

Mobilitätsszenarien 2040: Verkehrswachstum und Treibhausgas-minderungen – Geht das zusammen?

Dr. Christian Winkler¹, Stefan Seum²

¹ ² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung

1 Einleitung

Der Verkehr in Deutschland nimmt seit langer Zeit stetig zu. Damit sind auch enorme Mengen an Treibhausgasemissionen verbunden, die einen negativen Einfluss auf das Klima haben. Drei verschiedene Mobilitätsszenarien für das Jahr 2040, die im Rahmen des institutionell geförderten Projekts „Verkehrsentwicklung und Umwelt“ (VEU) am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelt wurden, zeigen, dass auch in Zukunft mit einem weiteren Wachstum der Verkehrsleistung zu rechnen ist. Aus Klimaschutzgründen sind jedoch die Treibhausgasemissionen auch im Verkehrssektor drastisch zu reduzieren.

In den erstellten Szenarien wurden unterschiedliche denkbare Trends und Entwicklungen berücksichtigt und deren Einfluss auf die Entwicklung der Mobilität in Deutschland und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen analysiert. Im vorliegenden Beitrag wird zunächst ein Überblick über das Projekt und die Szenarien gegeben. Anschließend erfolgt eine kurze Vorstellung des nationalen Verkehrsmodells DEMO, mit dem die Verkehrsnachfrage des Personen- und Güterverkehrs berechnet wurde. Zudem wird ein Einblick in die Berechnungsmethodik zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen gegeben. Abschließend werden die Ergebnisse der Szenarien gegenübergestellt und diskutiert.

2 Denkbare Entwicklungspfade der Mobilität in Deutschland: die VEU Szenarien

Szenario-Analysen sind ein etabliertes Instrument insbesondere in der strategischen Planung sowie der Unternehmens- und Politikberatung. Im Themenfeld Verkehr, Energie und Klimaschutz entstanden in den vergangenen Jahren eine Reihe von Szenarien, die sich in Zielszenarien und explorative Zukunftsszenarien einteilen lassen. Bei den Zielszenarien, wie beispielsweise im Projekt Renewability III [6] oder den Langfristszenarien zur Energieentwicklung [2] wird aufgezeigt, mit welchen Entwicklungspfaden bestimmte umweltpolitische Ziele vermutlich zu erreichen sind. Bei explorativen Zukunftsszenarien, wie beispielsweise die Szenarien des Instituts für Mobilitätsforschung [7], werden mögliche Zukunftsbilder skizziert, die plausibel in kontextualen Rahmenbedingungen eingebettet sind. Beide Ansätze haben für die Ableitung möglicher Handlungsempfehlungen Schwächen. So werden Zielszenarien

¹ Korrespondierender Autor: christian.winkler@dlr.de

² stefan.seum@dlr.de

von den Zielen getrieben und die Nachvollziehbarkeit und Konsistenz der Annahmen ist nicht immer gegeben [3]. Die Entwicklungen in explorativen Szenarien werden hingegen häufig von einigen wenigen Parametern dominiert, wie beispielsweise ökonomischen Einflussgrößen, so dass die Effekte konkreter Maßnahmen nur bedingt sichtbar werden (Ibid.).

Die Motivation für das Projekt „Verkehrsentwicklung und Umwelt“ war die konsistente Ableitung denkbarer Verkehrsentwicklungen und die anschließende Quantifizierung dieser Entwicklungen und ihrer Umweltwirkungen. Als methodischen Ansatz haben wir uns für einen explorativen Szenario-Prozess entschieden, der jedoch auf national beeinflussbare Parameter fokussiert, während Makro-Parameter (bspw. Bevölkerungsentwicklung, Bruttoinlandsprodukt) für alle Szenarien fixiert wurden [8]. Dabei war es unser Ziel, insbesondere solche handlungspolitischen Stellschrauben herauszuarbeiten, die realistischerweise als Steuerungsinstrumente der Politik und Gesellschaft in Frage kommen, weil sie auf eine denkbare Akzeptanz der Bevölkerung treffen und weil sie im Bereich der Verantwortlichkeiten regionaler und nationaler Entscheider liegen.

Methodisch haben wir uns für einen modell-basierten Logikansatz zur Ableitung von möglichen Veränderungen existierender Trends (probabilistic modified trends approach) nach [9] entschieden. Dieser Ansatz verbindet qualitative Elemente des Szenario-Writings mit quantitativen Elementen der Einschätzungen möglicher Veränderungen von Variablen. Mit Hilfe einer computergestützten Cross-Impact-Analyse werden verschiedene, denkbare Entwicklungskorridore von einflussreichen Parametern miteinander in Beziehung gesetzt. Als Ergebnis entstehen in sich konsistente Kombinationen von Parameter-Ausprägungen, die dann die Grundlage für die Erstellung der Szenario-Storylines bieten und zur Herleitung von Modell-Input-Parametern dienen. Von anfänglich mehr als 200 Parametern, die das Verkehrssystem beeinflussen, wurden dreizehn als hoch relevant und in ihrer zukünftigen Entwicklung sehr unsicher herausgefiltert (kritische Szenario-Parameter) und für die Cross-Impact Analyse aufbereitet. Dabei stellten sich die Bereiche Emissions-Grenzwerte, finanzielle Steuermechanismen, Infrastrukturinvestitionen, und die Entwicklungen im Energiemarkt als die effektivsten Parameter heraus, die die Klimawirkung des Verkehrs beeinflussen.

Als Untersuchungsgegenstand resultierten drei Szenarien: ein an die Eckdaten der Bundesverkehrswegeprognose (VP 2030) orientierter Referenzfall, das Szenario „Freies Spiel“ und das Szenario „Geregelter Ruck“. Im Referenzfall wird eine Fortführung bereits eingeleiteter Trends und Entwicklungen abgebildet. Die Veränderungen und Eingriffe können als moderat bezeichnet werden. So werden beispielsweise die CO₂-Flottengrenzwerte bis 2040 auf 65 g/km verschärft und die Energiewende, mit einem Anteil von 60 % erneuerbaren Energiequellen in 2040, gut vorangebracht. Das Szenario „Freies Spiel“ bettet sich in eine kompetitivere globale Ordnung ein, wo sich die Staaten auf nationale Kompetenzen zurückziehen. Es besteht ein breiter gesellschaftlicher Konsens, dass ökonomische Stärke und die Entwicklungen nach Marktkräften die beste Antwort auf globale Herausforderungen darstellt. Der Staat zieht sich als regulierender Akteur zurück, um Entwicklungen nicht zu behindern. So werden im „Freien Spiel“ die CO₂-Flotten-Grenzwerte auf dem 2020er Niveau von 95 g/km belassen. Aufgrund der wettbewerblichen Position setzen sich erneuerbare Energien nur zu 40 % am Strommarkt durch. Im Szenario „Geregelter Ruck“ ist der globale Kontext ein kooperativer. Es kommt zu internationalen Vereinbarungen und mehr Zusammenarbeit zum Lösen großer Herausforderungen. In der Gesellschaft besteht ein breiter Konsens, dass strengere Regeln kombiniert mit Förderungen und Investitionen in bestimmte Technologien am besten geeig-

net sind, um den Verkehrssektor umweltfreundlicher und weniger abhängig von fossilen Energiequellen zu gestalten. Neben Förderungen nichtmotorisierter Verkehre wird hier der CO₂-Flottengrenzwert auf 45 g/km verschärft und die Energiewende massiv vorangebracht. In 2040 werden 78 % der elektrischen Energie aus erneuerbaren Quellen erzeugt.

In allen drei Fällen sind denkbare und in sich konsistente Entwicklungen skizziert. Sie sind alle plausibel und konsistent mit den Annahmen einer leicht abnehmenden Bevölkerung und einer moderat wachsenden Wirtschaft. Bei genauer Betrachtung stellt sich das Szenario „Ge-regelter Ruck“ als ein hoch ambitioniertes Szenario dar [8].

3 Überblick über das Deutschlandmodell DEMO

Um die verkehrlichen Wirkungen der verschiedenen Maßnahmen und Entwicklungen der Szenarien quantifizieren zu können, ist die Anwendung eines Verkehrsmodells für Deutschland unerlässlich. Im Rahmen von VEU wurde daher in den letzten Jahren das Deutschlandmodell (DEMO) entwickelt und angewendet ([10], [11], [1]). Mit DEMO wird der Verkehr auf dem Territorium Deutschlands umfassend beschrieben und seine Veränderung in Abhängigkeit politischer und gesellschaftlicher Entwicklungen und Maßnahmen prognostiziert. Hierfür ist einerseits auch die Einbeziehung des verkehrlich relevanten europäischen Auslands erforderlich, andererseits ist den sehr unterschiedlichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen unterschiedlicher Verkehre durch separate Module Rechnung zu tragen.

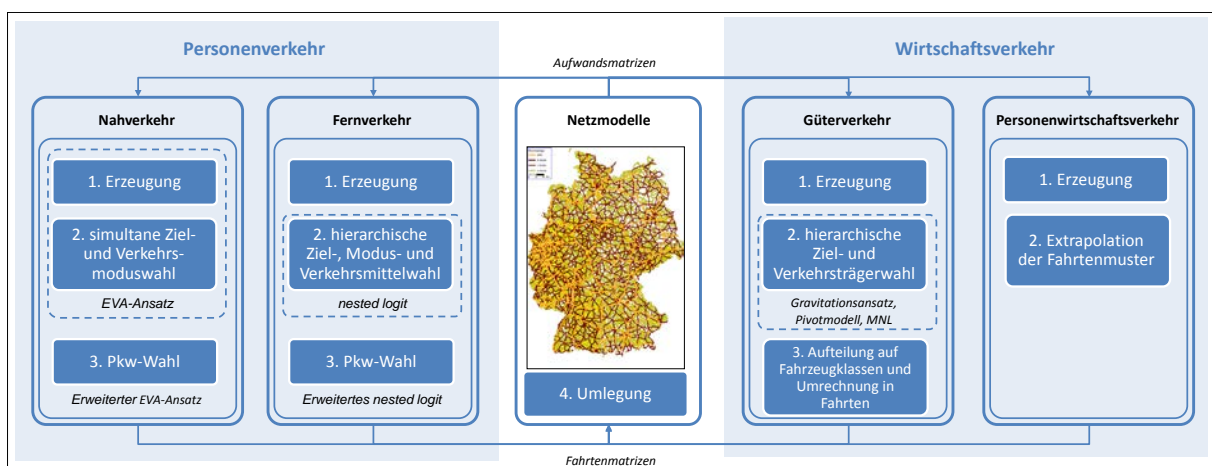


Abbildung 1: Module des Deutschlandmodells DEMO

In Abbildung 1 sind die verschiedenen Module von DEMO sowie deren Wechselwirkungen schematisch abgebildet. Es handelt sich dabei zum einen um die beiden Privatpersonenverkehrsmodule PNV (Personennahverkehr) und PFV (Personenfernverkehr), zum anderen um die Wirtschaftsverkehrmodule GV (Güterverkehr) und PWV (Personenwirtschaftsverkehr). Die Module entsprechen eigenständigen Verkehrsnachfragemodellen, welche jeweils im Kern die Modellstufen Verkehrserzeugung, Ziel- und Verkehrsmittelwahl umfassen. Die aus der Berechnung der Nachfragemodule resultierenden Fahrtenmatrizen werden gemeinsam und teilweise ergänzt durch weitere externe Fahrtenmatrizen des europäischen Verkehrs auf die Verkehrsnetze umgelegt. Die daraus resultierenden Verkehrsaufwände (Reisezeiten, Reisekosten) fließen wiederum in die Nachfragemodule zurück. Die Rückkopplungen zwischen den Nachfrageberechnungen und der Verkehrsumlegung erfolgen bis zur Erzielung von Nutzergleichgewichten.

Deutschland als Untersuchungsraum ist für die räumlich aufgelöste Verkehrsmodellierung aller Verkehrsarten in Verkehrszellen eingeteilt. Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik der Verkehre, sind zum Teil verschiedene räumliche Einteilungen umgesetzt. So erfolgen die Nachfrageberechnungen des PFV, GV und PWV für das Basisjahr 2010 jeweils auf der NUTS3-Ebene, d.h. auf Basis der Kreise und kreisfreien Städte in Deutschland (Stand 31.12.2010). Dabei handelt es sich um 412 Verkehrszellen in Deutschland, die ebenfalls im Rahmen der Verkehrsprognose des Bundes (VP 2030) die räumliche Basis darstellen. Zudem wird das europäische Ausland durch 183 Verkehrszellen abgebildet, wobei der Detaillierungsgrad mit zunehmender Distanz zu Deutschland abnimmt. Die Modellierung des Personennahverkehrs mit seinen teilweise sehr kurzen Entfernungen des Rad- und Fußverkehrs bedarf hingegen einer räumlich differenzierteren Betrachtung, wofür Deutschland in 6.561 Verkehrszellen unterteilt ist. Die Grundlage dieser Einteilung bilden die Gemeinden, die im ländlichen Raum jedoch teilweise zu Gemeindeverbänden zusammengefasst sind. Demgegenüber unterliegen große Städte einer weiteren Unterteilung, wodurch der städtische Nahverkehr wesentlich realistischer abgebildet werden kann.

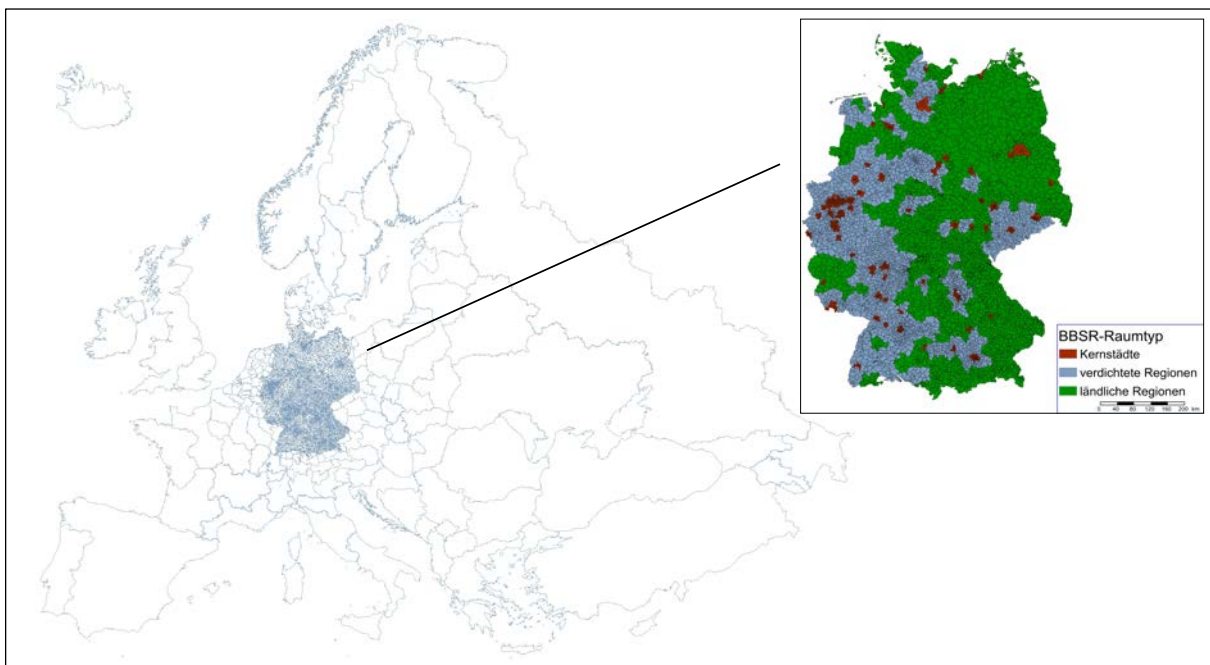


Abbildung 2: Verkehrszelleneinteilung

Die Verkehrszelleneinteilung für Europa und die gemeindebasierte Einteilung für Deutschland ist in Abbildung 2 abgebildet. Hieraus wird auch ersichtlich, dass die Verkehrszellen in Deutschland zusätzlich nach drei Raumtypen (Kernstädte, verstärkere Kreise und ländliche Kreise) unterschieden sind. Diese Einteilung stellt in der Nachfragemodellierung des Personenverkehrs eine Differenzierungseinheit verschiedener Verkehrsverhaltenskenngößen dar und entspricht der Kategorie der zusammengefassten Kreistypen in der Erhebung Mobilität in Deutschland 2008 [4].

4 Verkehrsnachfrageentwicklungen in den Szenarien

Für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage der Szenarien im Jahr 2040 erfolgte die Anwendung von DEMO. Hierfür mussten die Annahmen und Entwicklungen der Szenarien zunächst operationalisiert werden, d.h. in quantifizierbare Modellinputgrößen übersetzt werden. Übergeordnete Entwicklungen wie die Bevölkerungsänderungen lagen teilweise bereits entsprechend vor. Insbesondere szenarienspezifische Maßnahmen erforderten hingegen konkrete Festlegungen, wie beispielsweise der Reduzierung der Regelgeschwindigkeit auf dem innerörtlichen Nebenstraßennetz auf 30 km/h im Szenario „Geregelter Ruck“. In [8] ist eine umfassende Beschreibung der Szenarien präsentiert, auf dessen Grundlagen die Modellierungs-Eingangsparameter entwickelt wurden. Auf besonders wirkmächtige Maßnahmen wird im Folgenden bei der Beschreibung und Diskussion der Ergebnisse kurz eingegangen. Bei den nachfolgenden Ergebnissen handelt es sich um eine kleine Auswahl mit Fokus auf dem privaten Personenverkehr, die dem Vergleich der Szenarien dienen soll.

In Abbildung 3 sind die jährlichen Verkehrsaufkommen, also die Anzahl der Wege, für den privaten Personenverkehr differenziert nach den Verkehrsmitteln dargestellt. Nicht enthalten sind grenzüberschreitende Verkehre sowie der Personenwirtschaftsverkehr. Der Öffentliche Verkehr (ÖV) umfasst auch den innerdeutschen Luftverkehr. Im Basisjahr 2010 finden 98 Mrd. Wege im privaten Personenverkehr innerhalb Deutschlands statt. Davon entfallen knapp 55 Mrd. Wege auf den MIV (motorisierter Individualverkehr), der somit einen Anteil von ca. 56 % besitzt. Der ÖV besitzt einen Anteil von rund neun Prozent. Mit dem nichtmotorisierten Verkehr werden ca. 36 % der Wege zurückgelegt.

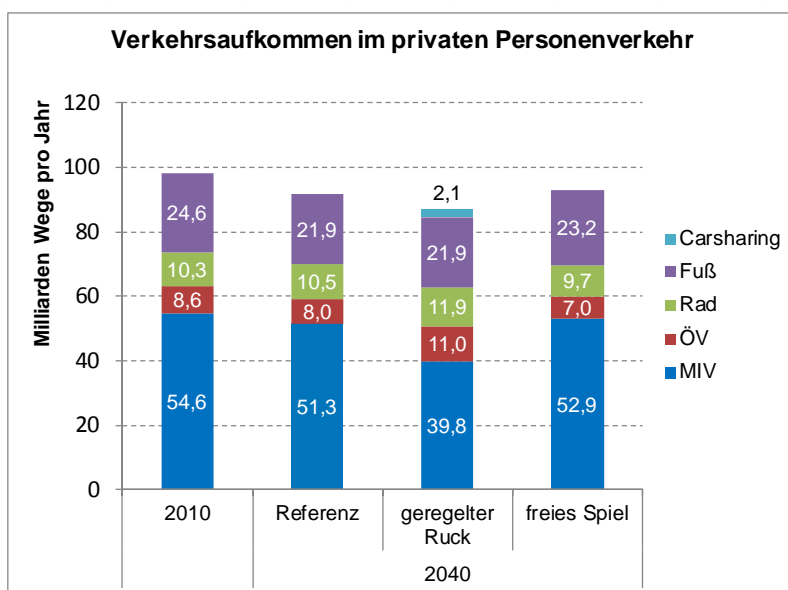


Abbildung 3: Verkehrsaufkommen im privaten Personenverkehr

Im Referenzszenario sinkt die Gesamtanzahl der Wege um ca. drei Prozent, was durch die zurückgehende Bevölkerung begründet ist. Der Rückgang der Wegeanzahl fällt prozentual schwächer aus als der Bevölkerungsrückgang, da der zu erwartende höhere Pkw- und Führerscheinbesitz in der Bevölkerung den Effekt etwas dämpft. Leichte Zugewinne erzielt der Radverkehr aufgrund der angenommenen Attraktivitätssteigerung durch Pedelecs. Die Wegeanteile der Verkehrsmittel bleiben, mit Ausnahme einer leichten Verschiebung vom Fuß- zum Radverkehr, hingegen nahezu unverändert gegenüber 2010. Der ÖV behält zwar

trotz Rückgang der Wege seinen Anteil weitestgehend, dabei ist jedoch interessant, dass im Nahverkehr deutliche Verluste infolge des Rückgangs der Schüleranzahl auftreten, dies aber teilweise durch neue Angebote im Fernverkehr (insbesondere Fernbusse) kompensiert wird.

Die stärkste Wirkung erzielt das Szenario „Geregelter Ruck“. Die Fördermaßnahmen des ÖV, Radverkehrs und Carsharing sowie deutlich höhere Nutzerkosten im MIV führen zu einer signifikanten Reduzierung des MIV gegenüber dem Referenzszenario um ca. 8 Mrd. Wege. Der Anteil des MIV reduziert sich damit um zehn Prozentpunkte auf 46 %. Der ÖV steigert seinen Anteil hingegen auf knapp 13 %. Der Radverkehr gewinnt noch einmal ca. drei Prozentpunkte und steigert seinen Anteil auf ca. 14 %. Eine starke Förderung des Carsharing führt zu einem Anteil der Gesamtwege von ca. zwei Prozent.

Im Szenario „Freies Spiel“ gibt es gegenüber dem Referenzszenario einen leichten Anstieg der Wegeanzahl um knapp ein Prozent. Grund hierfür ist eine etwas höhere Anzahl an Pkws innerhalb der Bevölkerung, was u. a. Folge einer Angebotsverschlechterung des ÖV ist. Dies führt zu einer Verlagerung vom ÖV zum MIV. Zudem wurde eine geringere Attraktivitätssteigerung des Radverkehrs angenommen. Die Verkehrsmittelanteile ändern sich jedoch vergleichsweise wenig.

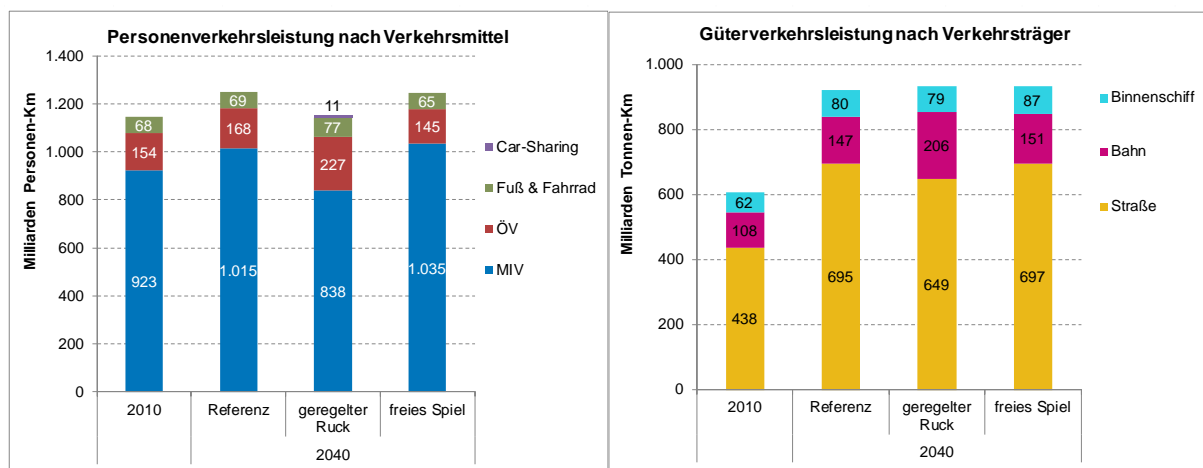


Abbildung 4: Verkehrsleistungen des Personen- und Güterverkehrs

In Abbildung 4 sind die Verkehrsleistungen des Personen- und Güterverkehrs für das Jahr 2010 und die Szenarien im Jahr 2040 gegenübergestellt. Der MIV umfasst hierin den gesamten Inlandsverkehr, d. h. auch den Personenwirtschaftsverkehr und grenzüberschreitenden Verkehr auf deutschem Boden. Es wird deutlich, dass im Personenverkehr sowohl in der Referenz als auch im „Freien Spiel“ von einer weiteren Zunahme der Verkehrsleistung insgesamt und insbesondere im MIV auszugehen ist. Gründe hierfür sind zum einen ein starker Zuwachs im Personenwirtschaftsverkehr, zum anderen sinken die Kilometerkosten für Nutzer im MIV, was zu Verkehrsverlagerungen hin zu weiter entfernten Ziele führt. Der ÖV verliert hingegen im „Freien Spiel“ aufgrund eines reduzierten Angebots, besonders im Nahverkehr, und erhöhten Fahrpreisen. Im „Geregelten Ruck“ sinkt hingegen die MIV-Verkehrsleistung bei einer deutlichen Erhöhung des ÖV um ca. 47 %. Die Gesamtverkehrsleistung bleibt in diesem Szenario in etwa auf dem Niveau von 2010.

Im Güterverkehr zeigt sich ein deutlich anderes Bild. Hier steigt die Verkehrsleistung in allen Szenarien für jeden Verkehrsträger stark an. Während auf der Straße die Verkehrsleistung in

den Szenarien zwischen ca. 50 und 60 % steigt, erhöht sich aufgrund der Attraktivitätssteigerungen im „Geregelten Ruck“ die Verkehrsleistung auf der Schiene um über 90 %. Die Gesamtverkehrsleistung erhöht sich in jedem Szenario um etwas mehr als 50 %.

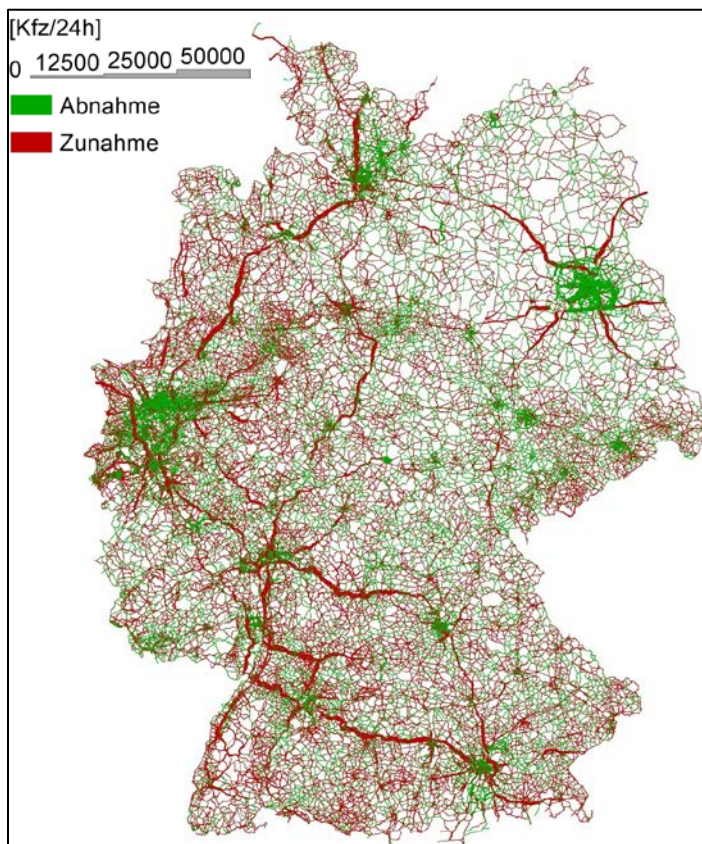


Abbildung 5: Differenz der Verkehrsbelastungen zwischen geregeltem Ruck (2040) und 2010

Die Änderung der räumlichen Belastungen des deutschen Straßennetzes zwischen 2010 und dem „Geregelten Ruck“ im Jahr 2040 ist in Abbildung 5 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass in den Ballungsräumen von einem Rückgang der Belastungen ausgegangen werden kann, da hier der private Personenverkehr dominiert, und dieser deutliche Verlagerungen weg vom Auto erfährt. Insbesondere auf dem Autobahnnetz zeigen sich jedoch deutliche Zunahmen, die insbesondere durch den steigenden Güterverkehr, aber auch durch mehr Fernverkehr im Personenverkehr verursacht werden. Entsprechende Vergleiche für das Referenzszenario und das „Freie Spiel“ zeigen noch wesentlich stärkere Zunahmen im Straßennetz.

5 Die Emissionsmodellierung der Szenarien

Im Projekt VEU wurden sowohl die Luftschadstoffemissionen als auch die Entwicklungen der Treibhausgasemissionen des Verkehrs analysiert. Das Treibhausgas Kohlendioxid spielt für die globale Erwärmung eine maßgebliche Rolle und der Verkehr hat einen großen Anteil daran. Die Analysen zum Kohlendioxid wurden in VEU für Deutschland in aggregierter Form durchgeführt, während die Luftschadstoffemissionen räumlich fein umgelegt und mit Atmosphären-Chemie-Modellen weiter untersucht wurden. Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen diskutiert.

Die Emissionen des straßengebundenen Verkehrs wurden „bottom-up“, d. h. basierend auf den einzelnen, räumlich zuordenbaren Fahrten modelliert. Diese räumlich differenzierten Verkehrsmengen und die damit verbundenen Fahrleistungen wurden kantenfein im Verkehrsmodell DEMO ermittelt (siehe Abbildung 5) und den Straßenkategorien „innerorts“, „außerorts“ und „Autobahn“ zugeordnet. Neben den Fahrleistungen wurden ebenfalls die Entwicklungen der Fahrzeugflotten modelliert, die den Grad der Durchdringung von neuen Technologien im Rahmen der Szenario-Storylines abbilden [8]. Für die resultierenden Fahrzeugflotten erfolgte eine weitere Differenzierung im Hinblick auf die Gesamt-Pkw-Anzahl, der Größenverteilung und der Fahrleistungsverteilung nach Straßentyp. Schließlich wurden für jedes Szenario straßentypdifferenzierte spezifische Flotten-Emissionsfaktoren generiert, mit denen die Fahrleistungen auf den jeweiligen Kanten multipliziert werden konnten.

Ausgangsdaten für die Flotten-Emissionsfaktoren lieferte die Emissionsfaktorendatenbank HBEFA³. Für das Basisjahr 2010 wurden die HBEFA-Werte unverändert verwendet, während für die Jahre 2030 und 2040 die Daten in einzelnen Bereichen modifiziert bzw. ergänzt wurden. Die Modifikationen umfassten dabei:

- Zusätzlich zu Emissionen wurden Faktoren für den Verbrauch fossiler und elektrischer Energie pro Kilometer umgesetzt.
- Aufgrund von eigenen Flottenmodellierungen wurden Korrekturen am Energieverbrauch von Euro 5 und Euro 6 Fahrzeugen vorgenommen. Im Trend wurden die Verbräuche von großen Benzin Pkw sowie von kleinen Diesel Pkw nach oben, die von großen Diesel Pkw nach unten korrigiert.
- Die Bio-Kraftstoffanteile wurden neu bewertet und stringenter gehandhabt (d.h. in kleineren Mengen als Beimischung angenommen)
- Neue Emissionsfaktoren wurden für Hybrid-, Plug-In-Hybrid und Batterie-Elektrische Fahrzeuge entwickelt und umgesetzt. Dies schließt den Energieverbrauch elektrisch und fossil mit ein.

Für die Emissionen des öffentlichen Verkehrs wurden die Daten aus TREMOD [5] als Grundlage genommen, für die Szenario-Jahre jedoch einige Annahmen variiert und verändert. So wurden beispielsweise unterschiedliche Hybridisierungen in den Antrieben öffentlicher Busse unterstellt und – als Effekt von investigativen Maßnahmen im öffentlichen Verkehr – die Auslastungszahlen in den einzelnen öffentlichen Verkehrsmitteln variiert. Neben generellen Effizienzsteigerungen sind diese Veränderungen von Auslastungen, sowohl zu höheren („Geregelter Ruck“) als auch zu niedrigeren („Freies Spiel“) maßgeblich daran beteiligt, wie CO₂-Effizient der öffentliche Personenverkehr sein wird.

In den VEU Szenarien gibt es noch einen weiteren wichtigen Unterschied zu TREMOD sowie den offiziellen bundesdeutschen Treibhausgasberichten im Rahmen der Kyoto-Vereinbarungen: In VEU haben wir die dem Verkehrssektor zuzuordnenden Emissionen aus der Elektrizitätserzeugung und der Treibstoffbereitstellung (Raffinerien) in Deutschland dem Verkehr zugeschlagen. Nach Kyoto-Berichterstattung führt eine Elektrifizierung des Verkehrs zur Verschiebung von Emissionen aus dem Verkehrs- in den Energiesektor. Zudem werden

³ HBEFA – Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 3.3, 2017. www.hbefa.net/d/index.html

in VEU für Strom immer die Emissionen des nach den Szenarien modellierten Energiemix zugrunde gelegt.

Im Freien Spiel und in der Referenz zeigt sich beispielsweise, dass aufgrund der geringen Durchdringung erneuerbarer Energien die elektrisch gefahrenen Pkw-km (in Deutschland) auch 2040 keinen oder sogar einen negativen Klimabilanzeffekt aufweisen (Abbildung 6). Pro gefahrenem elektrischen Pkw-km werden 2040 in dem Referenzszenario 87 gCO₂ und im Szenario „Freies Spiel“ sogar 139 gCO₂ ausgestoßen. Diesen stehen CO₂ Emissionen von 93 – 120 gCO₂ für fossile Antriebe gegenüber. Lediglich im Szenario „Geregelter Ruck“ gibt es, mit unter 25 gCO₂/Pkw-km, einen signifikant positiven Effekt durch die Elektrifizierung der Mobilität, der aber insbesondere von der Verdrängung von Kohlestrom durch erneuerbare Energien abhängig ist.

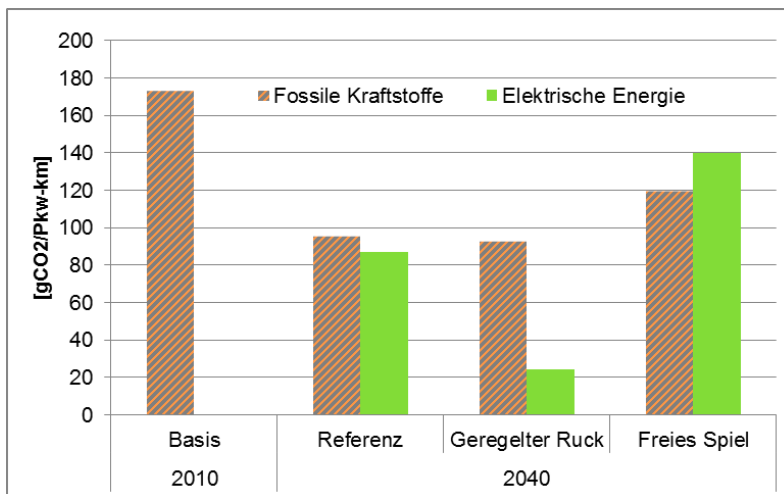


Abbildung 6: Systemischer CO₂-Ausstoß von Pkw, elektrisch und fossil angetrieben

Das Szenario „Geregelter Ruck“ ist zudem das einzige, das einen deutlichen Rückgang von mit fossilen Treibstoffen bewältigten Fahrleistungen verzeichnen kann (Abbildung 7). Hier sinken im Personenverkehr zum einen die Gesamtfahrleistungen, zum anderen kommt es zu einer deutlichen Elektrifizierung, wobei 30 % der Fahrleistungen in 2040 elektrisch zurückgelegt werden. Der Diesel wird hingegen praktisch vom Pkw-Markt verdrängt.

Im Güterverkehr wird der überregionale Lkw-Verkehr ab 2025 massiv elektrifiziert – hier als Beispiel mit Oberleitungstechnologie. Aus diesem Grund erreichen die fossil gefahrenen Kilometer in 2040 wieder den Wert von 2010. Im Kontrast zum „Geregelten Ruck“ bleiben im „Freien Spiel“ die Antriebe überwiegend fossil und die Fahrleistungen steigen sowohl im Personen als auch Güterverkehr an. Die technologische Entwicklung im Pkw geht hier hin zu Benzin-Hybrid Fahrzeugen und für Lkw kommt lediglich Erdgas in einer nennenswerten Größenordnung zusätzlich zum Einsatz.

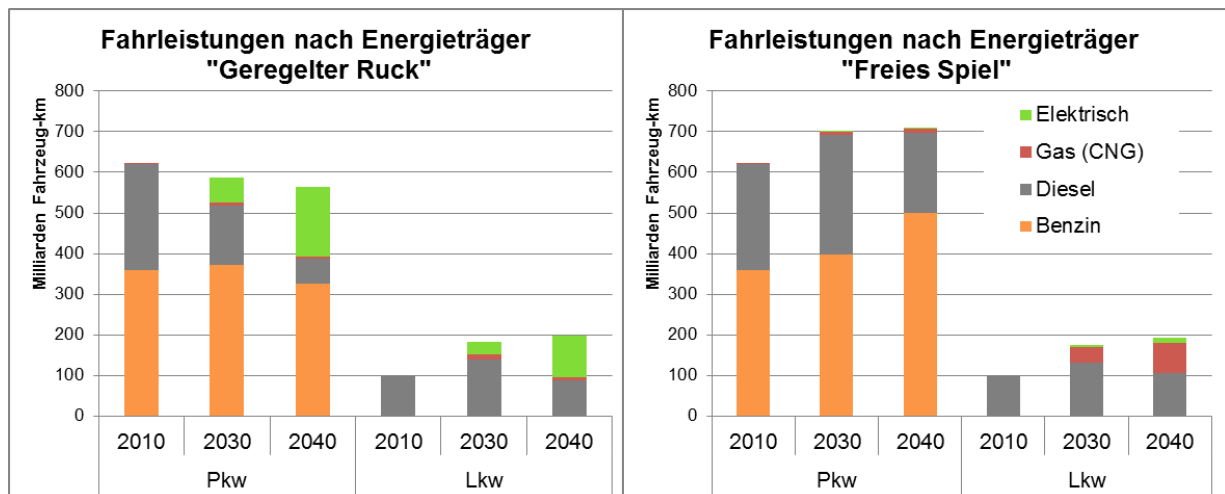


Abbildung 7: Entwicklung der Fahrleistungen nach Energieträgern

In der Auswertung der Szenario-Modellierungen in Bezug auf Treibhausgasemissionen wird deutlich, dass es umfassende Anstrengungen bedarf, um die Klimaziele der Bundesregierung für den Verkehr für 2030 erreichen zu können⁴. Selbst im ambitionierten „Geregelten Ruck“ werden diese Ziele erst nach 2030 erreicht und auch nur durch eine deutliche Elektrifizierung der Güterverkehre (die in Form von Oberleitungs-Lkw oder auch Schienengebundenen Güterverkehren stattfinden kann). Abbildung 8 legt die Gesamtergebnisse der Szenario-Analysen für Treibhausgase dar. Folgende Interpretationen sollten dabei beachtet werden:

- Die CO₂-Emissionen sinken in allen Szenarien gegenüber 2010 aufgrund von Effizienzverbesserungen und der Einführung neuer Antriebe. Die Effizienzverbesserungen hybrider und elektrischer Antriebe übersteigt jene fossiler Antriebe.
- Die elektrische Energiemenge für Verkehr steigt im „Geregelten Ruck“ drastisch an und liegt mit 96 PJ ca. 180 % über dem elektrischen Energiebedarf der Referenz 2040. Da diese Energie aber nur 3,7 % Kohlestrom enthält und über 77 % durch erneuerbare Energie gedeckt wird, steigen die Treibhausgasemissionen der elektrischen Energie für Verkehr nicht an.
- Gleiches findet im elektrisch betriebenen öffentlichen Personenverkehr statt: hier steigt der Energiebedarf, nicht aber die CO₂-Emissionen im „Geregelten Ruck“.
- Umgekehrt verhält es sich mit den Emissionen aus Raffinerien: diese sinken aufgrund abnehmender Nachfrage fossiler Treibstoffe im „Geregelten Ruck“.
- Die drastische Treibhausgasreduktion im „Geregeltem Ruck“ gegenüber der Referenz im Güterverkehr ist zu 90 % auf technologische Innovation zurückzuführen und nur zu 10 % auf die Verlagerung von der Straße auf die Schiene. Im Personenverkehr spielen die Verhaltensänderungen (weniger und verlagerte Verkehre) mit über 50 % eine weitaus größere Rolle.

⁴ Nach dem Klimaschutzplan 2050 soll der Verkehrssektor in 2030 <98 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente emittieren. Dies entspricht einer Reduzierung von 40 bis 42 % gegenüber 1990.

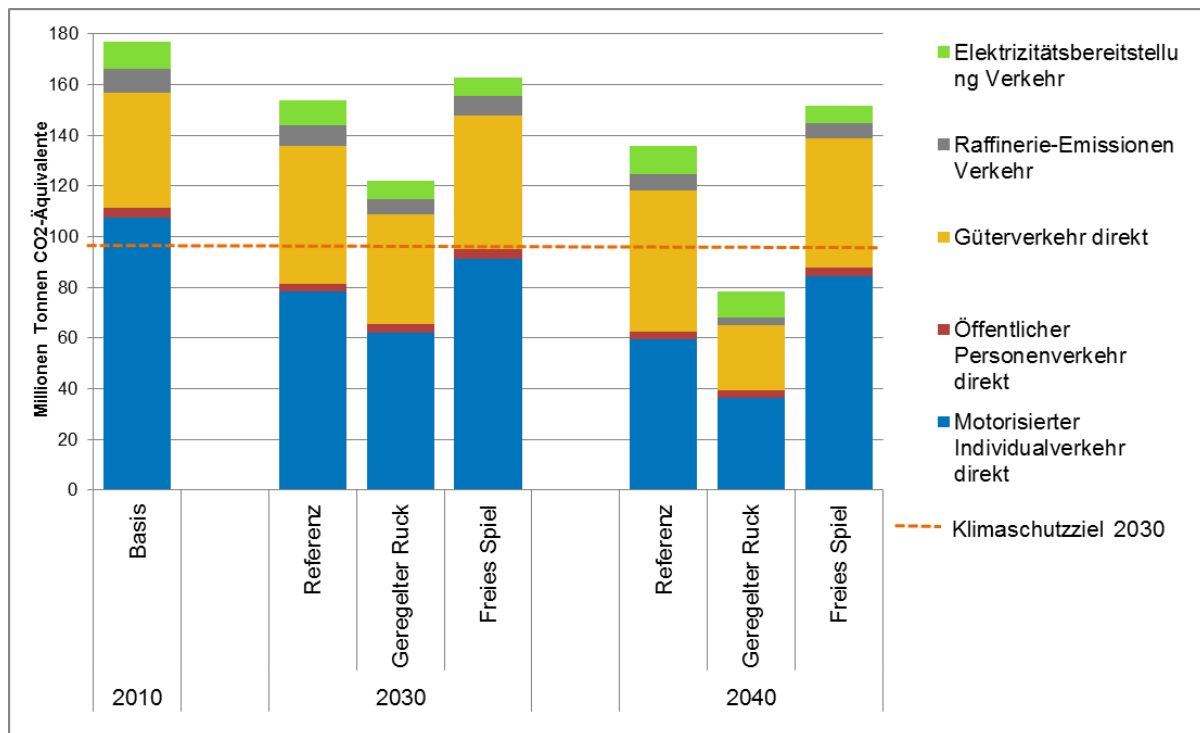


Abbildung 8: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des deutschen, bodengebundenen Verkehrs

6 Fazit

Verkehrswachstum und Treibhausgasminderung – geht das zusammen? Anhand von drei Szenarien haben Forscherinnen und Forscher am DLR denkbare zukünftige Entwicklungspfade des Verkehrs in Deutschland untersucht. Mit Hilfe des Verkehrsmodells DEMO wurden die szenariospezifischen Verkehrsnachfragen in Deutschland 2040 differenziert ermittelt und deren Umweltwirkungen anschließend mit Hilfe eines Verbundes von weiteren Modellen bestimmt. Während im Güterverkehr die Verkehrsleistungen in allen Szenarien drastisch weiter wachsen, ist dieses Wachstum im Personenverkehr moderater. Zudem konnten die Modellierungen zeigen, dass regulative Maßnahmen, wie beispielsweise Beschleunigung des Radverkehrs, Verteuerung des motorisierten Individualverkehrs etc., zu deutlichen Verschiebungen hin zu kooperativen, öffentlichen und aktiven Verkehrsmitteln führen. Trotzdem wäre ohne technische Entwicklungen kaum mit einer Treibhausgasreduzierung im gesamten Verkehrssektor zu rechnen.

Treibhausgasreduzierungen stellen sich jedoch in allen Szenarien ein – allerdings gelingt es nur im ambitionierten Szenario „Geregelter Ruck“ die Treibhausgase signifikant in Richtung der Klimaschutzziele der Bundesregierung zu bewegen. Es kann daher festgestellt werden, dass durch Effizienzsteigerungen und Hybridisierung auch für konventionelle Antriebe die Treibhausgasemissionen zurückgehen werden. Eine weitreichendere Treibhausgasreduzierung ist jedoch nur durch zusätzliche Verkehrsverlagerungen hin zu umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln und elektrische Antriebe, im öffentlichen und individuellen Verkehr, erreichbar. Dies jedoch nur dann, wenn der Anteil an Kohle an der Stromproduktion drastisch zurückgeht und Strom weitgehend erneuerbar produziert wird. Diese Entwicklung scheint jedoch noch lange nicht gesichert.

7 Literatur

- [1] Burgschweiger, S.; Wolfermann, A.; Liedtke, G. (2017): *A Macroscopic Freight Transport Demand Model for Policy Analysis in Germany*. In: proceedings of the 3rd Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic, Darmstadt.
- [2] DLR; Fraunhofer IWES; IFNE (2012): *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, „Leitstudie 2011“*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Berlin.
- [3] DLR; IFEU; LBST; DBFZ (2013): *Analyse aktueller Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und dessen Umweltwirkungen*. Kurzstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Berlin.
- [4] Infas; DLR (2010): *Mobilität in Deutschland 2008 – Ergebnisbericht*. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn.
- [5] Knörr, W.; Heidt, C.; Gores, S.; Bergk, F. (2016): *Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- [6] Öko-Institut; DLR; Ifeu; Infrac (2016): *Renewability III, Optionen einer Decarbonisierung des Verkehrssektors*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.
- [7] Phleps, P.; Feige, I. und Zapp, K. (2015): *Die Zukunft der Mobilität, Szenarien für Deutschland 2035*. Institut für Mobilitätsforschung (ifmo), München.
- [8] Seum S.; Goletz, M.; Kuhnimhof, T. (2017): *Verkehrssystemforschung am DLR – Mobil in Deutschland 2040. Teil 2: Die Szenarien des VEU-Projektes*. In: Internationales Verkehrswesen, Jg. 69, S. 78-81, Heft 2, Hamburg.
- [9] Weimer-Jehle, W. (2006): *Cross-Impact balances: a system-theoretical approach to cross-impact analysis*. In: Technological Forecasting and Social Change, Jg. 73, S. 334-361, Heft 4, Amsterdam.
- [10] Winkler, C.; Mocanu, T. (2017): *Methodology and Application of a German National Passenger Transport Model for Future Transport Scenarios*. in: proceedings of 45th European Transport Conference, Barcelona.
- [11] Winkler, C.; Wolfermann, A.; Mocanu, T.; Burgschweiger, S. (2017): *Modellierung des Personen- und Güterverkehrs in Deutschland als Entscheidungsunterstützung für die Politik*. in Straßenverkehrstechnik, Jg. 61, S. 551-558, Heft 8, Hamburg.