

Verkehrliche und ökologische Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens

Michael Krail*

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe, Deutschland

Abstract

Wird die Entwicklung des automatisierten und vernetzten Fahrens auf der Straße zu steigenden Treibhausgasemissionen führen oder kann sie dazu beitragen, das gesamte Verkehrssystem bis zum Jahr 2050 klimaschonender zu gestalten? Um diese Frage zu beantworten bedarf es einer Potenzialabschätzung, die sowohl die technische Entwicklung, die Akzeptanz als auch die verkehrlichen Wirkungen der Technikfolgen berücksichtigt.

Schlagwörter/Keywords:

Automatisierung, Vernetzung, Treibhausgasemissionen, verkehrliche Wirkungen

1. Einführung und Betrachtungsrahmen

Der Trend zunehmender Automatisierung und Vernetzung zeichnet sich in besonderer Weise auch im Verkehrssystem ab. Während fahrerlose Transportsysteme in der Industrie seit vielen Jahren bereits in Anwendung sind und auch fahrerlose, schienengebundene Verkehrssysteme weltweit seit langem im Einsatz sind, erfährt die Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr seit einigen Jahren einen Boom. Waren vor wenigen Jahren nur Fahrerassistenzsysteme und damit das assistierte Fahren (Stufe 1) oder teil-automatisierte Fahren (Stufe 2) in Straßenfahrzeugen verfügbar, hat man heute bereits den Sprung hin zum hochautomatisierten Fahren (Stufe 3) auf der Straße vollzogen.

In der Fachliteratur wird das automatisierte und vernetzte Fahren oft als disruptive Technologie oder der Trend zur Automatisierung als disruptiv bezeichnet. Mit dieser Einschätzung geht oft die Vorstellung eines Wandels des Verkehrssystems einher. Die Erwartungen bezüglich der verkehrlichen Wirkung des automatisierten und vernetzten Fahrens geht jedoch selbst in Expertenkreisen stark auseinander. Während die einen mit dieser technologischen Entwicklung einen Wandel des gesamten Verkehrs hin zu einem effizienteren, kostengünstigeren, flexibleren und klimaschonenden System verbinden, befürchten die anderen einen massiven Anstieg der Fahrleistungen auf der Straße

und zusätzliche Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) dadurch. Angesichts dieser Unsicherheiten ist ein systemischer Blick auf diese Technologie bereits heute notwendig. Gerade im Hinblick auf die ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung für den Sektor Verkehr bis zum Jahr 2030 und 2050 ist eine Abschätzung der Technikfolgen der Automatisierung und Vernetzung entscheidend, zum einen wegen potenzieller, direkter Auswirkungen der Technologie auf die THG-Emissionen und Endenergieverbrauch (EEV), zum anderen, um mögliche unerwünschte Reboundeffekte rechtzeitig zu erkennen. Zunächst bedarf es einer Analyse der voraussichtlichen technischen Reife der fünf Automatisierungsstufen für verschiedene Fahrzeugsegmente. Die Größenordnung der Wirkung hängt neben der Technik ebenfalls stark vom bis zum Jahr 2050 möglichen Markthochlauf der einzelnen Automatisierungsstufen und dem Einsatzbereich der Automatisierung ab. Hochautomatisierte Fahrzeuge funktionieren bereits heute sehr zuverlässig auf Autobahnen, kommen jedoch mit der Komplexität des Verkehrs in Städten und innerorts noch nicht klar. Der Markthochlauf hängt von den Bedürfnissen des Markts, der Akzeptanz und der Mehrpreisbereitschaft der Kunden ab. Zudem erfordert eine Potenzialabschätzung die Evaluation der Effizienzpotenziale durch die Automatisierung und Vernetzung über die 5 Stufen hinweg differenziert nach charakteristischen Fahrsituationen. Und letztlich muss ein Ansatz entwickelt werden, der es ermöglicht, die verkehr-

* Korrespondierender Autor.

E-Mail: Michael.Krail@isi.fraunhofer.de (M. Krail)

lichen Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung messbar zu machen. Dieser Ansatz wurde im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) von Krail et al. (2019) gewählt, um die Potenziale der Automatisierung und Vernetzung zu quantifizieren. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten werden im gewählten Ansatz die Auswirkungen der Automatisierung und Vernetzung auf die THG-Emissionen nicht im eingeschwungenen Zustand mit 100 % fahrerlosen und vernetzten Fahrzeugen bewertet. Vielmehr wird anhand einer Potenzialanalyse eine bis zum Jahr 2050 realistische Entwicklung der Technologie im Straßenverkehr in Deutschland unter den heutigen und zukünftigen Rahmenbedingungen ermittelt und somit der Prozess der Transition vom assistierten hin zum fahrerlosen und vernetzten Fahren gezeigt. Der Betrachtungsrahmen ist damit der Zeitraum von 2015 bis zum Jahr 2050 für die folgenden Fahrzeugsegmente:

- Pkw: Kleinwagen/Kompaktklasse, Mittelklasse und Oberklasse,
- Lkw: schwere Nutzfahrzeuge (SNF) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) < 3,5 t zGG,
- Bus: Stadtbusse, Reisebusse und Kleinbusse.

2. Markthochlauf der Automatisierung und Vernetzung

Die Grundlage für die Bewertung der Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens stellt eine detaillierte und umfangreiche Auswertung der relevanten, deutschen und englischsprachigen Fachliteratur zum Thema dar. Die Erkenntnisse der Literaturrecherche fließen dabei zunächst in eine Roadmap des automatisierten und vernetzten Fahrens bis zum Jahr 2050. Die Roadmap stellt dabei die evolutionäre Entwicklung der Automatisierung über fünf Stufen der Automatisierung dar und verbindet die Stufen mit den dafür benötigten Fahrerassistenzsystemen.

Die Ebene der Fahrerassistenzsysteme wird dabei benötigt, weil es für einzelne Fahrerassistenzsysteme bereits Abschätzungen der Wirkungen auf die Energieeffizienz und damit die THG-Emissionen gibt. Auf Ebene der Automatisierungsstufen gibt es anhand von europaweiten Feldtests erste Auswertungen auf die Energieeffizienz bis maximal zur Automatisierungsstufe 3 (Etemad et al. 2017). Neben der vorrangig für klassische Fahrzeugkonzepte zu erwartenden evolutionären Entwicklung gibt es besonders im Bereich des ÖPNV noch neue Fahrzeugkonzepte, bei denen vermutlich keine evolutionäre Entwicklung über die fünf Stufen der Automatisierung zu erwarten ist. Diese sind bereits heute komplett ohne Fahrer konzipiert, spielen auch dann erst ihre Vorteile hinsichtlich Flexibilität aus und werden daher nur ab Stufe 5 eine Rolle spielen.

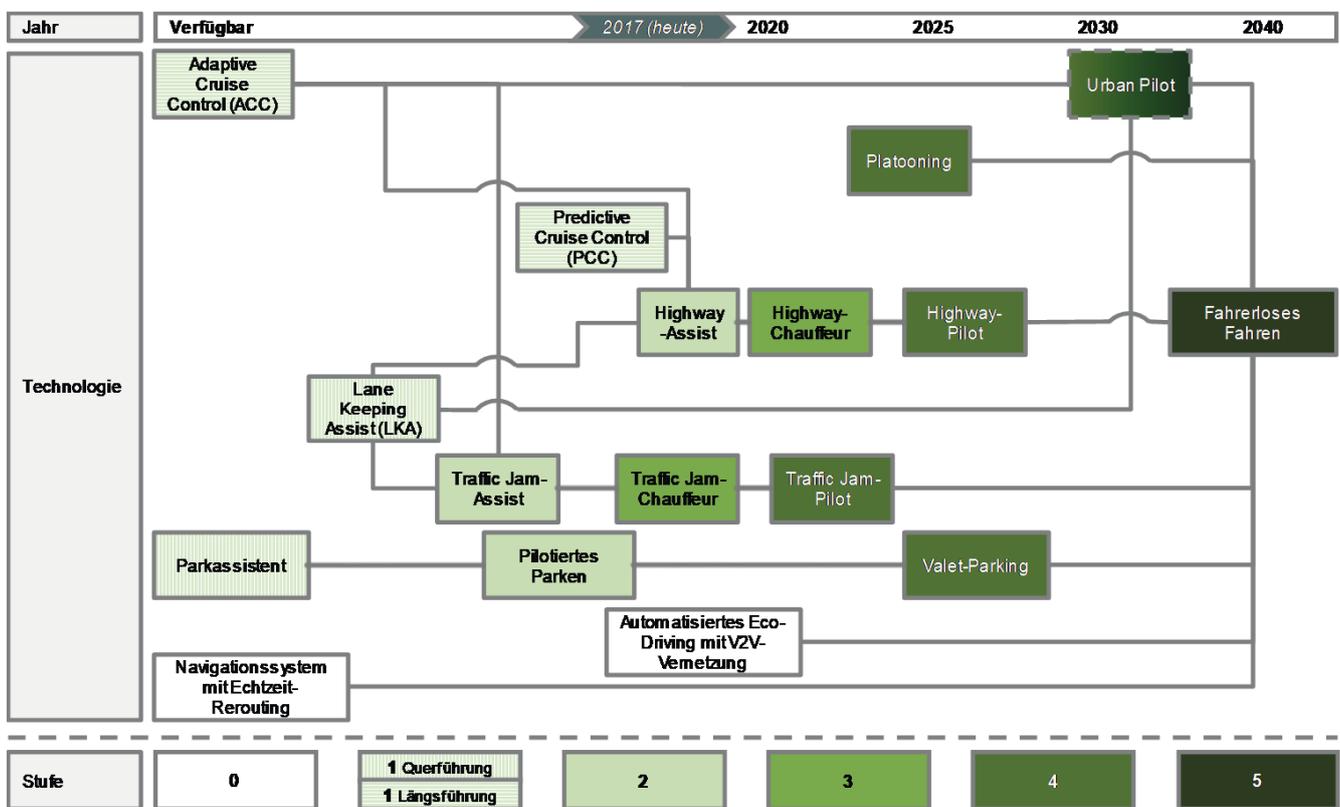


Abbildung 1: Roadmap Pkw für Fahrerassistenztechnologien und Automatisierungsstufen (Krail et al. 2019)

Die Evaluierung der Fachliteratur wurde genutzt, um den einzelnen Automatisierungsstufen für alle betrachteten Fahrzeugsegmente eine Kombination an Fahrerassistenztechnologien zuzuordnen. Diese Zuordnung ergibt sich aus der per Definition der für die Stufen notwendigen Funktionen. Darüber hinaus ermöglicht diese Zuordnung eine genauere Einschätzung der möglichen Zeitpunkte der Markteinführung. Für die Abschätzung des Markthochlaufs wurde in dieser Studie anhand der Roadmap der früheste Markteintritt des vollautomatisierten Fahrens (Stufe 4) ab dem Jahr 2025, für das fahrerlose und vernetzte Fahren (Stufe 5) ab dem Jahr 2035 angenommen. Auf Grund der hohen Produktionskosten und resultierenden Aufpreise für diese beiden Automatisierungsstufen werden dabei zunächst die Segmente der Pkw-Oberklasse, der schweren Nutzfahrzeuge und der Reisebusse und damit die klassischen Technologieträger bedient. Die Studie geht von einer verzögerten Markteinführung dieser Automatisierungsstufen in der Pkw-Mittelklasse und den anderen Pkw, Lkw und Bussegmenten aus.

Da die Aufgabe der Studie darin bestand, realistische Potenziale der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr in Deutschland bis zum Jahr 2050 zu ermitteln, wurden für die Studie die heutigen und zukünftigen Produktionskosten der Automatisierungssysteme abgeschätzt, um die Wirkung auf die Nachfrage einschätzen zu können. Dazu wurden anhand der Fachliteratur und der Befragung von Experten aus Industrie und Forschung heutige und zukünftige Produktionskosten und die Lernraten für einzelne Systemkomponenten der Sensorik, Aktorik und der Software mittels der folgenden 1-faktoriellen Lernkurven abgeschätzt.

$$C_i = C_{0,i} * \left(\sum_{t=0}^n X_i \right)^{-b}$$

mit:

C_i = Produktionskosten pro Einheit der Komponente i

$C_{0,i}$ = Produktionskosten der ersten Einheit der Komponente i

X_i = kumulierte Menge der produzierten Einheiten der Komponente i

b = Lernparameter

Die resultierenden Produktionskosten der einzelnen Systemkomponenten wurden im nächsten Schritt mittels der Zuordnung der benötigten Komponenten pro Automatisierungsstufe auf die Ebene der Automatisierungsstufen aggregiert. Abschließend konnte über die Nutzung bran-

chenüblicher Margen die resultierenden Aufpreise für die Endkunden für die Ausstattung der Fahrzeuge mit den Automatisierungsstufen ermittelt werden.

Um die Nachfrage nach den einzelnen Automatisierungsstufen abbilden zu können, wurden anhand einer Akzeptanzanalyse (Dütschke et al. 2017) die generelle Einschätzung der Kunden zur Technologie zusammengefasst und daraus resultierende Mehrpreisbereitschaften für die einzelnen Fahrzeugsegmente abgeleitet. Diese unterscheiden sich deutlich zwischen den privat und kommerziell genutzten Straßenfahrzeugen, da im kommerziellen Bereich ab Automatisierungsstufe 4 bereits die Kosten für den Fahrer reduziert werden können und ab Stufe 5 gänzlich wegfallen. Daraus ergeben sich Vorteile bei einer Vollkostenbetrachtung, die in höheren Bereitschaften zur Bezahlung von Aufpreisen resultieren.

Die Verknüpfung des Angebots bestimmter Automatisierungsstufen für die Fahrzeugsegmente der Pkw, Lkw und der Busse mit der potenziellen Nachfrage konnte mittels eines Diffusionsmodells gemacht werden. Das Prinzip des Modells besteht in einem Abgleich der Mehrpreisbereitschaften der Kunden für die einzelnen Fahrzeugsegmente mit den mittels der Lernkurven berechneten Aufpreisen zum Zeitpunkt t und der Übertragung der Anteile in die Neuzulassungen der einzelnen Segmente zum Zeitpunkt $t+1$. Anschließend ergeben sich durch die bis zum Zeitpunkt $t+1$ kumulierten verkauften Stückzahlen anhand der Lernkurven neue, geringere Produktionskosten und dadurch geringere Marktpreise für die Automatisierungsstufen.

Das Ergebnis ist ein potenzieller Markthochlauf der einzelnen Automatisierungsstufen pro Fahrzeugsegment über den Zeitraum 2015 bis 2050 in Form von Anteilen am gesamten Fahrzeugbestand. Die im Bereich der Kleinwagen/Kompaktklasse bei Pkw vorherrschende hohe Preissensibilität und der spätere Markteintritt im Vergleich zur Oberklasse verhindert das Erreichen höherer Marktanteile bis zum Jahr 2050. Trotz deutlicher Kostendegression ergab die Analyse für die Automatisierungsstufe 5 Aufpreise in Höhe von ca. 5.000 € im Jahr 2050 für Pkw der Oberklasse. Zum Zeitpunkt des Markteintritts (ca. 2035) sind diese mit ca. 11.000 € nur im Bereich der Pkw-Oberklasse und besonders für die schweren Nutzfahrzeuge bereits für eine größere Käufergruppe interessant. Daraus resultierend ist die Durchdringung der Flotten im Straßenverkehr mit den Automatisierungsstufen 4 und 5 mit 34 % bis 41 % des Bestandes für den Pkw, mit 42 % bis 44 % für den Lkw und 48 % bis 67 % für den Bus bis zum Jahr 2050 noch moderat. Die Spannweiten der Ergebnisse ergeben sich aus einer Szenarienbetrachtung. Nur maximal 7 % des Pkw-Bestandes sind anhand der Abschätzungen fahrerlos und damit mit Stufe 5 ausgestattet. Dieses bis zum Jahr 2050 noch eingeschränkte Marktpotenzial wirkt sich auch auf die THG-Emissionen des Straßenverkehrs aus.

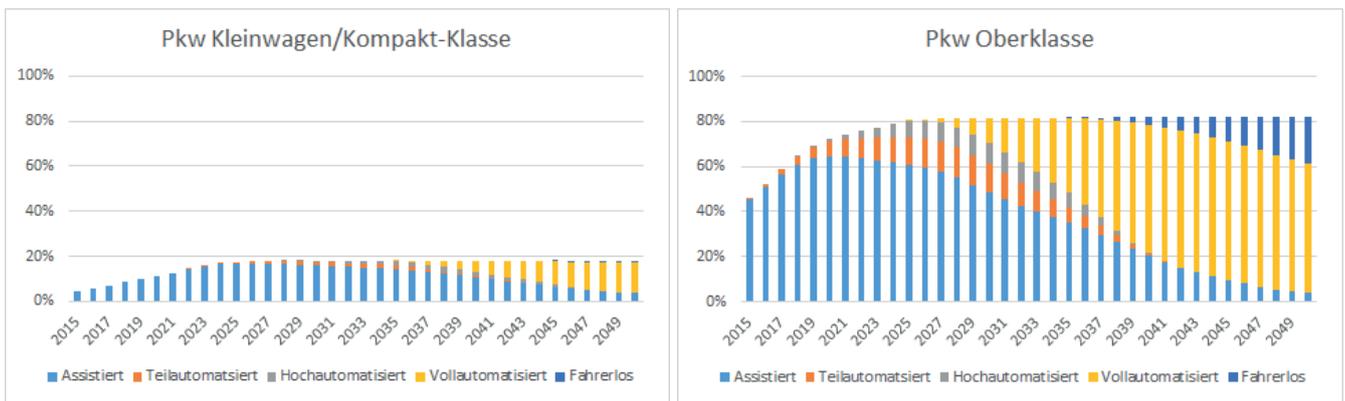


Abbildung 2: Anteile der Automatisierungsstufen am Pkw Bestand bis 2050 am Beispiel der Segmente Kleinwagen/Kompaktklasse und Oberklasse (Krail et al. 2019)

3. Treibhausgasminderungspotenziale durch Automatisierung und Vernetzung

Für die Quantifizierung der Reduktionspotenziale der THG-Emissionen durch Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr werden die Wirkungen im Folgenden nach sogenannten primären und sekundären Potenzialen unterschieden. Abbildung 3 zeigt dabei das Zusammenspiel der einzelnen Effekte. Primäre Effizienzpotenziale verstehen sich dabei als die Verbesserung der Effizienz am Fahrzeug selbst durch den Einsatz von Automatisierungsfunktionen über die fünf Stufen der Automatisierung in Kombination mit den Möglichkeiten durch die Vernetzung der Fahrzeuge (V2V) miteinander. Effizienzpotenziale durch die Automatisierung und Vernetzung ergeben sich hauptsächlich durch

optimierte Brems- und Beschleunigungsvorgänge, geringere Höchstgeschwindigkeiten, durch optimiertes Routing und durch verbesserten Verkehrsfluss. Sekundäre Effekte berücksichtigen die Änderungen im Verkehrssystem durch die Automatisierung und Vernetzung. Darin beinhaltet sind Änderungen im Verkehrsverhalten, neue Nutzergruppen und Angebotsformen im Straßenverkehr neben dem MIV und dem ÖV und ein sich dadurch ändernder Modal Split und die Fahrleistungen.

3.1 Effizienzpotenziale an einzelnen Fahrzeugen

Die in ersten Feldtests in der Realität nachgewiesenen hohen Effizienzpotenziale der Automatisierung bis Stufe 3

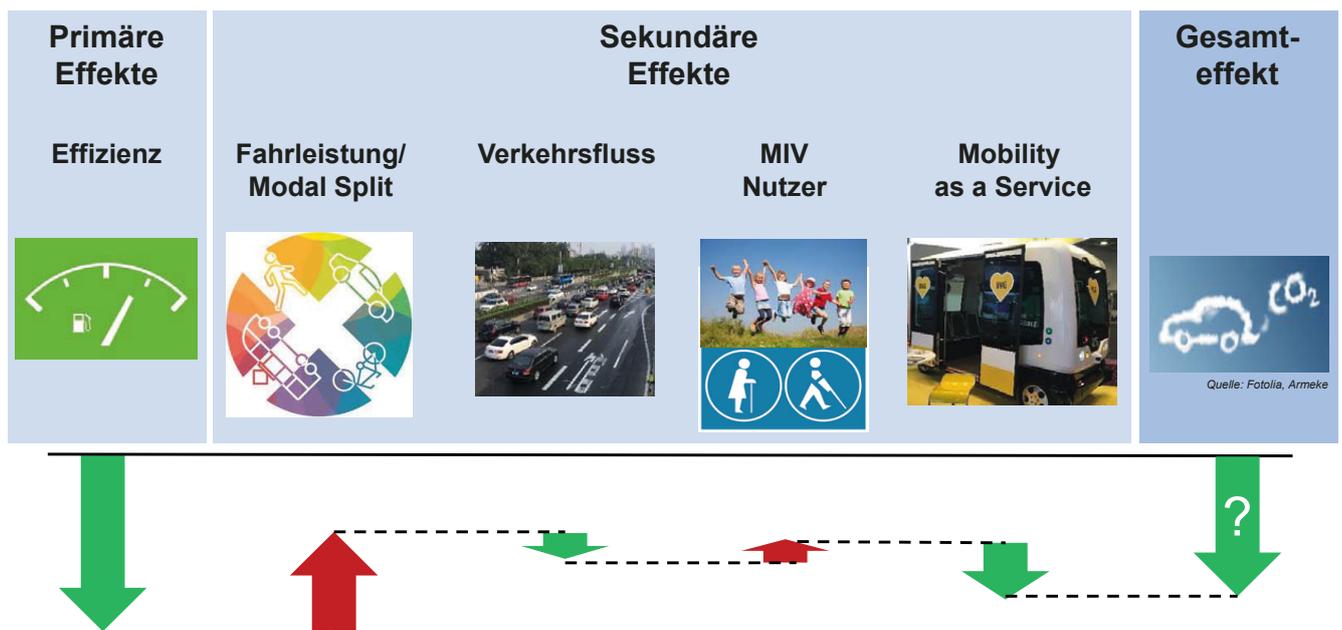


Abbildung 3: Gesamtwirkungen der Automatisierung und Vernetzung (Krail et al. 2019)

Automatisierungsstufe		5	Reduktionspotenzial in Abhängigkeit von der Penetrationsrate		
Fahrzeugklasse		Mittelklasse			
Verkehrsmittel		Pkw	low	medium	high
Straßentyp und Verkehrsdichte	Autobahn	Flüssig	3%	7%	12%
		Dicht/Gesättigt	1%	3%	3%
		Stop+Go	7%	12%	13%
	Landstraße	Flüssig	7%	11%	16%
		Dicht/Gesättigt	5%	6%	8%
		Stop+Go	10%	14%	16%
	Innerortsstraße	Flüssig	11%	15%	16%
		Dicht/Gesättigt	14%	19%	21%
		Stop+Go	26%	38%	42%

Abbildung 4: Effizienzpotenziale bei Pkw der Mittelklasse für Automatisierungsstufe 5 (Krail et al. 2019)

mussten für die Stufen 4 und 5 auch außerhalb des Bereichs der Autobahnen ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden die durch den Einsatz wichtiger Fahrerassistenzsysteme möglichen Effizienzpotenziale aus der betrachteten Fachliteratur, nach Fahrzeugsegment und Fahrsituation (Straßentyp und Verkehrsdichte) differenziert, gesammelt. Auf Basis der für die jeweiligen fünf Automatisierungsstufen benötigten Fahrfunktionen bzw. der Fahrerassistenzsysteme und den Anteilen der Fahrleistung nach Fahrzeugsegment und Fahrsituation konnten die einzelnen Effizienzpotenziale Bottom-up zu einem Gesamtpotenzial verrechnet werden. Die dafür verwendete Methodik wird detailliert in Krail et al. (2019) beschrieben. Die Ergebnisse der Bottom-up-Analyse haben gezeigt, dass die Ausstattung und die Nutzung der Automatisierungsfunktionen die Effizienz aller Straßenfahrzeuge schon mit Einführung der Stufe 1 spürbar verbessert. Abhängig von der Verkehrsdichte, des befahrenen Straßentyps und des Fahrzeugsegments ergeben sich Potenziale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im spezifischen Maximalfall von bis zu 42 %.

Gemittelt über die Anteile der Fahrten auf den Straßentypen (BAB, Landstraße, Innerortsstraße) und den Verkehrsdichten (flüssig, dicht, stop & go) kann die Automatisierung und Vernetzung den Kraftstoffverbrauch am einzelnen Fahrzeug immerhin noch um bis zu 17 % (für schwere Nutzfahrzeuge) reduzieren. Dieser Wert ist als Effizienzpotenzial zu verstehen, der sich dann realisieren lässt, wenn die Nutzer der Fahrzeuge die Automatisierungsfunktionen auch in allen möglichen, spezifischen Anwendungsfällen benutzen. Übertragen auf die Anteile der Fahrzeuge mit Automatisierung aus dem Markthochlauf ergeben sich alleine durch die primären Potenziale Einsparungen der THG-Emissionen um ca. 10 bis 10,4 Mt. CO₂äq. im Jahr 2050.

3.2 Verkehrliche Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung

Vor dem Hintergrund der zu ermittelnden Auswirkungen von automatisiertem und vernetztem Fahren auf die THG-Emissionen ist eine Abschätzung der sich infolge dieses Digitalisierungsprozesses ergebenden Verhaltensänderung notwendig. Unter Verkehrsverhalten versteht man hierbei die Mobilitätsmuster im Personen- und Güterverkehr, die zu einer bestimmten Anzahl an Wegen mit bestimmten Zwecken, zurückgelegte Relationen, gewählte Verkehrsmittel und dafür benutzte Verkehrsinfrastruktur führen. Das Verkehrsverhalten im Personenverkehr hängt von zahlreichen sozioökonomischen, räumlichen, kulturellen und politischen Einflussgrößen ab. Neben den Charakteristika der einzelnen Personen und den individuellen Mobilitätsbedürfnissen werden immer wieder folgende Faktoren als zentrale Einflussgrößen auf das Verkehrsverhalten genannt: Transport- bzw. Reisekosten, Transport- bzw. Reisezeiten, Besetzungsgrad bzw. Ladefaktor, Verfügbarkeit bzw. Erreichbarkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Komfort. Mit Ausnahme der letzten Einflussgröße dieser Liste gelten diese auch für den Güterverkehr als entscheidende Parameter. Automatisiertes und vernetztes Fahren beeinflusst alle Einflussgrößen und erzeugt dadurch eine verkehrliche Wirkung. Diese Wirkung entsteht nicht erst mit der Stufe 5, dem fahrerlosen Fahren in Kombination mit V2V-Vernetzung, sondern bereits durch die vorherigen Stufen der Automatisierung. Sowohl die Kosten, die Reisezeit als auch der Wert der Zeit hängen von den Distanzen ab, die eine Person zurücklegt.

Wenn die Kosten und die Zeit für Mobilität durch die Automatisierung sinken, dann ist mit einer Erhöhung der Fahrleistungen zu rechnen. Die technoökonomische Analyse der

Studien und die Abschätzung des Markthochlaufs haben gezeigt, dass automatisierte Fahrzeuge teurer in der Anschaffung sind. Allerdings zeigt sich angesichts der Energieeffizienzpotenziale, dass damit auch eine deutliche Einsparung der Betriebskosten möglich ist. Im Güterverkehr und im öffentlichen Verkehr ermöglichen automatisierte Fahrzeuge in gewissen Anwendungsfällen die Einsparung des Fahrers und damit in Kombination mit der verbesserten Effizienz der Fahrzeuge die Nutzung zu geringeren Transportkosten. Einige Studien gehen davon aus, dass mit zunehmender Automatisierung der Fahrzeuge die Kapazität der Infrastruktur steigt, also mehr Fahrzeuge pro Zeiteinheit ohne Reduktion der Durchschnittsgeschwindigkeit und damit einer sinkenden Reisezeit auf der Straße unterwegs sein können (vgl. Maurer et al., 2016). Simulationen mit Mikromodellen haben diese Wirkungen bestätigt, jedoch nur bei sehr hohen Anteilen von fahrerlosen und vernetzten Fahrzeugen (vgl. Hartmann et al., 2017). Eine weitere Verhaltensänderung kann durch die Möglichkeit der Ausübung fahrfremder Aktivitäten bereits ab Stufe 3 entstehen, wie sie ohne Automatisierung nur als Beifahrer oder im öffentlichen Verkehr möglich ist (vgl. Fraedrich et al., 2016). Dadurch kann sich eine Änderung der Bewertung der Reisezeit ergeben. Die Fahrtzeit wird unter Umständen als weniger störend und daher weniger entscheidend bei der Distanz- oder Verkehrsmittelwahl empfunden. Zusätzlich können neue Mobilitätsdienstleistungen mit automatisierten und vernetzten Fahrzeugen und die Möglichkeit der Nutzung durch bisher nicht aktiv im MIV teilnehmenden Bevölkerungsgruppen (z.B. Kinder) einen Einfluss auf die Fahrleistungsentwicklung haben.

Für die quantitative Abschätzung der Wirkungen auf das Verkehrsverhalten und damit auf die jährlichen Fahrleistungen pro Verkehrsmittel wurden die oben aufgeführten Ursachen berücksichtigt. Die daraus folgenden Wirkungen auf THG-Emissionen wurden mit Hilfe des integrierten Verkehrs-, Ökonomie- und Umweltmodell ASTRA berechnet. Sowohl die Fahrleistungen des Personen- als auch des Güterverkehrs werden innerhalb des ASTRA-Modells mittels eines 4-Stufen-Ansatzes berechnet.

Die Ergebnisse der Analyse der sekundären Effekte des automatisierten und vernetzten Fahrens für die definierten Markthochlauf- und Mobilitätsszenarien haben gezeigt, dass sich der Modal Split durch Kostenvorteile, Effizienzverbesserungen, Komfortgewinne und die Möglichkeit der Ausübung fahrfremder Aktivitäten zu Gunsten des Straßenverkehrs ändern kann. Für die Simulation der Änderung der Verkehrsverteilung und des Modal Split wurden die Änderung der wahrgenommenen (reine Kraftstoffkosten) Kosten im MIV und die Änderung der Vollkosten bei Lkw und Bussen berücksichtigt. Durch den Wegfall des Fahrers ergeben sich bei Lkw und Bussen um 23 bis 33 % reduzierte Vollkosten. Zusätzlich flossen in die Berechnung die Änderungen der Fahrtzeiten, die geänderte Wahrnehmung der Fahrtzeit und sich ändernde Besetzungsgrade und Beladungsfaktoren ein. Entgegen der Darstellung der positiven Wirkungen

des automatisierten und vernetzten Fahrens auf die Fahrtzeit in einigen Studien, zeigt sich anhand von Mikrosimulationen im Mischverkehr aus menschlich und automatisiert gesteuerten Fahrzeugen keine Verbesserung der Kapazität. Erst das Erreichen sehr hoher Anteile automatisierter Fahrzeuge ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Kapazitäten der Straßen. Dieser Effekt tritt durch den bis 2050 noch begrenzten Anteil an Fahrzeugen mit Stufe 4 und 5 nach dieser Untersuchung erst nach 2050 ein.

3.3 Gesamtwirkungen auf THG-Emissionen des Verkehrs

Die Ermittlung der Potenziale neuer, automatisierter und geteilter Mobilitätskonzepte war nicht Bestandteil dieser Studie. Da diese die Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr auf THG-Emissionen jedoch zukünftig beeinflussen können, wurde mit zwei Szenarien gearbeitet, die den Unterschied der zukünftigen Nutzung im Personen- und Güterverkehr auf der Straße verdeutlichen sollen. Durch die beschriebene Änderung der Vollkosten im Straßenverkehr ist ein steigender Anteil des MIV und des Straßengüterverkehrs im Modal Split wahrscheinlich, wenn die Intensität der Nutzung und das Angebot an Sharingdienstleistungen für Pkw nicht deutlich steigt und die Logistik nicht weiter optimiert wird. Das für diese Studie entwickelte Szenario „Welt des Fahrzeugbesitzes“ (Szenario 1) folgt dieser Annahme und setzt den Status-Quo der geringen Besetzungsgrade im MIV mit dem vorherrschenden Standard des eigenen Pkw, moderater Optimierung der Logistik und einem wenig flexiblen Öffentlichen Verkehr fort. Aus verkehrlichen Gesichtspunkten, vielmehr jedoch aus dem Blickwinkel der Umweltwirkung und des Flächenverbrauchs, ist dieses Szenario weit von einem anzustrebenden ressourcenschonenden Zustand entfernt. An diesem Zustand vermag auch die Einführung der beiden Technologien der Automatisierung und der Vernetzung im Straßenverkehr wenig ändern. Die ohnehin schon hohen Anteile des MIV an den gesamten Fahrleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2050 erfahren in Szenario 1 erwartungsgemäß eine Steigerung. Der Verlagerungseffekt fällt in Folge des nach oben begrenzten Markthochlaufs für die Automatisierungsstufen 1 bis 5 jedoch moderat aus. Zusätzlich wird die negative Wirkung durch die angenommene Automatisierung im Öffentlichen Verkehr und auf der Schiene zumindest leicht abgefedert.

Als Kontrast und zur Verdeutlichung der Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr in Kombination mit deutlich zunehmenden Anteilen von Car- und Ridesharing im MIV, Optimierung der Logistik im Straßengüterverkehr und einem flexibleren Öffentlichen Verkehr wurde das Szenario „Welt der Mobilitätsdienstleistungen“ (Szenario 2) entwickelt.

Die Studie hat sich im Rahmen der sekundären Effekte des automatisierten und vernetzten Fahrens auch mit Auswir-

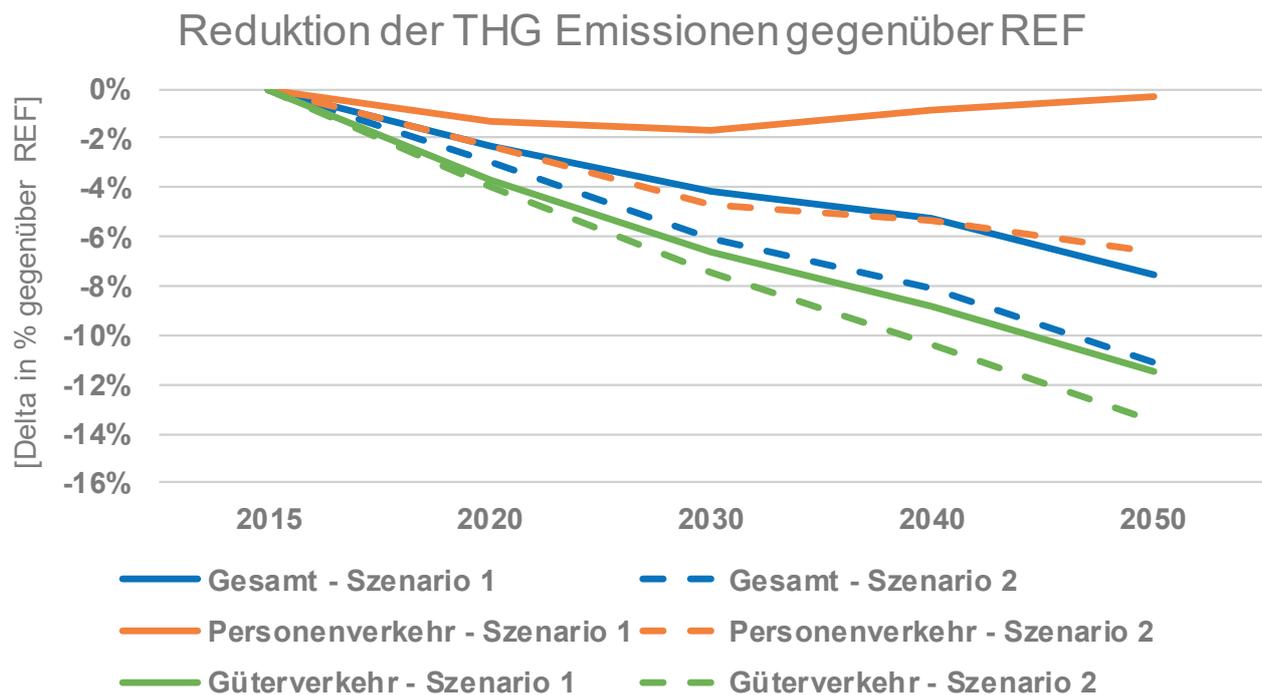


Abbildung 5: Gesamtwirkung des Automatisierten und Vernetzten Fahrens pro Szenario auf die THG-Emissionen (Krail et al. 2019)

kungen durch die Einführung neuer Nutzergruppen mit der Einführung des fahrerlosen Fahrens (Stufe 5) beschäftigt. Angesichts der bis zum Jahr 2050 noch geringen Marktanteile für die Stufe 5 wurde jedoch nicht von einer Steigerung der Fahrleistungen durch die Gruppe der Kinder und mobilitätseingeschränkter Personen ausgegangen. Die Steigerung der Verfügbarkeit des Pkw für Menschen ohne Zugang zu einem privaten Pkw wurde in Szenario 2 berücksichtigt. Die Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf die Vermeidung von Staus durch die Verbesserung der Verkehrssicherheit und der Reduktion der unfallbedingten Staus haben nur marginale Reduktionen der THG-Emissionen zur Folge.

In der Summe aus primären und sekundären Effekten ergeben sich sowohl für das Szenario 1 („Welt des Fahrzeugbesitzes“) als auch für das Szenario 2 („Welt der Mobilitätsdienstleistungen“) substantielle Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen im Vergleich zum Referenzszenario (REF). Während in Szenario 1 die Verlagerungseffekte von der Schiene auf die Straße die Wirkungen der primären Potenziale zumindest leicht abschwächen, verstärken sich die Wirkungen der primären Potenziale in Szenario 2 durch die Verknüpfung der Automatisierung und Vernetzung mit neuen, automatisierten Mobilitätsdienstleistungen. Die gesamten THG-Emissionen sinken durch die Automatisierung und Vernetzung gegenüber REF um 7,6 % im Jahr 2050 ohne Berücksichtigung neuer Mobilitätskonzepte und um 11,1 % gegenüber REF im Jahr 2050 mit zunehmender Nutzung von und Angebot an automatisierten Sharingkonzepten. In absoluten Mengen bedeutet dies eine Reduktion der THG-Emissionen um 7,8 Mt. CO_{2äq.} gegenüber REF im Jahr 2050 in Szenario 1.

Durch steigende Anteile des Car- und Ridesharing in Szenario 2 lassen sich die THG-Emissionen um 11,5 Mt. CO_{2äq.} gegenüber REF im Jahr 2050 verringern.

4. Schlussfolgerungen

Die Analysen zeigen zum einen das hohe Potenzial automatisierter und vernetzter Straßenfahrzeuge zur Verbesserung der Energieeffizienz. Sie zeigen jedoch auch, dass negative Verlagerungswirkungen entstehen können, wenn sich keine Änderung des Status quo der Verkehrsmittelwahl in Deutschland ergibt. Steigt die Nachfrage und das Angebot an geteilten Mobilitätsdienstleistungen wie Carsharing oder Ridesharing deutlich, kann auch hier die Automatisierung zu einer zusätzlichen Verbesserung der Effizienz des gesamten Verkehrssystems beitragen. Die Wirkung zeigt sich hierbei durch steigende Besetzungsgrade und insgesamt sinkende Fahrleistungen im MIV, wenn der private Pkw-Besitz abnimmt und durch die Nutzung von automatisierten Sharingdienstleistungen und dem Öffentlichen Verkehr substituiert wird. Im Güterverkehr können automatisierte Konzepte ebenfalls zu einer Steigerung der Effizienz beitragen, indem die Zahl der Leerfahrten optimiert wird. Dies führt ebenfalls zu einer Verbesserung der Fahrleistungen.

Die durchgeführte Potenzialabschätzung beruht wie bei Technikfolgenabschätzungen üblich auf einer Vielzahl an Annahmen, welche in Krail et al. (2019) ausführlich beschrieben sind. Die Wirkung dieser Annahmen auf THG-Emissionen sind im Falle des sich ändernden Verkehrsverhaltens und der Nutzung geteilter Mobilitätskonzepte mittels der

beiden Szenarien skizziert worden. Die Entwicklung der Akzeptanz der Automatisierung im Straßenverkehr stellt einen wichtigen Hebel bei der Ermittlung der Potenziale dar, ebenso wie die Entwicklung der Produktionskosten. Letztlich kann die Annahme der parallel im Öffentlichen Verkehr und insbesondere auf der Schiene ebenfalls deutlich zunehmenden Automatisierung die Ergebnisse ebenfalls beeinflussen. Schafft es der öffentliche Verkehr und die Schiene nicht, mit den Entwicklungen auf der Straße Schritt zu halten, dann steigt die Wettbewerbsfähigkeit des MIV durch die Automatisierung und Vernetzung zusätzlich. Dadurch würden die Modal-Anteile der Straße weiter steigen und die Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen deutlich kleiner ausfallen.

5. Referenzen

- Dütschke E., Schneider U., Krail M., Peters A. (2017): Akzeptanz für automatisiertes Fahren. Die Chance auf eine nachhaltige Verkehrswende? Internationales Verkehrswesen 69 (2017), Nr. 3, S. 60-63. Berlin.
- Etemad A. et al. (2017): Automated Driving Applications and Technologies for Intelligent Vehicles. Endbericht des Adaptive Projekts. Wolfsburg.
- Fraedrich E., Cyganski R., Wolf I., Lenz B. (2016): User Perspectives on Autonomous Driving: A Use-Case-Driven Study in Germany. Geographisches Institut, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Hartmann M.; Busch F.; Vortisch P. (2017): Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. Studie im Auftrag des VDA. FAT-Schriftenreihe 296. München.
- Krail M. et al. (2019): Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. Studie im Rahmen der MKS im Auftrag des BMVI. Karlsruhe.
- Maurer M., Gerdes C. J., Lenz B., Winner H. (Hrsg.) (2016): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer Verlag.