annahmen beschränken

sich jedoch auf die Vernetzung der Lichtsignalanlagen und der für automatisierte und vernetzte Fahrzeuge relevanten Verkehrsschilder. Die Infrastruktur wird dabei mit zusätzlichen Funkmodulen ausgestattet und kann über V2I sich nähernde Fahrzeuge mit Informationen versorgen. Hierbei wird auf Basis der Angaben aus Liu et al. (2019) der durchschnittliche Endenergieverbrauch der vernetzten Anlagen beziehungsweise Schilder berechnet. Pro vernetzter Anlage steigt damit der Endenergieverbrauch um ca. 88 kWh pro Jahr. Es gibt keine offiziellen Statistiken zu den genauen Anzahlen von Lichtsignalanlagen sowie von Verkehrsschildern in Deutschland. Expertenschätzungen gehen von einem Bestand von ca. 50.000 bis 60.000 Lichtsignalanlagen und 20 Millionen Verkehrsschildern aus. Im Szenario „Effiziente Vernetzung“ ist die Annahme hinterlegt, dass alle Lichtsignalanlagen bis 2050 und 6 Millionen Verkehrsschilder vernetzt sein werden.

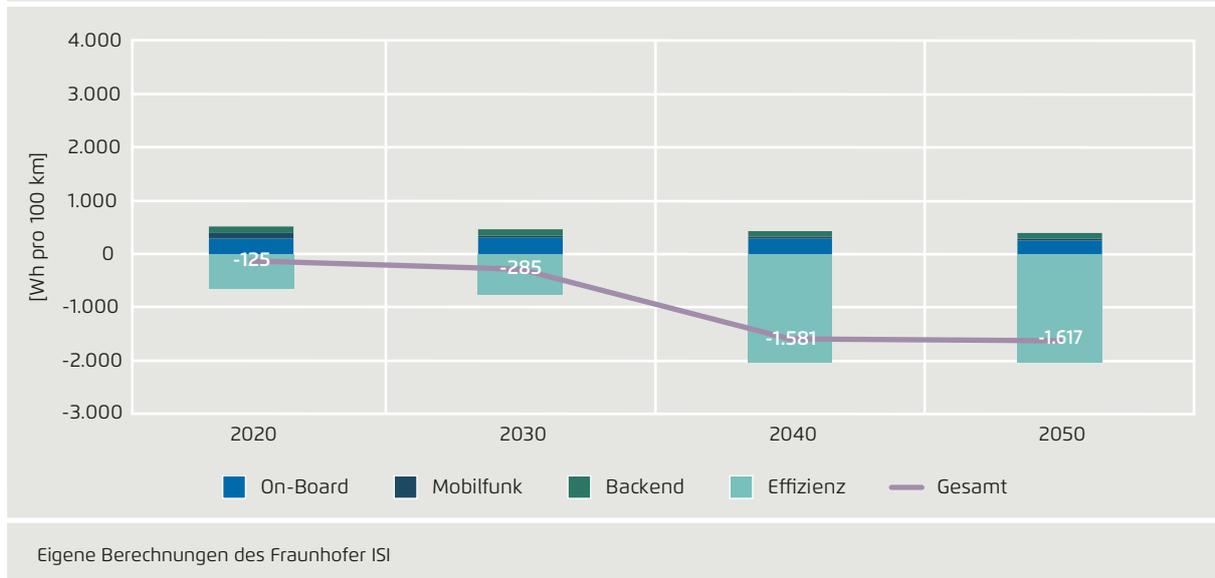
Die sich ergebende Gesamtmenge des Endenergieverbrauchs der Vernetzung mit dem Backend und der Verkehrsinfrastruktur wird anschließend noch mittels der für den Markthochlauf angenommenen automatisierten Pkw der Stufen 2 bis 5 (siehe Abbildung 1) auf einen Pkw auf 100 gefahrene Kilometer heruntergebrochen. Hierzu wird eine durchschnittliche Jahresfahrleistung in Höhe von 14.000 Kilometer angenommen. Es ergibt sich daraus der in Abbildung 8 aufgezeigte zusätzliche Endenergieverbrauch für das Backend und die Verkehrsinfrastruktur. Bezogen auf 100 gefahrene Kilometer bewegt sich der Energieverbrauch in einem Bereich zwischen 191 Wh für das Jahr 2020 und 359 Wh für das Jahr 2050.

3.5 Gesamte Wirkungen auf den Energieverbrauch

In den vorigen vier Abschnitten dieses Kapitels wurden die Annahmen und die Ergebnisse der Berechnung der Energieeffizienzpotenziale sowie die zusätzlichen Endenergieverbräuche durch das automatisierte und vernetzte Fahren bezogen auf einen Pkw beschrieben. Im Fahrzeug selbst entstehen durch die Nutzung der Automatisierungsfunktionen und die verschiedenen Vernetzungsoptionen aus den beiden Vernetzungsszenarien nur die in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 skizzierten Energieeffizienzpotenziale sowie die resultierenden Mehrverbräuche.

Bilanz des Energieverbrauchs durch AVF eines Mittelklasse-Pkw – Szenario „Minimalvernetzung“

Abbildung 9



Da die Studie aber die gesamten, durch AVF entstehenden Energieverbräuche sowie Energieeinsparungen über die Grenzen des Sektors Verkehr hinaus berücksichtigt, werden im Folgenden auch alle Faktoren aggregiert bezogen auf einen Pkw und 100 gefahrene Kilometer dargestellt. Die gesamten Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Endenergieverbrauch pro 100 Fahrzeugkilometer sind für das Szenario „Minimalvernetzung“ in Abbildung 9 und für das Szenario „Effiziente Vernetzung“ in Abbildung 10 skizziert.

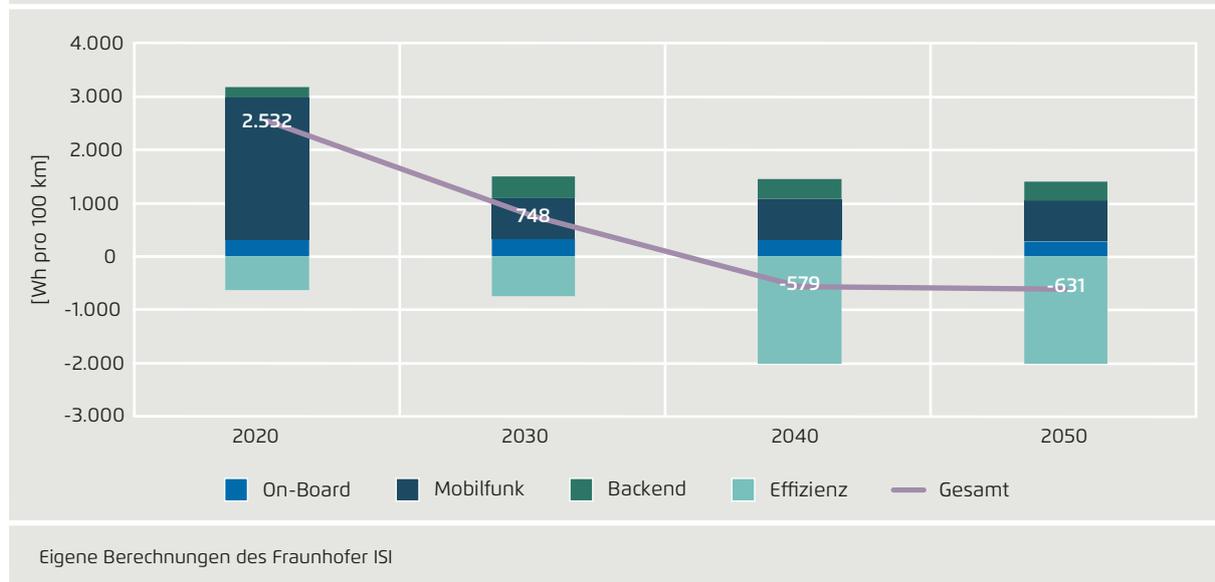
Während die Energieeffizienzpotenziale und der Mehrverbrauch durch die AVF-Systeme im Pkw abhängig von der Automatisierungsstufe des Pkw sind, sind die entstehenden Energieverbräuche im Mobilfunk und im Backend nahezu unabhängig von der jeweiligen Automatisierungsstufe. Daher wird zur vereinfachten Darstellung in den beiden Abbildungen keine weitere Differenzierung nach Automatisierungsstufen vorgenommen. Die in den Abbildungen für die Energieeffizienzpotenziale der Fahrzeuge und für den Mehrverbrauch durch AVF-Systeme on board verwendeten Werte beziehen sich daher auf die für die jeweiligen Jahre höchste verfügbare Automatisierungsstufe. Das bedeutet, dass für das Jahr 2020 die berechneten Werte für Stufe 2, für das Jahr 2030 die Werte für Stufe 3, für das Jahr 2040

die Werte für Stufe 4 und für das Jahr 2050 die Werte für Stufe 5 in die Darstellung eingeflossen sind.

Da insbesondere der durch den Datenfluss bei der Vernetzung der Fahrzeuge miteinander und mit dem Backend entstehende zusätzliche Endenergieverbrauch im Mobilfunk in den ersten Jahren ab 2020 noch substantiell in die Bilanz einfließt, ergibt sich beim Vergleich der beiden Szenarien ein unterschiedliches Bild. Während im Szenario „Minimalvernetzung“ von Beginn an mit einer marginalen Energieeinsparung von 125 Wh pro 100 Fahrzeugkilometer eine positive Energiebilanz durch AVF zu erwarten ist, ergibt sich im Szenario „Effiziente Vernetzung“ zunächst ein substantieller Mehrverbrauch in Höhe von ca. 2.500 Wh pro 100 Fahrzeugkilometer. Bis 2030 werden im Szenario „Effiziente Vernetzung“ die Einsparungen durch einen hohen Endenergieverbrauch im Mobilfunk überlagert. Unter Berücksichtigung der Annahmen aus dem Szenario „Effiziente Vernetzung“ zeigen sich erst nach 2030 positive Wirkungen des AVF auf den Endenergieverbrauch. Langfristig gesehen zeigen sich in beiden Szenarien substantielle Energieeinsparpotenziale durch AVF bei Pkw zwischen 631 und 1.617 Wh pro 100 Fahrzeugkilometer. In der Summe der jährlichen Bilanzen des Endenergieverbrauchs bis 2050 zeigt sich jedoch für beide Szenarien eine Nettoenergie-

Bilanz des Energieverbrauchs durch AVF eines Mittelklasse-Pkw – Szenario „Effiziente Vernetzung“

Abbildung 10



einsparung gegenüber einem fiktiven Szenario ohne Automatisierung und Vernetzung. Während im Szenario „Minimalvernetzung“ ca. 38 TWh an Endenergie eingespart werden können, summiert sich die Energiebilanz im Szenario „Effiziente Vernetzung“ immerhin noch auf 6 TWh für den Zeitraum bis 2050 auf.

3.6 Potenzielle Reboundeffekte durch AVF

In manchen Studien wird das automatisierte und vernetzte Fahren ab Stufe 4 als disruptive Technologie bezeichnet. Diese Einschätzung wird dabei oft damit begründet, dass automatisiertes und vernetztes Fahren ab Stufe 4 völlig neue Formen der geteilten Mobilität ermöglichen. Sie wird für komfortable Tür-zu-Tür-Lösungen benötigt und kann nach Einschätzungen von Experten (zum Beispiel Bösch et al. 2017) eine kostengünstige Alternative zum klassischen öffentlichen Verkehr werden. Zudem ermöglicht sie im Gegensatz zum heutigen System im MIV die effiziente Nutzung der Fahrzeit für fahrfremde Aktivitäten. Letztlich wird mit dem automatisierten und vernetzten Fahren im Straßenverkehr oft die Hoffnung verbunden, dass auch die

Fahrtzeiten durch optimiertes Routing und die bessere Ausnutzung der Kapazitäten der Straßeninfrastruktur sinken. Die Kombination aus Komfort, Effizienz, reduzierten Fahrzeiten und geringen Kosten wird daher in vielen Studien als Indikator dafür gesehen, dass die verbesserte Effizienz des Systems zu unerwünschten Reboundeffekten und unweigerlich zu einem steigenden Modalanteil des Straßenverkehrs führt. Die Größenordnung dieser Reboundeffekte variiert jedoch in den Studien. Während beispielweise in e-mobilBW (2017) oder Taiebat et al. (2019) deutliche Veränderungen des Modal Split durch AVF prognostizieren, sind die Änderungen des Modal Split bei Krail et al. (2019) spürbar aber geringer. Diese unterschiedliche Einschätzung ergibt sich aus den Annahmen zur Entwicklung der Automatisierungsfunktionen. Krail et al. (2019) gehen davon aus, dass aus Kostengründen bis 2050 nur ein kleiner bis mittlerer Teil der Pkw-Flotte mit Automatisierungsfunktionen der Stufen 4 und 5 ausgestattet sein werden. Dadurch ergeben sich auch nicht die in anderen Studien angenommenen Vorteile durch eine bessere Kapazitätsauslastung der Straßeninfrastruktur und eine Reduktion der Fahrzeiten. Diese Effekte, hervorgerufen durch den Mischverkehr zwischen menschlich und maschinell gesteuerten Fahrzeugen, sind bei Krause et al. (2017) bestätigt worden. Nichtsdestotrotz kann man von einer steigenden

Attraktivität eines automatisierten und vernetzten MIV ausgehen. Auf der anderen Seite gibt es auch im öffentlichen Verkehr die Bestrebungen, zukünftig stärker auf flexible, automatisierte und vernetzte Systeme zu setzen und damit kostengünstige und flexiblere Lösungen für die Kunden anzubieten.

Die für diese Studie ermittelten Einsparpotenziale des Endenergieverbrauchs durch AVF beim Pkw summieren sich im Jahr 2050 auf ca. 1,2 bis 3,2 TWh. Unter der Annahme, dass sich der gesamte Energieverbrauch des MIV bis 2050 wie in den Langfristszenarien des BMWi (2017) in etwa auf 120 TWh reduziert, würde dies bedeuten, dass die Gesamtbilanz des AVF bis zu einer Steigerung der Jahresfahrleistung im MIV um 1 bis 2,6 Prozent noch positiv ist. Bei stärkeren Reboundeffekten ergäbe sich somit ein steigender gesamter Endenergieverbrauch.

Neben den unerwünschten Reboundeffekten sei jedoch noch erwähnt, dass die Technologie der Automatisierung und Vernetzung neben den dargestellten Energieeinsparpotenzialen auch prinzipiell große Chancen für einen Wandel hin zu einem nachhaltigen Verkehrssystem birgt. Durch sie kann unter günstigen Rahmenbedingungen der Anteil einer effizienten multi- und intermodalen Nutzung der Verkehrsmittel zukünftig steigen. Geteilte Mobilitätsdienstleistungen unter Nutzung der Automatisierung und Vernetzung können durchaus das fehlende Puzzlestück darstellen, um den Besitz eines eigenen Pkw überflüssig werden zu lassen. Ein stärkeres und attraktiveres Nutzen statt Besitzen von Mobilität könnte dadurch zukünftig eine klimaschonende, nachhaltige Mobilität befördern.

4 | Handlungsempfehlungen und Ausblick

Die Evaluierung der Wirkungen automatisierter und vernetzter Pkw bis zum Jahr 2050 hat gezeigt, dass die beiden Technologien trotz des zusätzlichen Energieverbrauchs im Mobilfunk und im Backend zu einer verbesserten Energiebilanz des Gesamtsystems führen können. Um diese zumindest zu erreichen oder noch zu verbessern, müssen jedoch einige Rahmenbedingungen erfüllt werden.

Die Energieeffizienzpotenziale innerhalb der Fahrzeuge lassen sich durch kooperatives Fahren und einen dadurch optimierten Verkehrsfluss noch zusätzlich verbessern. Diese Potenziale lassen sich jedoch nur mit entsprechender Vernetzung und einer herstellerübergreifenden Zusammenarbeit erreichen. Grundvoraussetzung dafür sind die notwendigen Investitionen in ein effizientes Backend und in eine vernetzte Straßeninfrastruktur. Hier gilt es, vonseiten der öffentlichen Hand diese Investitionen entweder selbst zu tätigen oder diese mit geeigneten Instrumenten zu befördern.

Die Hersteller von automatisierten und vernetzten Pkw und die Zulieferer von Systemkomponenten sind gefordert, weiter an der Energieeffizienz der Sensoren und der Steuergeräte innerhalb der Fahrzeuge zu arbeiten. Die mit der Automatisierungsstufe steigenden Anforderungen an die Rechnerleistung innerhalb der Fahrzeug darf nicht zu einer weiteren Steigerung des Energieverbrauchs durch die AVF-Systeme on board führen. Hier gilt es, vor allem im Bereich der Prozessoren und der Speichereinheiten mit den Zulieferern zusammen die Entwicklung von energieeffizienten Komponenten zu fördern. Angesichts des Wandels im Antriebsstrang auf batterieelektrische Pkw und der Bedeutung der Reichweite wird diese Aufgabe zum Selbstzweck für eine erfolgreiche und schnelle Umstellung auf Elektromobilität.

Auch im Bereich der Software gilt es, für die Pkw-Hersteller, Zulieferer und Softwareentwickler Lösungen zum effizienten Handling von großen Datenmengen zu finden. Nur mit effizienten Big-Data-Analyseverfahren lassen sich die in AVF durch die Sensoren gesammelten Daten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und der Optimierung des Verkehrsflusses aller Straßenverkehrsteilnehmer über V2X ohne negative Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch nutzen.

Letztlich gilt es, unerwünschte Reboundeffekte so minimal wie möglich zu halten und die erwünschten Synergien durch AVF so gut wie möglich zu realisieren. Dazu muss die öffentliche Hand eine passgenaue Regulierung zur der Nutzung von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen im MIV entwickeln. Diese sollte ineffiziente Leerfahrten von fahrerlosen Fahrzeugen, wenn nicht verbieten, dann jedoch zumindest kostenseitig unattraktiv werden lassen. Ebenso gilt es, einen Mittelweg in der Regulierung zu finden, der es ermöglicht, das neue Mobility as a Service (MaaS) auf Basis von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen für geteilte und gepoolte Fahrten neben dem klassischen ÖPNV zu nutzen, ohne den ÖPNV dabei zu stark zu kannibalisieren. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, den öffentlichen Verkehr bei der Entwicklung und dem Einsatz von flexiblen, automatisierten und vernetzten Systemen zu unterstützen, um die Wettbewerbsfähigkeit mit dem neuen MaaS gewährleisten zu können.

Die aufgezählten Handlungsempfehlungen lassen sich selbstverständlich auch auf ein eingeschwungenes System aus 100 Prozent fahrerlosen Pkw im Straßenverkehr übertragen. Allerdings ist es bis dahin angesichts der noch hohen Kosten für den privaten Endverbraucher und der noch zu überwindenden technischen Probleme der Automatisierung insbesondere auf städtischen Straßen mit einer Vielzahl von Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern noch weit.

5 | Literatur

AECC (2020): *Rolling Zettabytes: Quantifying the Data Impact of Connected Cars*. URL: <https://datacenterfrontier.com/rolling-zettabytes-quantifying-the-data-impact-of-connected-cars/>. Letzter Zugriff am: 2.11.2020.

Altenburg et al. (2018): Altenburg, Sven; Kienzler, Hans-Paul; Auf der Maur, Alex: *Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte*. Studie für ADAC e. V., Berlin. Düsseldorf: Prognos.

Bäumer et al. (2017): Bäumer, Marcus; Hautzinger, Heinz; Pfeiffer, Manfred; Stock, Wilhelm; Lenz, Barbara; Kuhnimhof, Tobias; Köhler, Katja: *Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung*. BASt-Bericht V 290, Bonn.

Benmimoun et al. (2012): Benmimoun, Mohamed; Faber, Freek; Gustafson, Dan; Jonkers, Eline; Malta, Lucas; Metz, Barbara; Noort, Martijn van; Pütz, Andreas und Saint Pierre, Guillaume: *euroFOT Deliverable 6.5 and 6.6: Final results: impacts on traffic efficiency and environment*. Aachen.

BMVI (2015): *Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren: Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten*. Berlin.

BMWi (2017): Pfluger, Benjamin; Testeegen, Bernd; Franke, Bernd: *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul O: Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen*. Studie im Auftrag des BMWi. Karlsruhe.

BMWi (2020): *Laptop oder PC – beim Stromverbrauch haben Sie die Wahl. Initiative „Deutschland macht's effizient“ des BMWi*. URL: <https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEF/Redaktion/DE/Standardartikel/Dossier/A-computer-energieeffizient.html>. Letzter Zugriff am: 10.7.2020.

Bösch et al. (2017): Bösch, Patrick M.; Becker, Felix; Becker, Henrik; Axhausen Kay W.: *Cost-based analysis of autonomous mobility services*. In: *Transport Policy* 2017, S. 1–16.

Car2MEC (2019): *Verkehrssicherheits-Applikationen, basierend auf Car2X-Kommunikation via LTE und Mobile Edge Computing (MEC). Abschlussbericht*. URL: <https://onestore.nokia.com/asset/206173>. Letzter Zugriff am: 10.08.2020.

e-mobil BW (2017): *Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg*. Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, Berlin: Prognos.

ERTRAC (2019): *Connected Automated Driving Roadmap*. Brüssel/Belgien.

Fahrenkrog et al. (2017): Fahrenkrog, Felix; Wang, Lei; Rösener, Christian; Sauerbier, Jan; Breunig, Sandra: *Impact analysis for supervised automated driving applications*. Deliverable D7.3 des EU-Projekts AdaptIVe-IP. Aachen.

Friedrich et al. (2017): Friedrich, Markus; Hartl, Maximilian: *MEGAFON – Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Schlussbericht*. Universität Stuttgart. Stuttgart.

Gawron et al. (2018): Gawron, James H.; Keoleian, Gregory A.; De Kleine, Robert D.; Wallington, Timothy J. & Kim, Hyung C.: *Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects*. In: *Environmental Science & Technology*, 52(5), S. 3249–3256.

Gatzke et al. (2016): Gatzke, Monika; Motzek, Claudia; Schneider, Martina; Weigelin, Lena; Gries, Stefan; Gruhn, Volker; Hesenius, Marc; Ollesch, Julius; Patalas, Michael; Engels, Gregor; Sommer, Christoph; Stahl, Katharina; Ide, Christoph; Pillmann, Johannes; Wietfeld, Christian: *Fahrzeugvernetzung revolutioniert Mobilität. Perspektiven, Chancen und Herausforderungen für NRW*. Wuppertal.

Krause et al. (2017): Krause, S.; Motamedidehkordi, N.; Hoffmann, S.; Busch, F.; Hartmann, M.; Vortisch, P.: *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur*. Studie im Auftrag des VDA. FAT-Schriftenreihe 296. München.

Herman und Brenner (2018): Hermann, Andreas; Brenner Walter: *Die autonome Revolution: Wie selbstfahrende Autos unsere Welt erobern*. Frankfurter Allgemeine Buch. Frankfurt.

Heinrich (2017): Heinrich, Stephan: *Flash Memory in the emerging age of autonomy*. Präsentation auf dem Flash Memory Summit 2017. Santa Clara, CA.

Höfer et al. (2019): Höfer, Tim; Bierwirth, Sebastian; Madlener, Reinhard: *C15 – Energie-Mehrverbrauch in Rechenzentren bei Einführung des 5G Standards*. Studie der RWTH Aachen für EON. Aachen.

Intel (2017): "Data is new oil in the future of automated driving". URL: <https://newsroom.intel.com/editorials/krzanich-the-future-of-automated-driving/>. Letzter Zugriff am: 14.09.2020

Koomey et al. (2011): Koomey, Jonathan; Berard, Stephen; Sanchez, Maria; Wong, Henry: *Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing*. IEEE Annals of the History of Computing. Volume 33, Issue 3, S. 46–54.

Krail et al. (2019): Krail, Michael; Hellekes, Jens; Schneider, Uta; Dütschke, Elisabeth; Schellert, Maximilian; Rüdiger, David; Steindl, Alina; Luchmann, Inga; Waßmuth, Volker; Flämig, Heike; Schade, Wolfgang; Mader, Simon: *Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe.

L3Pilot (2020): *Piloting Automated Driving on European Roads*. URL: <https://l3pilot.eu/>. Letzter Zugriff am: 15.09.2020.

Lee et al. (2019): Lee, Jooyong; Kockelman, Kara M. (2019): *Energy implications of self-driving vehicles*. TRB Paper. Washington, D.C.

Liu et al. (2019): Liu, Zongwei; Tan, Hong; Kuang, Xu; Hao, Han; Zhao, Fuquan: *The negative impact of vehicular intelligence on energy consumption*. In: Journal of Advanced Transportation, Volume 2019, Article ID 1521928.

Maak, Niklas (2018): *Auch das Internet hat einen Auspuff*, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung (13.1.2018), S. 9.

MEC-View (2020): *Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren*. URL: <http://mec-view.de/>. Letzter Zugriff am: 10.08.2020.

OECD/ITF (2015): *Urban Mobility System Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic*. International Transport Forum. Paris.

SAE International (2018): *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. USA.

Stiftung Warentest (2018): *WLAN-Verstärker: Top-Geräte für lückenlosen Empfang*. Test 9/2018.

Taiebat et al. (2019): Taiebat, Morteza; Stolper, Samuel; Xu, Ming: *Forecasting the Impact of Connected and Automated Vehicles on Energy Use: A Microeconomic Study of Induced Travel and Energy Rebound*. In: Applied Energy 247, S. 297–308.

Trommer et al. (2016): Trommer, Stefan; Fraedrich, Eva; Kolarova, Viktoriya; Lenz, Barbara: *Exploring user expectations on autonomous driving*. Automated Vehicle Symposium 2016, 19.–21. Juli 2016, San Francisco, CA.

Vodafone (2019): *5G braucht deutlich weniger Strom*. URL: <https://www.teltarif.de/5g-4g-technik-stromverbrauch-mack-vodafone/news/79091.html>. Letzter Zugriff am: 22.7.2020

Publikationen von Agora Verkehrswende

Baustellen der Mobilitätswende

Wie sich die Menschen in Deutschland fortbewegen und was das für die Verkehrspolitik bedeutet

Elektromobilität hoch im Kurs?

Stand der Flottenelektrifizierung in den DAX-Unternehmen

Klimaneutrales Deutschland

In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals

Ein anderer Stadtverkehr ist möglich

Neue Chancen für eine krisenfeste und klimagerechte Mobilität

Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen

Chancen und Risiken selbstfahrender Fahrzeuge für nachhaltige Mobilität

Weiter denken, schneller laden

Welche Ladeinfrastruktur es für den Erfolg der Elektromobilität in Städten braucht

Lieferrn ohne Lasten

Wie Kommunen und Logistikwirtschaft den städtischen Güterverkehr zukunftsfähig gestalten können

Städte in Bewegung

Zahlen, Daten, Fakten zur Mobilität in 35 deutschen Städten

Der Doppelte Booster

Vorschlag für ein zielgerichtetes 100-Milliarden-Wachstums- und Investitionsprogramm

Abgefahren!

Die Infografische Novelle zur Verkehrswende

Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende

Kritische Beleuchtung eines Postulats

Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen

Ausgeliefert – wie die Waren zu den Menschen kommen

Zahlen und Fakten zum städtischen Güterverkehr

E-Tretroller im Stadtverkehr

Handlungsempfehlungen für deutsche Städte und Gemeinden zum Umgang mit stationslosen Verleihsystemen

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-verkehrswende.de

Agora Verkehrswende hat zum Ziel, gemeinsam mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft die Grundlagen dafür zu schaffen, dass der Verkehrssektor in Deutschland bis 2050 dekarbonisiert werden kann. Hierfür erarbeiten wir Klimaschutzstrategien und unterstützen deren Umsetzung.

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-verkehrswende.de

info@agora-verkehrswende.de

