



SPECIALISTS IN
EMPIRICAL ECONOMIC
RESEARCH

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

GWS DISCUSSION PAPER 2023/04

Ökonomische Effekte von Szenarien zur Energiewende im Verkehr

Ergebnisse im Rahmen der
Begleitforschung Energiewende im
Verkehr („BEniVer“)

Christian Lutz

Lisa Becker

Impressum

AUTOR*INNEN

Dr. Christian Lutz

Tel: +49 (0) 541 40933-120, E-Mail: lutz@gws-os.com

Lisa Becker

Tel: +49 (0) 541 40933-287, E-Mail: becker@gws-os.com

TITEL

Ökonomische Effekte von Szenarien zur Energiewende im Verkehr – Ergebnisse im Rahmen der Begleitforschung Energiewende im Verkehr („BEniVer“)

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, September 2023

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die in diesem Papier vertretenen Auffassungen liegen ausschließlich in der Verantwortung der Verfasser*innen und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der GWS mbH wider.

FÖRDERHINWEIS

Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines durch das BMWK geförderten Forschungsprojekts erarbeitet (FKZ 03EIV116D).

HERAUSGEBER DER GWS DISCUSSION PAPER SERIES

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

ISSN 1867-7290

Das Discussion Paper im Überblick

1	Einleitung	1
2	Vorgehen	4
2.1	Modellbeschreibung PANTA RHEI	4
2.2	Szenarien mit Inputdaten	6
2.3	Modellierung der Verkehrsszenarien	10
3	Ergebnisse	12
3.1	Makroökonomische Effekte	12
3.2	Sektorale Effekte	18
4	Diskussion und Ausblick	20
5	Literaturverzeichnis	22

1 EINLEITUNG

Der Verkehrssektor war im Jahr 2022 für 19,8 % der deutschen Treibhausgas-Emissionen verantwortlich (UBA 2023a). Mit 147,9 Millionen Tonnen (Mt) CO₂-Äquivalenten lagen sie um knapp 9 Tonnen über dem bisherigen im Klimaschutzgesetz festgelegten Ziel von 139 Megatonnen. Die für 2030 vorgesehene Emissionshöchstmenge liegt mit 85 Megatonnen um 48 % unter den Emissionen des Referenzjahres 1990, bislang ist allerdings erst eine Reduktion von 9,4 % erreicht. Im Jahr 2019 vor dem pandemiebedingten Einbruch des Verkehrsaufkommens lagen sie sogar leicht über dem Niveau aus 1990. Nach aktuellem Projektionsbericht (UBA 2023b) wird das Sektorziel für 2030 deutlich verfehlt: Im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) werden 118 Mt CO₂-Äquivalente ausgestoßen, sodass die Emissionshöchstmenge um rund 34 Mt überschritten wird. Mithilfe von zusätzlichen Maßnahmen können weitere 7 Mt eingespart werden, wodurch das Minderungsziel allerdings weiterhin nicht erreicht wird.

Der Energiemix des Verkehrs ist weiterhin stark von fossilen Energieträgern geprägt: Im Jahr 2021 lag der Anteil von erneuerbaren Kraftstoffen und Strom im Verkehrssektor bei 7,2 %, im Straßenverkehr liegt er mit 6,3 % noch niedriger (AGEB 2023). Erneuerbare Kraftstoffe sind fast ausschließlich Biokraftstoffe, die Benzin oder Diesel als E5 oder E10 beigemischt werden. Allerdings ist ihr Einsatz umstritten, weil sehr viel Fläche für den Biomasseanbau benötigt wird, der nicht zur Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung steht. Außerdem reduziert der großflächige Anbau z. B. von Palmölpflanzen die Biodiversität. Die EU-Kommission strebt in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (European Union 2018) an, dass bis 2030 mindestens 14 % des Endenergieverbrauchs im Verkehr aus erneuerbaren Quellen stammen, worunter ein Anteil von 3,5 % an Biokraftstoffen der zweiten Generation, die nicht in Konkurrenz zu Nahrungsmittelversorgung stehen, fällt. Auch die Bundesregierung diskutiert eine sukzessive Begrenzung von Biokraftstoffen der ersten Generation, die in einem Stopp der Verwendung im Verkehr bis 2030 münden könnte (agrarheute 2023). Synthetische Kraftstoffe werden noch nicht eingesetzt und sind somit in den Verkehrsstatistiken bislang nicht erfasst. Die Energiewende im Verkehr wird nicht nur Änderungen im Fahrzeugbau bewirken, sondern auch das Energiesystem und den Außenhandel betreffen. Der fossile Kraftstoffmarkt in Deutschland ist jedoch gekennzeichnet von einem alten Anlagenbestand und hohen Pfadabhängigkeiten (Becker & Lutz 2019), wodurch die Transformation hin zu neuen Antriebsformen zusätzlich erschwert wird.

Das Durchschnittsalter von Pkw in Deutschland ist zuletzt gestiegen und liegt aktuell bei 10 Jahren (KBA 2023b). Angesichts von Neuzulassungen von 2,65 Mio. Pkw im Jahr 2022 und einem Bestand von 49 Millionen (KBA 2023c, KBA 2023a) wird deutlich, dass ein schneller Wandel von Verbrennern hin zu anderen Antriebsarten wie der Elektromobilität nicht gelingen kann. Selbst wenn ab dem Jahr 2035 keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mehr zugelassen werden dürfen, wird es im Jahr 2050 noch entsprechende Fahrzeuge geben.

Angesichts dieser Entwicklungen drängt sich die Frage auf, wie die Klimaschutz im Verkehrsbereich in Zukunft gelingen kann. Neben Deutschland strebt auch die EU im Rahmen des Green Deal einen drastischen Rückgang der THG-Emissionen des Verkehrssektors an. Ab 2035 ist vorgesehen, dass Neufahrzeuge keine THG-Emissionen mehr verursachen. Ob synthetische Kraftstoffe Teil der Lösung sein können, hat im Jahr 2022

Meinungsverschiedenheiten innerhalb der Bundesregierung sowie mit der EU-Kommission offenbart. Die EU-Kommission hat Anfang 2023 synthetische Kraftstoffe für die Zeit nach 2035 akzeptiert. Während die Frage der Neuzulassungen damit geregelt ist, bleibt die Frage offen, wie die Emissionen im Bestand so gesenkt werden können, dass die THG-Minderungsziele erreicht werden können. Hierzu startet ab 2027 ein zweites EU-weites Emissionshandelssystem EU-ETS II, das den Gebäude- und Straßenverkehrssektor umfasst. In Deutschland besteht mit dem BEHG bereits ein ähnlicher Mechanismus. Allerdings liegen die CO₂-Preise mit derzeit 30 €/t, rund 10 ct/l Treibstoff, nicht auf einem Niveau, das auch nur die aktuellen Ziele einhält. Vermutlich müsst(en) die Preise dazu zukünftig drastisch steigen.

Eine zentrale Frage ist vor diesem Hintergrund, ob eine Energiewende im Verkehrsbereich, also der Wechsel zu klimaneutralen Kraftstoffen oder klimaneutralen Antriebsarten, zum Erreichen der Klimaziele ausreichen wird oder der Straßenverkehr, etwa durch hohe CO₂-Preise dazu reduziert werden muss, sei es durch mehr öffentlichen Verkehr oder eine Reduktion des Verkehrsaufkommens. Das Projekt BEniVer hat sich ausschließlich mit der Energiewende im Verkehr befasst.

Das Projekt „BEniVer“ (Begleitforschung Energiewende im Verkehr) zeigt anhand von Szenarien mögliche Perspektiven zur Dekarbonisierung des Verkehrs auf, die in der folgenden Untersuchung hinsichtlich ihrer ökonomischen Auswirkungen bewertet werden. Mit dem Projekt wurde ein Projektkonsortium aus sechs Forschungsinstituten vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie bzw. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz beauftragt, um die Forschungsinitiative „Energiewende im Verkehr“ wissenschaftlich zu begleiten. Neben den ökonomischen Effekten wurden alternative Kraftstoffe für den Verkehr aus technischer und ökologischer Perspektive bewertet und die gesellschaftlichen Folgen analysiert.

Alternative Energieträger im Verkehr werden zwar in verschiedenen Studien zur Entwicklung des Energiesystems einbezogen, wie z. B. die Metastudie von Naegler et al. (2021b) zeigt. Die gesamtwirtschaftlichen Effekte infolge des Wechsels von fossilen zu klimaneutralen Kraftstoffen sind bislang jedoch wenig untersucht worden und eher im Rahmen der Energiewende als Ganzes und weniger einzeln als Transformation des Verkehrs betrachtet worden. Die sozio-ökonomischen Auswirkungen der Energiewende in Deutschland fallen gesamtwirtschaftlich positiv aus (Lutz et al. 2021, Sievers et al. 2019, Öko-Institut et al. 2019), während einzelne Maßnahmen negative Folgen für Teile der Wirtschaft haben können (Oei et al. 2020) oder einzelne Wirtschaftsbereiche negativ betroffen sein können. Für die Maßnahmen im Verkehrssektor berechnen Sievers et al. (2019) jedoch ausschließlich positive Effekte sowohl auf die Bruttowertschöpfung als auch auf die Beschäftigung, die insbesondere im Baugewerbe erzielt werden.

Speziell für die Transformation hin zur Elektromobilität schätzen verschiedene Studien die ökonomischen Folgen ab (Ulrich & Lehr 2019, Mönning et al. 2019), während die Einführung von Wasserstoff oder synthetischer Kraftstoffe noch nicht gesamtwirtschaftlich bewertet, sondern lediglich einzelwirtschaftlich betrachtet wurde (z. B. Robinius et al. 2022, Agora Verkehrswende et al. 2018). Auch auf EU-Ebene werden die gesamtwirtschaftlichen Effekte der Elektrifizierung im Straßenverkehr von Tamba et al. (2022) untersucht. Für Australien und China liegen ähnliche Analysen vor (Jian et al. 2020, Broadbent et al. 2022).

Eine weltweite Untersuchung von Ram et al. (2022) zeigt, dass durch die Energiewende zwar Arbeitsplätze für die Herstellung von Brenn- und Kraftstoffen bis 2050 wegfallen werden, auf der anderen Seite durch neue Technologien wie Elektrolyse oder Fisher-Tropsch-Verfahren zur Herstellung synthetischer Energieträger auch neue Arbeitsplätze entstehen.

Zur Analyse der ökonomischen Effekte werden zunächst das eingesetzte Modell PANTARHEI beschrieben, die Szenarien und dazugehörigen Inputdaten charakterisiert sowie die Erweiterungen durch projektspezifische Modellierungen dargestellt (Kapitel 2). Die Ergebnisse werden überwiegend auf makroökonomischer Ebene gezeigt, zudem wird ein Blick auf die sektoralen Effekte geworfen (Kapitel 3). Die Wirkungen der Szenarien werden anhand der Differenzen der Zielszenarien zum Referenzpfad veranschaulicht. Der Bericht endet mit einer Diskussion der Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsbedarfe im Bereich der Energiewende im Verkehr (Kapitel 4).

2 VORGEHEN

2.1 MODELLBESCHREIBUNG PANTA RHEI

Für die Analyse wird das makroökonomische Modell PANTA RHEI verwendet (Lutz et al. 2021). Es ist die ökologisch erweiterte Version des Simulations- und Prognosemodells INFORGE (Becker et al. 2022, Maier et al. 2015), das der INFORUM-Philosophie folgt (Almon 1991). Neben dem umfassenden ökonomischen Kern werden auch die Bereiche Energie und Emissionen detailliert behandelt. Alle Modellteile sind konsistent miteinander verknüpft. Im Folgenden werden die wichtigsten Gleichungen zur privaten Energienachfrage vorgestellt. Für Details zum vollständigen Modell siehe Lutz et al. (2021). Zu den Anwendungen gehören die Bewertung der Beschäftigungseffekte der Förderung erneuerbarer Energien (Lehr et al. 2012), der sozioökonomischen Auswirkungen der deutschen Energiewende (Lutz et al. 2018, Lutz et al. 2021) sowie verschiedener Energiewendepfade (Naegler et al. 2021a, Ulrich et al. 2022) und der wirtschaftlichen Effekte eines E-Mobilitätszenarios (Ulrich & Lehr 2019). Rebound-Effekte und politische Maßnahmen zu deren Bekämpfung wurden in Ahmann et al. (2022) und Kern et al. (2022) untersucht.

Das gesamte Modell wird simultan gelöst, d. h., die gegenseitigen Abhängigkeiten und Rückkopplungen der Modellvariablen werden simultan berücksichtigt. Das Modell enthält eine große Anzahl von makroökonomischen Variablen aus der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und Input-Output-Tabellen und liefert sektorale Informationen nach 63 Wirtschaftszweigen. Die Energiebilanzen sind vollständig in das Modell integriert.

Die Verhaltensparameter werden ökonometrisch anhand von Zeitreihendaten, überwiegend ab dem Jahr 2000, geschätzt. Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass Verhaltensmuster oder Reaktionen auf Preis- oder Mengenänderungen in der Vergangenheit auch in der Zukunft vorherrschen werden. Die Verwendung von ökonometrisch geschätzten Gleichungen bedeutet, dass die Akteure nur kurzfristige Erwartungen haben. Sie folgen in der Vergangenheit entwickelten Routinen. Dies bedeutet, dass sich die Märkte im Gegensatz zu Optimierungsmodellen nicht notwendigerweise in einem Optimum befinden und dass nicht-marktbezogene (energie-)politische Interventionen positive wirtschaftliche Auswirkungen haben können.

Zentral ist in PANTA RHEI die Bestimmung der Produktion Y . Multipliziert man die Leontief-Inverse $(I - A)^{-1} - A$ ist die Inputkoeffizientenmatrix und I ist die Identitätsmatrix – mit dem Endnachfragevektor fd so erhält man die Bruttoproduktion Y für jede der 72 Branchen i der betrachteten deutschen Input-Output-Tabelle.

$$Y_i = (I - A)^{-1} * fd_i \quad (1)$$

Komponenten der Endnachfrage wie der private Konsum, der Staatskonsum und verschiedene Arten von Investitionen werden auf Branchenebene modelliert (siehe Maier et al. (2015)). Sie hängen von Aktivitätsvariablen wie dem verfügbaren Einkommen, Produktions- oder Kapitalkoeffizienten und relativen Preisen ab. Die Endnachfrage ist die Summe aus privatem Konsum c , Staatskonsum g , Investitionen inv für Ausrüstungen, Bau und Software sowie Exporten ex abzüglich Importen im :

$$fd_i = c_i + g_i + inv_i + ex_i - im_i \quad (2)$$

Der private Konsum c_k wird zunächst nach 47 Verwendungszwecken geschätzt. Als erklärende Variablen werden das real verfügbare Einkommen $\frac{YH}{PC}$ und die relativen Preise $\frac{pc_k}{PC}$ in die Schätzung einbezogen, wobei PC für den Verbraucherpreisindex steht. Für einige Verwendungszwecke wird der Zeittrend t als Proxy für langfristige Veränderungen im Verbrauchsverhalten oder die Anzahl der privaten Haushalte HH als erklärende Variable verwendet. Die Heizgradtage HDD , die den Witterungseinfluss beim Heizen beschreiben, werden für die entsprechenden Verwendungszwecke im Energiebereich herangezogen.

$$c_k = f\left(\frac{YH}{PC}, \frac{pc_k}{PC}, HDD, HH, t\right) \quad (3)$$

Der Konsum wird also bottom-up modelliert, indem er zunächst einzeln für die Verwendungszwecke geschätzt und anschließend zum Gesamtverbrauch aufsummiert wird. Davon abweichend wird angenommen, dass die privaten Haushalte nicht weniger oder mehr sparen, wenn sich ihre Energieausgaben ändern, sondern dass sie dann ihre Ausgaben für andere Verwendungszwecke anpassen. Schließlich wird der Konsum nach Verwendungszwecken mithilfe einer Matrix in Konsum nach Wirtschaftszweigen (c_i) überführt.

Die Anschaffungspreise p_i hängen von den Stückkosten uc_i und Aufschlägen ab. Das Ausmaß, in dem Preisaufschläge möglich sind, hängt von der Marktform in bestimmten Industriezweigen ab. Industrien auf internationalen Märkten müssen auch Importpreise pim_i berücksichtigen, da ihr Handel auch dem ausländischen Wettbewerb ausgesetzt ist.

$$p_i = f(uc_i, pim_i) \quad (4)$$

Die Modellierung des Arbeitsmarktes wird in Maier et al. (2015) ausführlich dargestellt. Die Arbeitsnachfragefunktionen basieren auf den Arbeitsstunden der Beschäftigten (Arbeitsvolumen). Dieser Ansatz baut auf zwei wichtigen Beobachtungen auf: Erstens berücksichtigt ein volumenbasierter Ansatz der Arbeitsnachfrage die wachsende Bedeutung von Teilzeitbeschäftigten, zweitens können arbeitsmarktpolitische Instrumente wie z. B. Kurzarbeit explizit berücksichtigt werden. Die Arbeitszeiten h_i werden durch die branchenspezifische Produktion y_i bestimmt. In einigen Branchen spielen auch die Reallöhne $\frac{w_i}{p_i}$ eine Rolle.

$$h_i = f\left(y_i, \frac{w_i}{p_i}\right) \quad (5)$$

Die Durchschnittslöhne W für die Gesamtwirtschaft werden mit Hilfe eines Phillipskurven-Ansatzes bestimmt. Die Löhne hängen von der Arbeitsproduktivität $\frac{BIP}{Emp}$, BIP/Beschäftigte, dem Verbraucherpreisindex PC und dem Verhältnis der Erwerbstätigen zu den Erwerbspersonen LF ab.

$$W = f\left(\frac{GDP}{Emp} * PC, \frac{Emp}{LF}\right) \quad (6)$$

Die Durchschnittslöhne nach Wirtschaftszweigen w_i hängen demnach zum einen von den Durchschnittslöhnen W und zum anderen von der branchenspezifischen Arbeitsproduktivität $\frac{y_i}{h_i}$ ab.

Die Zahl der Beschäftigten pro Wirtschaftszweig Emp_i ergibt sich, indem die Zahl der Arbeitsstunden h_i durch die exogen vorgegebene Arbeitszeit pro Jahr und Kopf hy_i dividiert wird.

$$Emp_i = \frac{h_i}{hy_i} \quad (7)$$

In Abschnitt 2.3 wird beschrieben, welche Teile des Modellsystems wie durch die Szenariovorgaben variiert werden. Es handelt sich dabei insbesondere um Inputvektoren des Fahrzeugbaus, die Teil der Inputkoeffizientenmatrix A sind, Investitionen in Fahrzeuge und Energieanlagen (inv) sowie Fahrzeug- und Anlagenexporte (ex).

2.2 SZENARIEN MIT INPUTDATEN

Die Energiewende im Verkehr wird über verschiedene Szenarien abgebildet, die im BEni-Ver-Projekt entwickelt wurden. In Aigner et al. (im Erscheinen) werden sie insbesondere aus technologischer Perspektive beschrieben. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Zielszenarien, die jeweils eine Option für eine mögliche zukünftige Entwicklung hin zu einem dekarbonisierten Verkehrssektor darstellen. Dabei handelt es sich nicht um Extrem-Szenarien, d. h., dass nicht nur eine Antriebsform in der Mobilität verwendet wird, sondern mehrere Technologien nebeneinander bestehen und Einsatz finden. So werden auch im direktelektrischen Szenario Wasserstoff und SynFuels als Kraftstoffe genutzt. Das HYD- und SYN-Szenario legen deutlichere Akzente auf Wasserstoff und SynFuels, jedoch setzt sich ebenfalls Elektromobilität am stärksten durch.

Die in Tabelle 1 skizzierten Szenarien, in denen Klimaneutralität bis 2045 erreicht wird, werden mit einer Referenzentwicklung (REF-Szenario) verglichen, in der eine Senkung der Treibhausgas-Emissionen um 80 % bis 2050 gegenüber 1990 erreicht wird. Ziel ist es, verschiedene Technologieoptionen zur Dekarbonisierung des Verkehrs gegenüberzustellen und deren Effekt anhand der Abweichung zur Referenzentwicklung zu analysieren. Die Rahmenannahmen hierzu werden in Aigner et al. (im Erscheinen) beschrieben.

Tabelle 1: Überblick über die Zielszenarien

Direktelektrisch (DEL) 	Wasserstoff (H2) 	Synthetische Kraftstoffe (PtX) 
Weitgehende Elektrifizierung des Verkehrs Einsatz von strombasierten Kraftstoffen nur im Langstreckenschwerlastverkehr, z. T. in der Schifffahrt und im Luftverkehr	Weitgehender Einsatz von batterieelektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen Nutzung von Wasserstoff im Straßenverkehr vor allem bei weiten Strecken sowie in der Luftfahrt auf Kurz- und Mittelstrecken	Im Vergleich zum DEL- und H2-Szenario stärkerer Einsatz von Verbrennungsmotoren, die mit SynFuels angetrieben werden Verstärkte Nutzung von SynFuels im Flug- und Schiffsverkehr

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Aigner et al. (im Erscheinen)

Um die beschriebenen Szenarien im Modell PANTA RHEI abzubilden, bedarf es exogener Vorgaben, die die möglichen Zukunftsentwicklungen charakterisieren. Sie betreffen neben den Rahmendaten, die für alle Szenarien gleich sind, vor allem die Nachfrage nach Fahrzeugen in Deutschland sowie nach in Deutschland hergestellten Fahrzeugen im Ausland sowie die jeweilige Produktionstechnologie in Form der Inputvektoren. Außerdem umfassen sie die Bereitstellung von erneuerbaren Energien und unterschiedlichen Kraftstoffen im Energiesystem, ebenfalls mit ihrer Kostenstruktur, sowie die Energieverbräuche im Straßenverkehr (Tabelle 2).

Dafür werden zum einen die Investitionen sowohl in Fahrzeuge als auch in das Energiesystem aus den Modellen des DLR herausgezogen und als Input für PANTA RHEI aufbereitet. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Investitionssummen über den gesamten Projektionszeitraum hinweg zwischen den Szenarien nur wenig unterscheiden, da die Investitionen, die im REF-Szenario erst im Zeitraum 2040 bis 2050 anfallen, in den anderen Szenarien vorgezogen werden, um die kurzfristigen Klimaziele zu erreichen. Über die inländischen Investitionen hinaus wirkt sich die Transformation im Automobilsektor auf den Außenhandel Deutschlands aus, der für die Szenarien anhand der Exporte der Fahrzeuge sowie der Ex- und Importe der für deren Antriebsenergie (grüner Strom, Wasserstoff, SynFuels) notwendigen Technologieanlagen abgebildet wird. Die Entwicklung der Außenhandelsszenarien wird ausführlich in Aigner et al. (im Erscheinen) und Eschmann et al. (2022) beschrieben.

Zur Verteilung der Investitions- und Außenhandelsimpulse auf die vorgelagerten Wirtschaftsbereiche ist eine Anpassung der Inputstrukturen an die technologische Veränderungen im Verkehrsbereich notwendig. Zur Abbildung in PANTA RHEI werden Inputvektoren bereitgestellt, die nach den 72 Gütergruppen der Input-Output-Tabelle gegliedert sind und damit eine Verteilung auf die notwendigen Vorleistungen ermöglichen. Diese werden sowohl für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen als auch für die Technologien zur Herstellung von E-Fuels implementiert. Für die EE-Anlagen wird auf die entsprechenden Arbeiten von O'Sullivan & Edler (2020) zurückgegriffen, die Inputvektoren für erneuerbare Energieträger für Deutschland ermittelt haben.

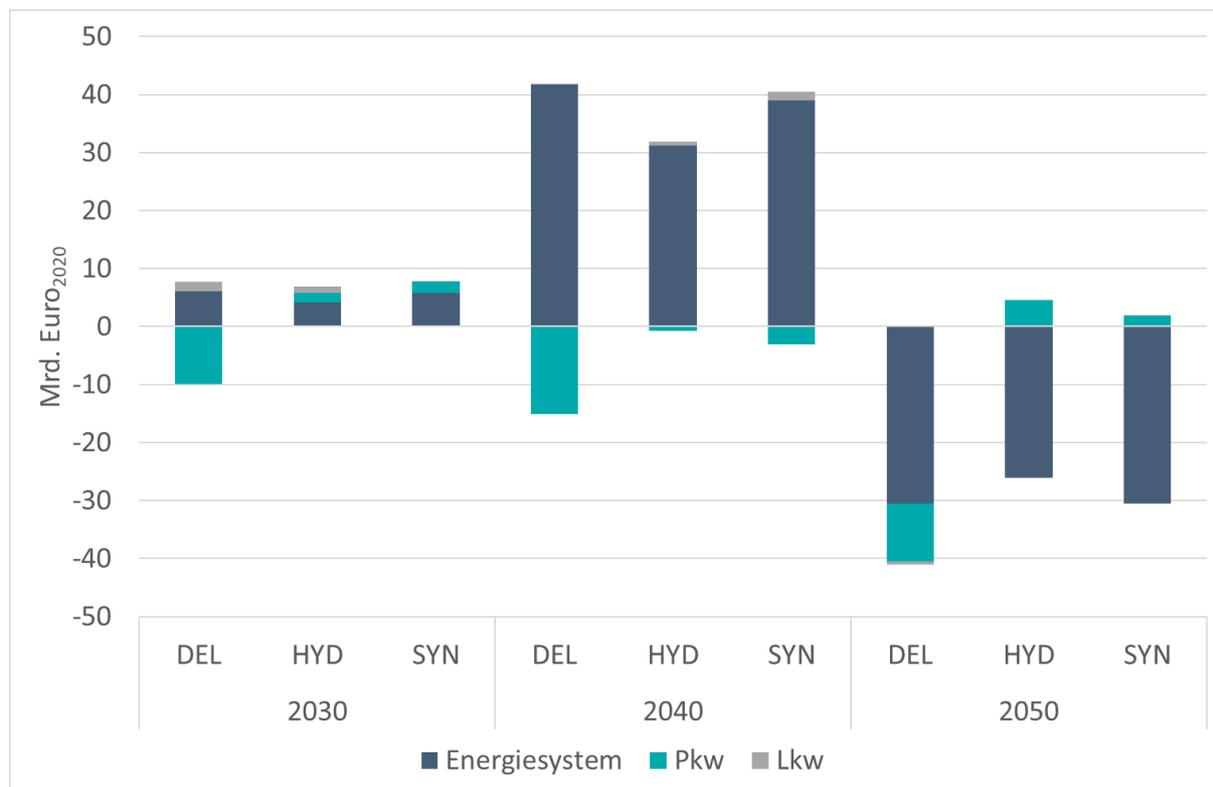
Tabelle 2: Übersicht über die Inputdaten

Daten	Struktur
Pkw-Investitionen	nach 5 Fahrzeugtypen
Pkw-Inputvektoren	nach 72 Gütergruppen und 5 Fahrzeugtypen
Lkw-Investitionen	nach 4 Fahrzeugtypen
Lkw-Inputvektoren	nach 72 Gütergruppen und 4 Fahrzeugtypen
Energiesystem-Investitionen	nach 28 Technologien
Energiesystem-Inputvektoren	nach 72 Gütergruppen und 28 Technologien
Betriebskosten Energieanlagen	nach 24 Technologien
Ex- und Importe Energieanlagen	nach 5 Technologien, jeweils für zwei Außenhandelswelten
Exporte Pkw	nach 5 Fahrzeugtypen
Exporte Lkw	nach 4 Fahrzeugtypen
Energieverbräuche Straßenpersonenverkehr	nach 8 Energieträgern
Energieverbräuche Straßengüterverkehr	nach 8 Energieträgern
Importpreis Wasserstoff	
Wirkungsgrade PtX	

Quelle: Eigene Tabelle.

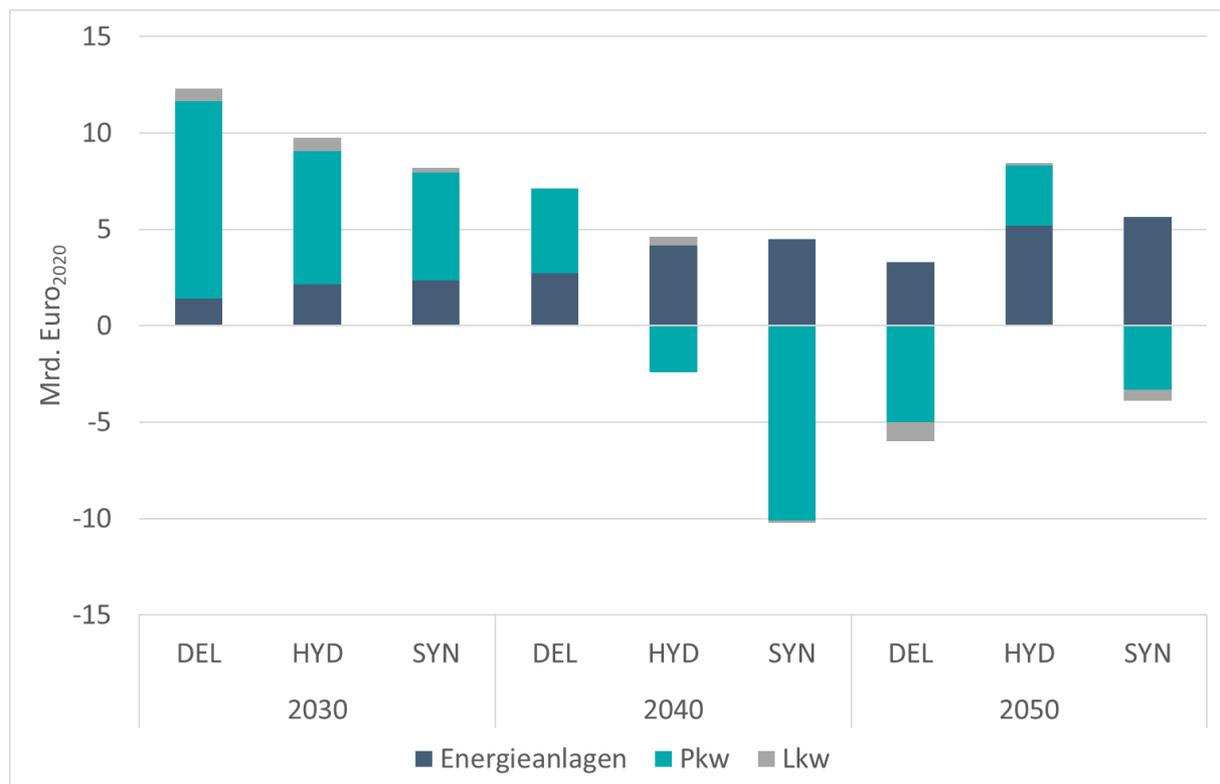
In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind die Differenzinvestitionen und -exporte dargestellt, die sich in den Zielszenarien gegenüber der Referenzentwicklung ergeben. Es handelt sich dabei jeweils um die Summe für die Kategorien Energiesystem, Pkw und Lkw. Innerhalb dieser Kategorien haben die Differenzen nicht immer das gleiche Vorzeichen, das bedeutet, dass in einem Zielszenario gegenüber dem Referenzszenario z. B. mehr in Brennstoffzellenautos und gleichzeitig weniger in Elektroautos investiert wird. Diese Unterschiede sind in den Abbildungen nicht zu erkennen, werden aber einzeln in der Modellierung berücksichtigt. Bei den Investitionen sind die Abweichungen im Jahr 2030 noch relativ gering. Für das DEL-Szenario zeigt sich ein negativer Investitionsimpuls gegenüber dem Referenzszenario, da bei der Szenarioentwicklung die Annahme getroffen wurde, dass die Batterien für E-Pkw im DEL-Szenario zu geringeren Kosten produziert werden können (siehe Aigner et al. (im Erscheinen)). Im Jahr 2040 wird in den Zielszenarien insbesondere in das Energiesystem deutlich mehr investiert als in der Referenzentwicklung. 2050 kehrt sich dieser Effekt um, d. h., dass Investitionen, die in den Zielszenarien bereits in früheren Jahren getätigt wurden, in der Referenz später nachgeholt werden.

Abbildung 1: Differenzinvestitionen gegenüber dem Referenzszenario



Quelle: Eigene Berechnung und Abbildung auf Basis von Aigner et al. (im Erscheinen).

Bei den Exporten (Abbildung 2) zeigt sich im Jahr 2030 zunächst ein deutlich positiver Impuls, der insbesondere durch höhere Pkw-Exporte in den Zielszenarien gegenüber der Referenzentwicklung hervorgerufen wird. In den Jahren 2040 und 2050 sind die Differenzexporte in ihrer Höhe und Richtung weniger eindeutig. Hier vermischen sich unterschiedliche Impulse innerhalb der Kategorien (siehe Aigner et al. (im Erscheinen)).

Abbildung 2: Differenzexporte gegenüber dem Referenzszenario

Quelle: Eigene Berechnung und Abbildung auf Basis von Aigner et al. (im Erscheinen).

Neben den Investitionen, dem Außenhandel und den Inputstrukturen werden weitere exogene Daten in PANTA RHEI eingestellt, die die Energiesysteme in den Szenarien charakterisieren: Die Energieverbräuche im Straßenverkehr nach Energieträgern sowie die Wirkungsgrade für die Power-to-X-Umwandlungsprozesse kennzeichnen die Szenarien in physikalischer Hinsicht. Darüber hinaus wird ein Importpreis für Wasserstoff vorgegeben, da hierfür keine historischen Daten vorliegen, sodass eine Schätzung und somit modellendogene Fortschreibung in PANTA RHEI nicht möglich ist.

2.3 MODELLIERUNG DER VERKEHRSSZENARIEN

Die in Abschnitt 2.2 dargestellten Inputdaten werden exogen in PANTA RHEI eingestellt und über die Modellierung in die bestehenden wirtschaftlichen Zusammenhänge eingeflochten. Die Szenarien sehen unterschiedliche Entwicklungen für die Investitionen in Fahrzeuge vor. Demnach ändern sich sowohl die Konsumausgaben der privaten Haushalte als auch die Investitionstätigkeit der Unternehmen für die Gütergruppe „Kraftwagen und Kraftwagenteile“, d. h., dass c_i und inv_i aus Gleichung (2) für den Fahrzeugbau mit den exogenen Vorgaben überschrieben werden. Der Konsum privater Haushalte wird anhand der Pkw-Investitionen, die Unternehmensinvestitionen anhand der Pkw- und Lkw-Investitionen fortgeschrieben. Hierbei wird angenommen, dass 40 % der Pkw-Investitionen von Unternehmen getätigt werden.

Der Inputvektor (IV) für den Fahrzeugbau nach Gütergruppen (j) wird aus den einzelnen Inputvektoren der Fahrzeugtypen zusammengesetzt. Dabei bestimmt die Verteilung der

Pkw- und Lkw-Investitionen (inv_pkw bzw. inv_lkw) auf die Fahrzeugtypen (j) die Gewichtung der Inputvektoren untereinander, d. h., fließen in einem Szenario mehr Investitionen in Brennstoffzellenautos, dann ändert sich die Inputstruktur für den Fahrzeugbau stärker in Richtung des Inputvektors von Brennstoffzellenautos:

$$IV_{i,Fahrzeugbau} = \sum_{j=1}^5 \frac{IV_Pkw_{i,j} * inv_pkw_j + IV_Lkw_{i,j} * inv_lkw_j}{inv_pkw_j + inv_lkw_j} \quad (8)$$

Diese strukturelle Änderung geht anschließend in die Inputkoeffizientenmatrix A ein (siehe Gleichung (1)), indem die Spalte für den Fahrzeugbau mit dem Inputvektor überschrieben wird. Dadurch lösen die exogen eingestellten Impulse durch z. B. die Investitionen nicht nur Effekte in der Fahrzeugindustrie selbst aus, sondern sie wirken sich durch die geänderte Produktionsweise auch auf die vorleistenden Wirtschaftszweige aus.

Bei der Modellierung für das Energiesystem können nicht gesamte Gütergruppen anhand der entsprechenden Investitionen fortgeschrieben werden, da die Investitionen in einzelne Energieanlagen nur einen Teil der übergeordneten Gütergruppe darstellen. Daher werden hier zunächst die Differenzen zum Referenzszenario berechnet, die als zusätzliche Investitionen der DEL-, HYD- und SYN-Szenarien eingestellt werden. Anhand des Inputvektors für die jeweilige Energieanlage werden die Investitionen auf die Vorleistungsgüter verteilt und anschließend summiert über die Energieanlagen den Gütergruppen hinzuaddiert.

Auf ähnliche Weise werden die Außenhandelsszenarien in PANTA RHEI implementiert. Die Differenzexporte bzw. -importe werden anhand der Inputvektoren auf die Vorleistungsgüter verteilt. Da die Außenhandelsströme jedoch nicht nach Gütergruppen, sondern nach Wirtschaftszweigen gegliedert sind, werden die auf die 72 Gütergruppen umgelegten Beträge anhand einer Überführungsmatrix den 63 Wirtschaftszweigen zugeteilt und anschließend als zusätzliche Ex- bzw. Importe dem Außenhandel hinzugerechnet.

3 ERGEBNISSE

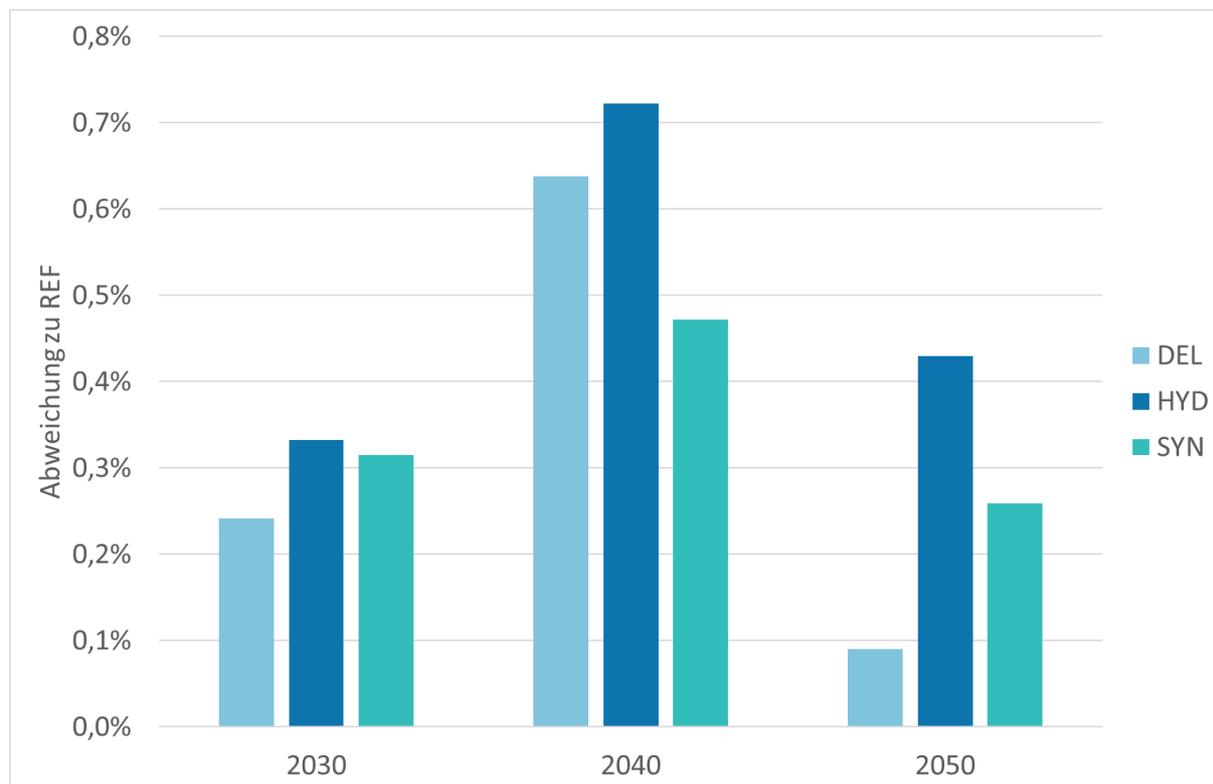
Anhand eines Vergleichs der Zielszenarien mit der Referenzentwicklung lassen sich die Effekte der eingestellten Annahmen zu den verschiedenen möglichen Zukunftsentwicklungen ermitteln. In Kapitel 3.1 werden sie aus makroökonomischer Perspektive beleuchtet, in Kapitel 3.2 werden sektorale Effekte vor allem für den Fahrzeugbau und die Energiewirtschaft näher betrachtet, in denen sich die Energiewende im Verkehr vor allem abspielt.

3.1 MAKROÖKONOMISCHE EFFEKTE

Auf makroökonomischer Ebene zeigen sich die Wirkungen der Szenarien anhand der BIP-Komponenten. Diese bilden die Wirtschaft als Ganzes ab, aus ihnen lassen sich jedoch keine Rückschlüsse für die Effekte in einzelnen Wirtschaftsbereichen ziehen.

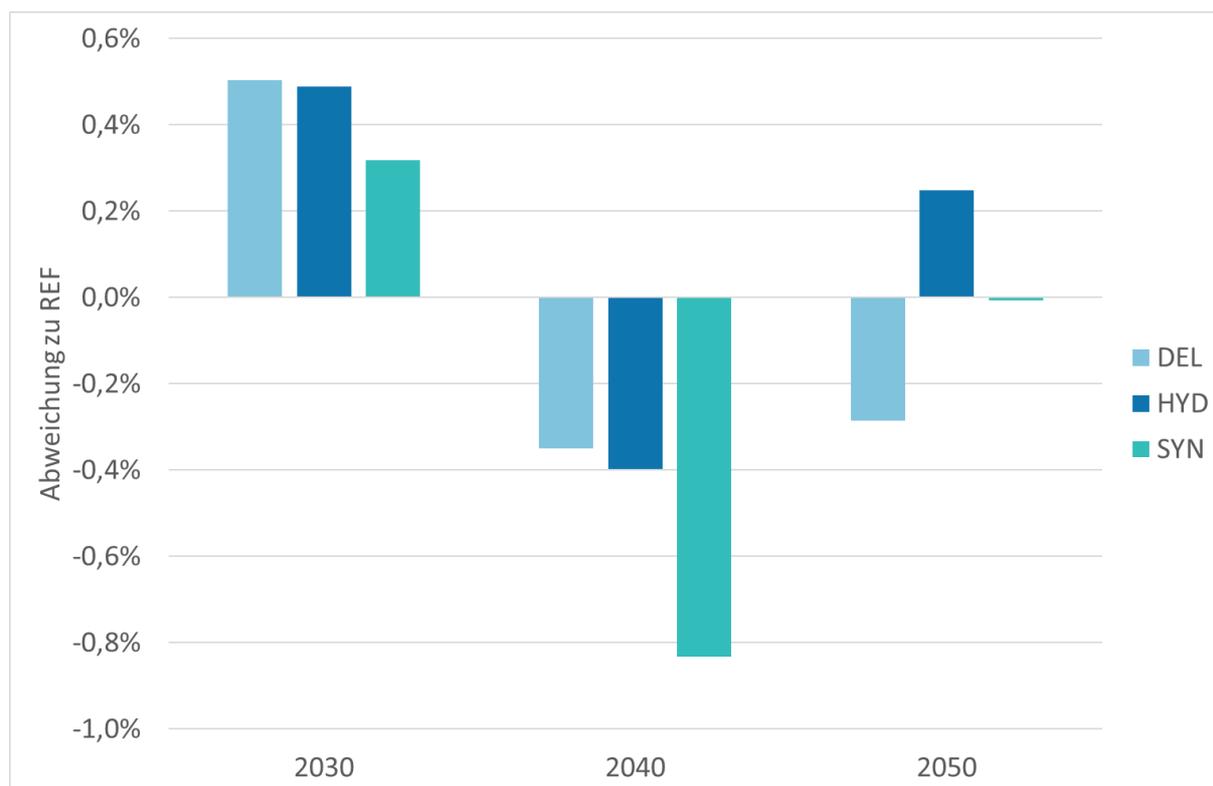
Auf die Investitionen wirken insbesondere die eingestellten Inputdaten zu Investitionen in Energiesystemtechnologien, in Lkw und in von Unternehmen gekaufte Pkw (siehe Abbildung 1) sowie Betriebskosten für Energieanlagen ein. Im Jahr 2040 ergibt sich ein starker positiver Investitionsimpuls, der vor allem auf die Investitionen in das Energiesystem zurückgeht. Für die zusätzliche Erzeugung von Strom, H₂ oder synthetischen Treibstoffen muss jeweils in Stromerzeugungsanlagen und ggfs. weitere Umwandlungsanlagen wie Elektrolyseure für H₂ investiert werden. Der Impuls ist im Szenario DEL am größten, im Szenario HYD am niedrigsten. Etwa spiegelbildlich dazu verhalten sich die Effekte in den drei Szenarien im Jahr 2050. Dann kehrt sich der Effekt um, da gesamtwirtschaftlich betrachtet mehr im REF-Szenario investiert wird. Dies führt zu negativen Abweichungen von der Referenzentwicklung in allen drei Zielszenarien.

Abbildung 3: Relative Abweichungen des privaten Konsums (preisbereinigt) von der Referenzentwicklung



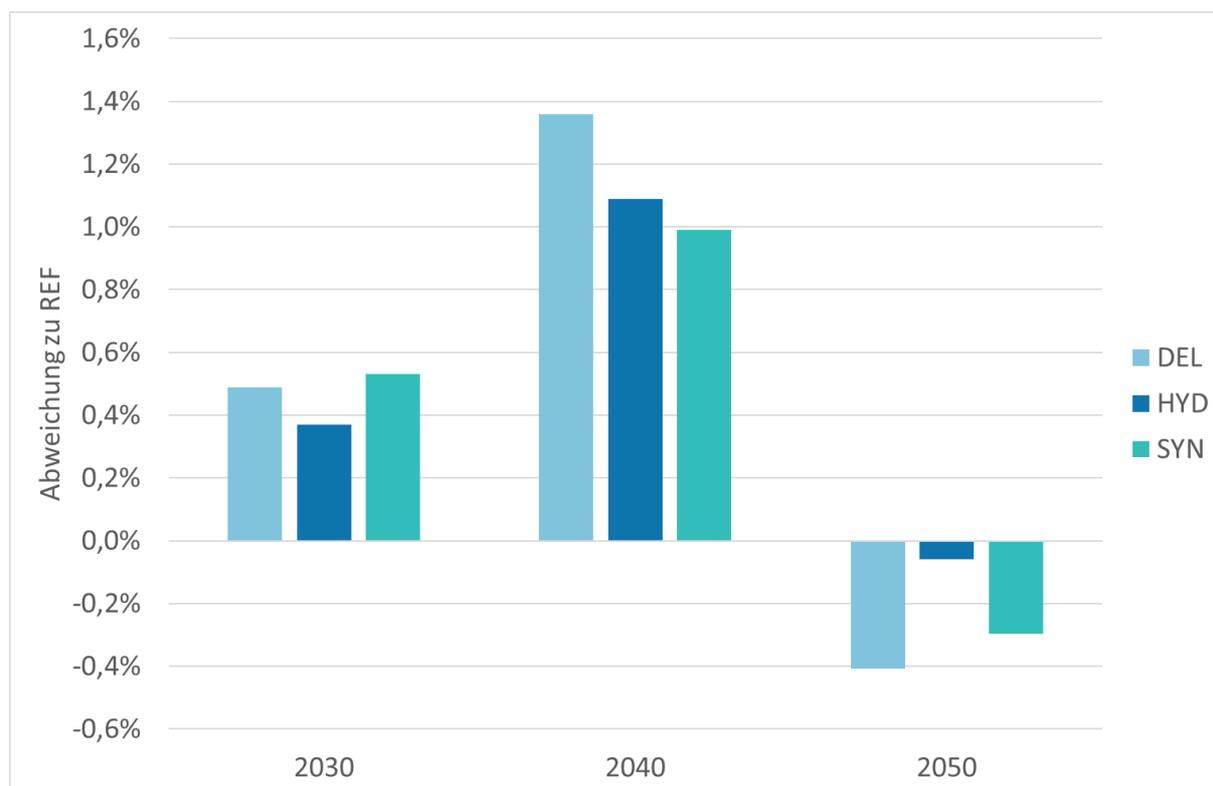
Quelle: Eigene Berechnung.

Der private Konsum liegt in allen Zielszenarien leicht höher als im REF-Szenario (Abbildung 3), was sich von einem höheren verfügbaren Einkommen herleitet. Grund dafür sind die unten beschriebenen positiven Effekte auf Beschäftigung und Reallohn. Dabei ergeben sich stärkere Effekte nach einzelnen Verwendungszwecken: Insbesondere für Strom liegen die privaten Ausgaben überdurchschnittlich höher, auf der anderen Seite senken die Haushalte ihren Konsum fossiler Kraftstoffe gegenüber dem Referenzszenario in einem ähnlichen Ausmaß. Im DEL-Szenario liegen die Ausgaben für Pkw unter denjenigen im REF-Szenario; insbesondere das DEL-Szenario geht aufgrund günstigerer Batteriekosten von deutlich niedrigeren Ausgaben für Fahrzeuge aus. Bei annahmegemäß gleich hoher Sparquote steigen dafür die Ausgaben für andere Konsumverwendungszwecke.

Abbildung 4: Relative Abweichungen der Exporte (preisbereinigt) von der Referenz

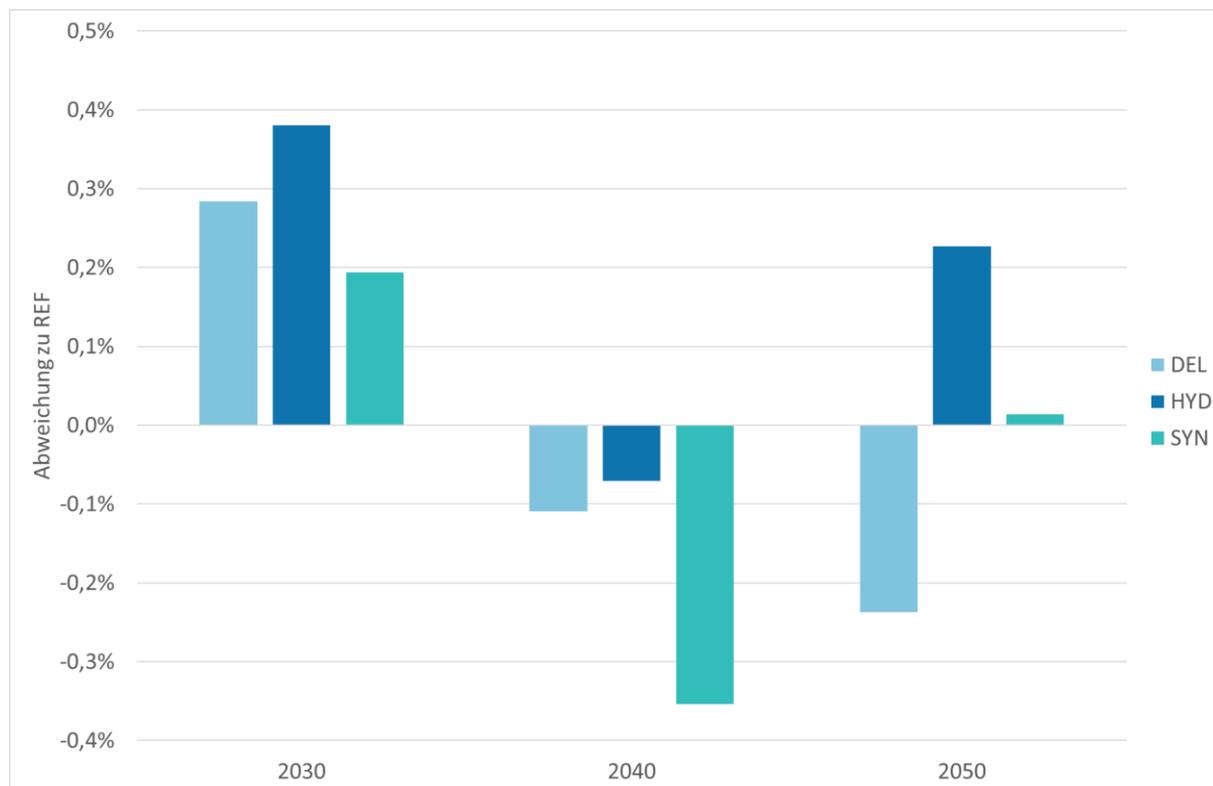
Quelle: Eigene Berechnung.

Der Effekt auf die Exporte (Abbildung 4) wird auf makroökonomischer Ebene von den Pkw-Exporten dominiert, außerdem beeinflussen Lieferungen von Lkw und Energieanlagen die Größe. Da die Unterschiede in den Inputdaten zwischen den Szenarien im Verhältnis zum Gesamtexportvolumen Deutschlands gering sind, ergeben sich eher geringe Effekte, die zunächst im Jahr 2030 positiv ausfallen. Danach liegen insbesondere die Exporte von Fahrzeugen gegenüber dem REF-Szenario niedriger, außerdem liegen die Exportpreise in den Zielszenarien überwiegend höher, sodass für das Jahr 2040 negative Abweichungen resultieren und die Wirkungen im Jahr 2050 in allen Szenarien eher gering sind. Die Exporte in den Szenarien DEL und HYD liegen in den Jahren 2030 und 2040 sehr ähnlich, während die Exporte im SYN-Szenario niedriger sind. Im Jahr 2050 zeigen sich leicht positive Abweichungen für HYD und leicht negative Abweichungen für DEL.

Abbildung 5: Relative Abweichungen der Importe (preisbereinigt) von der Referenz

Quelle: Eigene Berechnung.

Für die Importe (Abbildung 5) liegen in den Inputdaten Angaben zu den Energieanlagen vor. Importe von Fahrzeugen werden nicht exogen eingestellt, sondern ergeben sich modellendogen. Sie hängen vor allem von der inländischen Nachfrage ab. Daneben haben die Importe von Wasserstoff und SynFuels einen Effekt, die in den Zielszenarien in der Regel höher liegen. Zugleich führt die beschleunigte Einführung alternativer Antriebe in allen drei Szenarien zu niedrigeren Importen fossiler Energieträger. Darüber hinaus hängen die Importe von weiteren Einflussgrößen ab wie der Investitionstätigkeit (siehe Abbildung 1) und der damit verbundenen inländischen Produktion. Ähnlich zu den Investitionen zeigen sich bis 2040 positive Effekte auf die Importe, danach liegen die Importe in den Zielszenarien niedriger als im REF-Szenario.

Abbildung 6: Relative Abweichungen des BIP (preisbereinigt) von der Referenzentwicklung

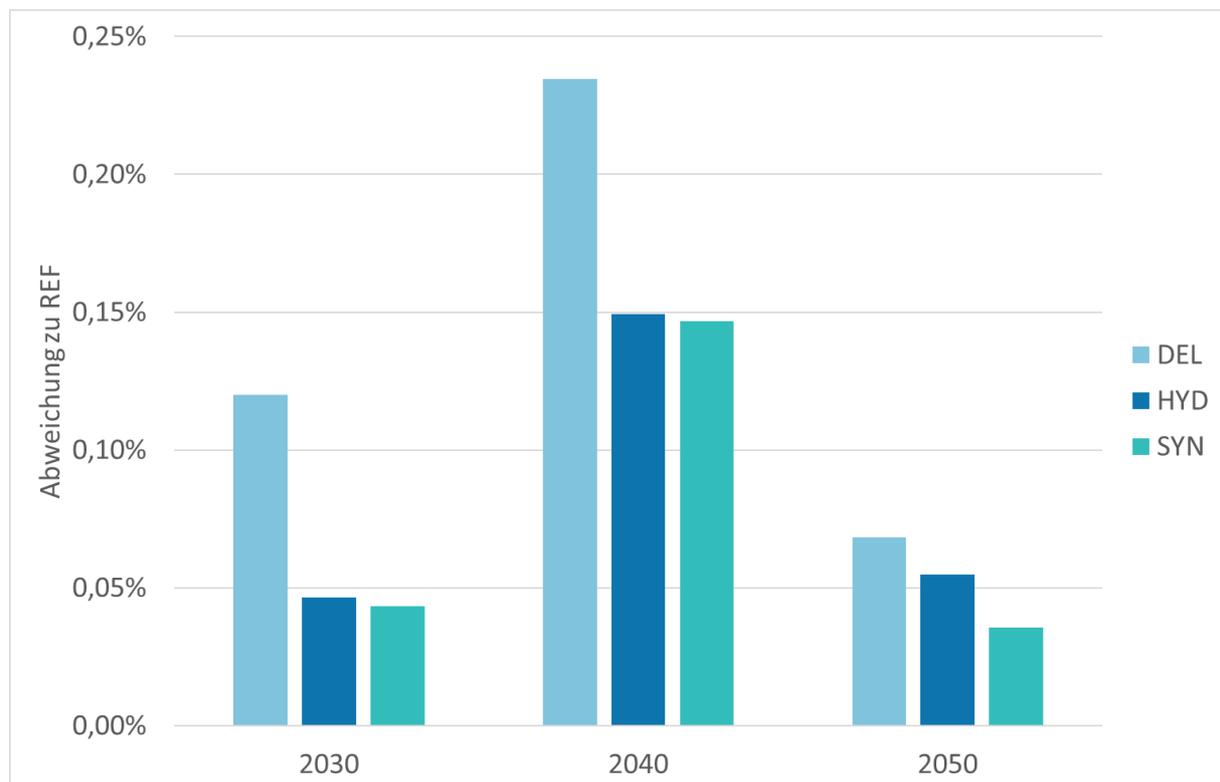
Quelle: Eigene Berechnung.

Die einzelnen BIP-Effekte zusammengenommen ergeben für das Jahr 2030 eine in allen Zielszenarien positive Wirkung auf das BIP (Abbildung 6), was sich auf die Investitionen, Exporte und den privaten Konsum zurückführen lässt. Im Jahr 2040 kehrt sich der BIP-Effekt ins Negative um. Zwar wirken sich höhere Konsumausgaben privater Haushalte sowie ein deutlicher Investitionsschub insbesondere infolge der Investitionen in das Energiesystem in allen Zielszenarien positiv auf das BIP aus. Dementgegen schmälern jedoch die im Vergleich zum REF-Szenario niedrigeren Exporte und höheren Importe den Effekt: Die Exporte werden von der Ausfuhr sowohl von Fahrzeugen als auch von Energieanlagen beeinflusst, wobei die Pkw-Exporte dominieren. Im DEL-Szenario werden 2040 zwar mehr Pkw exportiert als im REF-Szenario, allerdings liegen die Exportpreise in diesem Wirtschaftszweig höher, sodass die Exporte in realen Preisen niedriger sind. Die Importe in den Zielszenarien werden im Jahr 2040 zum einen von einem höheren Bedarf an Wasserstoff und SynFuels aus dem Ausland und zum anderen von höheren Energieanlagen-Importen getrieben. Darüber hinaus hängen sie auch von der inländischen Produktion ab, die induziert durch importintensive Investitionen in Energieanlagen und Fahrzeuge höher liegt und damit mehr Importe nach sich zieht als im REF-Szenario. Bei diesen gegenläufigen Effekten von Konsum und Investitionen auf der einen und Ex- und Importen auf der anderen Seite überwiegen im Jahr 2040 die negativen Effekte, die im SYN-Szenario aufgrund eines leicht schwächeren Konsums und einer leicht schlechteren Außenhandelsbilanz am stärksten ausfallen.

Im Jahr 2050 ist der BIP-Effekt im HYD-Szenario positiv, während er im DEL-Szenario negativ bleibt. Hierfür sind vor allem deutlich niedrigere Exporte und ein nur noch leicht

positiver Impuls auf den privaten Konsum ausschlaggebend. Importe und Investitionen liegen hingegen in allen Zielszenarien niedriger als im REF-Szenario, da die Inputdaten für die Energieanlagen eine ab 2041 höhere Investitionstätigkeit bzw. Importaktivität im REF-Szenario vorsehen. Im SYN-Szenario gleichen sich positive und negative Effekte auf das BIP 2050 im SYN-Szenario weitgehend aus, sodass sich im Ergebnis nur eine marginale Abweichung zum REF-Szenario zeigt. Über den gesamten Zeitraum fallen die BIP-Effekte im HYD-Szenario am besten aus. Zwischen dem DEL- und dem SYN-Szenario lässt sich eher eine zeitliche Variation der insgesamt geringen Effekte beobachten.

Abbildung 7: Relative Abweichung der Beschäftigung in den Szenarien DEL, HYD und SYN von der Referenzentwicklung



Quelle: Eigene Berechnung.

Die Beschäftigung liegt in allen Zielszenarien gesamtwirtschaftlich betrachtet leicht höher als im REF-Szenario (Abbildung 7). Sie wird auf Sektorebene durch die Produktion sowie den Reallohn bestimmt (Gleichungen (5) und (7)). Durch die leichte Verschiebung in den BIP-Komponenten vom Export zu Investitionen und Konsum steigt die gesamtwirtschaftliche Produktion in allen Szenarien leicht an, besonders deutlich im DEL-Szenario. Die Produktion in der Energiewirtschaft steigt in allen Szenarien sogar stark gegenüber der Referenz an (von +2,2 % im HYD-Szenario bis +4,2 % im DEL-Szenario). Zugleich steigen die Produktionspreise im DEL-Szenario am deutlichsten, was zu nur geringen Reallohnsteigerungen in diesem Szenario führt.

Tabelle 3: Relative Abweichungen verschiedener Arbeitsmarktgrößen in den Szenarien DEL, HYD und SYN von der Referenzentwicklung

	2030		
	DEL	HYD	SYN
Beschäftigung	0,12 %	0,05 %	0,04 %
Durchschnittslohn je Beschäftigtenstunde	0,28 %	0,39 %	0,30 %
Produktionswert (real)	0,36 %	0,33 %	0,20 %
Produktionspreis	0,22 %	0,05 %	0,08 %

Quelle: Eigene Berechnung.

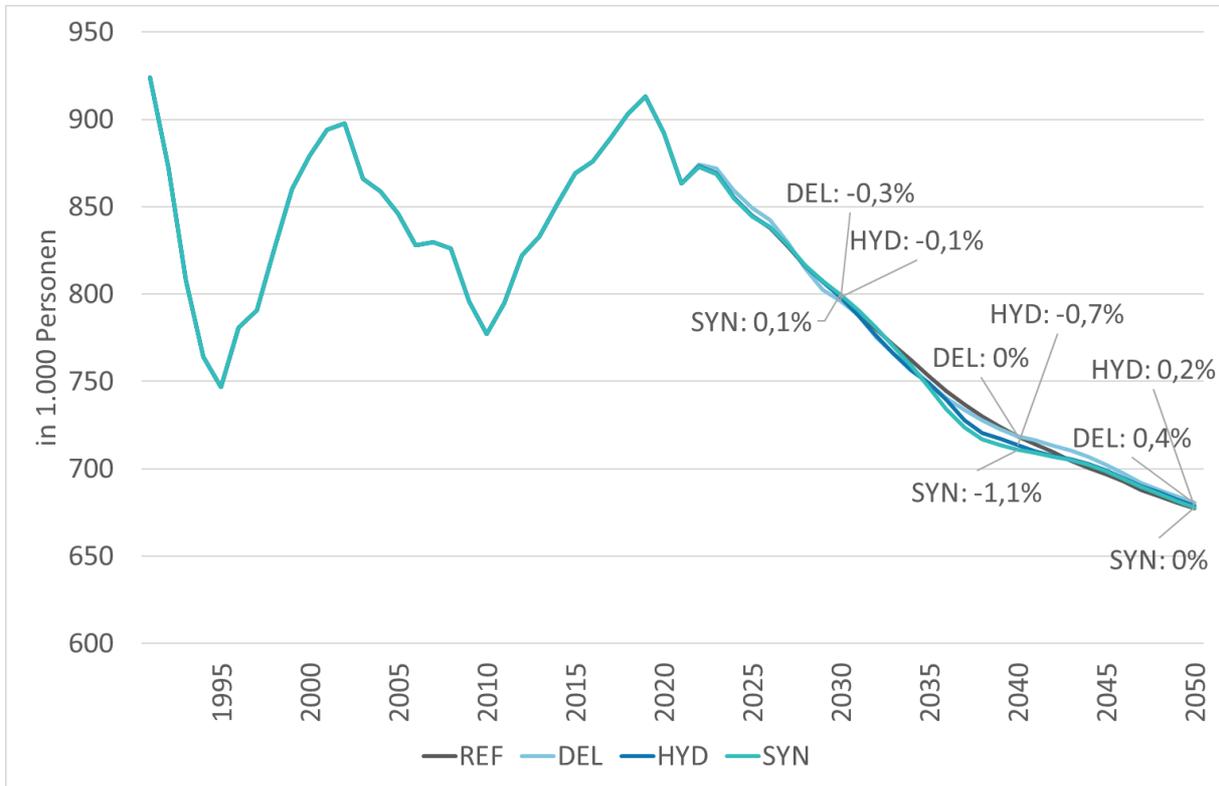
Tabelle 3 weist für das Jahr 2030 Effekte auf die Größen des Arbeitsmarktes aus, die den Beschäftigungseffekt erklären: Die Löhne liegen wegen der etwas höheren Produktion und einer leicht gesteigerten Arbeitsproduktivität in den Zielszenarien etwas höher (vgl. Gleichung (6)). Die höheren Löhne wiederum heben neben höheren Abschreibungen und Nettoproduktionsabgaben die Stückkosten an, sodass auch die davon abhängigen Produktionspreise etwas steigen. Da der Effekt auf die Produktionspreise jedoch schwach ist und die Produktion in laufenden Preisen durch höheren privaten Konsum und höhere Exporte eine stärkere positive Wirkung erfährt, liegen auch die realen Produktionswerte in den Zielszenarien höher. Letztlich wirken sich die höhere Produktion steigernd und die höheren Löhne senkend auf die Beschäftigung aus. Da die Produktion im überwiegenden Teil der Wirtschaftszweige jedoch stärker ins Gewicht fällt, fällt die Beschäftigung in den Zielszenarien im Jahr 2030 leicht höher aus.

3.2 SEKTORALE EFFEKTE

Trotz der durchweg positiven Effekte auf die Beschäftigung auf gesamtwirtschaftlicher Ebene ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Nachfrageimpulse teilweise auch leicht negative Effekte auf die Beschäftigung in einzelnen Wirtschaftszweigen. In der Automobilindustrie führen zudem veränderte Produktionsstrukturen, die durch die szenariospezifischen Inputvektoren im Modell abgebildet wurden, zu Abweichungen vom REF-Szenario, die in Relation zur Gesamtentwicklung der Beschäftigtenzahl in diesem Wirtschaftszweig jedoch geringe Unterschiede ausmachen (siehe Abbildung 8). Vielmehr sind neben den Annahmen zu den Exporten und der Entwicklung der Fahrzeugbestände im Inland der allgemeine Strukturwandel und Steigerungen der Arbeitsproduktivität entscheidend für die zukünftige Beschäftigtenzahl in dieser Industrie. Bei den geringen Abweichungen der Beschäftigtenzahl in den Zielszenarien vom Referenzpfad ist zu bedenken, dass bereits im REF-Szenario eine weitgehende Elektrifizierung der Fahrzeugneuzulassungen stattfinden wird. Ab dem Jahr 2040 ist die Beschäftigung des Fahrzeugbaus im DEL-Szenario am höchsten, was sich zum einen auf eine höhere Produktion zurückführen lässt. Zum anderen liegt diesem Wirtschaftszweig im DEL-Szenario eine Produktionsstruktur zugrunde, bei der gegenüber den anderen Szenarien leicht höhere Vorleistungen aus dem Fahrzeugbau selbst benötigt werden, während die Batteriekosten etwas niedriger sind. Auch die Beschäftigungseffekte in der Energiewirtschaft sind mit 0,2 bis 0,5 % Abweichung gegenüber dem

Referenzszenario relativ gering. Bei den sektoralen Effekten zeigen sich also keine erheblichen Ausschläge.

Abbildung 8: Entwicklung der Beschäftigung im WZ „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ und Abweichungen in den Zielszenarien DEL, HYD und SYN von der REF-Entwicklung für die Jahre 2030, 2040 und 2050



Quelle: Eigene Berechnung.

4 DISKUSSION UND AUSBLICK

Die Energiewende im Verkehr führt nur zu geringen gesamtwirtschaftlichen Effekten. Für das Bruttoinlandsprodukt zeigen sich leicht positive Effekte im Jahr 2030 und leicht negative Effekte im Jahr 2040. Das Szenario HYD schneidet leicht besser ab als die beiden anderen Szenarien. Die Beschäftigungseffekte des beschleunigten Wandels hin zu alternativen Antrieben oder Kraftstoffen sind durchgehend leicht positiv. Auf sektoraler Ebene...

Zusammengefasst lässt sich die Energiewende im Verkehr umsetzen, ohne dass mit negativen Effekten zu rechnen ist. Zugleich können die THG-Emissionen des Verkehrs entsprechend der nationalen und EU-Ziele bis 2050 reduziert werden.

Die geringen Abweichungen des BIP mit einer Spannweite von +/- 0,4 % zum Referenzpfad lassen sich zum einen darauf zurückführen, dass das Referenzszenario, mit der die Zielszenarien verglichen werden, keine Business-as-usual-Entwicklung abbildet, in der nur Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor hergestellt werden. Auch im REF-Szenario wird nicht an Verbrennungsfahrzeugen festgehalten, sondern es wird eine Energiewende im Verkehr angestrebt, die jedoch langsamer verläuft als in den Zielszenarien. Langfristig setzen sich Fahrzeuge mit neuen Antriebsformen durch, die ein daran angepasstes Energiesystem sowie klimaneutral produzierte Energieträger benötigen. In allen Szenarien dominieren längerfristig trotz unterschiedlicher Schwerpunkte E-Fahrzeuge den Markt. Zum anderen wird in allen untersuchten Szenarien nur ein Ausschnitt der Energiewende betrachtet. Energiewendemaßnahmen z. B. im Gebäudebereich oder der Industrie bleiben unberücksichtigt, sodass sich die damit verbundenen ökonomischen Effekte insbesondere durch höhere Investitionen nicht in den Ergebnissen widerspiegeln können. Auch sind die Effekte in ihrer Richtung im Zeitablauf nicht gleichgerichtet. Hierfür sind insbesondere die verzögerten Klimaschutzbemühungen im Referenzszenario ursächlich, die zu „Nachholeffekten“ führen, also z. B. zu höheren Investitionen in erneuerbare Energien zur Stromerzeugung in späteren Jahren, die in den Zielszenarien bereits früher getätigt wurden.

Die Szenarien zeigen in Bezug auf den Außenhandel, dass auch die Entwicklungen auf ausländischen Märkten hohe Relevanz für die deutsche Wirtschaft haben. Insbesondere im Bereich des Fahrzeugbaus hat Deutschland hohe Exporte vorzuweisen, sodass die Nachfrage aus den Importländern nach Fahrzeugen und deren Verteilung auf die Antriebsformen die inländische Produktion mitbestimmen und damit auch Einfluss auf die Geschwindigkeit und Ausgestaltung der hiesigen Energiewende im Verkehr nehmen. Um diese Effekte genauer zu erfassen, sollten zukünftige Modellierungen auch mit einem Modell der internationalen Wirtschaft durchgeführt werden. Dabei könnte auch die Verzahnung mit den Entwicklungen auf anderen Märkten und sich dadurch ergebende Effekte bei den Technologien und ihren Kosten, z. B. bei den Autobatterien, mitberücksichtigt werden.

Die Untersuchung zeigt, dass die gesamtwirtschaftliche Wirkung auf den Arbeitsmarkt positiv ist. Inwieweit Arbeitnehmer*innen unter der Voraussetzung beruflicher Flexibilität in anderen Wirtschaftszweigen einen Arbeitsplatz finden können, wurde nicht untersucht. Andere Studien zeigen aber, dass dies weitgehend gelingen dürfte (Mönnig et al. 2021).

Die Effekte des Umbaus des Verkehrs hängen stark von den Annahmen zu den neuen Technologien ab, die durch die Inputkoeffizienten im Fahrzeugbau und die Stromerzeugungs- und Umwandlungstechnologien wie Elektrolyseure und neue Technologien zur

Stromerzeugung, Energieumwandlung und Kraftstoffherstellung repräsentiert werden. Hier bietet es sich im Rahmen weitergehender Analysen an, die Annahmen eingehend zu beleuchten und mit anderen Studien wie Tamba et al. (2022) sowie mit aktuellen Erkenntnissen abzugleichen, etwa zur Entwicklung der Batteriekosten.

Die vorliegende Analyse betrachtet die ökonomischen Effekte unter der Bedingung, dass die Szenarien technisch möglich sind. Bei der Umsetzung der Energiewende müssen jedoch zum einen die Rahmenbedingungen berücksichtigt werden, wie die Akzeptanz in der Bevölkerung oder Abhängigkeiten zu anderen Ländern. Zum anderen sollte die Energiewende nicht separat für einzelne Bereiche, sondern als Ganzes betrachtet werden. Insbesondere angesichts der PtX-Energieträger, für die sich noch kein Markt etabliert hat und die zukünftigen Verfügbarkeiten ungewiss sind, müssen Knappheiten bedacht und in die Modellierung einbezogen werden: Der Einsatz im Verkehr steht in Konkurrenz zur Verwendung in anderen Bereichen, für die es teilweise keine klimaneutrale Substitutionsmöglichkeiten gibt (z. B. Wasserstoff bei der Herstellung von klimaneutralem Stahl). Mönning et al. (2022) zeigen anhand einer Literaturübersicht, wie weit die prognostizierten Wasserstoffmengen in unterschiedlichen Szenarien für Deutschland auseinanderliegen: Für 2050 liegt der Bedarf zwischen 50 und 800 TWh. Dies zeigt, wie hoch die Unsicherheit bezüglich die zukünftige Nachfrage nach Wasserstoff ist. Für Synfuels zeigt sich eine Lücke zwischen zukünftigem Bedarf und projizierter Verfügbarkeit (Ueckerdt & Odenweller 2023).

Auch deshalb sollten zukünftige Modellbetrachtungen nicht auf die Energiewende im Verkehr begrenzt bleiben. Elemente einer Verkehrswende sind mitzuberücksichtigen, statt sich nur auf den technologischen Austausch fossiler Energieträger durch Strom oder synthetische Kraftstoffe oder Wasserstoff auf Strombasis zu konzentrieren. Dadurch wird der Möglichkeitenraum zur Erreichung der Klimaneutralität auch im Verkehrssektor größer. Zukünftige Forschung sollte sich deshalb verstärkt ganzheitlich der Verkehrswende widmen.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- AGEB (2023): Energiebilanz der Bundesrepublik 2021.
- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende & Frontier Economics (2018): The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels.
- agrarheute (2023): Teller oder Tank: Lemke will Ausstieg für Biokraftstoffe bis 2030.
<https://www.agrarheute.com/politik/teller-tank-lemke-haelt-ausstieg-fuer-biokraftstoffe-fest-602464>, abgerufen am 06.09.2023.
- Ahmann, L., Banning, M. & Lutz, C. (2022): Modeling rebound effects and counteracting policies for German industries. *Ecological Economics* 197, S. 107432. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107432.
- Aigner, M., Aliabadi, D. E., Amri-Henkel, A., Anderson, J., Becker, L., Bergfeld, M., Brand-Daniels, U., Braun-Unkhoff, M., Brinkop, S., Brosowski, A., Deniz, Ö., Dietrich, R.-U., Eisenmann, C., Ennen, D., Eschmann, J., Frieske, B., Grimme, W., Haas, S., Hasselwander, S., Hauser, E., Heib, S., Heimann, N., Hendricks, J., Hildebrand, J., Hoyer-Klick, C., Jordan, M., Kronshage, S., Lutz, C., Mantke, H., Matschoss, P., Mertens, M., Neitz-Regett, A., Österle, I., Oswald, M., Pichlmaier, S., Prause, J., Pregger, T., Raab, M., Richter, S., Ruiz, E. S. A., Wulff, N. & Zeck, B. (im Erscheinen): Roadmap für strombasierte Kraftstoffe – Gesamtbericht zur Begleitforschung Energiewende im Verkehr (BEniVer).
- Almon, C. (1991): The Inforum Approach to Interindustry Modeling. *Economic Systems Research* 3 (1), S. 1–8. DOI: 10.1080/09535319100000001.
- Becker, L., Bernardt, F., Bieritz, L., Mönnig, A., Parton, F., Ulrich, P. & Wolter, M. I. (2022): INFORGE in a Pocket. GWS-Kurzmitteilung 2022/02, Osnabrück.
<https://www.gws-os.com/de/publikationen/gws-kurzmitteilungen/detail/inforge-in-a-pocket>.
- Becker, L. & Lutz, C. (2019): Infrastruktur des Kraftstoffmarktes – Elemente, Kosten, Anlagenbestand. Working Paper im Rahmen des BEniVer-Projektes.
- Broadbent, G., Allen, C., Wiedmann, T. & Metternicht, G. (2022): The role of electric vehicles in decarbonising Australia’s road transport sector – Modelling ambitious scenarios. *Energy Policy* (168).
- Eschmann, J., O’Sullivan, M. & Baldauf, T. (2022): Scenarios for Future Trade Flows of Energy Technologies. 17th IAEE European Energy Conference, Athen, 2022.
<https://elib.dlr.de/187367/>.
- European Union (2018): Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.
- Jian, L., Yongqiang, Z., Larsen, G. N. & Snartum, A. (2020): Implications of road transport electrification – A long-term scenario-dependent analysis in China. *eTransportation* (6).
- KBA (2023a): Bestand – Zahlen zum 1. Januar 2023 im Überblick.

- KBA (2023b): Bestandsbarometer – Personenkraftwagen am 1. Januar 2023 nach ausgewähltem Fahrzeugalter. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/2023/2023_b_jahresbilanz_tabellen.html?nn=3532350&fromStatistic=3532350&yearFilter=2023&fromStatistic=3532350&yearFilter=2023.
- KBA (2023c): Neuzulassungen – Zahlen des Jahres 2022 im Überblick. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_node.html.
- Kern, F., Peuckert, J., Lange, S., Ahmann, L., Banning, M. & Lutz, C. (2022): Designing effective and acceptable policy mixes for energy transitions: Countering rebound effects in German industry. *Energy Research & Social Science* 90, S. 102680. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102680.
- Lehr, U., Lutz, C. & Edler, D. (2012): Green jobs? Economic impacts of renewable energy in Germany. *Energy Policy* 47, S. 358–364. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.076.
- Lutz, C., Becker, L. & Kemmler, A. (2021): Socioeconomic Effects of Ambitious Climate Mitigation Policies in Germany. *Sustainability* 13 (11), S. 6247. DOI: 10.3390/su13116247.
- Lutz, C., Flaute, M., Lehr, U., Kemmler, A., auf der Maur, A., Ziegenhagen, I., Wunsch, M., Koziel, S., Piégasa, A. & Straßburg, S. (2018): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende. GWS Research Report 2018/4, Osnabrück. <http://papers.gws-os.com/gws-researchreport18-4.pdf>.
- Maier, T., Mönnig, A. & Zika, G. (2015): Labour demand in Germany by industrial sector, occupational field and qualification until 2025 – Model calculations using the IAB/IN-FORGE model. *Economic Systems Research* 27 (1), S. 19–42. DOI: 10.1080/09535314.2014.997678.
- Mönnig, A., Lutz, C., Becker, L., Maier, T. & Zika, G. (2021): Arbeitsmarkteffekte eines klimaneutralen Langfristpfads bis 2030 – Zusammenfassung der Ergebnisse. Kurzstudie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität, Osnabrück.
- Mönnig, A., Ronsiek, L., Becker, L. & Steeg, S. (2022): Wasserstoffbasierte Transformation und die Auswirkungen auf den Importbedarf Deutschlands. 1. Aufl. Hg. v. Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), Bonn.
- Mönnig, A., Schneemann, C., Weber, E., Zika, G. & Helmrich, R. (2019): Electromobility 2035 – Economic and labour market effects through the electrification of powertrains in passenger cars. IAB-Discussion Paper 8/2019.
- Naegler, T., Becker, L., Buchgeister, J., Hauser, W., Hottenroth, H., Junne, T., Lehr, U., Scheel, O., Schmidt-Scheele, R., Simon, S., Sutardhio, C., Tietze, I., Ulrich, P., Viere, T. & Weidlich, A. (2021a): Integrated Multidimensional Sustainability Assessment of Energy System Transformation Pathways. *Sustainability* 13 (9), S. 5217. DOI: 10.3390/su13095217.
- Naegler, T., Sutardhio, C., Weidlich, A. & Pregger, T. (2021b): Exploring long-term strategies for the German energy transition - A review of multi-Sector energy scenarios.

- Renewable and Sustainable Energy Transition 1, S. 100010. DOI: 10.1016/j.rset.2021.100010.
- O’Sullivan, M. & Edler, D. (2020): Gross Employment Effects in the Renewable Energy Industry in Germany—An Input–Output Analysis from 2000 to 2018. *Sustainability* 12 (15), S. 6163. DOI: 10.3390/su12156163.
- Oei, P.-Y., Hermann, H., Herpich, P., Holtemöller, O., Lünenbürger, B. & Schult, C. (2020): Coal phase-out in Germany – Implications and policies for affected regions. *Energy* 196.
- Öko-Institut, Fraunhofer-ISI, Prognos, M-Five, IREES & FiBL (Hg.) (2019): Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung.
- Ram, M., Osorio-Aravena, J. C., Aghahosseini, A., Bogdanov, D. & Breyer, C. (2022): Job creation during a climate compliant global energy transition across the power, heat, transport, and desalination sectors by 2050. *Energy* (238).
- Robinius, M., Cerniauskas, S., Madlener, R., Kockel, C., Praktiknjo, A. & Stolten, D. (2022): Economics of Hydrogen. In: Hafner, M. & Luciani, G. (Hg.): *The Palgrave Handbook of International Energy Economics*. Springer Nature, Cham, S. 75–102.
- Sievers, L., Breitschopf, B., Pfaff, M. & Schaffer, A. (2019): Macroeconomic impact of the German energy transition and its distribution by sectors and regions. *Ecological Economics* (160), S. 191–204.
- Tamba, M., Krause, J., Weitzel, M., Ioan, R., Duboz, L., Grosso, M. & Vandyck, T. (2022): Economy-wide impacts of road transport electrification in the EU. *Technological Forecasting and Social Change* 182. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162522003274>, abgerufen am 11.09.2023.
- UBA (Hg.) (2023a): Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990–2022.
- UBA (Hg.) (2023b): Projektionsbericht 2023 für Deutschland – Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes. *Climate Change* 39/2023.
- Ueckerdt, F. & Odenweller, A. (2023): E-Fuels – Aktueller Stand und Projektionen. https://www.pik-potsdam.de/members/Ueckerdt/E-Fuels_Stand-und-Projektionen_PIK-Potsdam.pdf, abgerufen am 13.09.2023.
- Ulrich, P. & Lehr, U. (2019): Economic effects of an E-mobility scenario – input structure and energy consumption. *Economic Systems Research* 32 (1), S. 84–97. DOI: 10.1080/09535314.2019.1619522.
- Ulrich, P., Naegler, T., Becker, L., Lehr, U., Simon, S., Sutardio, C. & Weidlich, A. (2022): Comparison of macroeconomic developments in ten scenarios of energy

system transformation in Germany: national and regional results. Energy, Sustainability and Society 12, 35. DOI: 10.1186/s13705-022-00361-5.