

Die Verkehrswende erreichen: vermeiden, verlagern, verbessern

1. Einleitung

Trotz eines steigenden Bewusstseins in der Bevölkerung für den Klimawandel und die dafür notwendige Umsetzung entsprechender Maßnahmen, sinken die CO₂-Emissionen in Deutschland [1] nicht ausreichend stark, um die Ziele der Bundesregierung für 2020 [2] zu erreichen. Ein Blick auf die Entwicklung der sektoralen CO₂-Emissionen Deutschlands (► *Abbildung 1*) zeigt weiterhin unterschiedliche Trends in den letzten Jahren auf [1].

In den Sektoren Industrie, Strom und Haushalte wurde bis 2017 bereits eine Reduktion der CO₂-Emissionen um mehr als 25% gegenüber dem Referenzjahr 1990 erreicht [1].

Dementgegen lagen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2017 auf einem ähnlichen Niveau wie in 1990. Seit 2010 ist sogar ein Anstieg der Emissionen erkennbar [1].

2. Optionen

Um die Emissionen des Verkehrssektors in der erforderlichen Höhe zu reduzieren, ist aus heutiger Sicht eine Kombination unterschiedlicher Maßnahmen erforderlich. Die Optionen lassen sich in drei zentrale Blöcke der Verkehrswende einteilen: vermeiden, verlagern, verbessern.

vermeiden

Eine Vermeidung von Verkehr kann z.B. durch einen zunehmenden Anteil von Heimarbeit erfolgen, der zu einer sinkenden Anzahl Arbeitswege führt. Ebenso könnte Verkehr durch geeignete Maßnahmen der Stadt- und Regionalplanung durch eine Verkürzung der Wege dazu beitragen Verkehr zu vermeiden. Im Güterverkehr ist eine erhöhte Auslastung der Fahrzeuge durch eine verbesserte Logistik zu nennen.

verlagern

Die im Herbst 2019 geplante Gesetzesänderung zur Reduktion der Mehrwertsteuer für Fernverkehrstickets der Bahn [4] zielt auf eine zunehmende Verlagerung des Verkehrs von CO₂-intensiveren (z.B. motorisierter Individualverkehr – MIV) auf CO₂-ärmere Verkehrsmodi (z.B. Schiene) ab.

verbessern

Der letzte Block umfasst die Senkung der spezifischen Emissionen der verschiedenen Modi. In diesem Bereich sind vor allem solche Maßnahmen konzentriert, die auf einen verringerten Endenergiebedarf sowie einen Kraftstoffwechsel hin zu solchen auf Basis erneuerbarer Primärenergien zielen. Dazu gehören insbesondere reduzierte Fahrwiderstände, beispielsweise durch verbesserte Aerodynamik und Gewichtsreduktion, die Erhöhung der Antriebs-effizienz und die Markteinführung alternativer Antriebskonzepte.

3. Herausforderungen der Verkehrswende

Obwohl diverse Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors verfügbar sind, weisen die in den letzten Jahren trotzdem steigenden Emissionen auf Schwierigkeiten bei der Umsetzung hin.

verbessern

Um die Entwicklung von Verbesserungsoptionen voranzutreiben, wurden sowohl für Pkw- [5] als auch für Lkw-Hersteller [6] Flottengrenzwerte auf EU-Ebene eingeführt. Bis 2014 führte diese Regulierung zu der gewünschten Senkung des spezifischen CO₂-Ausstoßes von neuen Pkw. Doch seit 2015 hat sich dieser Trend wieder umgekehrt, sodass aktuell eine erneute Erhöhung des spezifischen CO₂-Ausstoßes zu erkennen ist.

Diese negative Entwicklung entgegen dem Zielkorridor ist vor allem auf die veränderte Zusammensetzung der Neufahrzeugflotte zurückzuführen. So steigt insbesondere der Anteil der SUV seit 2010 kontinuierlich an. In Europa hat sich deren Anteil von 2010 bis 2018 mehr als verdreifacht. Welches Ausmaß die Auswirkungen dieser Entwicklung auf die CO₂-Emissionen haben zeigt ► *Abbildung 2*. Weltweit betrachtet führte die wachsende Flotte der SUV von 2010 bis 2018 zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen um 544 Mio. t. Dies ist zwar noch ein geringer Anteil an den Gesamtemissionen, aber schon mehr als der durch die Schwerindustrie im gleichen Zeitraum verursachte Anstieg. [7]



FZ Jülich

Dr. Martin Robinius
m.robinius@fz-juelich.de

Dr. Thomas Grube
th.grube@fz-juelich.de

Prof. Dr. Detlef Stolten
d.stolten@fz-juelich.de

DBFZ

Dr. Franziska Müller-Langer
franziska.mueller-langer@dbfz.de

DLR

Carsten Hoyer-Klick
carsten.hoyer-klick@dlr.de

Dr. Ralph-Uwe Dietrich
ralph-uwe.dietrich@dlr.de

Fraunhofer IEE

Philip Gauglitz
philip.gauglitz@ee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

IZES

Dr. Bodo Groß
gross@izes.de

KIT

Dr. Frank Graf
frank.graf@kit.edu

Sascha Ott
sascha.ott@kit.edu

UFZ

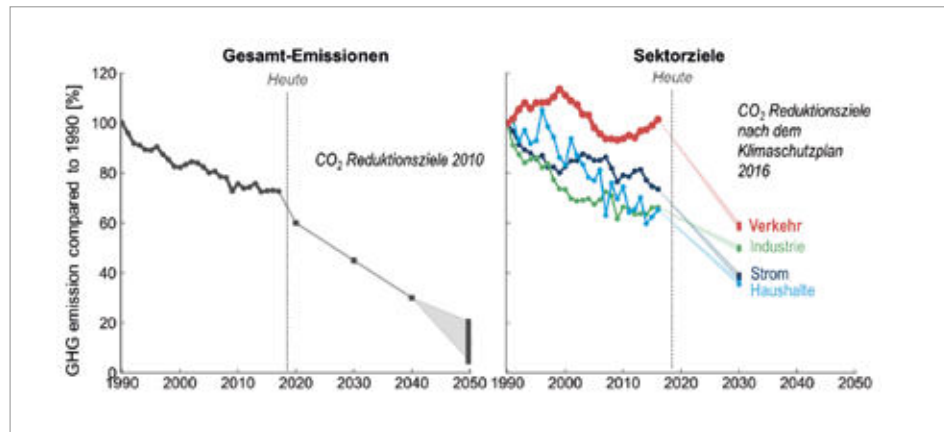
Prof. Dr. Paul Lehmann
paul.lehmann@ufz.de

Dr. Markus Millinger
markus.millinger@ufz.de

ZSW

Maike Schmidt
maike.schmidt@zsw-bw.de

Abbildung 1
**Entwicklung der
 gesamten und
 sektoralen
 CO₂-Emissionen
 in Deutschland
 inklusive zukünftiger
 Ziele [1-3]**



Demnach sind die bereits umgesetzten Effizienzverbesserungen sowie der langsam wachsende Anteil alternativer Antriebe im Pkw-Bereich [8] bisher nicht ausreichend, um die gegenläufigen Auswirkungen des wachsenden Bestands schwerer PKW auf die spezifischen CO₂-Emissionen auszugleichen [9].

vermeiden

Entgegen der gewünschten Verkehrsvermeidung steigen die Verkehrsleistungen sämtlicher Modi an [10]. Gründe für den Anstieg im Personenverkehr sind unter anderem eine stetig wachsende Entfernung zwischen Wohn- und Arbeitsort [11] sowie die verstärkte Reisetätigkeit [12]. Im Güterverkehr liegen die Ursachen in der zunehmenden Globalisierung und dem steigenden E-Commerce [13].

verlagern

Der Wunsch nach einer flexiblen und schnellen Logistik führt nicht nur zu einer steigenden Verkehrsleistung, sondern auch zu einer Verlagerung des Verkehrs vom Wasser auf die Schiene und Straße [10]. Auch dies widerspricht der gewünschten Verlagerung zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Weiterhin ist im Personenverkehr bisher keine bedeutsame Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf CO₂-ärmere Verkehrsmittel erkennbar [10].

4. Forschungsergebnisse und Beiträge aus der Forschung

Um trotz der im vorherigen Kapitel aufgezeigten Herausforderungen die Klimaschutzziele bis 2030 und 2050 im Verkehrssektor zu erreichen, werden in diesem Bereich erhebliche Forschungsaktivitäten geleistet. Diese haben bereits ausreichende Handlungsoptionen für die Verkehrswende herausgestellt. Des Weiteren sind die Hauptpfade (Elektromobilität mit Batterie und Wasserstoff, Power-to-Fuel und Biomasse) bekannt. In diesen Bereichen konnten durch Forschung bereits bedeutsame technologische Erfolge erzielt werden. Deren Umsetzung ist jedoch mit einer enormen Unsicherheit behaftet.

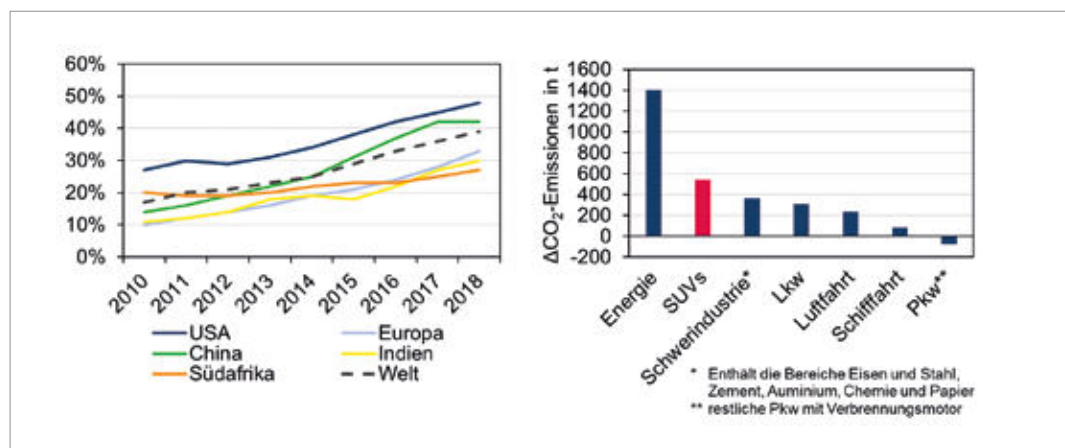
4.1 Verkehrsleistungsszenarien

Um mögliche Pfade der Verkehrswende zu bestimmen, bedarf es zunächst einer Abschätzung zukünftiger Verkehrsleistungen. ► *Abbildung 3* gibt einen Überblick zu diversen Szenarien der Verkehrsleistungen in Deutschland im Jahr 2030 und 2050.

Die Übersicht verdeutlicht, dass die Verkehrsleistungen der verschiedenen Modi in den meisten Szenarien auf einem ähnlichen Niveau prognostiziert werden. Zudem ist erkennbar, dass im Güterverkehr

Abbildung 2a
**Anteil der SUV an
 verkauften Pkw**

Abbildung 2b
**Veränderungen der
 CO₂-Emissionen
 von 2010 bis 2019
 (in Mio. t)**



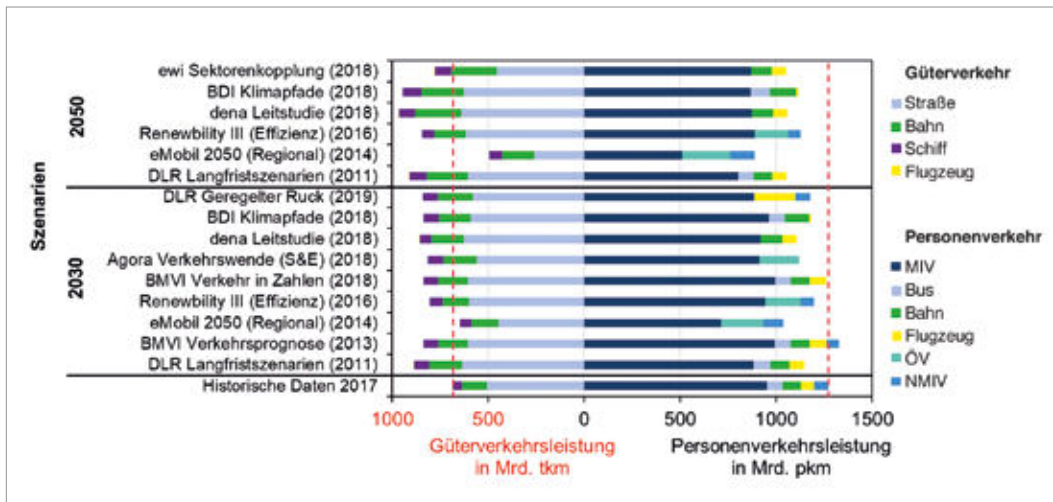


Abbildung 3
Verkehrsleistungs-szenarien für Deutschland in 2030 und 2050 [10, 14-21]

steigende Verkehrsleistungen erwartet werden, wohingegen im Personenverkehr eine leichte Reduktion bis 2050 angenommen wird. Weiterhin werden Verlagerungseffekte in den Szenarien nur in einem geringeren Ausmaß angenommen, sodass laut den bisher untersuchten Szenarien auch zukünftig ein starker Fokus auf dem motorisierten Individualverkehr liegt.

Das „Regional-Szenario“ der „eMobil“-Studie des Öko Instituts [18] stellt sowohl für 2030, als auch für 2050 einen Ausreißer in der Übersicht dar. Die Reduktion der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr des Szenarios resultieren vor allem aus der grundlegenden Annahme einer zunehmenden Regionalisierung des Lebens der Menschen. Im Personenverkehr führt diese beispielsweise zu einer Verkürzung der Wege zu Versorgungs- und Freizeitstrukturen. Hinzu kommt eine Reduktion der Arbeitswege und Dienstreisen um 25%. Die geringere Verkehrsleistung im Güterverkehr resultiert aus einem „sparsameren“ Umgang mit Ressourcen sowie aus lokalen (Recycling-)Kreisläufen. Weiterhin wird eine optimierte Auslastung der Ladekapazitäten angenommen. [18] Dies verdeutlicht, dass auch zum Beispiel alternative Verkehrsmittel wie das Fahrrad mitgedacht werden müssen.

4.2 Die Rolle von Energiesystemmodellen

Die gezeigten Verkehrsleistungsszenarien beinhalten Aspekte des Vermeidens und des Verlagerns. Des Weiteren gibt es Technologiemodelle, mit welchen Verbesserungspotenziale bestimmt werden können. Energiesystemmodelle bilden ein zentrales Element, da sie alle drei Grundpfeiler der Verkehrswende (vermeiden, verlagern, verbessern) berücksichtigen. Grundlage der holistischen Betrachtungsweise der Energiesystemmodelle bildet der Einbezug technischer, ökonomischer und ökologischer Rahmen-

bedingungen. Auf deren Basis wird das untersuchte System optimiert. Die Ergebnisse der Systemmodelle sind allerdings nicht als Prognosen zu verstehen, sondern dienen dazu, Kausalitäten innerhalb des Systems sichtbar zu machen.

Eine zentrale Entwicklung des Energiesystems der Zukunft ist die verstärkte Kopplung der einzelnen Sektoren. Durch neuartige Energiesystemmodelle [22-26] können die Zusammenhänge dieser Sektorkopplung berücksichtigt und deren Effekte aufgezeigt werden. Einer dieser Effekte ist eine Veränderung der Energiebereitstellung hervorgerufen durch die Verkehrswende. Dieser Wirkzusammenhang ist in ► **Abbildung 5** dargestellt.

Die steigende Elektrifizierung der Pkw-Flotte bis 2050 könnte zu einem steigenden Bedarf alternativer Kraftstoffe in Form von elektrischer Energie und Wasserstoff führen, für die verbleibenden Verbrennungskraftmaschinen sind Bio- bzw. PTL-Kraftstoffe erforderlich. Um diese Energieformen bereitzustellen zu können, müssen dementsprechend jedoch die erneuerbaren Energien Wind und Photovoltaik (PV) in ausreichendem Maße im Energiesystem installiert

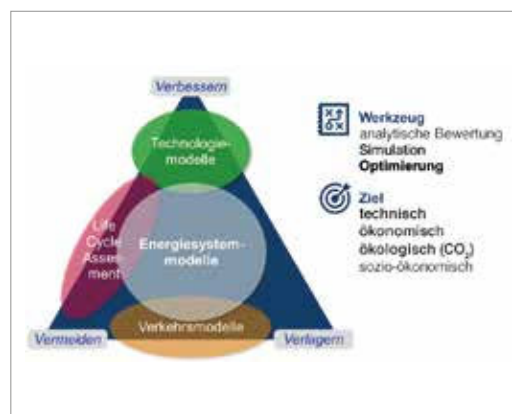


Abbildung 4
Einteilung der methodischen Modelle in das Zieldreieck der Verkehrswende

Abbildung 5a
Anteile von Antrieben
und Kraftstoffen in der
Pkw-Flotte 2050 [26]

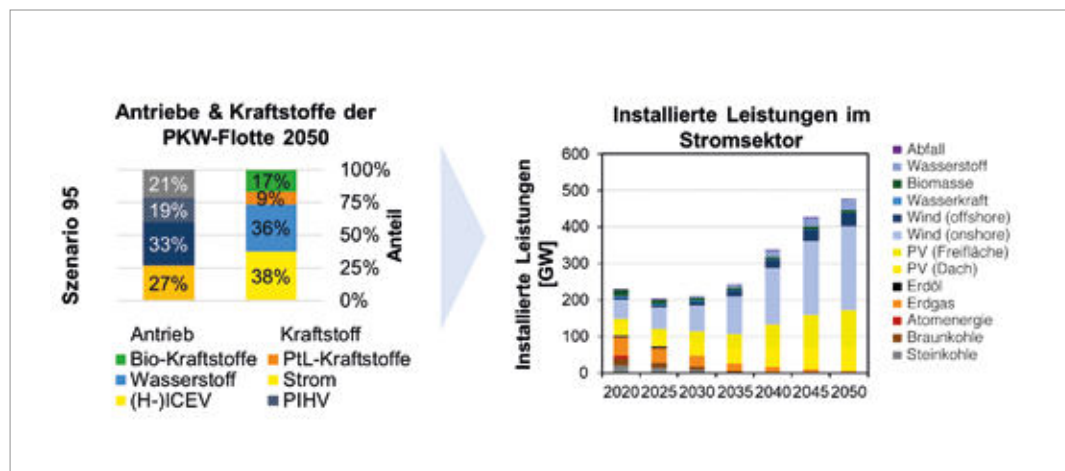
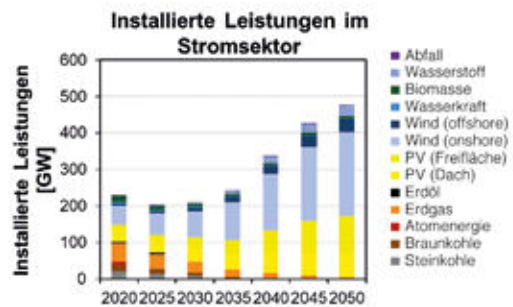


Abbildung 5b
Installierte Leistungen
im Stromsektor [26]



sein sowie Erzeugungskapazitäten für die Verarbeitung zu Wasserstoff und anderen Kraftstoffen geschaffen werden.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Zielsetzungen der Energiewende stellen den aktuell nahezu ausschließlich fossile Rohstoffe nutzenden Verkehrssektor vor besondere Herausforderungen, da trotz erzielter Verbesserungen der Antriebstechnologie ein Trend zu steigenden CO₂-Emissionen erkennbar ist. Dieser Trend wird unter anderem durch steigende Verkehrsleistungen und ein verändertes Käuferverhalten in Richtung von Fahrzeugen mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch verursacht. Weiterhin ist erkennbar, dass die Nachfrage nach emissionsarmen und effizienteren alternativen Antrieben nur langsam wächst.

Die Verkehrswende erfordert daher einen Mix aus Maßnahmen, die sich den Schlagworten vermeiden, verlagern, verbessern zuordnen lassen. Dabei gilt es zu beachten, dass einem breiten Spektrum an Lösungsoptionen, deren jeweiliger Markterfolg heute nicht abzusehen ist, zum Teil signifikante Mehrkosten gegenüberstehen. Strategische Entscheidungen können daher nur unter erheblichen Unsicherheiten getroffen werden. Dennoch sind heute auf politischer Ebene gewisse technologiespezifische Entscheidungen unumgänglich, sollen die klimapolitischen Ziele für das Jahr 2030 erreicht werden. Das gilt insbesondere für den Aufbau der notwendigen Infrastruktur zur Nutzung alternativer Antriebe.

Bezüglich aktueller Forschungsanstrengungen ist weiterhin erkennbar, dass in systemanalytischer Hinsicht die möglichen Auswirkungen eines veränderten Technologiemies – auch einschließlich der Optionen der Sektorenkopplung – und teilweise auch eines veränderten Mobilitätsverhaltens untersucht werden.

Dazu werden zum Teil neuentwickelte und zunehmend verknüpfte Modellansätze eingesetzt. Dabei verwendete Szenarien und Prognosen weisen insbesondere auch auf steigende Verkehrsleistungen im Güterverkehr hin. Im Bereich der Umsetzungsforschung kann gezeigt werden, dass derzeit neue Verfahren zur Kraftstoffbereitstellung, end-use Technologien und Infrastrukturlösungen in der Entwicklung sind, welche die Markteinführung der Elektromobilität mit Brennstoffzellen und Batterien sowie flüssiger und gasförmiger biogener und strombasierter Kraftstoffe unterstützen.

6. Quellen

1. BMWi, Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung. 2018: Berlin.
2. Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 2016, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Berlin.
3. Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 2010, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Berlin.
4. Bundesregierung, Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. 2019.
5. Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. 2019: Brussels.
6. Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 20. Juni 2019

- zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates.
7. Cozzi, L. and A. Petropoulos. Commentary: Growing preference for SUVs challenges emissions reductions in passenger car market. 2019 [15.10.2019–22.10.2019]; Available from: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/october/growing-preference-for-suvs-challenges-emissions-reductions-in-passenger-car-mark.html>
 8. Bestand an Pkw in den Jahren 2010 bis 2019 nach ausgewählten Kraftstoffarten. 22.10.2019]; Available from: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_z.html?nn=663524.
 9. Average carbon dioxide emissions from new passenger cars, E.E.A. (DK), Editor. 2019: Copenhagen.
 10. Radke, S., Verkehr in Zahlen 2018/2019. 2018: Berlin.
 11. Dauth, W. and P. Haller, Klarer Trend zu längeren Pendeldistanzen. IAB Kurzbericht, 2018.
 12. Hubert, J., Anzahl der Urlaubsreisenden in Deutschland bis 2018. 2019.
 13. Rabe, L., Umsatz durch E-Commerce/Onlinehandel in Deutschland bis 2019. 2019.
 14. Lorenczik et al., Kosteneffiziente Umsetzung der Sektorenkopplung. 2018.
 15. Gerbert et al., Klimapfade für Deutschland. 2018.
 16. Bründlinger, T., et al., dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. 2018, Deutsche Energie-Agentur GmbH: Berlin.
 17. Zimmer et al., Endbericht Renewability III. 2016.
 18. Hacker et al., eMobil 2050 – Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. 2014, Öko-Institut e.V.: Berlin.
 19. Nitsch et al., Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. 2011.
 20. Hoyer-Klick et al., Verkehr und seine Umweltwirkungen. 2019.
 21. Blanck et al., Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030. 2018.
 22. Millinger et al., Model for greenhouse gas optimal allocation of biomass across transport sectors in Germany. Transport. Res. Part D-Transport. Environ., 2019: p. 265-275.
 23. Böttger et al., Cost-optimal market share of electric mobility within the energy system in a decarbonisation scenario, in 15th International Conference on the European Energy Market. 2018: Lodz.
 24. Erlach et al., Optimierungsmodell REMod-D, in Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. 2018.
 25. de Tena et al., Impact of electric vehicles on a future renewable energy-based power system in Europe with a focus on Germany. Int. Journal of Energy Research, 2018: p. 2670-2685.
 26. Robinius, M., et al., Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 (Kurzfassung). 2019, Forschungszentrum Jülich GmbH: Jülich.