HYPAT

H_2 Potential

Globaler H_2-Potenzialatlas

Nachhaltige Standorte in der Welt für die grüne Wasserstoffwirtschaft von morgen: Technische, ökonomische und soziale Analysen zur Entwicklung eines nachhaltigen globalen Wasserstoffatlasses

HYPAT Working Paper 01/2023

Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse

Autorinnen und Autoren:

Martin Wietschel, Bastian Weißenburger, Matthias Rehfeldt, Benjamin Lux, Lin Zheng. (Fraunhofer ISI)

Jonas Meier (ESA^2 GmbH)

Fraunhofer ISI

Energy Systems Analysis Associates ESA^2

HYPAT Working Paper 01/2023

Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse

Förderung

Das Projekt HYPAT – H_2-POTENTIALATLAS – wird im Rahmen des Ideenwettbewerbs »Wasserstoffrepublik Deutschland« im Modul Grundlagenforschung Grüner Wasserstoff vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert. Die Projektlaufzeit läuft über einen Zeitraum von drei Jahren, März 2021 bis Februar 2024.

Projektleitung

Prof. Dr. Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Projekt-Webseite

www.hypat.de

Zitierempfehlung

Wietschel, M.; Weißenburger, B.; Rehfeldt, M.; Lux, B.; Zheng, L.; Meier, J. (2023): Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse. HYPAT Working Paper 01/2023. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).

Veröffentlicht

Datum	Version	Änderung
März 2023	01	
April 2023	02	neuer Disclaimer, Klarstellung zur Berechnung der notwendigen Elektroyseleistung

Disclaimer

Das vorliegende Diskussionspapier wurde von den genannten Autorinnen und Autoren des HyPat-Konsortiums ausgearbeitet. Die Analyse spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des HyPat-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.
Die Publikation einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4

2 Methodik der Erhebung einer preiselastischen Wasserstoffnachfrage und deren Anwendung auf Deutschland und die EU 6

2.1 Überblick über bestehende Ansätze 6
2.2 Überblick über die entwickelte Methodik 7
2.3 Unterstellte Preisszenarien 9
2.4 Modellierung der Industrie 10
2.4.1 Einleitung 10
2.4.2 Methodik 10
2.5 Modellierung des Verkehrs 12
2.5.1 Einleitung 12
2.5.2 Methodik für Pkw und Lkw 12
2.5.3 Methodik für andere Mobilitätssektoren 14
2.6 Modellierung der Energieversorgung 14
2.6.1 Einleitung 14
2.6.2 Methodik 15
2.7 Berücksichtigung der Gebäudewärme 16

3 Ergebnis: Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland 18

4 Kritische Würdigung und Ausblick 21
4.1 Kritische Würdigung des Ansatzes 21
4.2 Ausblick: Ermittlung von Wasserstoffpreisen und Handelsflüssen 21

5 Zusammenfassung, Diskussion und Schlussfolgerungen 25

Literaturverzeichnis 27

Abbildungsverzeichnis 30

Tabellenverzeichnis 31

Anhang A 32

Anhang B 36

1 Einleitung

Die heutige Wasserstoffwirtschaft ist aktuell noch ein Sektor ohne größere nationale und internationale Handelsaktivitäten. Nur fünf Prozent des weltweit erzeugten Wasserstoffs werden momentan transportiert und gehandelt (siehe Monopolkommission (2021)). Der Großteil der momentanen Wasserstoffherstellung findet entweder durch Industriegasanbieter oder lokal am Ort der Nachfrage durch die Industriebtriebe statt, die den Wasserstoff nutzen. Somit fehlt ein Wasserstoffmarkt und die Preise sind meist nicht öffentlich zugänglich oder bei bilateralen Verträgen nicht im Sinne eines freien öffentlichen Markts verfügbar.

Die Wasserstoffnachfrage wird nach einer Vielzahl an Studien allerdings künftig deutlich ansteigen, um die ambitionierten Ziele zur Treibhausgasminderung zu erreichen[1]. Auch die Zahl der potenziellen Anwendungen bei Industrie, Wärme und Mobilität wird deutlich zunehmen. Die Relevanz von politischer Seite, die Wasserstoff zugesprochen wird, sieht man in der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung (Bundesregierung 2020) und der Wasserstoffstrategie der EU (European Commission 2020). Der Markthochlauf von Wasserstoff erfordert allerdings erhebliche Investitionen in Produktionskapazitäten und Transport- und Verteilnetzinfrastrukturen und deren Realisierung benötigt Zeit (siehe Ueckerdt et al. (2021)). Wasserstoff wird deshalb in den nächsten Jahren wahrscheinlich ein knappes und im Vergleich zu anderen Energieträgern auch teures Gut sein (siehe Wietschel et al. (2021a), SRU (2021). Damit stellt sich die Frage, in welchen Anwendungen Wasserstoff zuerst eingesetzt wird. Dies hängt stark von den künftigen Preisen für Wasserstoff ab, weshalb hier eine wesentliche Forschungsfrage liegt.

Stand des Wissens ist, dass der Wasserstoffeinsatz stark getrieben wird von der Höhe der Treibhausgasminderungsziele (siehe Wietschel et al. (2021a) und Riemer et al. (2022)) sowie in den einzelnen Anwendungsgebieten u. a. von den alternativen Lösungen zur Minderung der Treibhausgase (THG). Zwischen den einzelnen Anwendungssektoren existieren hier große Unterschiede. Dies spiegelt sich auch in den Analysen zu den Treibhausgas-(THG)-Minderungskosten wider, die je nach Anwendung von null bis über tausend Euro gehen (siehe Ueckerdt et al. (2021)). Hieraus schließt sich, dass die Zahlungsbereitschaft für Wasserstoff in den einzelnen Anwendungen durchaus stark variieren könnte.

Vor diesem Hintergrund ist die Zielsetzung dieses Working Papers, eine Methodenentwicklung und -anwendung für die Erstellung einer langfristigen preiselastischen Nachfrage nach Wasserstoff für Deutschland bis 2045 durchzuführen. Es soll dabei analysiert werden, welche Anwendungen durch eine hohe Preiselastizität und welche durch eine niedrige Preiselastizität gekennzeichnet sind. Daraus lassen sich dann auch Wasserstoffnachfragen in Abhängigkeit von unterstellten Preisentwicklungen berechnen.

Prioritär wird der direkte Wasserstoffeinsatz in der Industrie (stoffliche Nutzung, energetische Nutzung in Hochtemperaturprozessen), im Verkehrssektor (insbesondere im straßengebundenen Verkehr) und im Umwandlungssektor (zur Speicherung und Rückumwandlung in Strom

[1] Siehe z. B. JRC (2019), Quarton et al. (2020), Wietschel et al. (2021a), World Energy Council (2021), Riemer et al. (2022), Fraunhofer ISI et al. (2022).

oder Wärme) gesehen (siehe Wietschel et al. (2021a), Riemer et al. (2022)). Auf die modellbasierte Erhebung von Preiselastizitäten in den drei Bereichen fokussiert sich deshalb das vorliegende Papier. Weiterhin wird der Wasserstoffeinsatz auch in der Gebäudewärme diskutiert, hier wird aber die Notwendigkeit nicht immer gesehen. Deshalb wird der Gebäudesektor hier nur über einem vereinfachen Ansatz berücksichtigt.

Das Working Paper ist folgendermaßen strukturiert. Im folgenden Kapitel 2 werden zuerst Grundlagen gelegt. Dabei wird auf theoretische Grundlagen zur Ermittlung von Wasserstoffpreisen, einer Literaturauswertung zu bestehenden Ansätzen hierzu sowie die Konkurrenzsituation von Wasserstoff in den verschiedenen Anwendungssektoren eingegangen. Anschließend wird ein Überblick über die entwickelte Methodik gegeben und methodische Details in den einzelnen Anwendungssektoren vorgestellt sowie wichtige Rahmenbedingungen und Dateninput vorgestellt.

In Kapitel 3 wird näher auf die mit der entwickelten Methodik produzierten Ergebnisse eingegangen. Im anschließenden Kapitel erfolgt eine kritische Würdigung und ein Ausblick auf weitere Arbeiten. Im letzten Kapitel 5 findet sich eine Zusammenfassung mit Schlussfolgerungen.

Das Working Paper beschreibt einen methodischen Aspekt vom Projekt HYPAT. Das Projekt HYPAT entwickelt einen globalen Wasserstoff-Potenzialatlas und identifiziert dafür erstmals umfassend mögliche Partnerländer Deutschlands für eine kooperative Entwicklung einer zukünftigen grünen Wasserstoffwirtschaft inklusive der Bedeutung der Produktionsregionen für eine gesicherte, ökonomische und ökologisch nachhaltige Versorgung.

2 Methodik der Erhebung einer preiselastischen Wasserstoffnachfrage und deren Anwendung auf Deutschland und die EU

2.1 Überblick über bestehende Ansätze

Wie in der Einleitung dargestellt fehlen historische, empirische Daten zur Ableitung eines Wasserstoffpreises in Abhängigkeit des Angebots und der Nachfrage. Deshalb besteht die Notwendigkeit auf Modelle oder andere methodische Ansätze zurückzugreifen, mit denen dann Preisszenarien für die Zukunft entwickelt werden. Bei einer Literaturrecherche konnten nur wenige Literaturquellen zu der Problematik gefunden werden, was auf ein Defizit in der Forschung bei dieser Frage hinweist.

Wie eine preiselastische Nachfragefunktion für Wasserstoff modellhaft abgeleitet werden kann, wird in Blanco et al. (2018) gezeigt. Blanco et al. nutzen das kostenoptimierende Energiesystemmodell JRC-EU-TIME, um die Verwendung von Wasserstoff in allen Sektoren für verschiedene Szenarien mit bis zu 95 % CO_2-Reduktion im Jahr 2050 zu untersuchen. Das Modell bildet die verschiedenen Möglichkeiten der Deckung der Nachfrage beispielsweise nach Stahl durch verschiedene Herstellverfahren ab und bewertet diese auf der Basis der Kosten für einen Prozess. Szenarioabhängig wird eine preisabhängige Wasserstoffnachfragekurve erstellt. Dabei wird ein konstanter Wasserstoffpreis vorgegeben und im Modell wird endogen entschieden, wie viele Mengen in welchen Anwendungsgebieten bei diesem fixen Preis nachgefragt werden. Durch die verschiedenen, exogen vorgegebenen Wasserstoffpreise lässt sich dann eine Nachfragekurve zusammenstellen. Wird einer der Parameter des Szenarios zur Erstellung der Wasserstoffnachfragekurve verändert, so ändert sich auch die Nachfragekurve. Die so erstellte Nachfragefunktion wird dann in ein kostenoptimierendes Energiesystemmodell integriert, welches dann die Angebotsdeckung des Wasserstoffs berechnet, indem die verschiedenen Optionen der Erzeugung miteinander in Konkurrenz stehen.

Ein weiterer methodischer Ansatz mit langfristigen Preiselastizitäten auf der Angebots- und Nachfrageseite wird in NREL (2021) entwickelt. Dort wird eine Wasserstoff-Nachfragekurve für verschiedene Szenarien in den USA berechnet. Für die betrachteten Anwendungssektoren werden Grenzpreise (Zahlungsbereitschaft) für Wasserstoff ermittelt, ab denen Wasserstoff konkurrenzfähig zu alternativen Technologien wird. So ist bei der Ammoniakproduktion Wasserstoff ein wesentlicher Grundstoff mit begrenzten oder keinen Alternativen, wodurch angenommen wird, dass die Konsumenten bereit sind, einen höheren Preis zu zahlen. Die Autoren setzen deshalb im Referenzszenario für diese Anwendung den Grenzpreis bei 3,00 USD/kg Wasserstoff. Bei der Stahlherstellung hingegen konkurriert Wasserstoff im Direktreduktionsverfahren mit Erdgas. Die Autoren setzen dafür je nach Preisszenario für Erdgas den Preis für Wasserstoff bei 0,80 USD/kg bzw. 1,40 USD/kg. Insgesamt werden neun Anwendungen für Wasserstoff betrachtet. Für jede Anwendung wird ein Grenzpreis und die potenzielle Nachfragemenge abgeschätzt. Die Abschätzung basiert auf Experteneinschätzungen und die Zusammenführung von

Ergebnissen aus Studien. Durch Aggregation über alle Anwendungen hinweg wird die preiselastische Nachfragekurve erstellt. Methodisch vergleichbar wird eine kostenbasierte Angebotskurve für Wasserstoff für die USA erhoben. Aus Experten- und studiengestützten Analysen werden die Kosten für die Herstellung von Wasserstoff aus verschiedene Erzeugungstechnologien wie der Elektrolyse oder der Erdgasreformierung bestimmt und das Potenzial über den Feedstock, das heißt z. B. über die Menge an zur Verfügung stehenden erneuerbaren Stromerzeugung oder Gasmengen, quantifiziert. Die durchgeführten Analysen werden statisch für das Jahr 2050 erstellt. Der Weg bis 2050 wird nicht betrachtet.

2.2 Überblick über die entwickelte Methodik

Ziel des methodischen Ansatzes ist es eine langfristige preiselastische Nachfragefunktion zu erheben. D. h. es werden Investitionsentscheidungen berücksichtigt und die Gesamtkosten über die Lebensdauer der Investitionen dabei beachtet. Die Erhebung einer preiselastischen H_2-Nachfrage erfordert dabei ein hohes Wissen an Detailkenntnissen über die generelle Nachfragentwicklung in den einzelnen Anwendungsgebieten, den technologischen Optionen (siehe Anhang) und der wirtschaftlichen Bewertung. Die Investitionen und die laufenden Kosten der Wasserstoffanwendung im Vergleich zu den alternativen Optionen bestimmen, ob sich die Wasserstoffanwendung durchsetzt. Hieraus leitet sich die Zahlungsbereitschaft für Wasserstoff ab.

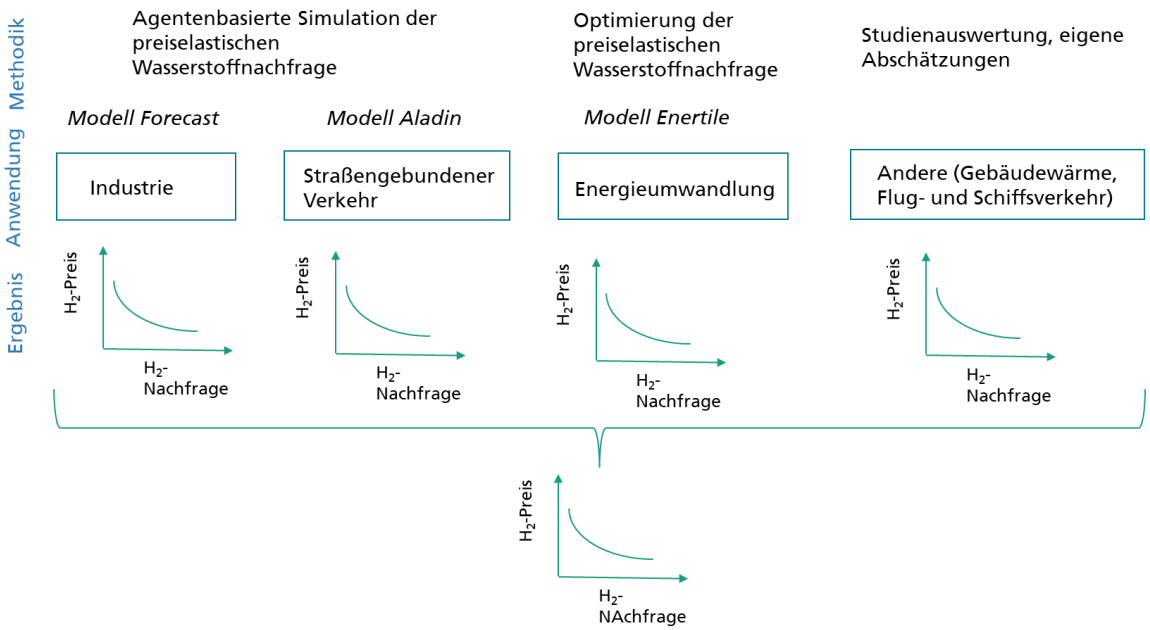
Hierfür wurden am Fraunhofer ISI in den letzten Jahren agentenbasierte Simulationsmodelle für die Sektoren Industrie, Verkehr und Wärme entwickelt. Diese Modelle sind dafür konzipiert, für die einzelnen Sektoren Szenarien für die Nachfrageentwicklung nach Energieträgern zu entwickeln und Treibhausgasminderungsszenarien zu berechnen. Die Treiber der Nachfrage wie die Entwicklung der Bevölkerung, des Bruttosozialproduktes, der Anzahl und der Größe von Haushalten wird i. d. R. aus anderen Studien entnommen.

In die Analysen gehen eine Reihe an technischen und ökonomischen Parametern ein. Sie betreffen einmal die in den Modellen abgebildeten Technologien (z. B. im Lkw-Sektor die konventionellen Diesel-Lkw, die Brennstoffzellen-Lkw, die batterieelektrischen Lkw etc.), die miteinander konkurrieren. Zum anderen werden Rahmenparameter wie Energiepreise vorgegeben. Ein Parameter ist der künftige Wasserstoffpreis. Durch dessen Variation in den Szenarien erhält man zu jedem vorgegebenen Wasserstoffpreis für den Sektor eine nachgefragte Wasserstoffmenge. Im Sektor Gebäudewärme wird keine eigene Modellierung angewendet, sondern auf andere Studien zurückgegriffen. Wichtig ist festzuhalten, dass hier ein Szenario unterstellt wird – mit einer Reihe an Annahmen – und keine Prognose erstellt wird.

Eine weitere potenzielle Nachfrage nach Wasserstoff kann sich im Energieumwandlungssektor bilden, u. a. kann Wasserstoff dort als Langfristspeicher eingesetzt werden und bei Bedarf, z. B., in Situationen von kalter Dunkelflaute zurück verstromt werden. Zur Analyse derartiger Einsatzmöglichkeiten haben sich optimierende Energiesystemmodelle als adäquate Methodik seit Jahren etabliert. Ein solches Modell wird deshalb auch für die Ermittlung einer preiselastischen Nachfrage im Energieangebotssektor eingesetzt.

Durch die Aggregation über alle Sektoren hinweg erhält man dann eine gesamte preiselastische Nachfragefunktion. Abbildung 1 zeigt einen Überblick über die Methodik.

Abbildung 1: Überblick über die eingesetzte Methodik



Quelle: eigene Darstellung.

Bei den folgenden Analysen wird überwiegend auf die aktuellen Modellversionen zurückgegriffen, die in den Langfristszenarien zum Einsatz kommen, einer aktuellen Studie für das BMWK (siehe Fraunhofer ISI et al. (2022)). Dabei wird auf die T45-Szenarien zurückgegriffen, die eine Treibhausgasneutralität in 2045 für Deutschland unterstellen. Dies ist eine sehr bedeutsame Rahmensetzung für die folgenden Modellergebnisse, weil Treibhausgasneutralität ein starker Treiber für die Transformation des Energiesystems ist, auch hinsichtlich des Einsatzes von Wasserstoff. Viele Studien haben gezeigt, dass Wasserstoff in größerem Umfang erst ab Treibhausgasminderungszielen von 80 % und mehr zum Einsatz kommt (siehe die Metastudien in Wietschel et al. (2021a) und Riemer et al. (2022)).

In den Langfristszenarien werden drei Hauptszenarien berechnet:

- starker Einsatz von Strom (Szenario T45-Strom)
- starker Einsatz von Wasserstoff (Szenario T45-H_2)
- starker Einsatz von synthetischen Kohlenwasserstoffen (T45-PtG/PtL)

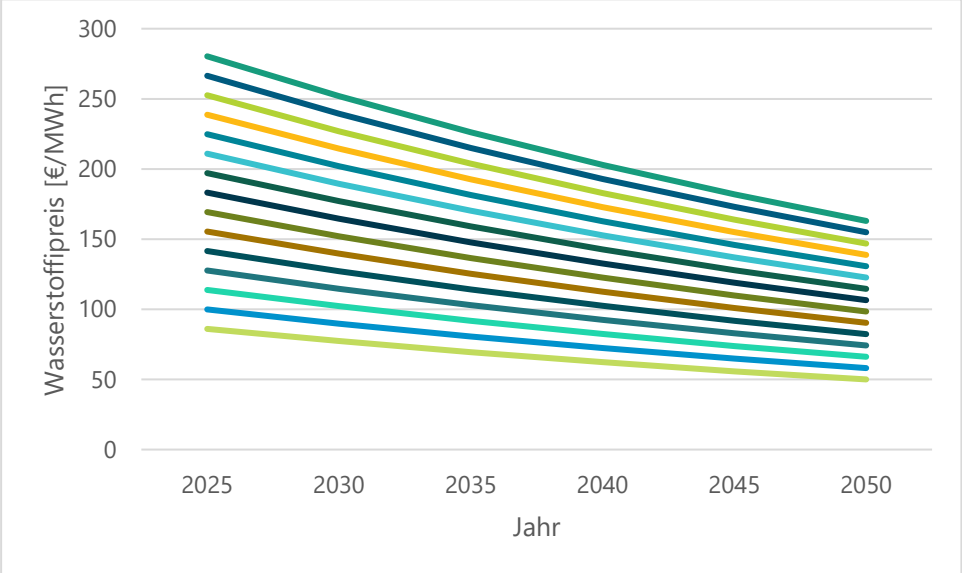
Methodisch und inhaltlich wird in den Langfristszenarien ein lernender Prozess vorgenommen, um den Lösungsraum für ein treibhausgasneutrales Energiesystem immer besser „auszuleuchten", sprich hier die drei Ecken eines Lösungsraumes. Dafür werden in den drei Szenarien jeweils optimistische Annahmen zu techno-ökonomischen Parametern wie Investitionen, Lebensdauer, Infrastrukturverfügbarkeit etc. bezüglich der jeweiligen Ecke getroffen, die es auszuleuchten gilt.

Für die folgenden Analysen wird überwiegend auf die Annahmen des Szenarios T45-H_2 zurückgegriffen, aber in einigen Punkten, auf die dann in den folgenden Kapiteln eingegangen wird, davon abgewichen.

2.3 Unterstellte Preisszenarien

Bei der Modellierung einer preiselastischen Wasserstoffnachfragefunktion müssen verschiedene Wasserstoffpreise vorgegeben werden. Diese müssen als künftige Preispfade von heute bis zum Ende des Betrachtungszeitpunktes (2050) vorliegen. Eine rein statische Betrachtung für einen Zeitpunkt ist ungenügend, weil die Investitionen in den Vorjahren, z. B. in eine Direkt-Eisenreduktion auf Wasserstoffbasis, die Ergebnisse beeinflusst (Pfadabhängigkeiten). Weiterhin ist stark davon auszugehen, dass zu Beginn die Wasserstoffpreise höher sind und dann u. a. durch Skaleneffekte die Preise über die Zeit sinken. Abgeleitet aus einer Reihe von Studien (siehe Deutsch et al. (2018), Pfennig et al. (2017), Timmerberg et al. (2019), Prognos (2020), Lux et al. (2021), Hank et al. (2020), Hydrogen Council & McKinsey (2022), Hobohm (2018) und Hampp et al. (2021)) werden die in Abbildung 2 dargestellten Preispfade, die eine große Bandbreite möglicher Entwicklungen darstellen, für die folgenden Analysen unterstellt.

Abbildung 2: Untersuchte Preispfade (Großhandel) von Wasserstoff



Quelle: eigene Darstellung.

Dabei ist zu betonen, dass es sich um Großhandelspreise handelt. Dazu kommen noch u. a. die Kosten für den inländischen Transport, Lagerung und Verteilung sowie Steuern und Abgaben und beim Verkehr noch die Ausgaben für die Tankstellen.

Die Betrachtung von zeitlichen Preispfaden zeichnet die Arbeiten hier aus, weil üblicherweise nur ein Zeitpunkt in vergleichbaren anderen Studien betrachtet wird.

Betrachtet man die untersuchten Preispfade, so sind die sehr niedrigen Preispfade kritisch zu reflektieren. Es existieren Studien zu den Herstellkosten und den Nachfragemengen in treibhausgasneutralen Szenarien, aus denen man sich Herstellkosten bei einer Nachfragedeckung ableiten kann. Wird dies durchgeführt, so zeigt sich, dass sich bei den Herstellkosten ein Band über die beiden Studien Hydrogen Council & McKinsey (2022) und Pfennig et al. (2021) von 60 bis 90 €/MWh H_2 in 2045/2050 ergibt. Damit wird deutlich, dass Marktpreisannahmen in dieser Region nach heutigem Kenntnisstand eher unwahrscheinlich sind.

2.4 Modellierung der Industrie

2.4.1 Einleitung

Motiviert durch Klima- und Energiekrise ist die Dekarbonisierung des Energiebedarfs der Industrie eine maßgeblich die Transformation ganzer Wertschöpfungsketten und individueller Produktionsverfahren treibende Kraft. Der Industriesektor verbraucht in Deutschland etwa 30 % der Endenergie (AGEB 2019) – etwas weniger als der Verkehrssektor und etwas mehr als die Haushalte – und hat 2021 24 % der deutschen Treibhausgasemissionen verursacht (berechnet mit Zahlen aus UBA (2022a). Hinzu kommt stoffliche Nutzung von Energieträgern in der chemischen Industrie. 2019 belief sich die Summe dieser Bedarfe auf gut 950 TWh. Neben der direkten Elektrifizierung wird die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in unterschiedlichsten industriellen Anwendungen als möglicher Lösungsweg diskutiert (siehe Anhang).

Um eine Priorisierung dieser Anwendungen im Sinne einer Preiselastizität zu ermöglichen, müssen ihre techno-ökonomischen Charakteristika berücksichtigt werden. Dazu gehören – neben dem eigentlichen Zweck der Nutzung (energetisch oder stofflich) – auch das bereitgestellte Temperaturniveau, Entwicklungsstadien der konkreten Technologien und ihrer Alternativen sowie ökonomische Größen (z. B. CO_2-Vermeidungskosten). Eine solche Unterteilung ermöglicht es, Anwendungen nach Eignung und Attraktivität für die Wasserstoffnutzung abzuschichten.

Im folgenden Abschnitt wird eine solche Priorisierung unternommen und die sich daraus ergebende Nachfrage nach Wasserstoff in der Industrie szenariobasiert auf mehreren Preisstufen modelliert.

2.4.2 Methodik

2.4.2.1 Überblick der Modellierung

Die Modellierung der Nachfrageszenarien der Industrie wird mit dem Bottom-up-Simulationsmodell FORECAST durchgeführt. Eine ausführlichere Beschreibung ist in Fleiter et al. (2018) hinterlegt. Für das Verständnis der hier angewendeten Vorgehensweise sind insbesondere zwei Eigenschaften relevant: Die grundlegende Bezugsgröße der industriellen Aktivität ist die physische Produktion energieintensiver Produkte – also etwa Tonnen Rohstahl, Zement oder Ethylen. Diese Mengen werden im Rahmen der Szenariodefinition exogen festgelegt, sie orientieren sich dabei an historischen Entwicklungen. Im Verlauf der Szenarien verändern sich die für diese Produkte potenziell einsetzbare Verfahren – so wird die Produktion von Stahl im Hochofen ersetzt durch wasserstoffbasierte Direktreduktion, wenn dies unter den Annahmen zielführend und möglich ist. Diese Entwicklungen betreffen ganz zentral die wichtigsten Grundstoffe, die in dedizierten Standorten und Anlagen hergestellt werden und eine hervorgehobene Bedeutung sowohl für Energiebedarf als auch Treibhausgasemissionen haben. Darüber hinaus beinhaltet die Modellierung Wettbewerb zwischen Energieträgern. In diesem wird – basierend auf der wirtschaftlichen Attraktivität, die maßgeblich durch den Energieträgerpreis bestimmt wird, – der Wechsel zwischen Brennstoffen (und Strom) simuliert. So steigt üblicherweise der Anteil eines Energieträgers an der gesamten Energienutzung, wenn er im Vergleich zu anderen Optionen günstiger wird.

Beide Eigenschaften des Modells finden Eingang in die hier berechneten Szenarien. Im Folgenden werden die konkrete Umsetzung und die damit einhergehenden Rahmenbedingungen und Beschränkungen beschrieben.

2.4.2.2 Umsetzung und Parametrisierung

Dem Modell werden 15 Wasserstoffpreispfade übergeben (siehe Kapitel 2.3). Diese fließen in zwei Schritten in die Modellierung ein: Die exogene Definition der Produktionsmengen und die endogene Energieträgerkonkurrenz. Das Grundgerüst der Szenarien (Energieträgerpreise außer Wasserstoff, CO_2-Bepreisung, wirtschaftliche Entwicklung) basiert wie oben erwähnt auf dem Szenario T45-H_2 der Langfristszenarien (Fraunhofer ISI et al. 2022).

Die **exogene Berechnung der Produktionsmengen** basiert auf der Betrachtung der Differenzkosten konventioneller (fossiler) Produktionsverfahren und ihrer wasserstoffbasierten Alternativen[2]. Dabei werden die energie-, CO_2- und investitionsbedingten Kosten der Referenztechnologie (z. B. Hochofenroute) mit der alternativen Route (hier: H_2-DRI) verglichen. Die entstehende Differenz – so die Alternativroute teurer ist – wird durch den Zugriff auf bestehende Förderprogramme (Klimaschutzverträge, Programm zur Dekarbonisierung der Industrie, IPCEI und andere) ausgeglichen. Höhere Wasserstoffpreise erzeugen höhere Differenzkosten – die Förderbudgets werden stärker belastet. Aus den verfügbaren Förderbudgets (siehe Projektionsbericht ((Repenning et al. 2021) und Klimaschutzinstrumentenszenario (2030)) und den Differenzkosten ergeben sich so förderbare Produktionsmengen alternativer Verfahren (z. B. bis 2030 10 Mt H_2-DRI-Stahl). Diese werden dem Modell übergeben. Bei diesem Vorgehen ist die Zuordnung der Förderbudgets notwendig in gewissem Umfang willkürlich, auch andere Zuordnungen sind denkbar. Allerdings engen weitere Randbedingungen den Lösungsraum ein.

Zu diesen Randbedingungen gehört, dass alle Szenarien bzw. Preisstufen die Klimaziele der Bundesregierung (2030: 58 % Reduktion gegenüber 1990 (118 $Mt_{CO2\text{-}Äq.}$ Jahresemissionsmenge), 2045 weitgehende Dekarbonisierung und substantieller Beitrag zur Treibhausgasneutralität Deutschlands) erreichen sollen. Dadurch sind zwei Entwicklungen grundsätzlich vorgezeichnet, die für die Modellierung entsprechend vorausgesetzt werden: Die Rohstahlproduktion wandelt sich bereits bis 2030 stark zu wasserstoffbasierter Direktreduktion (für die Zielerreichung 2030 notwendig) und die chemische Industrie nutzt spätestens 2045 keine fossilen Rohstoffe. Diese Randbedingung überschreibt die zur Verfügung stehenden Förderbudgets. Wird also auf hohen H_2-Preisstufen zur Erreichung der Klimaziele mehr Förderung benötigt als im Budget hinterlegt, wird dieses überzogen.

Die **modellendogene Konkurrenz der Energieträger** untereinander wird abgebildet, indem in jeder Preisstufe das Preissignal für Wasserstoff an den jeweils untersuchten Pfad angepasst wird. Die Nutzung von Wasserstoff zur Erzeugung von Prozesswärme (Dampf und Industrieöfen) wird dadurch mit jeder niedrigeren Preisstufe attraktiver und kann sich besser gegen Konkurrenz (Biomasse, Strom und – im Übergang – fossile Energieträger) durchsetzen.

[2] Das Verfahren wurde auch im Projektionsbericht 2021 (Repenning et al. 2021) und den Klimaschutzinstrumentenszenarien (KIS-2030, in Veröffentlichung) verwendet, die Szenarien bauen auf der dort verwendeten Landschaft politischer Instrumente zur Industrietransformation auf.

Zusammen bilden diese beiden Effekte – Verlagerung der Produktionsmengen in neue Verfahren und Energieträgerwechsel in der Prozesswärme – die preissensitive Wasserstoffnachfrage ab. Für die Preisstufen ergeben sich Wertepaare von Preis und Nachfrage.

2.5 Modellierung des Verkehrs

2.5.1 Einleitung

Der Verkehrssektor war im Jahr 2021 für 19 % der THG-Emissionen in Deutschland verantwortlich (berechnet mit Zahlen aus UBA (2022a)). In der Vergangenheit hat er seine Emissionen nicht gesenkt, technische Effizienzgewinne wurden durch eine Zunahme an Verkehrsleistung und Fahrzeuggrößen kompensiert. Der Verkehrssektor muss relevant zur Senkung der Treibhausgase zukünftig beitragen, damit Deutschland sein Ziel der Treibhausgasneutralität 2045 erreichen kann.

Wasserstoff kann für eine Reihe von Anwendungen im Mobilitätssektor eingesetzt werden. Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind schon heute im Pkw-Segment kommerziell in ersten Kleinserien verfügbar. Im Bereich des Materialtransports, beispielsweise bei Gabelstaplern, sind sie im Regelbetrieb zu finden. Weiterhin existieren Flottenversuche in Deutschland im Busverkehrssektor (Nah- und Fernverkehr). Im Lkw-Segment, insbesondere bei mittleren und schweren Lkw, gibt es bereits einige Aktivitäten und in naher Zukunft ist die Produktion von Kleinstserien hier vorgesehen. Im Schienenverkehr gibt es erste Flottenversuche bzw. Ankündigungen für nichtelektrifizierte Streckenteile.

Einschränkungen für Wasserstofffahrzeuge existieren bei Anwendungen, wo eine sehr hohe Energiedichte gefordert wird, wie im internationalen Flug- und Seeverkehr. Hier spielen künftig zur Senkung der THG-Emissionen synthetische Brenn- und Kraftstoffe auf Wasserstoffbasis bzw. biogener Basis eine wichtige Rolle. Auf der anderen Seite gibt es Anwendungen, wo die Anforderungen an die Energiedichte nicht hoch sind. Hier dominieren aus wirtschaftlichen Gründen derzeit und wahrscheinlich auch künftig batterieelektrische Lösungen, wie bei der Mikromobilität, Fahrrädern und kleinen und mittleren Pkw. Nach Ansicht der Studie des Hydrogen Council (2020) sind nach heutigem Kenntnisstand die vielversprechendsten Einsatzgebiete für Wasserstoff in Kombination mit der Brennstoffzelle (BZ) folgende Anwendungsbereiche: Lkw der mittleren und schweren Gewichtsklassen, Fernreisebusse und Langstreckenbusse im urbanen Umfeld, große Pkw und SUV mit hohen Reichweitenanforderungen, Taxiflotten, Regionalzüge und Flurförderfahrzeuge.

Eine preiselastische Nachfrage im Verkehr wird für Pkw und Lkw mit einem agentenbasierten Modell berechnet. Für den Flug- und Schiffsverkehr erfolgt eine Abschätzung auf der Basis der aktuellen Studie Langfristszenarien (siehe Fraunhofer et al. (2022), Gnann et al. (2022)).

2.5.2 Methodik für Pkw und Lkw

2.5.2.1 Überblick der Modellierung

Zur Modellierung der antriebsspezifischen Verkehrsnachfrage und dem Einfluss des Wasserstoffpreises auf die Nachfrage speziell von Wasserstoff wird das Simulationsmodell ALADIN (**Al**ternative **A**ntriebe **D**iffusion und **I**nfrastruktur) verwendet. Es handelt sich um ein agentenbasiertes Modell, das die Kaufentscheidung einzelner Individuen unter gegebenen Rahmenbedingungen abbildet. Die Kaufentscheidung wird basierend auf realen Fahrprofilen und daraus

resultierenden Anforderungen simuliert. Für jedes Fahrprofil wird die nutzenmaximierende Antriebstechnologie ausgewählt. Anschließend werden die individuellen Kaufentscheidungen in einem Bestandsmodell zusammengeführt.

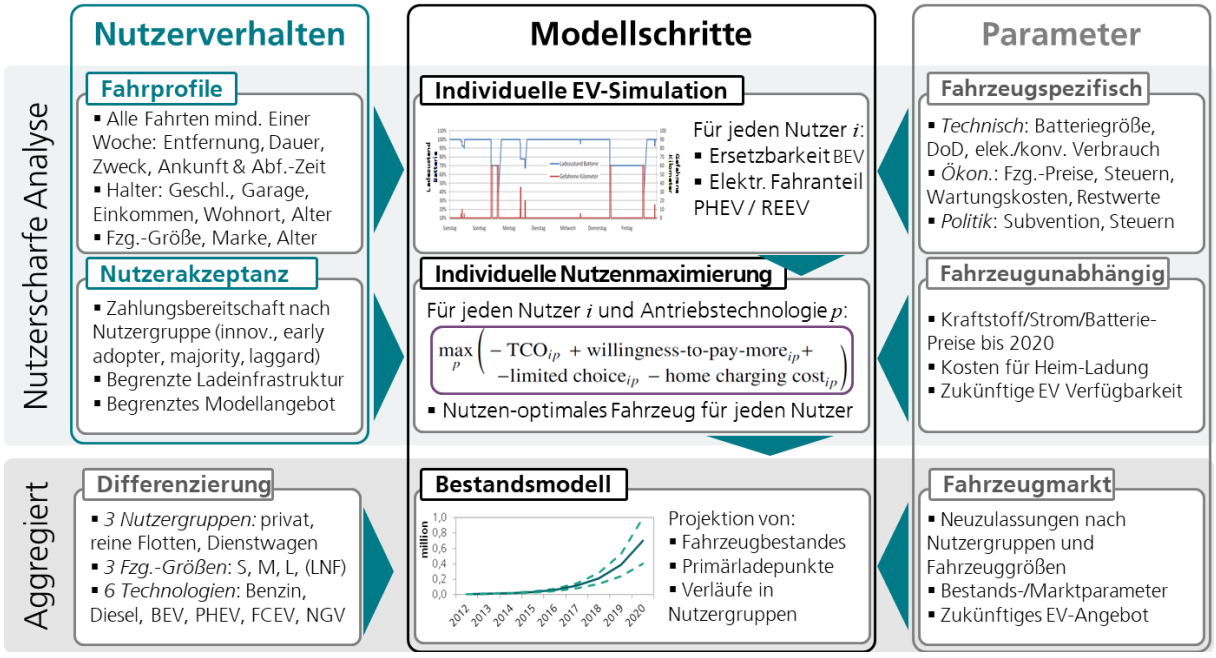
ALADIN kam bereits für unterschiedliche nationale und internationale Studien zum Einsatz (vergleiche zum Beispiel Plötz et al. (2014) und Gnann et al. (2015)). Grundlegende Informationen zum Modell sowie zu Referenzprojekten und Publikationen finden sich unter www.aladin-model.eu. Weiterhin wird auf das Szenario T45-Strom verwiesen, das in der aktuellen Studie der Langfristszenarien entwickelt wurde (Fraunhofer ISI et al. 2022).

In ALADIN werden für Pkw < 3,5 t zGG sechs Antriebsalternativen unterschieden: (1) Benzin, (2) Diesel (beide auf Basis von Erdöl oder synthetischen Flüssigkraftstoffen), (3) Gas (NGV, sowohl Erdgas als auch synthetisches Gas), (4) Plug-in-Hybride (PHEV), (5) batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und (6) Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV).

Für Nutzfahrzeuge werden in ALADIN sieben Antriebsalternativen unterschieden: (1) Dieselfahrzeuge, (2) Gasfahrzeuge, (3) Plug-in-Hybride (PHEV), (4) batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), (5) Brennstoffzellenfahrzeuge sowie zwei Arten von Oberleitungs-Fahrzeugen, die entweder (6) mit einer zusätzlichen Batterie (O-BEV) oder (7) mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor ausgestattet sind (HO-Diesel).

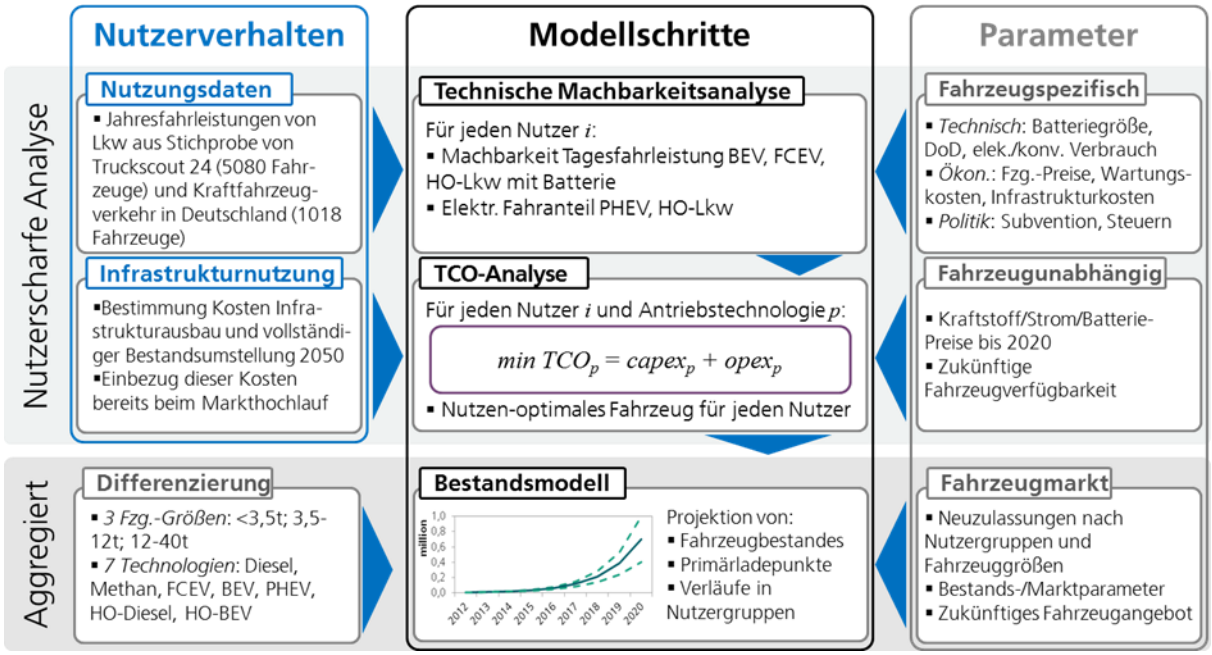
Das Modell liefert als Ausgang für jede Größenklasse einen Markthochlauf alternativer Antriebe. Die wichtigsten Ein- und Ausgangsdaten des Modells können für Pkw und Lkw Abbildung 3 und Abbildung 4 entnommen werden. Eine detaillierte Modellbeschreibung gibt es außerdem unter https://www.aladin-model.eu/.

Abbildung 3: Überblick über die Vorgehensweise im Modell ALADIN für Pkw



Quelle: (Fraunhofer ISI (2023)).

Abbildung 4: Überblick über die Vorgehensweise im Modell ALADIN für Nutzfahrzeuge



Quelle: (Fraunhofer ISI (2023)).

2.5.2.2 Umsetzung und Parametrisierung

Für die hier vorliegende Arbeit bildet ALADIN den Pkw- sowie Lkw-Verkehr ab. Für die Parametrisierung der Modelle wurde auf die Langfristszenarien aufgebaut. Das Grundgerüst der Szenarien basiert wie auch in der Modellierung der Industrie auf dem Szenario T45-Strom (siehe Fraunhofer et al. (2022)). Hierbei wurden ergänzend die Wasserstoffpreispfade aus Kapitel 2.3 vorgegeben. Außerdem wurde auf der einen Seite die Verfügbarkeit der Infrastruktur für Oberleitungsfahrzeuge begrenzt und auf der anderen Seite die der Wasserstoffinfrastruktur aus dem T45-H_2 Szenario der Langfristszenarien übernommen.

2.5.3 Methodik für andere Mobilitätssektoren

Als weitere Mobilitätssektoren sind noch die Schiene, Busse, der Schiffs- und der Flugverkehr zu beachten. Hierfür wurde jedoch keine eigene Modellierung vorgenommen, sondern auf bestehende Auswertungen zurückgegriffen, insbesondere auf die Langfristszenarien (siehe Fraunhofer et al. (2022)). Dort wird auf der Basis einer techno-ökonomischen Basis die verschiedenen Optionen zur Senkung der Emissionen berechnet und auf Basis der Entwicklung von Szenarien zur Entwicklung der Verkehrsleistung THG-Minderungsszenarien erstellt.

2.6 Modellierung der Energieversorgung

2.6.1 Einleitung

Über die letzten beiden Dekaden gesehen hat der Energiesektor seine THG-Emissionen deutlich senken können. Er hat aber mit 32 % den höchsten Anteil an Treibhausgasemissionen in Deutschland 2021 von allen Sektoren gehabt (berechnet mit Daten aus UBA (2022a)).

Wasserstoff ist im Umwandlungssektor vor allem aufgrund seiner verhältnismäßig guten Speicherbarkeit eine wichtige Option für die Bereitstellung flexibel steuerbarer Erzeugungsleistung. Dies gilt sowohl für die Versorgung von Strom als auch von Wärme in Wärmenetzen. Energiesysteme die maßgeblich bzw. ausschließlich auf fluktuierenden erneuerbaren Energien beruhen bedürfen Versorgungsoptionen bei wetterbedingt geringem erneuerbaren Dargebot. Wasserstoff kann eine Option für die Deckung von Residuallasten sein. Im Stromsystem konkurriert er dabei mit nachfrageseitigen Flexibilitätsoptionen, wie bspw. Lastmanagement, und anderen angebotsseitigen Flexibilitätsoptionen, wie bspw. dem überregionalen Lastausgleich über verstärkte Stromnetze. Gleichzeitig besteht eine sektorübergreifende Konkurrenz um die bestmögliche Allokation eines verhältnismäßig teuren Energieträgers.

2.6.2 Methodik

2.6.2.1 Überblick der Modellierung

Die Wasserstoffnachfrage im Umwandlungssektor wird mit dem Optimierungsmodell Enertile ermittelt. Enertile bestimmt zur stundenscharfen Deckung vorgegebener Strom-, Wärme-, und Wasserstoffnachfragen aus den klassischen Energienachfragesektoren Industrie, Verkehr, GHD, und Haushalte die kostenminimale Energiebereitstellungsinfrastruktur. Diese Infrastruktur beinhaltet für alle betrachteten Energieformen Umwandlungs- und Speichertechnologien und für Strom darüber hinaus vereinfachte Übertragungsnetze. Ein besonderer Fokus in der Modellierung liegt auf der hohen technologischen, zeitlichen und räumlichen Auflösung von erneuerbaren Energienpotenzialen. Einzelne Modellläufe betrachten meist die Europäische Union, das Vereinigte Königreich, Norwegen und die Schweiz für unterschiedliche Stützjahre bis zum Zieljahr der Treibhausgasneutralität.

Wasserstoff kommt in der Modellierung dabei eine Sonderrolle zu. Die Optimierung entscheidet nicht nur darüber, wie exogen vorgegebene Wasserstoffnachfragen möglichst kosteneffizient mittels Elektrolyse gedeckt werden können, sondern auch in welchem Umfang Wasserstoff als saisonales Speichermedium für den Umwandlungssektor selbst eingesetzt wird. Unter perfekter Voraussicht und Berücksichtigung der Kosten für Wasserstofferzeugung, -speicherung und -umwandlung ermittelt das Modell den Einsatz zur Strom- und Wärmebereitstellung. Für die Wasserstofferzeugung sind PEM-Elektrolyseure parametrisiert; die Umwandlungstechnologien beschränken sich auf Wasserstoffturbinen zur Stromerzeugung und Wasserstoffkessel zur Wärmeerzeugung.

2.6.2.2 Umsetzung und Parametrisierung

Für die Analysen in diesem Papier wird auf bereits in Lux et al. (2020) veröffentlichte Rechnungen zurückgegriffen. Die Rechnungen in dieser Veröffentlichung beschränken sich auf ein treibhausgasneutrales europäisches Energiesystem im Jahr 2050. In diesem Fall wurden Wasserstoffbedarfe aus den Nachfragesektoren nicht explizit, sondern mittelbar durch Zahlungsbereitschaften für Elektrolysewasserstoff modelliert. Die Kostenminimierung des angebotsseitigen Energiesystems ermittelt in diesem Fall die Wasserstoffmenge, die sie zur unterstellten Zahlungsbereitschaft der Nachfragesektoren kostendeckend bereitstellen kann. In einer Parameterstudie wurden in unterschiedlichen Modellläufen unterschiedliche Zahlungsbereitschaften zwischen 0 und 150 €/MWh für Wasserstoff angenommen. Dabei steht der „Wasserstoff-

verkauf" an die Nachfragesektoren immer in Konkurrenz mit einer Nutzung im Umwandlungssektor. Die Auswertung in diesem Papier stellt die modellinternen Schattenpreise für Wasserstoff dem Wasserstoffeinsatz im Umwandlungssektor in den unterschiedlichen Modellläufen gegenüber.

2.7 Berücksichtigung der Gebäudewärme

Der Wasserstoffeinsatz im Wärmesektor wird kontrovers diskutiert. Hier stehen mit einer Erhöhung der Energieeffizienz durch bessere Dämmung, mit Wärmpumpen und Wärmenetzen Alternativen zu Verfügung, die oft als wirtschaftlich sinnvoller angesehen werden (siehe SRU 2021). Deshalb weisen viele Studien keine oder eher geringere Potenziale für den Wasserstoffeinsatz hier aus (siehe Metastudien in Wietschel et al. (2021a) für Deutschland und die EU und Riemer et al. (2022) für weltweite Analysen). Der mögliche Wasserstoffeinsatz ersetzt dann überwiegend Erdgas, was eine recht teure Minderungsmaßnahme zur Reduzierung von Treibhausgasen ist (siehe Ueckerdt et al. (2021)). D. h. Wasserstoff wird hier nur dann in größeren Mengen zum Einsatz kommen, wenn dessen Preise sehr viel niedriger sind.

Eine Analyse von Studien zeigt, dass Wasserstoff bei den hier unterstellten Preispfaden in der Gebäudewärme wahrscheinlich keine große Rolle spielen wird. Eine aktuelle Studie im Auftrag des deutschen Wasserstoffrates (Thomsen et al. 2022) zeigt anhand von konkreten Fallstudien unter Berücksichtigung der verschiedenen Optionen zur Wärmeversorgung von Haushalten und Industrie, dass Wasserstoff nur dann eine relevante Rolle spielen wird, wenn die Wasserstoffpreise niedrig sind. Für die Raumwärme in Gebäuden sieht die Studie selbst im unterstellten Niedrigpreispfad von Wasserstoff von 90 €/MWh (Endkundenpreis, d. h. mit Verteilnetzkosten), dass in Gebieten ohne oder mit geringem Prozesswärmebedarf für die Industrie die Bereitstellung der Raumwärme überwiegend durch Wärmepumpen und Fernwärme erfolgt.

Eine ähnliche Schlussfolgerung zieht Knosala et al. (2022). Dort wird in einer techno-ökonomischen Studie die Rolle von Wasserstoff in der klimaneutralen Energieversorgung unter Berücksichtigung von Sanierungsmaßnahmen in deutschen Wohngebäuden im Vergleich zu strombasierten Ein- und Mehrfamilienhäusern untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass ab Werten von Grenzübergangspreisen Wasserstoff von 10 €/MWh für Einfamilienhäuser und 50 €/MWh für Mehrfamilienhäuser sich ein Break-even-Preis für Wasserstoff ergibt.

Man kann sich auch im Vergleich zum Gaspreis der Thematik nähern. Beim Gaspreis geht man davon aus, dass Wasserstoff in das Erdgasnetz eingespeist wird und dort Erdgas verdrängt. Der anlegbare Preis für Wasserstoff ist dann der Erdgaspreis plus der Preis für die CO_2-Zertifikate. In Frontier (2021) wird über diesen Ansatz ein anlegbarer Preis von ca. 40 €/MWh für Deutschland berechnet. In NREL (2021) wird vergleichbar für die USA vorgegangen. Die aktuellen Gaspreise liegen derzeit deutlich über 40 €/MWh, langfristig könnten sie sich aber wieder auf ein normales Niveau einpendeln, was z. B. die IEA in ihren Langfristpreisszenarien unterstellt (IEA 2021a). Da Wasserstoff derzeit noch überwiegend aus der Erdgasreformierung gewonnen wird, gehen damit auch aktuell hohe Wasserstoffpreise einher. Wasserstoff über Elektrolyse gewonnen ist derzeit auch sehr teuer aufgrund der hohen Strompreise.

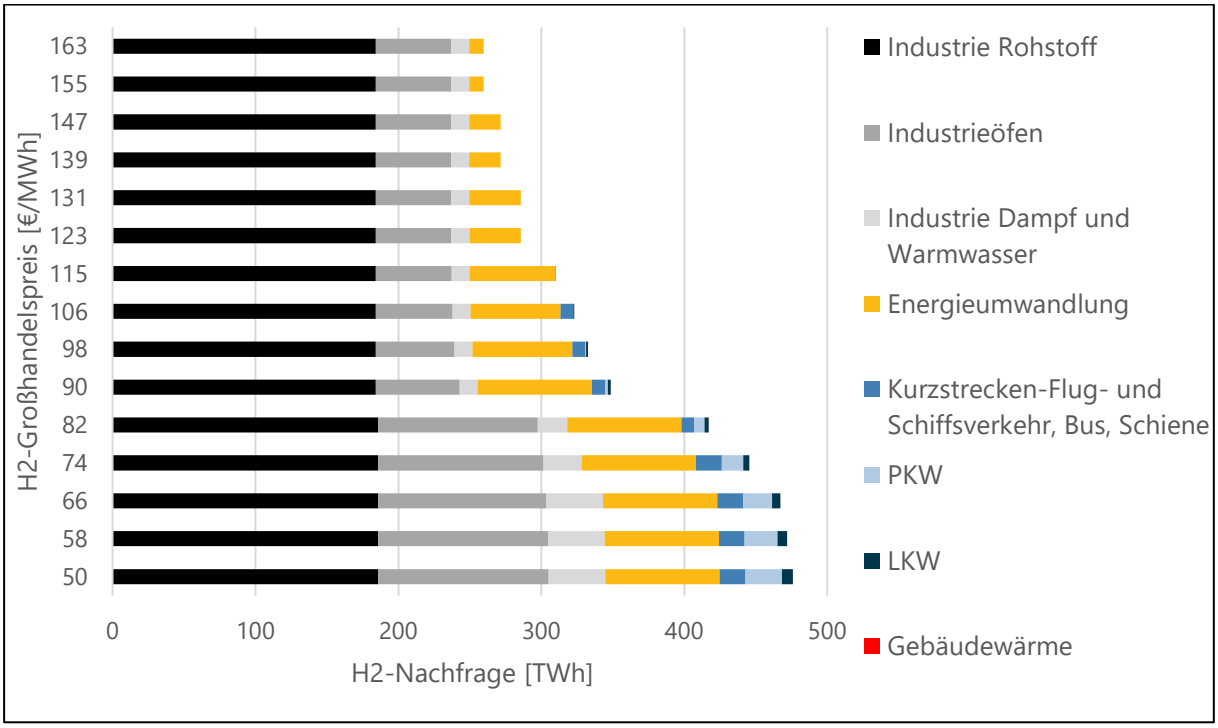
Beide Ansätze führen zu Werten, die sich unterhalb des günstigsten angenommenen Preispfads für Wasserstoff in dieser Studie befinden (siehe Kapitel 2.3. Deshalb ergibt sich kein Potenzial für den Wasserstoffeinsatz in der Gebäudewärme.

Einschränkend ist zu sagen, dass nicht in allen Gebäuden Wärmepumpen und Effizienzmaßnahmen zum Einsatz kommen können, beispielsweise aus Lärm- oder Denkmalschutzgründen. Weiterhin könnte eine Wasserstoffversorgung von Industrieunternehmen dazu führen, dass dieser dann auch vor Ort für Gebäudewärmenutzung verwendet wird. Einsatzpotenziale von Wasserstoff bieten sich in derartigen Fällen, wenn er sehr günstig zur Verfügung steht. Siehe hierzu auch Thomsen et al. (2022).

3 Ergebnis: Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland

Auf der Basis der vorgestellten Methodik werden im Folgenden die Ergebnisse einer preiselastischen Nachfrage nach Wasserstoff in dem Szenario, 2045 Treibhausgasneutral zu sein, nun vorgestellt. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Modellierung einer preiselastischen Nachfrage in 2045.

Abbildung 5: Preisabhängige Wasserstoffnachfrage in Deutschland 2045 beim Ziel Treibhausgasneutralität



Quelle: eigene Darstellung.

Es lässt sich festhalten, dass es eine hohe Nachfrage nach Wasserstoff in einem preisunelastischen Bereich in der Industrie gibt (die stoffliche Nutzung, die prozessbedingte Nutzung und die energetische Nutzung in Nischenanwendungen). Weiterhin existiert eine geringere Nachfrage, die preissensitiver ist, bei der Energieversorgung (Speicherung und Rückverstromung) sowie eine Nachfrage, die nur bei sehr geringen Preisen erfolgt (energetische Nutzung in der Industrie sowie in der Mobilität bei Pkw, Lkw, Bussen und Schiene). Auf die einzelnen Bereiche wird jetzt genauer eingegangen.

Ausgehend von hohen Wasserstoffpreispfaden zeigt sich in der Industriesimulation zunächst eine robuste Wasserstoffnachfrage in Höhe von etwa 250 TWh. Diese ist nicht preissensitiv und spiegelt die den Szenarien mitgegebene Randbedingung wider, dass Klimaziele notwendig einzuhalten sind. Dabei handelt es sich also um jene Wasserstoffnutzung für Rohstoffe (Chemie, 184 TWh bei Preisen bis 90 €/MWh) und Industrieöfen (wasserstoffbasierte Stahlerzeu-

gung, 55 TWh bei Preisen bis 98 €/MWh), die ohne heute bekannte und wirtschaftlich darstellbare technisch verfügbare Alternative entsteht. In diesem Bereich zeigt die Preisunelastizität, dass sehr hohe Treibhausgasminderungskosten existieren und zur Aufrechterhaltung einer heimischen Produktion eine hohe staatliche Förderung notwendig ist, damit diese im internationalen Wettbewerb bzw. wenn es alternative Produkte geben sollte, erhalten bleiben. Erst bei Wasserstoffpreisen von unter 90 €/MWh lässt der Förderbedarf signifikant nach und bei anderen energetischen Anwendungen in der Industrie wird eine zusätzliche Nachfrage induziert. Bis zur niedrigsten Preisstufe kommen so in 2045 nochmal etwa 100 TWh hinzu. Ergänzend kommt dann auch die energetische Nutzung von Wasserstoff in der Industrie zur Dampferzeugung (bis zu 40 TWh Nachfrage) hinzu.

Im Verkehrssektor ergibt sich eine hohe Wasserstoffnachfrage in Form von synthetischen Kraftstoffen für den internationalen Flug- und Schiffsverkehr von 209 TWh. Wie oben aber erwähnt wird davon ausgegangen, dass dies in den Langfristszenarien durch die vorhandenen Biomassepotenziale gedeckt wird (Fraunhofer ISI 2022). Deshalb wird sie nicht in der Abbildung 5 dargestellt. Ähnlich wie für gewisse Industrieanwendungen gibt es hier nach heutigem Kenntnisstand keine Alternativen zur Emissionsminderung.

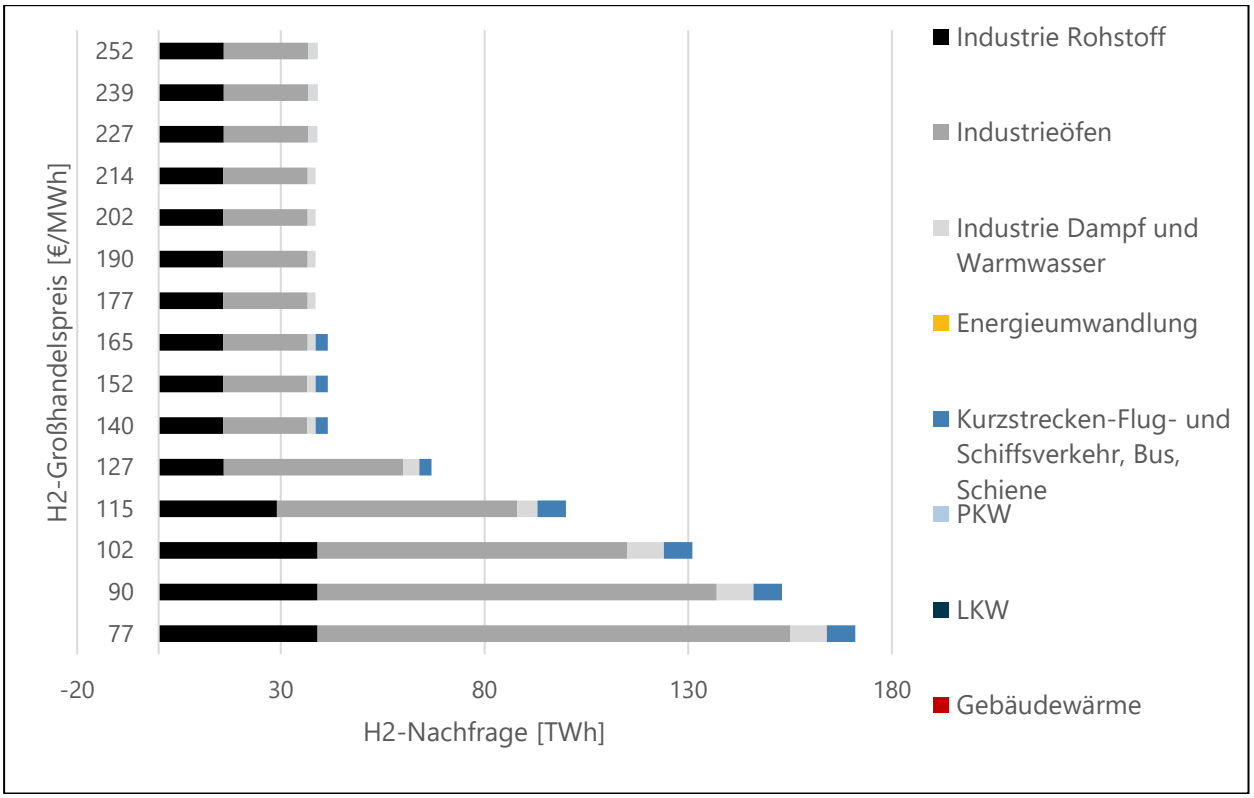
Ein direkter Wasserstoffeinsatz bei anderen Mobilitätsanwendungen wird erst bei sehr niedrigen Preisen gesehen. Diese sind der Wasserstoffeinsatz in Brennstoffzellen-Pkw und -Lkw sowie in Bussen und auf heute noch nicht elektrifizierten Schienenabschnitten sowie bei Flug- und Schiffsverkehr unter 1000 km (in der Summe bei der niedrigsten Preisstufe 52 TWh). Wenn die niedrigen H_2-Preise bei den Berechnungen nicht unterstellt werden, so wird überwiegend die Direktelektrifizierung mit Batterien als wirtschaftlich sinnvoller bewertet.

Im Energieumwandlungssektor reagiert die Nachfrage auf Preisvariationen stärker als bei der Industrie und im Verkehrssektor. Dies hängt damit zusammen, dass es hier eine Reihe an Alternativen gibt. Bei hohen Wasserstoffpreisen ist es günstiger, mehr Erneuerbare auszubauen und Stromüberschüsse in Kauf zu nehmen und mehr Strom in Wärmenetzen einzusetzen. Deshalb kann die Nachfrage nach Wasserstoff bei hohen Preisen sehr gering werden, allerdings für die Überbrückung von Situationen mit kalter Dunkelflaute wird auch dann eine Nachfrage gesehen, wenn sie auch klein ist. Sinken dann die Wasserstoffpreise wird der Einsatz im Energiesystem immer attraktiver und er kann dann bei der niedrigsten Preisstufe 80 TWh betragen.

Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass ein Teil der Wasserstoff- und Derivatenachfrage auch durch biogene Quellen substituiert werden könnte. Die Zuteilung der beschränkten, nachhaltig zur Verfügung stehenden Biomassepotenziale wird in den Langfristszenarien auf den internationalen Flug- und Schiffsverkehr vorgenommen, der fast die gesamte deutsche Biomassepotenziale in einer Höhe von 250 TWh des Jahres 2045 (Fraunhofer ISI 2022) benötigt. Dies Zuteilung wird in diesem Working Paper übernommen. In Szenarien von anderen Studien (z. B. Agora und BDI) wird das beschränkte Potenzial an nachhaltiger Biomasse teilweise in anderen Sektoren eingesetzt (Industrie, Wärme). Das gesamte verfügbare Biomassepotenzial liegt dabei in einer ähnlichen Größenordnung. Da auch der internationalen Flug- und Schiffsverkehr zur Dekarbonisierung stark auf Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivate angewiesen ist, würde die in Abbildung 5 dargestellte Potenzialkurve kaum verändert, wenn eine andere Sektorenzuteilung der Biomassenpotenziale erfolgt. Im Anhang B befindet sich Abbildung 8, die die gesamte preiselastische Nachfrage nach Wasserstoff und Biomasse darstellt

In Abbildung 6 wird für 2030 die Wasserstoffnachfrage in Abhängigkeit der Preise dargestellt. Die Nachfrage insgesamt ist recht niedrig, gerade bei mittleren und hohen Preisen. Sie wird im Wesentlichen von Nachfragen aus der Industrie dominiert. Die Rohstahlproduktion wandelt sich bereits bis 2030 stark zu wasserstoffbasierter Direktreduktion (für die Zielerreichung 2030 notwendig, insgesamt Wasserstoffnachfrage für Industrieöfen bis zu einem Preisniveau von 140 €/MWH von 21 TWh, bei niedrigeren Preisen dann noch deutlich ansteigend bis auf 116 TWh). Weiterhin wird noch eine stoffliche Nutzung von 16 TWh Wasserstoff bis Preisen herunter auf 140 €/MWh berechnet. Bei niedrigen Preisen sieht man noch einen direkten Wasserstoffeinsatz im nationalen Flug-, Schiffs-, Bus- und Schienenverkehr.

Abbildung 6: Preisabhängige Wasserstoffnachfrage in Deutschland 2030 beim Ziel Treibhausgasneutralität



Quelle: eigene Darstellung.

4 Kritische Würdigung und Ausblick

4.1 Kritische Würdigung des Ansatzes

Generell ist bei derartigen Untersuchungen zu sagen, dass die Ergebnisse stark von den Rahmenannahmen wie beispielsweise den klimapolitischen Zielen, oder der unterstellten Entwicklung der techno-ökonomischen Parametern, wie z. B. Investitionen in Direkt-Eisenreduktionsanlagen in der Stahlindustrie oder deren Lebensdauer, abhängt. Deren künftige Entwicklung ist mit Unsicherheiten behaftet.

Rückkopplungseffekte zwischen Angebot und Nachfrage werden nicht berücksichtigt. So kann eine zusätzliche Nachfrage nach Wasserstoff gedeckt durch Elektrolyseure zu höheren Strompreisen führen. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Wettbewerbssituation von Wasserstoff und Strom in den Nachfragesektoren. Da aber bei der Entwicklung der preiselastischen Wasserstoffnachfrage in dem gewählten Ansatz der Strompreis konstant gehalten wird, wird dieser Effekt außer Acht gelassen. Man könnte allerdings über verschiedene Strompreisszenarien derartige Effekte methodisch integrieren.

Weiterhin ist anzumerken, dass Rückkopplungen zu anderen Energieträgern, z. B. eine erhöhte Wasserstoffnachfrage im Verkehr auf die Benzin- und Dieselpreise, nicht betrachtet wird. Als weitere Einschränkung ist zu erwähnen, dass unterstellt wird, dass es bei der Nachfrage in den Sektoren nicht zu einer Verlagerung ins Ausland kommt. Dies könnte gerade bei hohen Wasserstoffpreisen durchaus der Fall sein, z. B. bei der Industrie. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass die Rahmendbedingungen durch die Politik so gesetzt werden, dass die Industrieprodukte in Deutschland gehalten werden. Dies ist gerade bei den hohen Wasserstoffpreisszenarien kritisch zu würdigen. Ob es bei höheren Wasserstoffpreisen auch zu einem generellen Nachfragerückgang kommt, wurde ebenfalls ausgeklammert.

Bei den betrachtenden Anwendungen wurde der Einsatz von Wasserstoff in Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung nicht berücksichtigt, wobei hier durchaus interessante Potenziale liegen können (siehe Thomsen et al. (2022) und Fraunhofer ISI et al. (2022)). Hier sollten weitere Analysen zu deren Integration im Ansatz durchgeführt werden.

Kohlendioxid-Abscheidung und Speicherung (CCS) wurde als Minderungstechnologien in den Analysen weitgehend ausgeklammert. Studien mit Szenarien, in denen CCS eine größere Rolle zubilligen, kommen zu deutlich geringeren Bedarfen nach Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen (siehe Studienübersicht in Wietschel et al. 2021a). Damit würden auch die Wasserstoffpreise niedriger sein. Die mögliche Rolle von CCS als Game Changer sollte deshalb aufmerksam beobachtet und weiter analysiert werden.

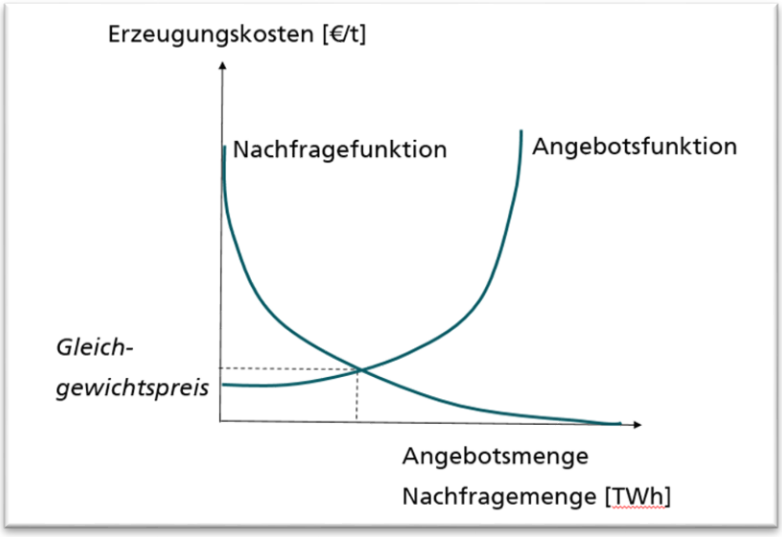
4.2 Ausblick: Ermittlung von Wasserstoffpreisen und Handelsflüssen

Derzeit geht man davon aus, dass Deutschland aber auch andere Länder wie Japan, ihre Wasserstoffnachfrage nicht selber decken können (siehe zur deutschen Situation Fraunhofer ISI (2022), zur deutschen und europäischen Situation Wietschel et al. (2021a), zur internationalen

Situation Irena 2022) Wie sich Wasserstoffpreise künftig einstellen könnten und internationale Handelsströme sich etablieren könnten, wird derzeit in verschiedenen Studien und auch in HYPAT untersucht.

Ein etablierter methodischer Ansatz zur Ermittlung von Preisen auf Märkten, gerade auch auf Energiemärkten, sind partielle Gleichgewichtsmodelle. Bei ihnen wird nur der Markt betrachtet, der direkt betroffen ist und die Rückkopplung verschiedener Märkte werden nicht betrachtet. Preisabhängige Angebots- und Nachfragekurve werden dabei benutzt, um die Preis- und Mengenänderung darzustellen und einen Gleichgewichtspreis zu identifizieren (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Preisbildung auf vollkommenen Märkten



Quelle: eigene Darstellung.

Bei partiellen Gleichgewichtsmodellen werden langfristige und kurzfristige Ansätze unterschieden, die sich über die einbezogenen Ausgaben differenzieren. Bei den langfristigen Modellen werden langfristige Grenzkosten unterstellt, die Investitionen (Capex) und variable Ausgaben (Opex) enthalten. Kurzfristige Modelle beziehen nur die variablen Ausgaben mit ein.

Die Zielsetzung von langfristigen partiellen Gleichgewichtsmodellen ist es für Investoren, Investitionsentscheidungen zu bewerten bzw. für politische Entscheidungsträger Strategiempfehlungen abzugeben. Besonders gut geeignet sind sie bei Greenfield-Ansätzen, bei denen keine Investitionen bisher stattgefunden haben. Dieser Fall liegt bei der vorliegenden Problemstellung von international gehandelten Wasserstoff- und Handelsströmen vor. Kurzfristige Modelle eigenen sich dafür, kurzfristige Preisentwicklungen zu analysieren, benötigen aber dafür ein bestehendes Produktions- und Transportsystem.

Die partielle Gleichgewichtsanalyse kann bei vollkommenem Wettbewerb, monopolistischer Konkurrenz, Oligopol, Monopol und Monopson angewendet werden und die Effekte von staatlichen Eingriffen berücksichtigen. Dies ist wichtig, weil Marktmacht, Marktorganisation und Regulierung nach derzeitigem Kenntnisstand bei Wasserstoffmärkten eine wichtige Rolle spielen könnten.

Wenn man sich die Studienlage hierzu zum Themenfeld Wasserstoff anschaut, dann haben sich auf der Angebotsseite einige Studien modellhaft mit den Herstellkosten von Wasserstoff- oder

Syntheseprodukten auf der Basis von erneuerbarer Stromerzeugung auseinandergesetzt (siehe die Studienübersicht in Wietschel et al. 2021b). Diese Studien ermitteln für einen realen oder unterstellten Standort die Herstellkosten. Andere Studien gehen weiter und ermitteln optimierte Herstellkosten für alle Standorte einer Region oder eines Landes und erhalten durch eine nach Kosten aufsteigende Sortierung eine Angebotskurve für Wasserstoff oder Syntheseprodukte. Über die Aggregation aller betrachteten Regionen bzw. Länder kann man eine weltweite, kostenbasierte Angebotsfunktion erhalten. Siehe zu entsprechenden Ansätzen Pfennig et al. (2021), Forschungszentrum Jülich (2021), Brändle et al. (2021), Hydrogen Council & McKinsey (2022) und IRENA (2022). Diesen wird in einigen Fällen eine feste Wasserstoffnachfrage gegenübergestellt, siehe z. B. Lux et al. (2021), Schönfisch et al. (2022) oder IRENA (2022). Über den Einbezug von den Kosten des Transportes und einer Wasserstoffnachfrage lassen sich dann auch mögliche Handelsströme zwischen anbietenden und nachfragenden Ländern ermitteln, siehe z. B. Heuser et al. (2019) oder IRENA (2022). Allerdings treffen diese Studien keine Aussagen über die Markt- und Preisentwicklung, da sie sich auf die Analyse der Herstellungs- und Transportkosten beschränken und die Nachfrage dabei als konstant vorgegeben wird.

Neben den Ansätzen zur Bestimmung von Herstellkosten existieren noch Ansätze auf der Basis von partiellen Gleichgewichtsmodellen (Schönfisch et al. 2022, Riera et al. 2021). In diesen Ansätzen stellt jeder Teil der Lieferkette (z. B. Elektrolyse, Pipeline, Schiffstransport, Verflüssigung usw.) einen Agenten dar, welcher seine Profite maximieren will. Sie basieren auf Vollkostenbetrachtungen. Damit lassen sich beispielsweise angebotsseitige Monopol- oder Oligopolsituationen abbilden. Während in partiellen Gleichgewichtsmodellen die Nachfrage üblicherweise preisabhängig ist, vereinfachen die identifizierten Modelle bei Wasserstoff hier und unterstellen ebenfalls eine preisunelastische Nachfrage.

Der in diesem Working Paper vorgestellte Ansatz eignet sich damit nun dafür, in bestehenden Ansätzen von der vereinfachten Annahme einer unelastischen Nachfrage zu einer elastischen Nachfrage zu kommen. In Wietschel et al. (2021b) finden sich hierzu weitere Ausführungen. Derzeit wird ein langfristiges partielles Gleichgewichtsmodell entwickelt, mit dem Preisszenarien und Handelsströme ermittelt werden können.

Eine Herausforderung ist dabei, dass der Aufwand zur detaillierten Erhebung von preiselastischen Nachfragefunktionen, so wie er modellgestützt für Deutschland in diesem Papier durchgeführt wurde, sehr hoch ist. Somit könnten einfache Ansätze notwendig werden. Ein solcher wird im Folgenden beschrieben.

Der generelle Ansatz der langfristigen Nachfragefunktion lässt sich auch auf andere Regionen und Länder übertragen, für die keine Simulationsmodelle des Energiesystems in der Detailstufe verfügbar sind. Wie in den Energiesystemmodellen wird die Technologieumstellung langfristig durch Klimaambition getrieben. Wie oben ausgeführt wird die Entscheidung zur Dekarbonisierungsoption einer Technologie vor allem durch die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit der Optionen bestimmt. Die notwendigen Umstellungen auf dekarbonisierte Prozesse und Optionen werden durch Annahmen (bspw. die Treibhausgasminderungspfade, die Nachfrage an die Energie und Industrieprodukte) getrieben. Dies bestimmt weiterhin die nachgefragte Wasserstoffmenge für die energetische Nutzung in allen Endsektoren sowie die stoffliche Anwendung, z. B. in der Industrie. Die Grenzkosten bzw. Zahlungsbereitschaft für die wasserstoffbasierte(n) Option(en) werden anhand der verschiedenen Konkurrenzoptionen abgeleitet. Die möglichen Optionen in den jeweiligen Anwendungsbereichen werden technologisch und ökonomisch

analysiert. Dabei werden CAPEX und OPEX innerhalb der kompletten Lebensdauer der Anlage berücksichtigt. Anders als in den Sektormodellen werden keine Wasserstoffpreise unterstellt, sondern es wird aus Grenzkosten eine Nachfragefunktion von Wasserstoff berechnet. Durch Abgleich der Ergebnisse für Deutschland aus dem modellbasierten Ansatz in diesem Working Paper werden die entscheidenden Berechnungsparametern der Nachfragefunktion für Wasserstoff identifiziert und können so in das langfristige partielle Gleichgewichtsmodell integriert werden. Region- und länderspezifischen Parametern (z. B. Energiepreise) werden für die Übertragung der Nachfragefunktion entsprechend angepasst.

5 Zusammenfassung, Diskussion und Schlussfolgerungen

Wasserstoff und Wasserstoffderivate sind wichtige Bausteine zur Erreichung der klimapolitischen Ziele, gerade wenn es um Treibhausgasneutralität geht. Allerdings existiert eine kontroverse Debatte darüber, bei welchen Anwendungen Wasserstoff und seine Derivate in welchem Umfang eingesetzt werden sollten. Neben der Ambitioniertheit von Klimaschutzzielen ist ein entscheidendes Kriterium dabei der Wasserstoffpreis und die damit verbundene Konkurrenzfähigkeit des Wasserstoffeinsatzes im Vergleich zu anderen Optionen wie beispielsweise der direkten Elektrifizierung.

Vor dieser Problemstellung verfolgt die vorliegende Studie das Ziel, einen methodischen Ansatz zu entwickeln und auf Deutschland anzuwenden, mit dem erstmals eine Nachfrage von Wasserstoff und seinen Derivaten unter der Zielsetzung der Treibhausgasneutralität in 2045 in Abhängigkeit von möglichen Wasserstoffpreispfaden erfolgt.

Die Preiselastizitäten der Wasserstoffnachfrage in den einzelnen Anwendungsbereichen Industrie, Verkehr und Energieumwandlung werden dabei mit techno-ökonomischen, agentenbasierten Simulationsmodellen oder optimierenden Modellen ermittelt. Diese bilden die alternativen Möglichkeiten zur Erreichung der Klimaziele ab und bewerten die Optionen unter wirtschaftlichen Kriterien. Also z. B., ob es wirtschaftlich sinnvoller ist, Elektro-Pkw einzusetzen oder Brennstoffzellen-Pkw, in Abhängigkeit von Wasserstoffpreispfaden, die exogen vorgegeben werden. Für bestimmte Bereiche, der Gebäudewärme und dem internationalen Flug- und Schiffsverkehr wird auf eine eigene Modellierung verzichtet und auf andere Studienergebnisse zurückgegriffen.

Ein Kernergebnis ist, dass ein sehr wichtiger Treiber für die Nachfrage von Wasserstoff die sogenannten No-Regret-Anwendungen sind. Dies sind Anwendungen, bei denen nach heutigem Kenntnisstand kaum ökonomisch attraktive andere Technologieoptionen zur Verfügung stehen, um die ambitionierten Treibhausgasminderungsziele von Deutschland zu erreichen. Sie sind somit weitgehend preisunelastisch. Dies sind insbesondere die stoffliche und energetische Nutzung in bestimmten Anwendungen der Industrie (Stahlsektor, Grundstoffchemie). Die Berechnungen zeigen, dass die Nachfrage hier in 2045 250 TWh beträgt, was 10 % des heutigen Endenergiebedarfes von Deutschland entspricht. Alleine hierfür müssten rund 20 GW an Elektrolyseleistung nur für die Deckung der Nachfrage in Deutschland installiert werden unter der Annahme, dass ein Drittel heimisch hergestellt wird, was eine enorme Herausforderung ist. Zur Einordnung: Anfang 2022 waren weltweit nur 0,5 GW an Elektrolyseleistung installiert (IEA 2022). Der Aufbau einer Wasserstoffproduktion ist zeit- und kapitalintensiv. Die Notwendigkeit, ein hohes Ausbautempo vorzulegen, wenn die gesteckten politischen Ziele zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft erreicht werden sollen, wird vielfach betont (siehe Hydrogen Council (2021), Hydrogen Council (2022), IEA (2021b)).

Der internationale Flug- und Schiffsverkehr weist ebenfalls eine hohe, preisunelastische Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen zur Treibhausgasminderung auf (209 TWh in 2045). Es wird in dieser Studie aber davon ausgegangen, dass dies durch biogene Quellen gedeckt wird.

Weil diese Sektoren somit wohl vorrangig Wasserstoff und biogene Syntheseprodukte nachfragen werden, folgt daraus aber auch, dass günstiger Wasserstoff in den anderen Sektoren eher nicht zur Verfügung stehen wird. Gerade bei weiteren Verkehrsanwendungen (Pkw, Lkw, Busse, Schienenfahrzeuge sowie der nationale Flug- und Schiffsverkehr), bei denen die direkte Elektrifizierung oft eine Alternative bietet, zeigen aber die Berechnungen, dass Wasserstoff nur dann in größerem Umfang zum Einsatz kommt, wenn er sehr günstig zur Verfügung steht. Dies ist erst bei Wasserstoffpreisen im Großhandel von unter 90 €/MWh in 2045, je nach Anwendung sogar deutlich darunter, der Fall. Dies gilt auch für den Bereich der energetischen Nutzung von Wasserstoff in der Industrie zur Dampf- und Wärmeerzeugung und erst recht für den Gebäudewärmebereich. Bei Preisen von 50 €/MWh ergeben die Analysen eine Gesamtwasserstoffnachfrage von 476 TWh in 2045.

Allerdings sind Preisregionen von unter 90 €/MWh und niedriger kaum zu erwarten. Selbst reine Kostenbetrachtungen zeigen, dass dies derzeit nur an sehr günstigen Standorten der Welt als realisierbar erscheint. Auf die in diesen Studien ausgewiesenen Herstellkosten kommen aber u. a. noch Transportkosten, Gewinnmargen, Kapitalkosten, die Länderrisiken abbilden, Vertriebskosten, F&E-Kosten etc. hinzu. Weiterhin sind die Produktionsmengen an den sehr günstigen Standorten begrenzt und reichen nach derzeitigem Kenntnisstand nicht aus, um die sich abzeichnende weltweite Nachfrage zu decken. Hierfür muss auf Standorte mit höheren Produktionskosten zurückgegriffen werden. Sodass nach heutigen Kenntnissen von Marktpreisen von Wasserstoff von deutlich über 90 €/MWh in 2045 ausgegangen werden kann.

Es erscheint deshalb nicht sinnvoll eine größer angelegte Förderung des Wasserstoffeinsatzes in den Bereichen der Gebäudewärme, des landgebundenen Verkehrs und der energetischen Nutzung in der Industrie weiter zu verfolgen. Wobei es allerdings in bestimmten Nischenanwendungen hiervon Ausnahmen geben kann. Beispielsweise bei der Gebäudewärmeversorgung, wenn eine nahegelegene Wasserstoffnachfrage an einem Industriestandort vorliegt.

Es gibt in der Energieumwandlung einen interessanten Preisbereich im Großhandel (von 130 bis 90 €/MWh), in dem die Nachfrage nach Wasserstoff recht preiselastisch ist. Dies hängt damit zusammen, dass bei dem angestrebten Ausbau der erneuerbaren Energie Optionen zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage notwendig sind. Hier stehen die Optionen der Nutzung von Wasserstoffspeichern mit Rückverstromung u. a. in Konkurrenz mit Optionen der Flexibilitätserhöhungen der Nachfrage. Die Flexibilitätsoptionen sind u. a. Wärmpumpen, Wärmenetze oder Elektro-Fahrzeuge. Weiterhin kann auf andere Speicheroptionen zurückgegriffen werden und es besteht auch die Möglichkeit, die Erneuerbaren stärker auszubauen und deren stärkere Abregelung in Kauf zu nehmen. Hier werden somit in Zukunft die Wasserstoffpreise darüber mitentscheiden, in welchem Umfang er künftig eingesetzt wird.

Die Ergebnisse für das Jahr 2030 zeigen, dass die Wasserstoffnachfrage zu diesem Zeitpunkt noch nicht sehr hoch sein wird (etwas mehr als 40 TWh). Dominiert wird diese Wasserstoffnachfrage von bestimmten Industrieanwendungen. Auf diese sollte sich eine Förderung in den nächsten Jahren fokussieren. Nur wenn sehr niedrige Großhandelspreise unterstellt werden, steigt die Nachfrage in 2030 deutlich an, was aber als wenig realistisch eingeordnet werden kann.

Literaturverzeichnis

AGEB (2022): Bilanz 2020, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2020/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020, zuletzt geprüft: am 23.8.2022.

Blanco, H.; Nijs, W.; Ruf, J.; Faaij, A. (2018): Potential for hydrogen and Power-to-Liquid in a low-carbon EU energy system using cost optimization. In Applied Energy 232 (2018) 617-639. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.216.

Brändle, G.; Schönfisch, M.; Schulte, S. (2021): Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen. In: Applied Energy 302 (2021) 117481. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117481.

Bundesregierung (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.). Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16, zuletzt geprüft am 12.11.2020.

Deutsch, M.; Maier, U.; Perner, J.; Unteutsch, M.; Lövenich, A. (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Hg. v. Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics: Berlin, Köln.

European Commission (2020): A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brüssel: European Commission.

Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Herbst, A.; Elsland, R.; Klingler, A.L.; Manz, P.; Eidelloth, S. (2018): A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. In: Energy Strategy Review, Volume 22, pp. 237-254.

Forschungszentrum Jülich (Hg.) (2021): H_2Atlas-Africa. Online verfügbar unter https://www.h2atlas.de/en/, zuletzt aktualisiert am 13.11.2022, zuletzt geprüft am 13.11.2022.

Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu, Technische Universität Berlin (2022): Langfristszenarien. Webseite Downlaod: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php.

Fraunhofer ISI (2023): Aladin Modell zur Simulation der Marktdiffusion alternativer Antriebe im Verkehr. Online verfügbar unter https://www.aladin-model.eu/, zuletzt aktualisiert am 13.01.2023, zuletzt geprüft am 13.01.2023.

Frontier (2021): Power to Gas, Missing Money und der Wärmesektor als wichtiger „Heimatmarkt" beim Markthochlauf in Deutschland – Ein Diskussionsbeitrag zur Nationalen Wasserstoffstrategie („NWS"). Frontier economics.

Gnann, T.; Plötz, P.; Kühn, A.; Wietschel, M. (2015): Modelling Market Diffusion of Electric Vehicles with Real World Driving Data – German market and Policy options. In: Transportation Research Part A, Vol. 77, July 2015, pp. 95-112.

Gnann, T.; Speth, D.; Krail, M..; Wietschel, M. (2022): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Langfristszenarien 3, T45-Sznarien) – Modul Verkehr. Studie im Auftrag des BMWi.

Hank, C.; Sternberg, A.; Köppel, N.; Holst, M.; Smolinka, T.; Schaadt, A.; Henning, H.-M. (2020): Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable electricity. Retrieved from 10.1039/d0se00067a.

Hampp,J.; Düren, M.; Brown, T. (2021): Import Options for Chemical Energy Carriers from Renewable Sources to Germany. ArXiv:2107.01092 [Physics], July. http://arxiv.org/abs/2107.01092.

Heuser, P.-M. et al. (2019): Techno-economic analysis of a potential energytrading link between Patagonia and Japan based on CO2free hydrogen. In: International Journal of Hydrogen Eenergy 44 (2019) 12733e12747.

Hobohm, J.; auf der Maur, A.; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Koziel S.; Krei-Delmeyer, S. et al. (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen

Biomasseforschungszentrums DBFZ. Endbericht. Prognos AG; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, sicherheit- und Energietechnik (UMSICHT); Deutsches Biomasseforschungszentrum: Berlin.

Hydrogen Council (2020): Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective. Hydrogen Council.

Hydrogen Council (2021): Hydrogen Insights – A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Hydrogen Council.

Hydrogen Council (2022): Hydrogen Insights 2022 – An updated perspective on hydrogen market development and actions required to unlock hydrogen at scale. Hydrogen Council and McKinsey & Company.

Hydrogen Council & McKinsey (2022): Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization. Hydrogen Council.

IEA (2021a): World Energy Outlook 2021. Online verfügbar unter https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021, zuletzt geprüft am 15.11.2022.

IEA (2021b): Global Hydrogen Review 2021. International Energy Agency: Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/e57fd1ee-aac7-494d-a351-f2a4024909b4/GlobalHydrogenReview2021.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2021.

IEA (2022): Electrolysers - Technology deep dive. https://www.iea.org/reports/electrolysers, zuletzt geprüft am 23.1.2023.

IRENA (2022): Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal – Part I. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi: IRENA.

JRC (2019): Hydrogen use in EU decarbonisation scenarios. Joint Research Centre.

Knosala, K.; Langenberg, L.; Pflugradt, N.; Stenzel, P.; Kotzur, L.; Stolten, D. (20022): The role of hydrogen in German residential buildings. In: Energy & Builidngs 276 (2022) 112480.

Lux, B.; Pfluger, B. (2020): A supply curve of electricity-based hydrogen in a decarbonized European energy system in 2050. Applied Energy, 269, 115011. Permalink: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115011.

Lux, B.; Gegenheimer, J.; Franke, K.; Sensfuß, F.; Pfluger, B. (2021): Supply curves of electricity-based gaseous fuels in the MENA region. In: Computers & Industrial Engineering, S. 107647. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107647.

Monopolkommission (2021): Energie 2021: Wettbewerbschancen bei Strombörsen, E-Ladesäulen und Wasserstoff nutzen. 8. Sektorgutachten der Monopolkommission gemäß § 62 EnWG 2021.

NREL (2021): The Technical and Economic Potential of the H2@Scale Concept within the United States. National Renewable Energy Laboratory. Retrieved November 8, 2021, from https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Die-Wasserstoffstrategie-2-0-fuer-DE.pdf, zuletzt geprüft am 23.1.2023.

Pfennig, M.; Gerhardt, N.; Pape, C.; Böttger, D. (2017): Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H_2-Importen aus internationalen Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projekts: Klimawirksamkeit Elektromobilität – Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Teilbericht. Bremerhaven: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES.

Pfennig, M.; von Bonin, M.; Gerhardt, N. (2021): PTX-Atlas - Weltweite Potenziale für die Erzeugung von grünem Wassrstoff und kliamneutralen synthetsichen Kraft- und Brennstoffen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: DeV-KopSys. Kassel: Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE.

Plötz, P; Gnann, T.; Wietschel, M. (2014): Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data – Part I: Model structure and validation Elsevier. In: Ecological Economics Vol 107, Nov 2014, pages 411-42.

Prognos (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer-Rahmen für synthetische Brennstoffe“. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Quarton, C. J.; Tlili, O.; Welder, L.; Mansilla, C.; Blanco, H.; Heinrichs, H.; Leaver, J.; Samsatli, N. J.; Lucchese, P.; Robinius, M.; Samsatli, S. (2020): The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios. In: Sustainable Energy & Fuels, 4 (1), pp. 80-95.

Repenning et al. (2021): Projektionsbericht 2021 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. Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf.

Riemer, M.; Zheng, L.; Pieton, N.; Eckstein, J.; Kunze, R.; Wietschel, M. (2022): Future hydrogen demand: A cross-sectoral, multiregional meta-analysis. HYPAT Working Paper 04/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (ed.).

Riera, J.; Barner, L.; Holz, F.; Rathje, L.; Sogalla, R.; Hirschhausen, C. (2021): The global hydrogen market 2050 – A model-based comparison of pathways and policy constraints. IAEE Proceedings. Online verfügbar unter: http://www.iaee.org/proceedings/article/17189, zuletzt geprüft am 13.1.2023.

Schönfisch, M. (2022): Charting the Development of a Global Market for Low-Carbon Hydrogen. EWI Working Paper No 22/03.

Sensfuß, F. et al. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Treibhausgasneutrale Szenarien; Kurzzusammenfassung. Online verfügbar unter https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_Executive_Summary_2021_05_19_v19.pdf, zuletzt geprüft am 23.1.2023.

SRU (2021): Wasserstoff im Klimaschutz. Klasse statt Masse. Stellungnahme.

Timmerberg, S.; Kaltschmitt, M. (2019): Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central Europe as blend in existing pipelines – Potentials and costs. In: Applied Energy 237 (2019), pp. 798-809.

Thomsen, J.; Fuchs, N.; Meyer R.; Wanapinit, N.; Ulffers, J.; Bavia Bampi, B.; Lohmeier, D.; Prade, E.; Gorbach, G.; Sanina, N.; Engelmann, P.; Herkel, S.; Kost, C.; Braun, M.; Lenz, M. (2022): Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Freiburg, Kassel: Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEE (Hrsg.)

Ueckerdt, F.; Bauer, C.; Dirnaichner, A. et al. (2021): Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. In: Nat. Clim. Chang. 11, 384–393 (2021). https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7.

Umweltbundesamt (2022a): Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Porzent. Pressemitteilung des Umweltbundesamtes. Internet Download https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent, zuletzt geprüft am 23.1.2023.

Wietschel, M.; Zheng, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pfluger, B. (2021a): Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG.

Wietschel, M., Eckstein, J.; Riemer, M.; Zheng, L.; Lux, B: Neuner, F.; Breitschopf, B.; Pieton, N.; Nolden, C.; Pfluger, B.; Thiel, Z.; Löschel, A. (2021b): Import von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten: von Kosten zu Preisen. HYPAT Working Paper 01/2021. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.)

World Energy Council (2021): Hydrogen Demand and Cost Dynamics. Working Paper.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die eingesetzte Methodik 8
Abbildung 2: Untersuchte Preispfade (Großhandel) von Wasserstoff 9
Abbildung 3: Überblick über die Vorgehensweise im Modell ALADIN für Pkw 13
Abbildung 4: Überblick über die Vorgehensweise im Modell ALADIN für Nutzfahrzeuge 14
Abbildung 5: Preisabhängige Wasserstoffnachfrage in Deutschland 2045 beim Ziel Treibhausgasneutralität 18
Abbildung 6: Preisabhängige Wasserstoffnachfrage in Deutschland 2030 beim Ziel Treibhausgasneutralität 20
Abbildung 7: Preisbildung auf vollkommenen Märkten 22
Abbildung 8: Preisabhängige Nachfrage nach Syntheseprodukten (Wasserstoff und biogene) in Deutschland 2045 beim Ziel Treibhausgasneutralität 36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technologische Konkurrenzsituation in den Sektoren Industrie und Gewerbe-Handel-Dienstleistungen 32
Tabelle 2: Technologische Konkurrenzsituation im Sektor Verkehr 33
Tabelle 3: Technologische Konkurrenzsituation im Umwandlungssektor 34

Anhang A

Die folgenden Tabellen stellen die Konkurrenzsituation in den einzelnen Subsektoren anhand der Konkurrenzsituation dar. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass die Tabelle nur einen groben Überblick, die technologische Auflösung in den Modellen aber deutlich vielfältiger ist.

Tabelle 1: Technologische Konkurrenzsituation in den Sektoren Industrie und Gewerbe-Handel-Dienstleistungen

Anwendungs-bereich	**Bisherige Technologie**	**Direkte Elektrifi-zierungsoptionen**	**Wasserstoff/ Synthese-Techno-logien**	**Sonstige erneuer-bare Energieträger**
Industrie				
Industrielle Prozesswärme	Gasbrenner Dampf	Elektrodenkessel Induktionsheizung Plasmaverfahren Widerstandshei-zung Wärmepumpen	Synthetische Brenn-stoffe Wasserstoff	Biomasse/-gas
Stahl (Primärroute)	Oxygenstahl/Hoch-ofenroute (Koks, Kohle, fossile Gase)	Nur Prozesswärme	Direktreduktion mittels Wasser-stoff/Synthesegas + Elekrolichtbogen-ofen	Biomasse/-gas
Chemikalien	Erdöl- und erdgas-basierte Grund-chemikalien	Nur Prozesswärme	Synthetische Grundstoffe	Biomasse/-gas
Ammoniak	Erdgasbasiert Erzeugung	Nur Prozesswärme	Wasserstoff (Koh-lenwasserstoffe möglich)	Biomasse/-gas
Niedertempera-turwärme für Haushalte, Indust-rie, Gewerbe, Han-del und Dienstleis-tungen				
Niedertemperatur-wärme	Öl-, Gasheizung, Fernwärme	Wärmepumpen, Widerstandshei-zung	Synthetisches Gas substituiert Erdgas	Biomasse/-gas

Quelle: eigene Darstellung.

Tabelle 2: Technologische Konkurrenzsituation im Sektor Verkehr

Anwendungsbereich	Bisherige Technologie	Direkte Elektrifizierungsoptionen	Wasserstoff/Synthese-Technologien	Sonstige erneuerbare Energieträger
Verkehr				
Pkw	Otto- und Dieselmotoren Gasbetriebene Pkw	Batteriebetriebene Pkw	Brennstoffzellenfahrzeuge Synthetische Kraftstoffe	Biokraftstoffe
Lkw Verteilverkehr, kleine Gewichtsklassen	Otto- und Dieselmotoren Gasbetriebene Fahrzeuge	Batteriebetriebene Lkw	Brennstoffzellenfahrzeuge Synthetische Kraftstoffe	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas
Lkw schwerer Straßengüterverkehr	Dieselmotoren Gasbetriebene Fahrzeuge	Oberleitungen auf Autobahnen Batteriebetriebene Lkw mit Hochleistungsladen	Brennstoffzellenfahrzeuge Synthetische Kraftstoffe	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas
Schienenverkehr	Elektrischer Antrieb Dieselmotoren	Elektrifizierung nicht-elektrifizierter Strecken	Brennstoffzellenantriebe Batteriebetriebene Synthetische Kraftstoffe	Biodiesel
Flugverkehr, europäisch	Turbinen (Kerosin)	Batteriebetrieben (eingeschränkt)	Brennstoffzellenantriebe Synthetisches Kerosin	Biobasiertes Kerosin
Flugverkehr, kontinental	Turbinen (Kerosin)	Keine Technologien absehbar	Synthetisches Kerosin	Biobasiertes Kerosin
Schiffsverkehr, europäisch	Schiffsmotoren (Schweröl, Diesel), künftig mehr LNG	Batteriebetrieben (eingeschränkt)	Brennstoffzellenantrieb Synthetischer Diesel Synthetisches LNG	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas
Schiffsverkehr, international	Schiffsmotoren (Schweröl, Diesel), künftig mehr fossiles LNG	Keine Technologien absehbar	Synthetischer Diesel Synthetisches LNG	Biodiesel, aufgereinigtes Biogas

Quelle: eigene Darstellung.

Tabelle 3: Technologische Konkurrenzsituation im Umwandlungssektor

Anwendungs-bereich	Bisherige Technologie	Direkte Elektrifi-zierungsoptionen	Wasserstoff/Syn-these-Technolo-gien	Sonstige erneuer-bare Energieträger
Stromversorgung				
Kurzfristige Stabili-sierung des Strom-netzes, Bereitstel-lung von Flexibilität	Flexibler Kraft-werkseinsatz De-mand Side Ma-nagement (DSM)/Demand Side Response (DSR) Flexibilisierung der Nachfrage Netzausbau	Stromspeicher (Pumpspeicher, Bat-terien, …)	Flexible Betriebs-weise der Elektro-lyse	Flexible Stromer-zeugung aus Bio-masse
Stabilisierung des Stromnetzes auf-grund strukturellen Fehlens erneuerba-rer Stromerzeu-gung (z. B. Dunkel-flaute)	Flexibler Kraft-werkseinsatz Demand Side Ma-nagement (DSM)/ Demand Side Response (DSR) Konventionelle Speicher	Keine Technologien absehbar	Synthetisches Gas zur Rückverstro-mung in Kraftwer-ken oder Brennstoffzellen Wasserstoffspeicher Synthese gasspeicher	Flexible Strom-er-zeugung aus Bio-masse
Sonstige Um-wandlungssektor				
Raffinerie	Fossiler Wasserstoff (überwiegend Erd-gas) zur z. B. Ent-schwefelung oder das Hydrocracken	Nur Prozesswärme (komplexe interne Energieflüsse)	Grüner Wasserstoff ersetzt fossilen Wasserstoff	Biomasse/-gas

Quelle: eigene Darstellung.

Die Investitionen und die laufenden Kosten der Wasserstoffanwendung und der alternativen Option bestimmen, ob sich die Wasserstoffanwendung durchsetzt. Hieraus leitet sich die Zahlungsbereitschaft für Wasserstoff ab. In diesem Zusammenhang ist es hilfreich, die Sub-Sektoren je nach Flexibilität zur Nutzung von Wasserstoffalternativen in drei Gruppen einzuteilen, die im Folgenden näher beschrieben werden (ähnlich wird vorgegangen in Wietschel et al. (2021a), Agora Energiewende 2021). Diese Gruppen werden auch in der Zuordnung von Preisen und bei der Betrachtung des zeitlichen Verlaufs eine Rolle spielen.

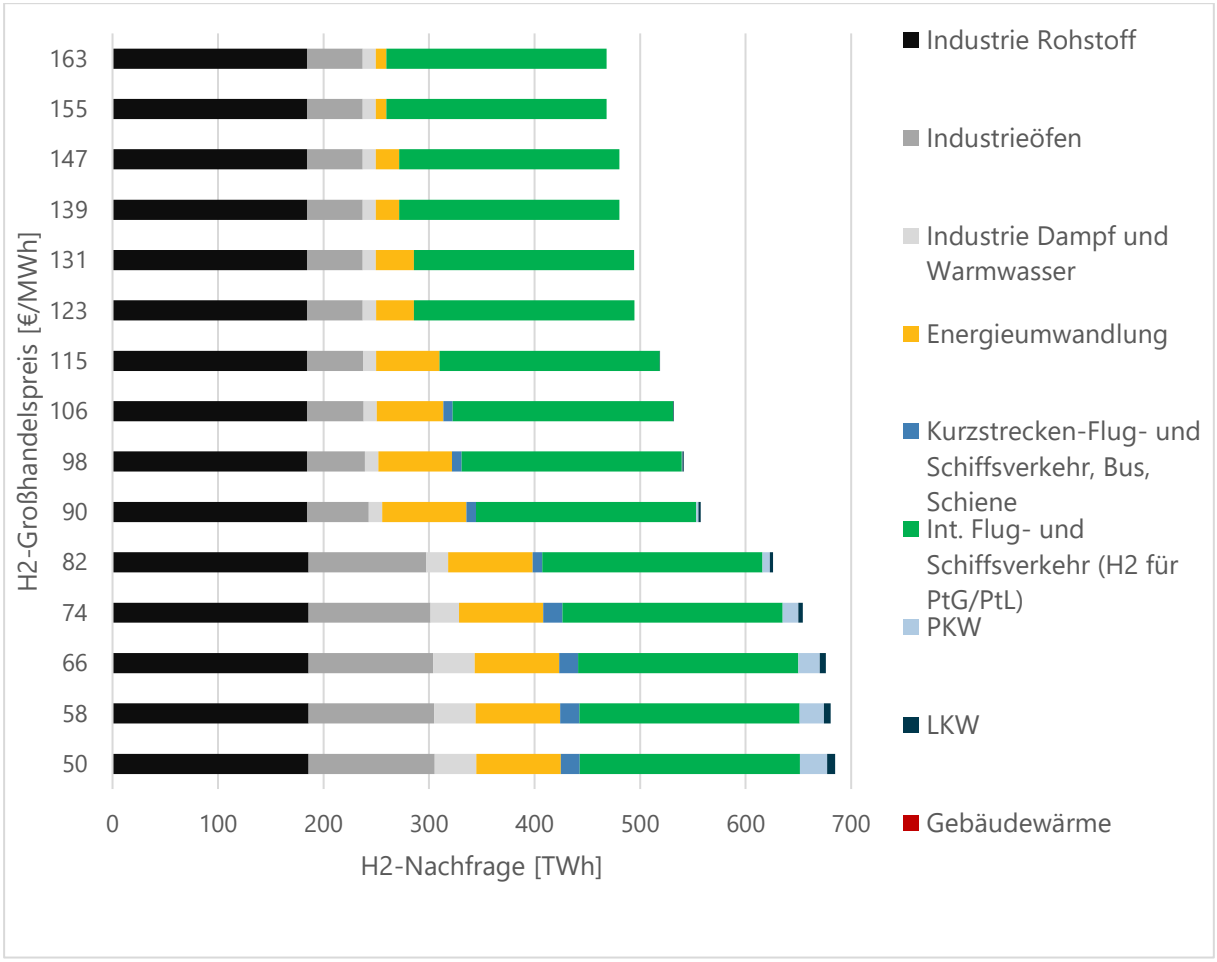
- No regret: In der „No regret"-Gruppe wird die Nachfrage nach Wasserstoff durch den Mangel an alternativen Dekarbonisierungsmaßnahmen getrieben. Direktelektrifizierung ist nur begrenzt oder nicht möglich, weshalb eher Wasserstoff oder die Nutzung fossiler Brennstoffe mit CO_2-Abscheidungn und Speicherung (CCS) oder ein Biomasseeinsatz in Frage kommen. Durch die begrenzten Alternativen reagieren die Nachfrager wahrscheinlich eher unelastisch auf Preisänderungen von Wasserstoff. In dieser Gruppe finden sich zum einen die Industrieanwendungen, die bereits heute die wesentlichen Wasserstoffnachfrager sind, wie Ammoniak und die Grundstoffchemie, in Zukunft ergänzt um Stahl. Zum anderen auch der internationale Flug- und Seeverkehr.

- No lock-in: In der „No lock-in"-Gruppe finden sich Anwendungen, bei denen die Dekarbonisierungsoption sowohl durch die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom als auch durch erneuerbaren Wasserstoff vollzogen werden kann und noch nicht feststeht, welche die wirtschaftlichste Alternative ist. Dies umfasst zum Beispiel die Hochtemperatur-Wärme in der Industrie oder den Schwerlasttransport. Die Nachfrager reagieren hier eher elastisch auf Preisänderungen von Wasserstoff.
- Game-changing: In der „Game-changing"-Gruppe wie etwa im Personenverkehr oder in der Raumwärme stellt die Direktelektrifizierung die effizientere Dekarbonisierungsmaßnahme dar. Eventuell sprechen andere Faktoren wie verfügbare Infrastrukturen oder Akzeptanz für Wasserstoff und Derivate sowie etwa stark sinkende Produktionskosten von Wasserstoff. In dieser Gruppe reagieren die Nachfrager eher elastisch auf Preisänderungen von Wasserstoff.

Anhang B

Im Folgenden ist die Nachfrage nach Syntheseprodukten in 2045 dargestellt.

Abbildung 8: Preisabhängige Nachfrage nach Syntheseprodukten (Wasserstoff und biogene) in Deutschland 2045 beim Ziel Treibhausgasneutralität



Quelle: eigene Darstellung.