

Schlussbericht für das BMBF Forschungsvorhaben P2X-2

**Erforschung, Validierung und Implementierung von Power-to-X-Konzepten
(Kopernikus P2X) – Teilvorhaben T1-2**

Berichtsteile I und II



OSTBAYERISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
REGENSBURG

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Auftragnehmer:

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES)
Seybothstraße 2
93053 Regensburg

Bearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Sterner
Franz Bauer

Projektlaufzeit:

01.09.2019 - 31.12.2022

Ort/Datum:

Regensburg den 30.06.2023

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SFK2T1-2 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung.....	I-1
I. 1 Aufgabenstellung.....	I-1
I. 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	I-1
I. 3 Planung und Ablauf des Vorhabens	I-2
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde.....	I-3
I. 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	I-4
II. Eingehende Darstellung.....	II-1
II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	II-1
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	II-13
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	II-14
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	II-14
II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	II-15
Literaturverzeichnis	i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Szenarien für das Roadmapping.....	II-2
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Energiemodelle.....	II-3
Abbildung 3: Historische THG-Emissionen, modellierte THG-Emissionen in den verschiedenen Szenarien und deutsche Reduktionsziele.....	II-6
Abbildung 4: THG-Emissionen in den verschiedenen Szenarien der Roadmap 4.0.....	II-7
Abbildung 5: Primärenergiebedarf in den Szenarien der Roadmap 4.0 und Ziele der Bundesregierung.....	II-8
Abbildung 6: Endenergie- und Rohstoffbedarf in den Szenarien der Roadmap 4.0.....	II-9
Abbildung 7: Nachfrage nach synthetischen Gasen und Kraftstoffen der Roadmap 4.0 sowie aus aktueller Literatur und dem Basisszenario der Roadmap 3.0.....	II-10
Abbildung 8: Nutzungspfade von H ₂ im Jahr 2050 des Basisszenarios der Roadmap 4.0.....	II-13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: CO ₂ -Menge für PtX nach Quellen im <i>Basisszenario</i> der Roadmap 4.0.....	II-7
Tabelle 2: Endenergiebedarf inklusive nicht-energetischer Verbrauch (NEV) in den verschiedenen Verbrauchssektoren der Szenarien der Roadmap 4.0.....	II-11

I. Kurzdarstellung

I. 1 Aufgabenstellung

Mit der Novellierung des deutschen Klimaschutzgesetzes im Jahr 2021 (KSG 2021) haben sich die Klimaziele substanziell verschärft. Um diese Ziele zu erreichen, ist unter anderem die Sektorkopplung mittels Power-to-X (PtX) ein zentrales Element (Wiese et al. 2022). Damit PtX ökologische Vorteile aufweist, sollte der Strom weitgehend klimaneutral sein. Dies erfordert eine rasche Defossilisierung des Stromsektors und damit einen starken Ausbau erneuerbarer Energien. Der zukünftig voraussichtlich hauptsächlich aus Wind und Photovoltaik stammende Strom kann nach einer Umwandlung sowohl für energetische als auch für stoffliche Zwecke eingesetzt werden. Da einige Sektoren auch in Zukunft auf Brenn- und Kraftstoffe mit hoher Energiedichte oder stoffliche Energieträger auf Kohlenstoffbasis angewiesen sind, stellt die PtX-Technologie einen wichtigen Baustein für die Defossilisierung dieser Sektoren dar und trägt damit maßgeblich zum Erreichen der Klimaschutzziele bei.

Im Rahmen des P2X-Vorhabens der Kopernikus Forschungsinitiative wurden verschiedene PtX-Prozesse ökologisch, technoökonomisch und aus gesellschaftlicher Sicht analysiert. Den übergeordneten Rahmen bildeten hierbei die Ergebnisse der Energiesystemmodellierung des vorliegenden Forschungsvorhabens. Dieses schließt sich an das Sattelitenprojekt „SPIKE“ (Förderkennzeichen 03SFK2S4) an, das in der ersten Kopernikus-Phase eingebettet war. Die Arbeiten des vorliegenden Vorhabens fanden innerhalb des *Tasks 1 Energieszenarien* statt, welcher das Ziel hatte, PtX-Technologien grundlegend im Gesamtkontext der Energiewende sowie des Klimaschutzes einzuordnen und eine gemeinsamen Grundlage für die Analysen in den Roadmaps zu schaffen. Zudem erfolgte die Mitarbeit in *Task 3 Reflexionsgremium*, in *Task 4 Roadmapping* und in der Kopernikus-übergreifenden *AG Szenarien*. Die Arbeiten hierzu werden nachfolgend in Subtask 1.1 beschrieben.

Task 1 gliederte sich in sechs Subtasks. In **Task 1.1** erfolgte die Gesamtkoordination der Energiesystemmodellierung und der Austausch mit den Projektpartner*innen des Task 3 *Reflexionsgremium* und des Task 4 *Erstellen der Roadmap* sowie der Kopernikus-übergreifenden *AG Szenarien*. **Subtask 1.2** widmete sich der Anpassung des in der ersten Förderphase entwickelten Energiesystemmodells. Die Modellierung fand anhand von zwei miteinander gekoppelten Teilmodellen statt, in denen einerseits die Nachfrage und andererseits die Erzeugung abgebildet wurden. Daher wurden in **Subtask 1.3** die Schnittstellen der Modelle der *OTH Regensburg* und des *Lehrstuhls für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme der Technischen Universität München (TUM ENS)* definiert. Zudem wurden in **Subtask 1.4** alle notwendigen Daten für die Energiesystemmodellierung gesammelt und für die Implementierung aufbereitet. In **Subtask 1.5** erfolgte die Berechnung von verschiedenen Szenarien und deren Auswertung. Darüber hinaus wurden in **Subtask 1.6** die wichtigsten Einsatzgebiete der PtX-Technologien untersucht und die benötigten Mengen an Wasserstoff, synthetischen Brenn- und Rohstoffen in den jeweiligen Sektoren quantifiziert.

Mit diesen Arbeiten konnte unter anderem der Beitrag von PtX zur Transformation des deutschen Energiesystems herausgearbeitet werden. Gleichzeitig dienten die Modellergebnisse als Eingangsgrößen für die Analysen in *Task 2* und für das Roadmapping in *Task 4*. Damit konnte eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den verschiedenen Wertschöpfungsketten innerhalb des Projektes geschaffen werden. Zuletzt erfolgte die Mitarbeit an einer Bewertung der im Projekt untersuchten PtX-Technologien bezüglich der UN-Nachhaltigkeitsziele.

I. 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsvorhaben wurde unter der Voraussetzung durchgeführt, die wissenschaftliche und gesellschaftliche Diskussion über PtX voranzutreiben und zu vertiefen sowie die Auswirkungen verschiedener PtX-Verfahren im deutschen Energiesystem aufzuzeigen. Darüber hinaus sollten eine einheitliche Datenbasis und ein übergreifender Rahmen für das Roadmapping

und die darin agierenden Tasks gewährleistet werden. Zuletzt sollten die zukünftig benötigten PtX-Mengen abhängig von diversen Randbedingungen quantifiziert werden.

Die Laufzeit erstreckte sich vom 01.09.2019 bis zum 31.08.2022 und wurde kostenneutral bis zum 31.12.2022 verlängert. Das Projekt wurde von der *Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES)* an der *Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Regensburg* durchgeführt. Hierfür wurden eine volle Stelle über die gesamte Projektlaufzeit und eine volle Stelle für drei Monate geschaffen, die zu 100 % vom BMBF finanziert wurden. Die Koordinierung erfolgte durch das Forschungszentrum Jülich. Das Fördervolumen inklusive Projektpauschale betrug 308.737 €.

I. 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliederte sich in sechs Subtasks, die in *Task 1 Energieszenarien* verortet waren. Zudem erfolgte in einer kostenneutralen Verlängerung die Mitarbeit bei der Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der UN-Nachhaltigkeitsziele. Die Projektleitung unterlag Herrn Prof. Dr.-Ing Michael Sterner.

In **Subtask 1.1** wurden einheitliche Randbedingungen mit der *TUM ENS* in diversen virtuellen Treffen festgelegt, Szenarien definiert und die Potenziale erneuerbarer Energien abgestimmt. Es fand zudem ein kontinuierlicher Austausch mit dem *Reflexionsgremium* und weiteren Tasks innerhalb des Kopernikus-Projekts statt, in dem die getroffenen Annahmen und die Zwischenergebnisse der Energiesystemmodellierung diskutiert wurden. Innerhalb des Tasks fand weiterhin die gemeinsame Erstellung der Roadmaps 3.0 und 4.0 in *Task 4* statt. Darüber hinaus erfolgte in regelmäßigen Online-Meetings die Definition wichtiger Kenngrößen und Charakteristika im Rahmen der *AG Szenarien*. Hierfür wurde unter anderem eine gemeinsam genutzte Szenario-Datenbank aufgebaut.

Das Energiesystemmodell wurde mehrfach aufgrund von Absprachen mit anderen Tasks und geänderter Rahmenbedingungen in **Subtask 1.2** angepasst. In diesem Zusammenhang erfolgte die Implementierung neuer PtX-Pfade, die Erweiterung um Flexibilitätsoptionen und die Übernahme der mit der *AG Szenarien* vereinbarten Kenngrößen. Ferner fand eine Erweiterung des Modells für die Datenübergabe an die *TUM ENS* statt.

Subtask 1.3 beinhaltete die Schaffung von Schnittstellen zur Kopplung des Energiemodells mit dem Modell der *TUM ENS*. Hierfür wurde die stündliche Nachfrage von Strom und Wasserstoff festgelegt. Darüber hinaus wurden die modellierten THG-Emissionen der Stromerzeugung als CO₂-Budget zwischen den Stützjahren an die *TUM ENS* übermittelt.

In **Subtask 1.4** wurde eine Aktualisierung der Daten der ersten Projektphase vorgenommen. In diesem Zusammenhang erfolgte ein Update aller für die Energiesystemmodellierung relevanter Daten des Basisjahres 2015 auf das Jahr 2019. Auch die Kenngrößen der Strom- und Wasserstoffherzeugung wurden aufeinander abgestimmt. Zusätzlich wurden die neuen deutschen Klimaschutzbestimmungen in das Programm integriert sowie aktuelle Studien bezüglich Suffizienzmaßnahmen gesichtet und daraus Daten für die Szenarien abgeleitet.

In **Subtask 1.5** wurden die ausgewählten Szenarien berechnet. Für die Roadmap 3.0 wurden vier Szenarien betrachtet. Dies waren ein *Basisszenario*, in dem im Wesentlichen die alten deutschen Klimaschutzziele abgebildet wurden sowie darauf aufbauend ein *Importszenario*, in dem ein vermehrter Import aus dem europäischen Ausland zugelassen wurde. Darüber hinaus wurde das Szenario *Verkehr* modelliert, in dem Verhaltensänderungen im Verkehrssektor betrachtet wurden. Im Szenario *1,5 Grad* erfolgte die Berechnung unter verschärften Klimaschutzbestimmungen. Aufgrund der im Projektzeitraum novellierten Klimaschutzziele und Anregungen des P2X-Konsortiums wurden die Szenarien für die Roadmap 4.0 überarbeitet. Im *Basisszenario* wurden hierfür die Klimaziele nach KSG 2021 implementiert. Zusätzlich zu den Verhaltensänderungen im Verkehr (Szenario *Verkehr*) wurden im *Suffizienzscenario* weitere Suffizienzmaßnahmen im Bereich Konsum, Wohnen und Ernährung aufgenommen. Die Berechnung der neuen Szenarien *Import* und *Speicher* erfolgte durch die *TUM ENS*. Hier wurden einerseits Wasserstoffimporte aus dem nichteuropäischen Ausland mitbetrachtet und anderer-

seits Stromübertragungskapazitäten nach Deutschland begrenzt. Mithilfe der Szenarien sollten verschiedene Transformationspfade für das deutsche Energiesystem modelliert und damit eine Bandbreite an möglichen Lösungen für das Erreichen der vorgegebenen Klimaschutzziele aufgezeigt werden. Ziel des Subtasks war zudem, mit dem *Basisszenario* eine einheitlich Grundlage für die weiteren Analysen in den Tasks *LCA*, *TÖA* und *Potenzialanalyse* zu schaffen.

In **Subtask 1.6** wurden schließlich die Power-to-X-Technologien anhand der Modellergebnisse hinsichtlich ihres Nutzens für die Energiewende und den Klimaschutz untersucht. Damit konnten die vielversprechendsten PtX-Pfade in den verschiedenen Sektoren des deutschen Energiesystems identifiziert werden.

Die Arbeiten bezüglich der UN-Nachhaltigkeitsziele in der kostenneutralen Verlängerung fanden überwiegend in Form von Beratungen in diversen virtuellen Treffen statt.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

In der Fachliteratur wird vielfach aufgeführt, dass die Sektorkopplung durch PtX zwingend notwendig ist (s. z. B.: Burre et al. 2020; Daiyan et al. 2020; Decourt 2019; Pfennig et al. 2022; Rego de Vasconcelos und Lavoie 2019). Durch die voranschreitende Klimakrise und den daraus folgenden ambitionierten Klimaschutzzielen findet die Technologie immer mehr Beachtung, damit auch schwer zu defossilisierende Sektoren eine Klimaneutralität erreichen (Eveloy et al. 2021; Farfan et al. 2019; Sterner und Specht 2021; Thiel und Stark 2021).

Um die zukünftig notwendigen PtX-Mengen zu bestimmen, wird häufig auf Energiemodelle zurückgegriffen. Das Vorhaben knüpft an aktuelle Arbeiten an, in denen das Energiesystem unter Berücksichtigung des novellierten deutschen Klimaschutzgesetzes modelliert wird. Dies sind im Wesentlichen die Studien von Brandes et al. (2021), Burchardt et al. (2021), Jugel et al. (2021), Luderer et al. (2021), Prognos et al. (2021) und Sensfuß et al. (2022).

Als Grundlage der Energiesystemmodellierung diente ein Langzeit-Bottom-Up-Modell, in dem eine lineare Optimierung erfolgt. Erste Teile des Modells wurden bereits im Rahmen der SMARAGD-Studie „Klimaschutz mit grünen Gasen“ (Ahnis et al. 2018) entwickelt und für die erste Projektphase im Satellitenprojekt SPIKE (BMBF 2019) angepasst. Diese Arbeiten bildeten den Ausgangspunkt für alle weiteren Arbeiten am Energiesystemmodell. Die hierfür notwendigen Daten der technischen und ökonomischen Kenngrößen stammen einerseits aus offiziellen Statistiken (z. B.: AGEB 2021; Destatis 2021; Strogies et al. 2021; VCI 2020; WV Stahl 2020). Andererseits zeigte sich in Ausfelder und Dura (2019), dass Power-to-X-Technologien hauptsächlich in den Sektoren Industrie und Verkehr zum Einsatz kommen. Daher wurden speziell für diese Sektoren in einer umfassenden Literaturrecherche für PtX relevante Produktionsprozesse bzw. Fahrzeugtypen bestimmt und die notwendigen Daten aus den Arbeiten eruiert. Dazu zählen unter anderem die Studien von Brunke (2017), Brynolf et al. (2017), Fleiter et al. (2013), Habert et al. (2020), Remus et al. (2013) oder Siegemund et al. (2017).

Darüber hinaus wurden aufbauend auf den Arbeiten in WBGU (2016) Kriterien für ein nachhaltiges Energiesystem definiert. Dazu zählen die begrenzte Nutzung von Anbaubiomasse für energetische Zwecke, technisch-ökologische Potenziale erneuerbarer Energien, der Ausstieg aus der Kernenergie oder die Nutzung von Sekundärprodukten (Recycling).

Zuletzt wird in der Literatur oft betont, dass Suffizienzmaßnahmen einen großen Beitrag zur Nachhaltigkeit und dem Klimaschutz leisten können (Brischke et al. 2016; Zell-Ziegler und Förster 2018; Zozmann et al. 2021). Aus diesem Grund wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben ein Szenario integriert, in dem Verhaltensänderungen berücksichtigt wurden. Die Suffizienzmaßnahmen wurden anhand ihres Energie- und Treibhausgasreduktionspotenzials aus Fischer et al. (2016) bestimmt. Damit wird wie beispielsweise in Samadi et al. (2017) oder Wiese et al. (2022) gefordert, das Potenzial von Verhaltensänderungen mithilfe eines Energiesystemmodells bestimmt.

I. 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Abstimmung der Inputgrößen für das Energiemodell fanden in regelmäßigen Abständen virtuelle Treffen mit der *TUM ENS*, dem *Reflexionsgremium* und den Projektpartner*innen des *Roadmapping* statt. Hier wurden zudem die Zwischenergebnisse der Modellierung diskutiert, Szenarien herausgearbeitet und das Energiemodell stetig angepasst.

Es erfolgte weiterhin die Zusammenarbeit mit dem Kopernikus-übergreifenden Task *AG Szenarien*. In diversen Online-Meetings wurden besonders relevante Kenngrößen für die Energiesystemmodellierung bestimmt und harmonisiert. Außerdem wurden die Ergebnisse der verschiedenen Kopernikus-Projekte *P2X*, *Ariadne*, *SynErgie* und *ENSURE* mithilfe einer gemeinsamen Datenbank verglichen und sowohl Gemeinsamkeiten als auch Abweichungen herausgearbeitet.

Zuletzt wurden ausgewählte Ergebnisse an andere Tasks des P2X-Projekts übergeben, die intern für Analysen genutzt wurden. Dies waren die zukünftige Struktur der Stromerzeugung für die ökologischen Untersuchungen der PtX-Technologien im Task *LCA*, die Entwicklung des Strompreises für die techno-ökonomischen Analysen im Task *TÖA* und die Potenziale der erneuerbaren Energieerzeugung sowie die in Zukunft benötigten PtX-Mengen in den entsprechenden Verbrauchssektoren für den Task *Potenzialanalyse*.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendungen wurden entsprechend der Zielsetzungen im Projektantrag eingesetzt. In den nächsten Abschnitten werden die Resultate der folgenden Subtasks aufgeführt, die innerhalb des *Tasks 1 Energieszenarien* bearbeitet wurden:

- Subtask 1.1: Gesamtkoordination
- Subtask 1.2: Anpassung der bestehenden Energiemodelle
- Subtask 1.3: Schnittstellen
- Subtask 1.4: Datensammlung und -aufbereitung
- Subtask 1.5: Berechnung von Szenarien
- Subtask 1.6: Einordnung von PtX-Pfaden

Übergeordnetes Ziel des *Tasks 1* war die bereits bestehenden Energiemodelle der *OTH Regensburg* und *TUM ENS* zu kombinieren und so anzupassen, dass die PtX-Technologien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Energiesystem untersucht werden konnten. Darüber hinaus sollten ein gemeinsamer Rahmen für das Roadmapping geschaffen, Transformationspfade des Energiesystems modelliert und die wichtigsten Einsatzgebiete von PtX analysiert werden.

Subtask 1.1: Gesamtkoordination

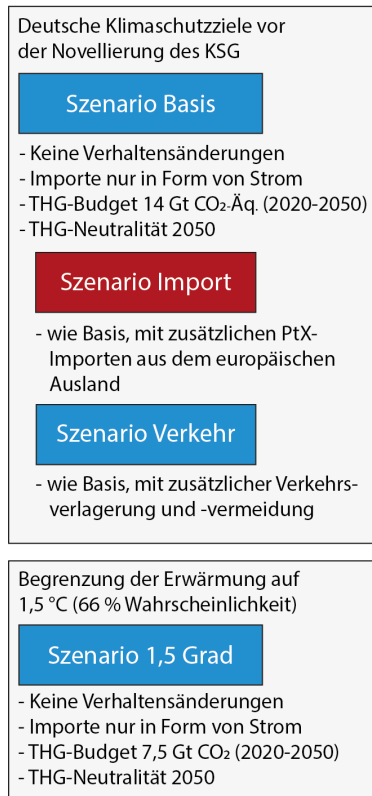
Zur Modellierung des Energiesystems mussten eine Vielzahl von Randbedingungen und Eingangsgrößen bestimmt werden, die zur Kopplung der beiden Energiemodelle der *OTH Regensburg* und der *TUM ENS* harmonisiert werden mussten. Zudem wurden wichtige Kenngrößen und Charakteristika (Brennstoffkosten, Kapitalkosten, Wirkungsgrade, etc.) mit den Kopernikus Schwesterprojekten in der *AG Szenarien* definiert, die in die P2X-Modellierung des vorliegenden Forschungsvorhabens integriert wurden.

Die Abstimmungen bezüglich der Modelldaten erfolgten in regelmäßigen physischen und virtuellen Treffen mit der *TUM ENS*, dem *Subtask 2.4 Potenzialanalyse* und der *AG Szenarien*. In diesen Treffen wurden die Potenziale der erneuerbaren Energietechnologien, die Energieträger- und Anlagenpreise und weitere Kenngrößen wie CO₂-Preise oder Treibhausgasbudgets abgestimmt. Weiterhin wurden vier Szenarien für die Roadmap 3.0 definiert, welche für die Roadmap 4.0 überarbeitet bzw. neu gestaltet wurden (s. Abbildung 1). Die Szenarien werden in *Subtask 1.5* im Detail beschrieben.

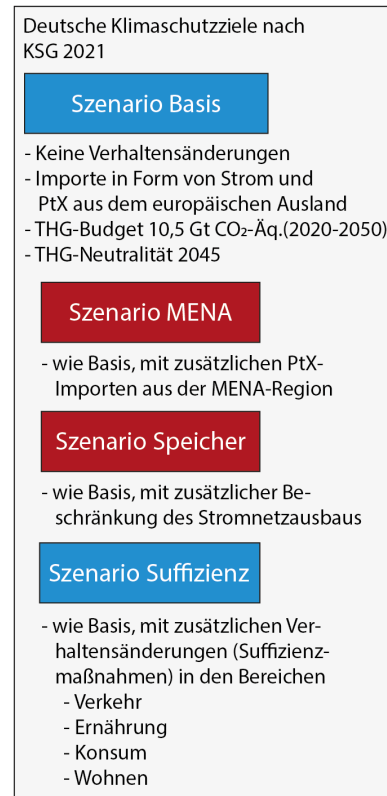
Die Zwischenergebnisse der Energiesystemmodellierung wurden kontinuierlich in zahlreichen virtuellen Treffen mit dem *Task 3 Reflexionsgremium* sowie den *Subtasks 2.1 LCA*, *2.3 TÖA* und *2.4 Potenzialanalyse* abgesprochen und die Modelle sowie Szenarien entsprechend angepasst. Zur Kopernikus-übergreifenden einheitlichen Erfassung der Endergebnisse der Energiesystemmodellierung erfolgte zudem der Aufbau einer gemeinsamen Datenbank mit der *AG Szenarien* in die die P2X-Szenarien der Roadmap 4.0 hochgeladen wurden. Für die vergleichende Einordnung der verschiedenen Szenarienergebnisse aus den Kopernikus-Projekten wurden zwei Dokumente innerhalb der *AG Szenarien* erstellt (Produkt 1 und 2) an welchen aktiv mitgearbeitet wurde. Produkt 3 befindet sich aktuell in Bearbeitung.

Zuletzt wurden die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens auf verschiedenen wissenschaftlichen Tagungen, Konferenzen und Webinars vorgestellt. Dazu zählen beispielsweise das H2 Forum in Berlin, das Forschungsnetzwerk Wasserstoff, das Netzwerk der Wasserstoffatlanten, die Woche des Wasserstoffs Süd, die Plattform Klimaneutrales Stromsystem (PKNS), der Bürgerdialog Stromnetz oder der ressort-übergreifenden Stakeholderdialog zur Weiterentwicklung der nationalen Wasserstoffstrategie.

Szenarien der Roadmap 3.0



Szenarien der Roadmap 4.0



■ Modellierung hauptsächlich durch die OTH Regensburg
■ Modellierung hauptsächlich durch die TUM ENS

KSG: Klimaschutzgesetz
THG: Treibhausgase
PtX: Power-to-X
CO₂-Äq.: CO₂-Äquivalente

Abbildung 1: Szenarien für das Roadmapping.

Subtask 1.2: Anpassung der bestehenden Energiemodelle

Das bereits bestehende Energiesystemmodell der *OTH Regensburg* gliedert sich in die zwei Teilmodelle „Makromodell“ und „Mikromodell“. Im Makromodell erfolgt eine lineare Optimierung des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2050 mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr. Das Mikromodell bildet den Stromsektor und insbesondere den Stromverbrauch stundenscharf ab und basiert ebenfalls auf einer linearen Optimierung. Es dient vornehmlich für die Kopplung mit dem Energiemodell der *TUM ENS*.

In beide Teilmodelle der *OTH Regensburg* wurde ein neuer Optimierungsalgorithmus implementiert, der eine wesentlich kürzere Laufzeit als der in der ersten Projektphase verwendete Algorithmus aufweist. Damit konnten Modellergebnisse schneller generiert werden und kurzfristiger an weitere Tasks übermittelt werden.

Das Makromodell wurde um weitere PtX-Pfade (Power-to-Liquid-, Power-to-Chemicals- und CO₂-Bereitstellungstechnologiepfade) erweitert und es erfolgte eine Aktualisierung des Startjahrs. Zudem wurden die THG-Minderungsziele nach KSG 2021 in das Modell aufgenommen und die gemeinsam in der *AG Szenarien* definierten Kenngrößen integriert.

Im Mikromodell erfolgte eine Erweiterung um Flexibilitätsoptionen. Hierfür wurden für Prozesse in der Industrie, in Gebäuden und teilweise im Verkehr Flexibilitätswerte in das Modell integriert, die eine Lastverschiebung ermöglichen. Weiterhin wurden stündlich aufgelöste Wetterdaten für Wind und Photovoltaik implementiert, die mit der *TUM ENS* abgesprochen wurden. Innerhalb des Mikromodells fand darüber hinaus eine Regionalisierung des Wärmeverbrauchs in Haushalten, dem GHD-Sektor und der Industrie statt.

Zuletzt erfolgte für die Datenübergabe an die *TUM ENS* die Erweiterung des Modells um einen Programmteil, der automatisiert die Ergebnisse in der benötigten Form ausgibt.

Subtask 1.3: Schnittstellen

Das Energiesystemmodell der *OTH Regensburg* wurde innerhalb des Forschungsvorhabens zur Modellierung der Energienachfrage genutzt. Diese Nachfrage wurde über eine Schnittstelle an das Energiemodell der *TUM ENS* übergeben, in dem die Modellierung der Erzeugung stattfand. Als Schnittstelle wurde der stündliche Verbrauch von Strom und Wasserstoff in den Stützjahren 2020, 2030, 2040, 2045 und 2050 festgelegt. Die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung zwischen den jeweiligen Stützjahren aus dem Modell der *OTH Regensburg* wurden ebenfalls in Form einer Randbedingung für das Modell der *TUM ENS* übergeben. Damit wurde gewährleistet, dass die Emissionen der deutschen Stromerzeugung in beiden Energiemodellen gleich sind und das maximale THG-Budget in Deutschland nicht überschritten wird. In Abbildung 2 sind die beiden Modelle mit ihren Schnittstellen schematisch dargestellt.

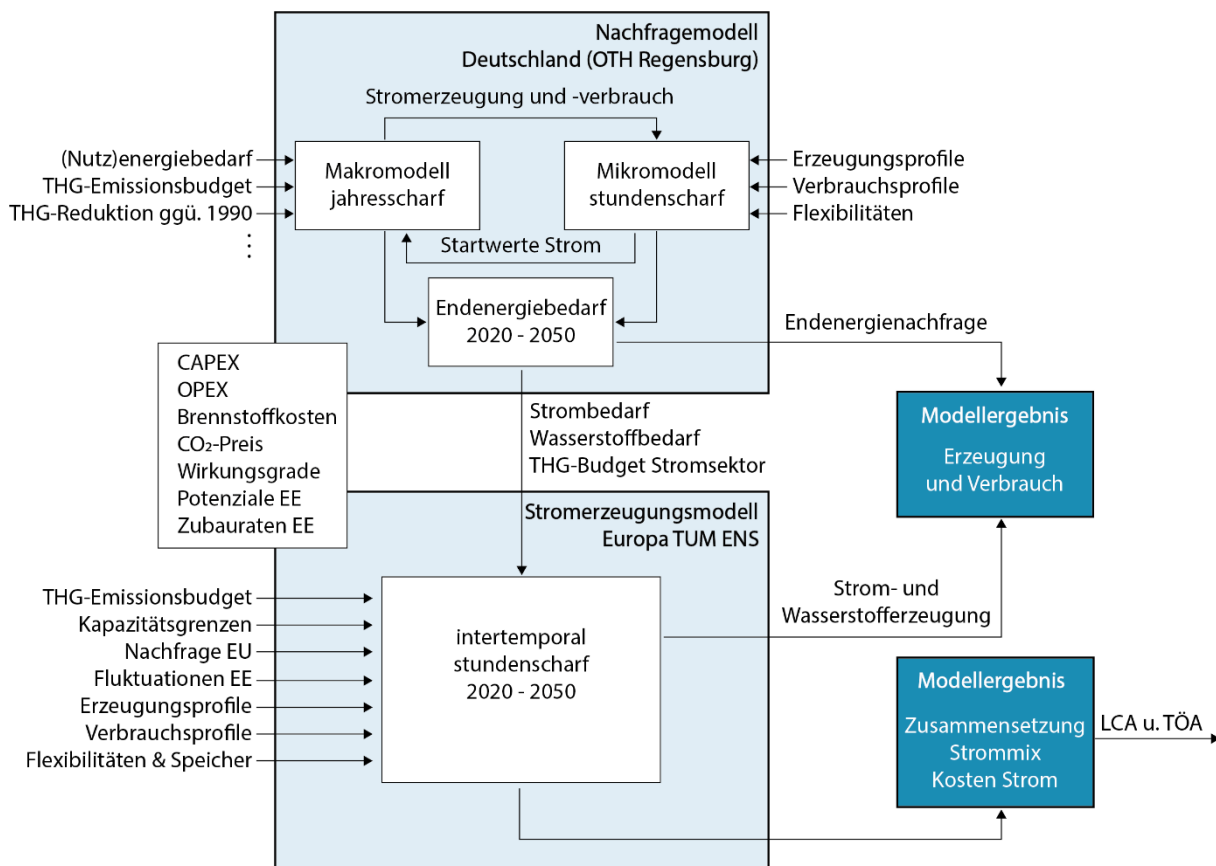


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Energiemodelle.

Subtask 1.4: Datensammlung und -aufbereitung

In diesem Subtask erfolgte die Erhebung und Aufbereitung von Daten für die Energiesystemmodellierung. Dies umfasste Daten für die zulässigen Treibhausgasemissionen nach KSG 2021 sowie für alle Technologieoptionen des Startjahres 2019 wie beispielsweise die Stromerzeugung, Produktionszahlen in der Industrie oder Verkehrsleistungen. Weiterhin wurden alle relevanten Daten für die Strom- und Wasserstofferzeugung in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Tasks definiert und entsprechend angepasst. Es fanden zudem Absprachen mit Projektpartner*innen der technischen Arbeitspakete bezüglich der Parameter für die im Kopenhagen-Projekt betrachteten Power-to-X-Pfade statt.

Für das Suffizienzzenario wurden Verhaltensänderungen mit besonders hohen Energie- und Treibhausgasreduktionspotenzialen aus der Literatur (Fischer et al. 2016; Kenkmann et al. 2019; Kuhnhehn 2017; Purr et al. 2019; Samadi et al. 2017; Willett et al. 2019; Zell-Ziegler und Förster 2018; Zozmann et al. 2021) identifiziert:

- Umstellung der Ernährung auf eine hauptsächlich pflanzenbasierte Kost
- Keine vermeidbaren Lebensmittelabfälle
- Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf klimafreundlichere Verkehrsmittel
- Rückgang der Kraftfahrzeugdichte
- Verzicht auf innerdeutsche Flugreisen
- Nullwachstum (ab 2030)
- Reduktion der Wohnfläche pro Kopf und des Warmwasserverbrauchs
- Absenkung der Raumtemperatur

Für die oben genannten Suffizienzmaßnahmen wurden die benötigten Daten festgelegt und in Form von Nachfragekurven in das Energiemodell integriert.

Daneben wurden für die Regionalisierung im Mikromodell die Standorte großer industrieller Verbraucher auf Bundeslandebene identifiziert und eine Methodik zur Regionalisierung des Wärmeverbrauchs ausgearbeitet.

Subtask 1.5: Berechnung von Szenarien

Innerhalb des Subtasks wurden die in Abbildung 1 dargestellten Szenarien modelliert. Die wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt. Dabei wird größtenteils auf die Szenarien der Roadmap 4.0 (RM 4.0) eingegangen, da im Gegensatz zu den Szenarien der Roadmap 3.0 (RM 3.0) in diesen die novellierten Klimaschutzziele nach KSG 2021 enthalten sind. Zudem werden in diesem Abschnitt die einzelnen Szenarien beschrieben.

Szenarien

Insgesamt wurden innerhalb des Forschungsvorhabens acht Szenarien definiert (s. Abbildung 1), wobei vier Szenarien für die Roadmap 3.0 (*Basis*, *Import*, *Verkehr*, *1,5 Grad*) und vier Szenarien für die Roadmap 4.0 (*Basis*, *MENA*, *Speicher*, *Suffizienz*) modelliert wurden.

Im *Basisszenario* der Roadmap 3.0 *Basis* (RM 3.0) wurden die mittlerweile veralteten Zielsetzungen der Bundesregierung, die Emissionen um mindestens 55 % (2030), 70 % (2040) bzw. 80 bis 95 % (2050) gegenüber 1990 zu senken, integriert. Durch lineare Interpolation der THG-Werte in den Stützjahren wurden diese Ziele in ein maximal zur Verfügung stehendes Budget für Deutschland von 14 Gt CO₂-Äq. zwischen 2020 und 2050 überführt. Es wurde weiterhin festgelegt, dass das Energiesystem im Jahr 2050 vollständig defossilisiert wird (- 95 % gegenüber 1990) und der Sockelbetrag von 5 % ausschließlich den nicht-energiebedingten und quasi-unvermeidbaren Emissionen zur Verfügung steht. Importe wurden in diesem Szenario nur in Form von Strom zugelassen. Zuletzt wurde angenommen, dass in allen Sektoren eine maximale Effizienzsteigerung und der Einsatz alternativer und erneuerbarer Technologien grundsätzlich möglich ist. Das *Basisszenario* wurde als Grundlage für die ökologischen (LCA) und ökonomischen (TÖA) Analysen innerhalb der Roadmap 3.0 genutzt.

Im Szenario *Import* wurde mehr Flexibilität zugelassen, sodass ein Zubau von Wasserstoffpipelines länderübergreifend in Europa möglich ist. Die restlichen Annahmen entsprachen denen des *Basisszenarios*.

Da im *Basisszenario* keine Verhaltensänderungen implementiert wurden, erfolgte dies im Szenario *Verkehr*. In dieser Sensitivität wurde als Beispiel einer Suffizienzmaßnahme eine Verkehrsverlagerung und -vermeidung sowie eine Reduktion von Flugreisen angenommen. Die restlichen Annahmen waren äquivalent zum *Basisszenario*.

Im *1,5 Grad-Szenario* wurde das THG-Emissionsbudget so berechnet, dass die mittlere globale Oberflächentemperatur mit einer Wahrscheinlichkeit von über 66 % nicht über 1,5 °C gegenüber dem Wert vor der Industrialisierung ansteigt. Hieraus berechnet sich mit dem Prinzip der Chancengleichheit und ohne Berücksichtigung der historischen Emissionen ein Budget von 7,5 Gt CO₂-Äq. ab dem Jahr 2020. Ansonsten ergaben sich keine Unterschiede zum *Basisszenario*.

Da sich die deutschen Klimaschutzziele im Zeitraum des vorliegenden Forschungsvorhabens signifikant verschärft haben, wurden für die Roadmap 4.0 die Szenarien entsprechend angepasst. Im aktualisierten *Basisszenario* wurden die Ziele nach KSG 2021 aufgenommen. Diese fordern THG-Minderungen gegenüber 1990 von 65 % im Jahr 2030 und 88 % im Jahr 2040. Ab dem Jahr 2045 wird eine Klimaneutralität angestrebt. Zudem enthalten die novellierten Klimaziele sektorale Maximalwerte der THG-Emissionen, die ebenfalls als Randbedingungen in die Modellierung aufgenommen wurden. Es wurde ein kumuliertes THG-Budget (ohne Senken) für Deutschland ab 2020 von 10,5 Gt CO₂-Äq. aus dem KSG 2021 abgeleitet. Da der Einfluss von Wasserstofftransporten innerhalb Europas bereits im Szenario *Import* der Roadmap 3.0 untersucht wurde, standen diese nun im *Basisszenario* und in allen weiteren Szenarien zur Verfügung. Das Szenario diente in der Roadmap 4.0 als Basis für alle weiteren Analysen der *LCA*, *TÖA* und der *Potenzialanalyse*.

Für das Szenario *MENA* wurde dem Energiemodell die zusätzliche Option zur Verfügung gestellt, Wasserstoff global zu produzieren und nach Europa zu importieren. Beispielhaft wurde hier die MENA-Region als Produktionsstandort gewählt. Die restlichen Annahmen entsprachen denen des *Basisszenarios*.

Im *Speicherszenario* wurde der Ausbau der Stromleitungen auf die bereits beschlossenen Pläne bis zum Jahr 2030 begrenzt, um den Einfluss des Netzausbaus auf das Gesamtsystem zu analysieren. Der Wasserstofftransport blieb hingegen unbeschränkt möglich. Ansonsten existierten keine Unterschiede zum *Basisszenario*.

Zuletzt wurde ein *Suffizienzzenario* erstellt, das Verhaltensänderungen in den Bedürfnisfeldern Verkehr, Wohnen, Konsum und Ernährung enthält. Hierfür wurden eine Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung, eine Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche, des Warmwasserverbrauchs und der Innenraumtemperatur, eine Umstellung der Ernährung auf eine überwiegend pflanzliche Kost, eine Vermeidung von Lebensmittelabfällen sowie ein Rückgang der Kaufaktivität (Nullwachstum der Wirtschaft ab 2030) unterstellt. Daraus resultierten deutliche Rückgänge der im Modell enthaltenen Aktivitätsgrößen (Produktionsmengen, Nutzwärmebedarf, Verkehrsleistungen, Tierzahlen, etc.). Die weiteren Randbedingungen waren identisch zu denen des *Basisszenarios*.

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der modellierten Szenarien dargestellt.

Treibhausgasemissionen

Die sich aus dem KSG 2021 ergebenden Randbedingungen bezüglich der Treibhausgasemissionen sowie die zukünftigen Treibhausgasemissionen in den Szenarien *Basis (RM 4.0)*, *Suffizienz (RM 4.0)* und *Basis (RM 3.0)* sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Die restlichen Szenarien der RM 4.0 unterscheiden sich kaum vom Basisszenario der RM 4.0 und sind daher nicht in der Abbildung enthalten.

Wie aus der Abbildung hervorgeht, ergibt sich aus den novellierten Klimaschutzzielen ein signifikant schnellerer Rückgang der THG-Emissionen im Vergleich zu den veralteten Zielen in der RM 3.0. Darüber hinaus werden die als Randbedingungen vorgegebenen Minderungsziele in allen Szenarien unterschritten, da die Einhaltung der Klimaziele in den Verbrauchssektoren Verkehr, Industrie und Gebäude eine raschere Defossilisierung des Stromsektors fordert als die im KSG 2021 sektoral festgelegten Ziele. Dies resultiert vor allem aus der Sektorenkopplung mittels PtX-Verfahren, da diese nur einen treibhausgasmindernden Effekt aufweisen, wenn der Strom hauptsächlich aus erneuerbaren Energien stammt.

Das Gesamtbudget im Zeitraum 2020 bis 2050 von 10,5 Gt CO₂-Äq. (RM 4.0), welches sich aus dem Klimaschutzgesetz ableiten lässt, wird in allen Szenarien fast vollständig ausgeschöpft. In den Szenarien *Basis (RM 4.0)*, *MENA* und *Speicher* werden 10,0 Gt CO₂-Äq. emittiert, im Szenario *Suffizienz* 9,4 Gt CO₂-Äq. und im Szenario *Basis (RM 3.0)* 13,0 Gt CO₂-Äq. In den Szenarien der RM 4.0 wird im Jahr 2045 zudem eine Treibhausgasneutralität erreicht. Hierfür ist im *Suffizienzzenario* eine Senkenleistung von 42 Mt CO₂-Äq. und in den Szenarien *Basis (RM 4.0)*, *MENA* und *Speicher* 72 Mt CO₂-Äq. nötig, welche durch den LULUCF-Sektor

und durch CCS-Technologien erbracht werden muss (s. Abbildung 4). In den Szenarien der 3. Roadmap erfolgt eine THG-Minderung von 95 % gegenüber 1990 im Jahr 2050.

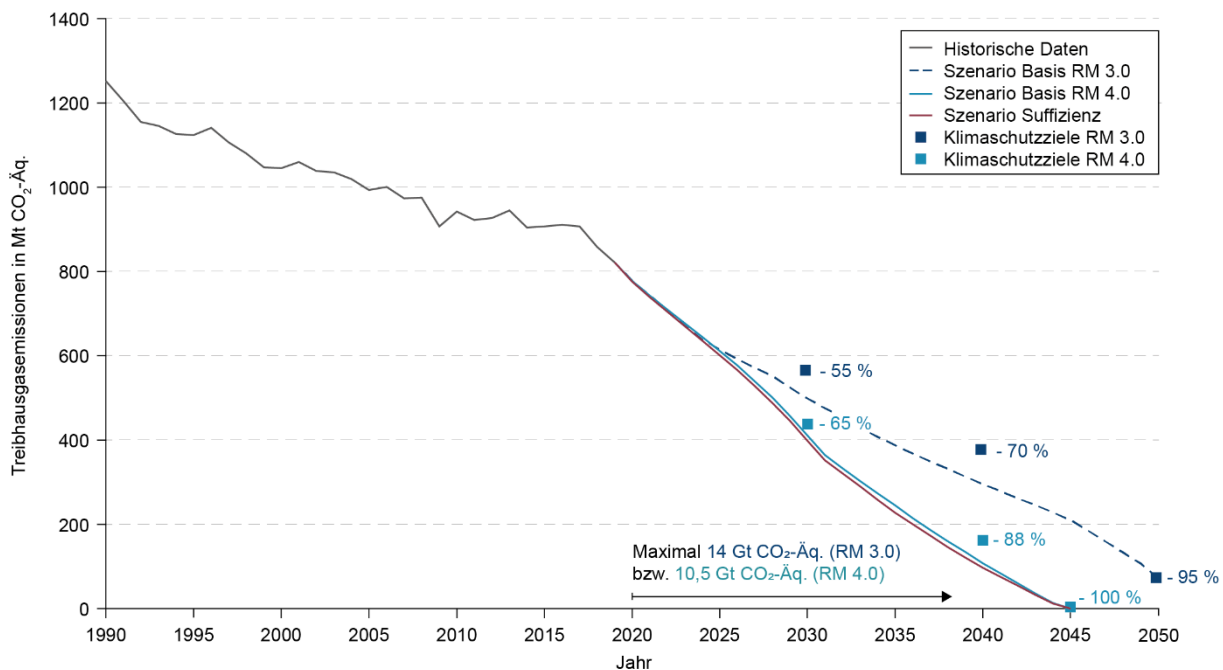


Abbildung 3: Historische THG-Emissionen, modellierte THG-Emissionen in den verschiedenen Szenarien und deutsche Reduktionsziele.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung, die Nutzung der Sektorenkoppelung und alternativer Technologien sowie eine Steigerung der Effizienz, verursachen eine schnelle Reduktion der Treibhausgasemissionen (s. Abbildung 4). Im Jahr 2030 werden durchschnittlich 47 % weniger THG emittiert als im Jahr 2020. Der Großteil der Emissionen entfällt auf CO₂. Hauptemittent der Nicht-CO₂-Emissionen im Jahr 2030 ist wie in allen Stützjahren die Landwirtschaft. Im Jahr 2040 verbleiben in den Szenarien *Basis (RM 4.0)*, *MENA* und *Speicher* Bruttoemissionen in Höhe von 107 Mt CO₂-Äq. Diese werden hauptsächlich von der energetischen und stofflichen Nutzung von Mineralölprodukten und Erdgas sowie der Landwirtschaft verursacht. Da im Szenario *Suffizienz* die Anzahl der Tiere aufgrund der angenommenen Ernährungsumstellung sinkt, reduzieren sich auch die Nicht-CO₂-Emissionen und die gesamte Menge der Bruttoemissionen im Jahr 2040 liegt bei 96 Mt CO₂-Äq. Im Jahr 2045 und 2050 ist das komplette Energiesystem treibhausgasneutral. Die verbleibenden Residualemissionen stammen aus industriellen Prozessen (Herstellung von Zement, Kalk, Ziegeln, Stahl, Adipin- und Salpetersäure, Calciumcarbid, Soda und Glas). Zudem verursacht die Landwirtschaft, der Abfallsektor und die Produktverwendung unvermeidbare Emissionen. Zur Kompensation dieser Restemissionen im Jahr 2045 wird in den Szenarien *Basis (RM 4.0)*, *MENA* und *Speicher* eine Senkenleistung von 73 Mt CO₂ benötigt - im Szenario *Suffizienz* 42 Mt CO₂. Im Jahr 2050 reduziert sich diese auf 68 Mt CO₂ bzw. 34 Mt CO₂.

Das Senkenpotenzial des LULUCF-Sektors wird nach dem Klimaschutzgesetz zu maximal 35 Mt CO₂ im Jahr 2040 und 40 Mt CO₂ im Jahr 2045 und 2050 angesetzt. Die dadurch nicht kompensierten Emissionen müssen durch technische Senken (CCS) ausgeglichen werden. Deren Einsatz wurde ab frühestens 2035 unterstellt. Im Jahr 2045 beträgt die Menge an abgeschiedenen CO₂ mittels CCS in den Szenarien *Basis (RM 4.0)*, *MENA* und *Speicher* 33 Mt CO₂ und im Jahr 2050 28 Mt CO₂. Im Szenario *Suffizienz* sind 2 Mt CO₂ im Jahr 2045 durch CCS bereitzustellen. Im Jahr 2050 reicht hier das Senkenpotenzial des Waldes aus, um eine Treibhausgasneutralität zu erreichen.

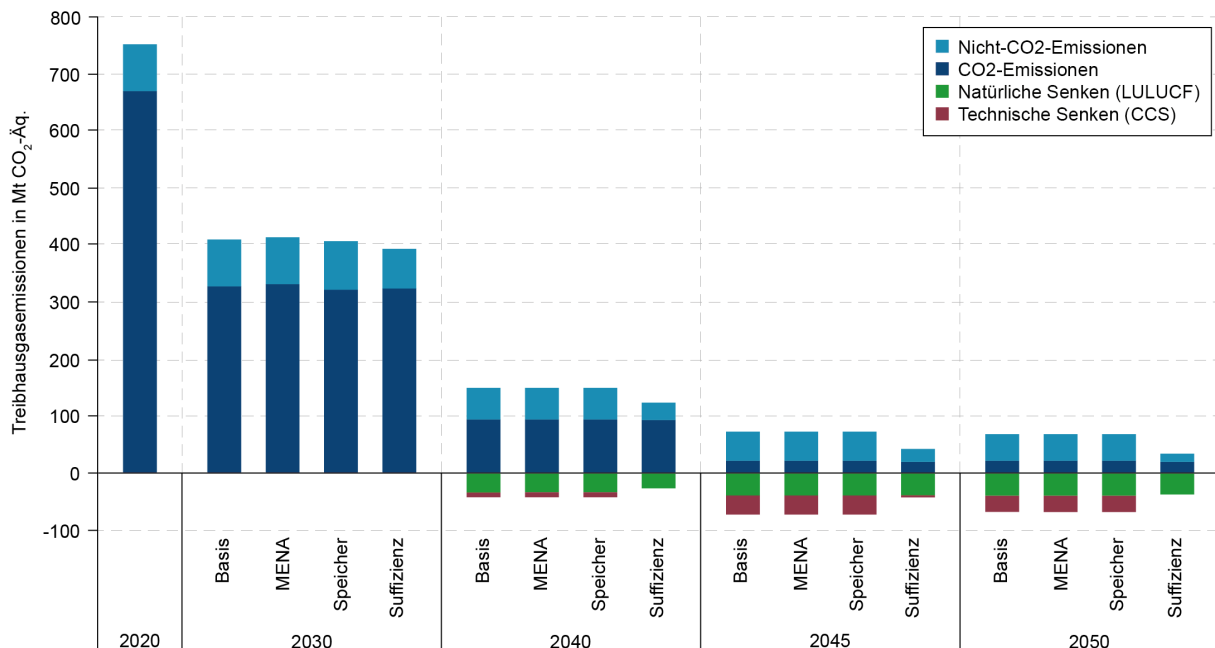


Abbildung 4: THG-Emissionen in den verschiedenen Szenarien der Roadmap 4.0.

Zur Herstellung einiger PtX-Produkte wird CO₂ eingesetzt, welches im Energiemodell durch drei Optionen bereitgestellt werden kann. Dies sind industrielle Punktquellen und biogene Quellen (Biomasse- und Biogaskraftwerke) sowie die Atmosphäre. Fossile Kraftwerke zur Stromerzeugung werden nicht betrachtet, da diese bereits nicht mehr im System enthalten sind, wenn die PtX-Prozesse das CO₂ benötigen. In Tabelle 1 sind die zur Verfügung stehenden und die für PtX genutzte Mengen CO₂ für das Basisszenario enthalten. Da sich die weiteren Szenarien nicht wesentlich davon unterscheiden, werden sie an dieser Stelle nicht aufgeführt.

Tabelle 1: CO₂-Menge für PtX nach Quellen im *Basisszenario* der Roadmap 4.0. Das theoretisch verfügbare Potenzial ist in Klammern aufgeführt.

	Zement	Kalk	Sonstige Prozesse	Biomasse	Luft	Summe
	Mio. t CO ₂					
2030	0,1 (10,5)	0,0 (5,9)	0,0 (89,4)	0,3 (13,4)	0,0	0,4
2040	9,0 (10,9)	1,0 (5,0)	0,1 (23,4)	4,1 (13,1)	0,5	14,7
2045	11,3 (11,3)	4,3 (4,3)	2,9 (2,9)	4,7 (9,0)	20,1	43,3
2050	11,5 (11,5)	4,2 (4,2)	2,8 (2,8)	4,8 (4,8)	19,8	43,1

Im Jahr 2030 entstehen in der Industrie energie- und prozessbedingt 106 Mio. t CO₂, die prinzipiell für eine Abscheidung geeignet sind. Diese Menge sinkt auf 39 Mio. t CO₂ im Jahr 2040. In den Jahren 2045 und 2050 fallen industriell lediglich prozessbedingte Emissionen an, die sich auf 19 Mio. t CO₂ belaufen. Weiterhin reduziert sich die verfügbare CO₂-Menge aus Biomasse- und Biogasanlagen von 13,4 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 auf 4,8 Mio. t CO₂ im Jahr 2050. Da 2030 hauptsächlich Wasserstoff und nur geringe Mengen synthetisches Methan und Flüssigkeiten in Power-to-X-Prozessen hergestellt werden, sind hierfür lediglich 0,4 Mio. t CO₂ notwendig, die überwiegend aus Biomasse gewonnen werden. Bis zum Jahr 2040 steigt der CO₂-Bedarf an und beträgt 15 Mio. t. Hier erfolgt die Gewinnung aus Industrieprozessen und Biomasse sowie zu kleinen Teilen aus der Atmosphäre. In den Jahren 2045 und 2050 wird das verfügbare Potenzial der industriellen Punktquellen vollständig ausgeschöpft (19 Mio. t CO₂). Auch die Nutzung aus biogenen Quellen steigt bis zum Jahr 2050 bis an die Obergrenze des

Potenzials an. Um den Bedarf von 43,1 Mio. t CO₂ im Zieljahr zu decken, müssen zusätzlich 19,8 Mio. t CO₂ mittels DAC gewonnen werden.

Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf in Deutschland wird aktuell dominiert von Mineralölprodukten, Erdgas und Kohle. Diese drei fossilen Rohstoffe beanspruchen über 76 % des Primärenergieverbrauchs. Der Anteil erneuerbarer Energien beträgt rund 17 %, der Rest stammt aus sonstigen Energieträgern und Kernenergie (s. Abbildung 5).

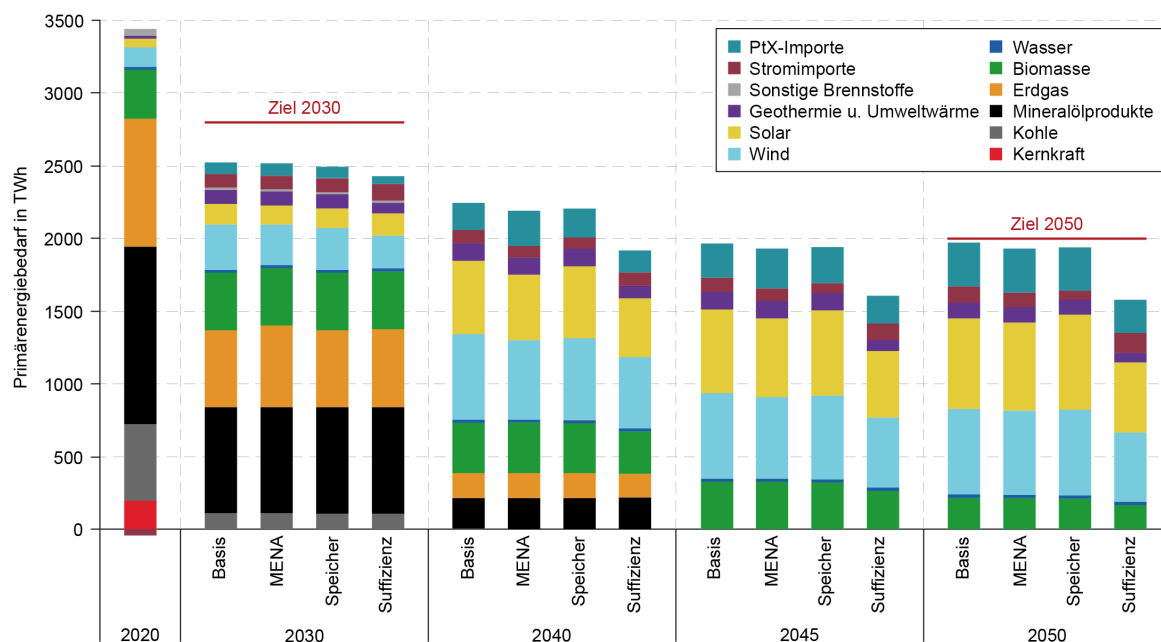


Abbildung 5: Primärenergiebedarf in den Szenarien der Roadmap 4.0 und Ziele der Bundesregierung.

Bis zum Jahr 2030 erfolgt eine Primärenergiereduktion von 27 bis 29 % im Vergleich zum Jahr 2020. Dies ist einerseits auf zunehmende Effizienzgewinne und andererseits auf den steigenden Anteil erneuerbarer Energieträger zurückzuführen, der in diesem Jahr im Mittel bei 37 % liegt. Durch die verwendete Wirkungsgradmethode zur Bilanzierung der Primärenergie sinkt diese mit zunehmender Substitution von fossilen oder nuklearen Brennstoffen durch erneuerbare Energien überproportional ab. Im Jahr 2030 sind darüber hinaus bereits PtX-Importe in Höhe von 53 bis 80 TWh notwendig, die vor allem im Verkehrssektor und der chemischen Industrie eingesetzt werden. Zudem erfolgt ein Ausstieg aus der Nutzung von Kernenergie, sodass diese im Jahr 2030 nicht mehr im deutschen Energiesystem vorhanden ist.

Bis 2040 findet eine weitere Reduktion des Primärenergieverbrauchs statt, sodass dieser um 35 bis 44 % unter dem Wert des Jahres 2020 liegt. Angetrieben durch die verstärkte Stromnutzung aufgrund der Sektorenkopplung erfolgt ein starker Ausbau der Solar- und Windenergie und ein Rückgang fossiler Energieträger, sodass deren Anteil am Primärenergiebedarf lediglich 17 bis 20 % beträgt. Da der Kohleaussieg im Stromsystem bis zum Jahr 2038 abgeschlossen ist, werden im Jahr 2040 nur noch geringe Mengen Kohle in der energieintensiven Industrie verbraucht. Die Importe von Strom und PtX-Produkten betragen je nach Szenario 233 bis 275 TWh. Diese sind notwendig, da das Potenzial der erneuerbaren Energien bzw. deren Ausbaugeschwindigkeiten nicht ausreichen, um die Nachfrage nach Strom sowie synthetischen Gasen und Flüssigkeiten zu decken. Gemäß den Vorgaben des KSG 2021 ist das Energiesystem im Jahr 2045 und 2050 vollständig defossilisiert. Der Großteil der Primärenergie stammt aus Solarenergie und Windkraft, welche für die Stromproduktion und nachfolgende direkte sowie indirekte Nutzung (Power-to-X) eingesetzt wird. Die Ziele der Bundesregierung bezüglich der Primärenergiereduktion in den Jahren 2030 und 2050 werden in allen Szenarien eingehalten, wobei das Szenario *Suffizienz* mit 1579 TWh den geringsten und das Szenario

Basis (RM 4.0) mit 1971 TWh den höchsten Verbrauch aufweist. Die Jahre 2045 und 2050 unterscheiden sich wegen der geforderten Klimaneutralität nur geringfügig voneinander. Lediglich die Biomassenutzung ist gemäß den vorgegebenen Nachhaltigkeitskriterien (keine energetische Nutzung von Anbaubiomasse) leicht rückläufig. Dies verursacht unter anderem eine Steigerung der Importe.

Endenergiebedarf und PtX

Der Endenergiebedarf inklusive des nichtenergetischen Verbrauchs kohlenstoffhaltiger Rohstoffe (Kokereien, chemische Industrie, etc.) ist aktuell geprägt von fossilen Energieträgern. Rund zwei Drittel des Bedarfs wird aus Kohle, Mineralöl und Gas zur Verfügung gestellt. Weitere 20 % der Endenergie werden in Form von Strom verbraucht, der Rest stammt aus biogenen Energieträgern, Solarthermie, Fernwärme und sonstigen Energieträgern (s. Abbildung 6 und Tabelle 2). Durch die angenommenen Effizienzsteigerungen und einer fortschreitenden Umstellung auf weniger energieintensive Technologien findet unabhängig vom Szenario eine starke Reduktion des Energiebedarfs statt, welche im Szenario *Suffizienz* nochmals ausgeprägter als im *Basisszenario* ist. Die anderen Szenarien der Roadmap 4.0 unterscheiden sich lediglich in der Herkunft des Wasserstoffs und des Stroms vom Szenario *Basis (RM 4.0)*, jedoch nicht in der Höhe der Nachfrage. Daher werden die Szenarien *Basis (RM 4.0)*, *MENA* und *Speicher* in diesem Abschnitt zusammengefasst als *Basisszenarien* betrachtet und sind in Abbildung 6 und den weiteren Abbildungen als ein Szenario dargestellt.

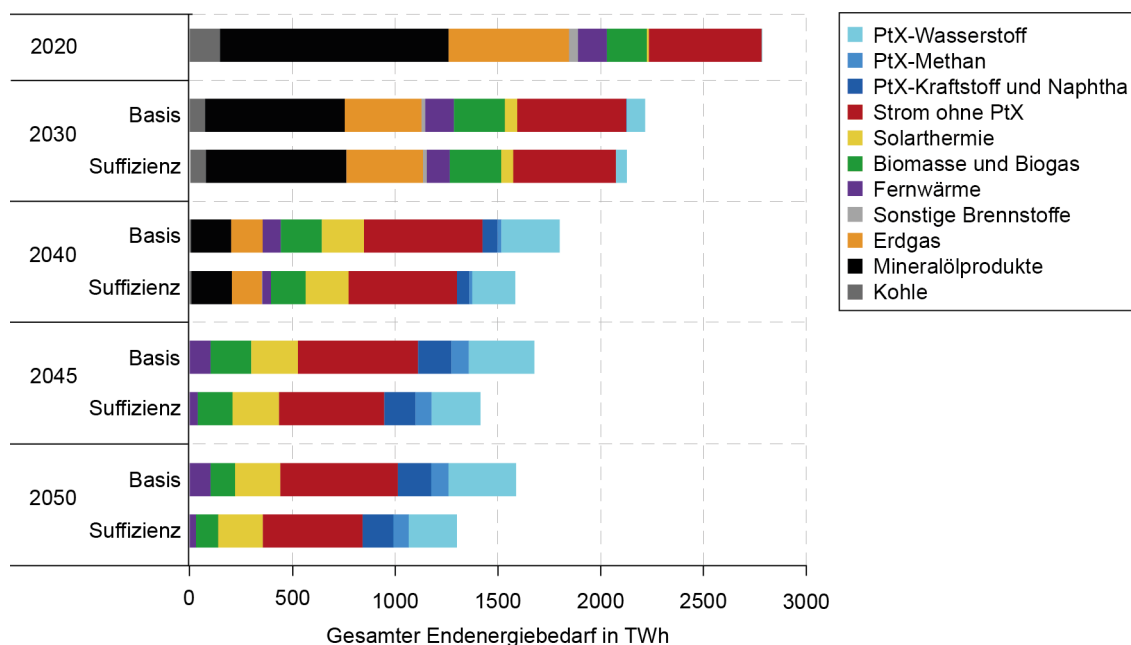


Abbildung 6: Endenergie- und Rohstoffbedarf in den Szenarien der Roadmap 4.0.

In den *Basisszenarien* findet bis zum Jahr 2030 eine Reduktion des Energiebedarfs von 20 % im Vergleich zum Jahr 2020 statt. Dies ist neben den Effizienzsteigerungen hauptsächlich auf die Durchdringung der Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr sowie dem verstärkten Einsatz von Wärmepumpen zur Gebäudeheizung zurückzuführen. Darüber hinaus werden einige energieintensive Produkte und der industrielle Wärmebedarf im Jahr 2030 zum Teil über effizientere Prozesse und Wärmeerzeuger hergestellt. Dazu zählt die Sekundärstahlherstellung über das Elektrostahlverfahren, der Einsatz von alternativen Bindemitteln bei der Herstellung von Zement oder die Nutzung von Strom für die Erzeugung von Wärme unter 500 °C anstelle von Mineralöl oder Erdgas. Zudem findet eine verstärkte Nutzung von Abfallbiomasse und Solarthermie statt. Im Jahr 2030 werden in den *Basisszenarien* bereits 90 TWh Power-to-X-Produkte (vornehmlich Wasserstoff) benötigt, welche im Schwerlastgüterverkehr (64 TWh) und in der chemischen Grundstoffindustrie (26 TWh) eingesetzt werden. Diese im Gegensatz

zur Roadmap 3.0 etwa fünfmal höhere Menge Wasserstoff ist damit zu erklären, dass die neuen Klimaschutzziele eine schnellere Defossilisierung erfordern, welche in den genannten Bereichen und unter den getroffenen Annahmen nur mittels PtX möglich ist. Aktuelle Arbeiten (Burchardt et al. 2021; Jugel et al. 2021; Prognos et al. 2021; Luderer et al. 2021), die das KSG 2021 berücksichtigen, geben je nach Szenario PtX-Mengen in einer Bandbreite zwischen 40 und 100 TWh im Jahr 2030 an (s. Abbildung 7). Damit reiht sich die modellierte PtX-Menge des vorliegenden Forschungsvorhabens gut in diese Bandbreite ein.

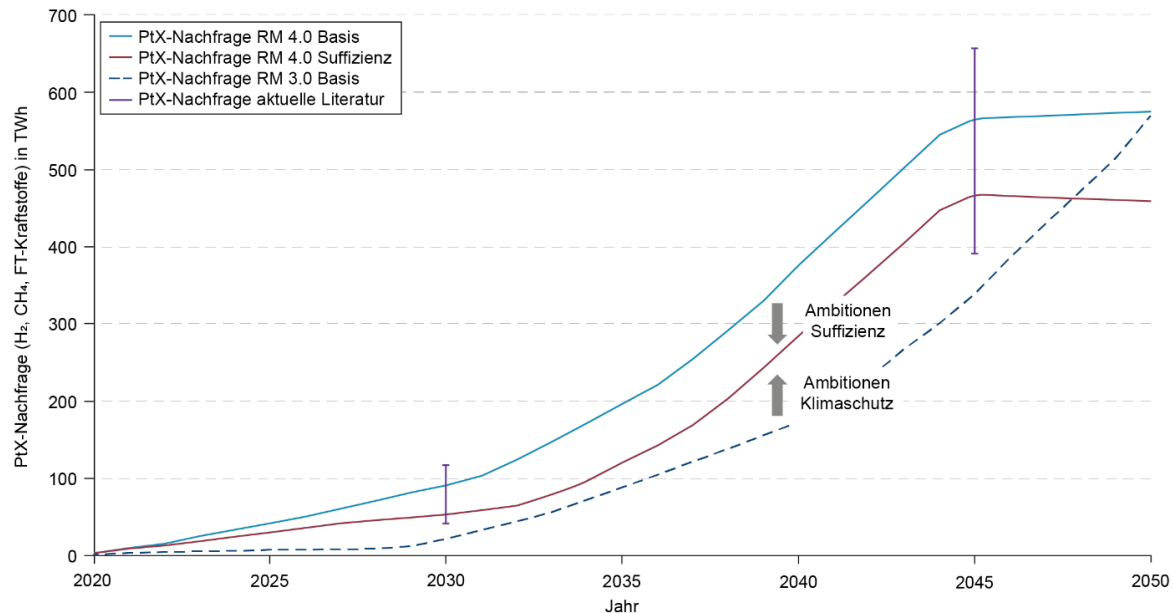


Abbildung 7: Nachfrage nach synthetischen Gasen und Kraftstoffen der Roadmap 4.0 sowie aus aktueller Literatur und dem Basisszenario der Roadmap 3.0.

Im Jahr 2040 werden in den *Basisszenarien* rund 35 % weniger Endenergie und Rohstoffe als 2020 verbraucht. Etwa 80 % der Energie stammt aus Strom, PtX, Solarthermie, Biomasse und Fernwärme. Die verbleibenden Mineralölprodukte werden hauptsächlich im Verkehrssektor in Form von Kraftstoffen sowie der chemischen Industrie (Naphtha) genutzt. Erdgas wird im Jahr 2040 im Gebäudesektor für die Erzeugung von Raumwärme und branchenübergreifend in der Industrie für Prozesswärme eingesetzt. Zudem werden im Industriesektor noch rund 6 TWh Kohle verbraucht (s. Tabelle 2). Die notwendige Menge an Wasserstoff, synthetischem Methan und Flüssigkeiten beläuft sich auf zusammen 376 TWh im Jahr 2040, was etwa der doppelten Menge des PtX-Bedarfs des *Basisszenarios* der Roadmap 3.0 entspricht. Diese Erhöhung ist hauptsächlich auf die verschärften Klimaziele zurückzuführen.

Im Jahr 2045 ist die gesamte Energie- und Rohstoffbereitstellung klimaneutral und liegt in den drei *Basisszenarien* bei 1.667 TWh. Dies entspricht einer Minderung von 40 % im Vergleich zum Jahr 2020. Es werden 566 TWh PtX-Produkte in der Industrie und im Verkehrssektor (319 TWh H₂, 163 TWh PtL, 84 TWh CH₄) eingesetzt. Dies entspricht rund einem Drittel der gesamten Nachfrage und in etwa dem Wert des *Basisszenarios* der Roadmap 3.0 im Jahr 2050. Weiterhin wird ein Drittel des Endenergiebedarfs aus Strom gedeckt. Der Rest stammt aus Biomasse, Fernwärme und Solarenergie. Das Zieljahr 2050 unterscheidet sich kaum vom Jahr 2045, da in beiden Jahren eine Treibhausgasneutralität gefordert wird. Es erfolgt lediglich eine geringe Senkung des Endenergiebedarfs aufgrund steigender Effizienzen und eine leichte Erhöhung des PtX-Bedarfs auf 575 TWh durch steigende industrielle Produktionszahlen und Verkehrsleistungen.

Tabelle 2: Endenergiebedarf inklusive nicht-energetischer Verbrauch (NEV) in den verschiedenen Verbrauchs-sektoren der Szenarien der Roadmap 4.0.

		Kohle	Mineral- öl	Erd- gas	Sons- tige	Fern- wärme	Strom	Bio- masse	Solar	PtX
Szenario <i>Basis (RM 4.0)</i> , MENA und Speicher in TWh										
Verkehr	2020	0,0	739,0	5,8	0,0	0,0	16,2	29,0	0,0	0,0
	2030	0,0	434,8	3,5	0,0	0,0	51,6	15,7	0,0	64,4
	2040	0,0	118,3	0,9	0,0	0,0	98,3	2,6	0,0	161,0
	2050	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	104,4	0,0	0,0	236,4
Industrie inkl. NEV	2020	143,9	225,4	236,1	43,5	57,8	231,2	59,2	0,8	0,0
	2030	73,8	180,3	162,3	18,6	32,6	220,9	127,4	24,5	26,1
	2040	5,5	62,6	66,6	0,0	24,8	251,6	123,3	52,0	214,9
	2050	0,0	0,0	0,0	0,0	38,4	259,6	107,0	43,3	338,5
HH und GHD	2020	3,9	176,9	345,3	0,0	84,6	302,4	106,5	9,0	0,0
	2030	1,7	79,8	208,1	0,0	106,4	258,8	105,4	35,2	0,0
	2040	0,4	17,2	86,4	0,0	63,9	227,2	73,2	153,6	0,0
	2050	0	0,0	0,0	0,0	62,5	208,0	13,2	177,1	0,0
Szenario <i>Suffizienz</i> in TWh										
Verkehr	2020	0,0	739,0	5,8	0,0	0,0	16,2	29,0	0,0	0,0
	2030	0,0	427,3	3,5	0,0	0,0	45,6	15,2	0,0	47,4
	2040	0,0	116,3	0,9	0,0	0,0	81,6	2,2	0,0	89,8
	2050	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	78,1	0,0	0,0	98,4
Industrie inkl. NEV	2020	143,9	225,4	236,1	43,5	57,8	231,2	59,2	0,8	0,0
	2030	74,0	191,5	162,4	19,0	32,6	198,2	129,5	24,5	5,5
	2040	9,0	64,9	57,8	3,0	12,3	231,1	124,7	50,6	167,6
	2050	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	219,0	109,0	46,3	285,8
HH und GHD	2020	3,9	176,9	345,3	0,0	84,6	302,4	106,5	9,0	0,0
	2030	1,7	79,7	208,2	0,0	78,4	255,1	105,4	35,2	0,0
	2040	0,4	17,1	86,5	0,0	29,8	215,6	41,4	158,1	0,0
	2050	0,0	0,0	0,0	0,0	18,3	188,2	0,0	171,0	0,0

Im *Suffizienzscenario* ergibt sich in allen Stützjahren ein geringerer Energiebedarf als in den *Basisszenarien*. Im Jahr 2030 wird zudem weniger H₂ im Schwerlastgüterverkehr benötigt, da die Verkehrsverlagerung und -vermeidung eine Reduktion der Gütertransportleistung durch Lkw bedingen. Daher beträgt die PtX-Menge in diesem Szenario nur 53 TWh. Darüber hinaus wird durch die Maßnahmen im Verkehr und die verringerten Produktionsmengen in der Industrie weniger Strom als im Basisszenario verbraucht. Der Rückgang der fossilen Energie- und Rohstoffträger entspricht im Wesentlichen dem der *Basisszenarien* (s. Abbildung 6). In den Jahren 2040, 2045 und 2050 wird aufgrund des veränderten Wohnverhaltens weniger Fernwärme als in den *Basisszenarien* zur Raumheizung eingesetzt. Auch die Biomassenutzung geht leicht zurück. Am deutlichsten ist der Unterschied der Sensitivitäten am PtX-Bedarf zu erkennen. Im Jahr 2040 liegt dieser bei 284 TWh, 2045 bei 467 TWh und 2050 bei 459 TWh. Dies sind 92 TWh, bzw. 98 TWh und 116 TWh weniger als in den *Basisszenarien*. Es zeigt sich also, dass Verhaltensänderungen erheblichen Einfluss auf die notwendigen PtX-Mengen besitzen. Besonders das Verkehrs- und Konsumverhalten weist einen starken Zusammenhang bezüglich des PtX-Bedarfs auf. Aber auch eine Änderung der Ernährung und damit ein Rückgang der Tierzahlen und der landwirtschaftlichen Fläche wirkt sich auf die Düngemittelproduktion und somit auf die Herstellung von Ammoniak und Salpetersäure mittels PtX aus.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die benötigte Menge an synthetischen Gasen und Flüssigkeiten mit steigendem Ambitionsniveau der Suffizienzmaßnahmen sinkt und mit strikteren Klimaschutzziele ansteigt. Dies ist deutlich anhand Abbildung 7 zu erkennen. Die Ergebnisse bezüglich der PtX-Mengen in diesem Forschungsvorhaben liegen zwischen 467 und 566 TWh im Jahr 2045 und damit innerhalb der Bandbreite aktueller Studien. Im Jahr 2050 werden PtX-Produkte mit einem Energiegehalt zwischen 459 und 575 TWh benötigt.

Subtask 1.6: Einordnung von PtX-Pfaden

In Subtask 1.6 wurden die verschiedenen Hauptanwendungspfade für PtX anhand der Modellierungsergebnisse identifiziert. Die Ergebnisse werden im Folgenden vordergründig für das *Basisszenario* der Roadmap 4.0 präsentiert, da sich die grundlegenden PtX-Einsatzgebiete nicht von denen der anderen Szenarien unterscheiden.

Die Modellierungsergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass PtX nur in Anwendungen eingesetzt wird, für die keine effizienteren oder günstigeren Methoden der Defossilisierung existieren. Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, sind dies unter den getroffenen Annahmen ausschließlich Subsektoren in der Industrie und im Verkehr. In der Abbildung sind die Nutzungspfade im Jahr 2050 des *Basisszenarios* der Roadmap 4.0 beginnend bei Wasserstoff dargestellt. Insgesamt werden 19,5 Mio. t bzw. 649 TWh Wasserstoff benötigt, von denen 53 % national produziert werden. Davon wird über die Hälfte im Industriesektor verbraucht. Etwa 178 TWh werden in Form von Wasserstoff für die Direktreduktion von Stahl und die Herstellung der Grundstoffchemikalien Methanol, Ammoniak, Ethylen und der High-value chemicals (HVC) Propylen, Buten und Butadien eingesetzt. Weitere 103 TWh werden in Power-to-Gas-Anlagen zu 85 TWh Methan umgewandelt, das stofflich genutzt wird. Zudem erfolgt ein energetischer Einsatz des synthetischen Methans zur Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme, die nicht durch Strom bereitgestellt werden kann. Hierfür können die bereits bestehenden gasbeheizten Öfen genutzt werden. Außerdem wird ein Teil des Wasserstoffs für die Industrie über die Fischer-Tropsch-Synthese zu 75 TWh Naphtha umgewandelt, das stofflich in der Grundstoffchemie verwendet wird.

Im Verkehrssektor werden 23 % des Wasserstoffs (150 TWh) direkt in Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt. Davon verbrauchen Lkw den größten Teil von 147 TWh. Der Rest wird für die Bahn- und Busstrecken benötigt, welche nicht elektrifizierbar sind. Darüber hinaus werden 18 % bzw. 117 TWh Wasserstoff in Power-to-Liquid-Anlagen zu 87 TWh e-Fuels konvertiert. Diese werden hauptsächlich als synthetisches Kerosin im Personen- und Güterflugtransport eingesetzt (84 TWh), da hier keine bzw. kaum Alternativen zu einem klimaneutralen Treibstoff existieren. Weitere 3 TWh e-Fuels werden in Schiffen als Ersatz von Mineralölkraftstoffen nachgefragt.

Für die Erzeugung von Heizwärme und Warmwasser in Haushalten, dem GHD-Sektor und der Industrie sowie zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme unter 500 °C wird in keinem Szenario auf PtX-Produkte zurückgegriffen. Dies liegt an den hier verfügbaren effizienteren und kostengünstigeren Alternativen wie Wärmepumpen, Biomasse oder Fernwärme. Auch im motorisierten Individualverkehr werden direktelektrische Antriebe mit besserem Wirkungsgrad bevorzugt behandelt und PtX-Kraftstoffe nur übergangsweise genutzt.

In den Szenarien *MENA* und *Speicher* der Roadmap 4.0 ergeben sich nahezu dieselben PtX-Mengen und Verteilungen auf die Subsektoren, allerdings variiert hier die Herkunft des Wasserstoffs. Im Szenario *MENA* werden 75 TWh aus den nichteuropäischen und 226 TWh aus dem europäischen Ausland importiert. Im *Speicherszenario* ergibt sich eine Importmenge von 298 TWh H₂ aus Europa. Das *Suffizienzscenario* weist hingegen aufgrund der Verhaltensänderungen eine geringere Nachfrage nach Wasserstoff auf. Diese liegt bei 526 TWh im Jahr 2050, wovon 43 % aus dem Ausland stammen. Die grundsätzlichen Nutzungspfade entsprechen denen des Szenarios *Basis (RM 4.0)*. In den Szenarien der Roadmap 3.0 werden im Mittel 662 TWh Wasserstoff im Jahr 2050 benötigt. Auch hier sind die Nutzungspfade und PtX-Mengen vergleichbar mit denen in Abbildung 8.

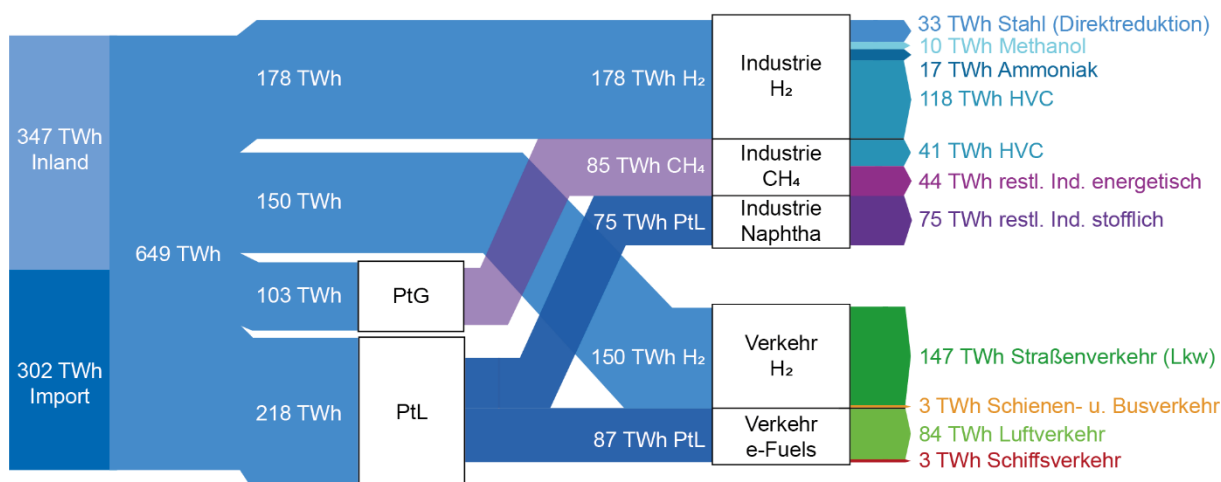


Abbildung 8: Nutzungspfade von H₂ im Jahr 2050 des Basisszenarios der Roadmap 4.0.

Aus den Modellergebnissen wird ersichtlich, dass der Einsatz von PtX für ein defossilisiertes Energiesystem unverzichtbar ist. Als weiterer Grundpfeiler der Energiewende dient neben einer Effizienz- und/oder einer Suffizienzsteigerung die verstärkte Nutzung von Strom zur Sektorenkopplung. Für diese Optionen ist eine schnelle Reduktion der THG-Emissionen im Stromsektor notwendig. Denn nur bei sehr geringen bis keinen spezifischen direkten Emissionen des Strommix weisen die Nutzung von Power-to-X und anderen Technologien zur Sektorenkopplung wie Wärmepumpen oder die Elektromobilität ökologische Vorteile gegenüber fossilen Energieträgern auf.

Die Modellierung des Stromsektors erfolgte durch die *TUM ENS* und wird daher nicht weiter ausgeführt. Die Ergebnisse hierzu sowie weitere Details auf der Nachfrageseite des Energiesystems sind in den Roadmaps 3.0 (Ausfelder und Dura 2021) und 4.0 (Ausfelder und Tran 2022) zu finden.

Zuletzt erfolgte in einer kostenneutralen Verlängerung die Mitarbeit an ergänzenden Betrachtungen und Bewertungen zu den UN-Zielen für eine nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, kurz: SDGs). Diese Mitarbeit fand überwiegend in Form von Beratungen in diversen virtuellen Diskussionsrunden mit anderen P2X-Tasks statt, da die geplanten Veröffentlichungen innerhalb des Arbeitspaketes außerhalb des Förderzeitraums des vorliegenden Forschungsvorhabens liegen. Der Fokus lag auf Schnittstellen der SDGs und PtX, wobei die Nachhaltigkeitsziele „4 Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen“, „7 Bezahlbare und saubere Energie“, „9 Industrie, Innovation und Infrastruktur“, „13 Maßnahmen zum Klimaschutz“, „14 Leben unter Wasser“ und „16 Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen“ als wichtigste Schnittstellen identifiziert wurden.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der wesentliche Kostenfaktor des Forschungsvorhabens entfiel auf die Beschäftigung des wissenschaftlichen Personals zur Bearbeitung des Projekts. Hierfür wurden im Jahr 2019 27.519 €, im Jahr 2020 83.470 €, im Jahr 2021 79.056 € und im Jahr 2022 63.124 € ausbezahlt. Insgesamt betrugen die Personalkosten damit 253.169 €. Zudem wurden 11.692 € (2019: 430 €, 2020: 1.146 €, 2021: 2.150 €, 2022: 7.966 €) der Förderung für Reisetätigkeiten verwendet. Somit wurden insgesamt 264.861 € (exklusive Projektpauschale) der verfügbaren Fördersumme von 257.281 € abgerufen. Der negative Kassenbestand wurde durch Drittmittelkompensation ausgeglichen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die *OTH Regensburg* als eine der größten Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Bayern ist eine staatliche Einrichtung, für die eine Eigenfinanzierung bei Forschungsarbeiten nicht möglich ist. Daher stand für die durchgängige Beschäftigung des wissenschaftlichen Personals keine Grundfinanzierung zur Verfügung, die für eine effektive Arbeit notwendig war. Auch die Kosten der Projekttreffen, Konsortialtreffen und der Besuch relevanter Konferenzen konnten ohne eine Förderung seitens des BMBF nicht abgedeckt werden. Die bereitgestellten Mittel wurden entsprechend der definierten Arbeitspakete und Meilensteine genutzt und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet.

Das Forschungsvorhaben war notwendig, um einen übergeordneten Systemvergleich aller PtX-Technologien durchzuführen. Die modellgestützte Untersuchung des Einsatzes von PtX war vor allem im Kontext des KSG 2021 zielführend und ist für eine weitere Ausgestaltung der Energiewende zwingend erforderlich. Mithilfe der zugeteilten Mittel durch das BMBF konnte darüber hinaus ein Energiesystemmodell entworfen werden, das in kommenden Projekten und Forschungsarbeiten weiter genutzt werden kann.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Durch das Forschungsvorhaben konnte eine definierte Systemumgebung in einem Energiemodell geschaffen werden, in der eine fundierte Technologieanalyse für PtX möglich war. Dies ermöglicht eine konstruktive und zielführende Diskussion in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft hinsichtlich der Integration von PtX in das Energiesystem.

Die wissenschaftliche Hauptverwertung des Forschungsvorhabens stellen die durch das Energiemodell abgeleiteten vielversprechendsten PtX-Pfade dar, welche sich technisch und volkswirtschaftlich behaupten und etablieren können. Mit den Ergebnissen können langfristige Entscheidungen für eine nachhaltige Transformation und Defossilisierung der verschiedenen Sektoren des Energiesystems getroffen werden. Es konnte gezeigt werden, dass PtX vor allem in den Sektoren Verkehr und Industrie zwingend notwendig ist und ein Erreichen der Klimaschutzziele ohne diese PtX-Technologien kaum möglich ist. Die Technologien müssen bereits sehr früh großflächig in den Sektoren eingesetzt werden. Weiterhin ging aus der Modellierung hervor, dass PtX in Sektoren, in denen effizientere Alternativen verfügbar sind, keine Anwendung findet. Damit kann die Debatte um die sinnvollsten Einsatzgebiete von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten unterstützt werden.

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Energiesystemmodell bildet den deutschen Industriesektor inklusive des dort energetischen und nicht-energetischen Verbrauch in einem Detailgrad ab, der in bisherigen Studien zur gesamtheitlichen Defossilisierung des Energiesystems nur oberflächlich betrachtet wurde. Dies ist insbesondere für die Energieforschung und -politik von Relevanz.

Zudem wurden in einem Szenario eine Vielzahl von Suffizienzmaßnahmen integriert und deren Auswirkungen auf den zukünftigen Energie- und PtX-Bedarf sowie die Treibhausgasemissionen analysiert. Damit konnte neben dem Einsatz erneuerbarer bzw. alternativer Technologien und der Erhöhung der Energieeffizienz eine weitere Strategie für das Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung und der Klimaschutzziele identifiziert werden, welche zukünftig in politische Diskussionen eingehen könnte.

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden in wissenschaftlichen Publikationen aufbereitet (s. Abschnitt II 6) sowie auf verschiedenen Tagungen und Konferenzen kommuniziert (s. Subtask 1.1) und stoßen auf Zustimmung innerhalb der wissenschaftliche Fachgemeinschaft. So wurden die detaillierten Modellierungskategorien der Industrie beispielsweise in die BMWK Langfristszenarien übernommen. Hier war das vorliegenden Vorhaben wegweisend. Im Sinne des voranschreitenden Interesses am Klimaschutz und der PtX-Technologie sind sie zudem interessant für die breite Öffentlichkeit. Aus diesem Grund werden und wurden ausgewählte

und speziell aufbereitete Erkenntnisse des Forschungsvorhabens auch in Vorträgen für die Allgemeinheit und in Vorlesungen an der *OTH-Regensburg* genutzt. Die Kernergebnisse sind ebenfalls in das populärwissenschaftliche Sachbuch „So retten wir das Klima - wie wir uns unabhängig von Kohle, Öl und Gas machen“ eingeflossen, welches als Spiegel Bestseller auch eine große Reichweite hat und den Wissenstransfer in die Gesellschaft fördert.

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektvorhabens der wissenschaftliche Nachwuchs gefördert. Es entstanden eine Master- und eine Bachelorarbeit (s. Abschnitt II 6). Ferner wurde während des Projekts eine Dissertation bearbeitet und fertiggestellt. Die Einreichung dieser Arbeit erfolgt voraussichtlich im Juli 2023.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Forschungsvorhabens sind folgende Arbeiten im Bereich von Power-to-X sowie der Modellierung des deutschen Energiesystems erschienen, die allerdings den erzielten Forschungsergebnissen nicht widersprechen, sondern sie zum Teil untermauern (in allen Arbeiten sind bereits die neuen Klimaschutzziele nach KSG 2021 enthalten, wodurch sie vergleichbar mit den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsvorhabens sind):

- Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem (Brandes et al. 2021)
- Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann (Prognos et al. 2021)
- Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität (Jugel et al. 2021)
- Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 (Luderer et al. 2021)
- Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Sensfuß et al. 2022)

In allen Szenarien der oben genannten Studien wird die Notwendigkeit von Power-to-X zur Defossilisierung des Energiesystems hervorgehoben, wobei sich die benötigten Mengen je nach Annahmen teilweise stark voneinander unterscheiden. Die PtX-Mengen in Szenarien mit ähnlichen Annahmen wie die des vorliegenden Forschungsvorhabens zeigen jedoch eine gute Übereinstimmung mit den eigenen Ergebnissen. Auch wird der Einsatz der PtX-Technologie vor allem im Verkehrs- und Industriesektor als relevant gesehen. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens. Weiterhin wurde im Rahmen der Modellierung vor allem der Industriesektor sehr detailliert abgebildet. Dies stellt einen wesentlichen Mehrwert gegenüber den oben aufgeführten Forschungsarbeiten dar.

Zuletzt änderten sich während der Durchführung des Forschungsvorhabens die gesetzlich vorgeschriebenen Klimaschutzziele. Aus diesem Grund mussten die Randbedingungen für die Energiesystemanalyse angepasst werden. Daraus resultierten jedoch keine größeren Verzögerungen der Arbeiten innerhalb der Subtasks und alle Meilensteine konnten eingehalten werden.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Folgende Arbeiten wurden oder werden innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens veröffentlicht:

Abschlussarbeiten:

- Dissertation Bauer, Franz (2023; eingereicht, noch nicht veröffentlicht): *Analyse von Suffizienzpotenzialen im Kontext einer nachhaltigen Transformation des deutschen Energiesystems anhand eines sektorübergreifenden Optimierungsmodells.*
- Bachelorarbeit Meisinger, Alexander (2021): *Nachhaltige Energiekonzepte für die Schutzhütte Höllensteinhaus.*

- Masterarbeit Meisinger, Alexander (2023): *Auf dem Weg zu einer deutsch-französischen Energiewende: Ein kostenbasiertes sektorgekoppeltes Optimierungsmodell unter Berücksichtigung des Europäischen Green Deals*.

Publikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften:

- Bauer, Franz; Sterner, Michael (2023; in Review): *Impacts of lifestyle changes on energy demand and greenhouse gas emissions in Germany*. In: Nature Communications.
- Meisinger, Alexander (2022): *The Role of Energy Storages for the Transition to a Climate-Neutral Energy System in Germany in 2045*. Applied Research Conference 2022.

Weitere Veröffentlichungen:

- Sterner, Michael (2023): *So retten wir das Klima: Wie wir uns unabhängig von Kohle, Öl und Gas machen*. München: Komplett-Media Verlag.
- Ausfelder, Florian; Dura, Hanna; Bauer, Franz et al. (2021): *Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II*. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Ausfelder, Florian; Tran, Dinh Du; Bauer, Franz et al. (2022): *Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. 4. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II*. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Folgende Veröffentlichungen sind noch geplant:

- Wissenschaftliches Paper über den zukünftigen Energie-, bzw. PtX-Bedarf und die Treibhausgasemissionen in der Industrie in Deutschland und evtl. Europa anhand eines Bottom-Up-Ansatzes und des Energiesystemmodells.

Literaturverzeichnis

AGEB (2021): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Berlin.

Ahnis, Erik; Wehling, Anja; Köppel, Wolfgang; Sterner, Michael; Lucke, Nadine (2018): Technisch-ökonomische Modellierung eines sektorengesetzten Gesamtenergiesystems aus Gas und Strom unter Fortschreibung des regulatorischen Rahmens. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches. Bonn.

Ausfelder, Florian; Dura, Hanna (2019): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. Nachhaltigkeitseffekte - Potenziale Entwicklungsmöglichkeiten: 2. Roadmap des Kopernikus-Projektes "Power-to-X": Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X). Dechema. Frankfurt am Main.

Ausfelder, Florian; Dura, Hanna (2021): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II. Dechema.

Ausfelder, Florian; Tran, Du Dinh (2022): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X-Technologien. 4. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II. Dechema. Frankfurt am Main.

BMBF (2019): Kopernikus P2X Satelliten-Projekt: SPIKE. Wie das Projekt SPIKE gezeigt hat, welche Rolle Power-to-X im Energiesystem der Zukunft spielt. Online verfügbar unter <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/p2x/spike>, zuletzt geprüft am 06.12.2022.

Brandes, Julian; Haun, Markus; Wrede, Daniel; Jürgens, Patrick; Kost, Christoph; Henning, Hans-Martin (2021): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Update November 2021: Klimaneutralität 2045. Fraunhofer ISE. Freiburg.

Brischke, Lars-Arvid; Leuser, Leon; Duscha, Markus; Thomas, Stefan; Thema, Johannes; Spitzner, Meike (2016): Energiesuffizienz - Strategien und Instrumente für eine technische, systemische und kulturelle Transformation zur nachhaltigen Begrenzung des Energiebedarfs im Konsumfeld Bauen / Wohnen. Endbericht. Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg.

Brunke, Jean Christian (2017): Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland. Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.

Brynnolf, Selma; Taljegard, Maria; Grahn, Maria; Hansson, Julia (2017): Electrofuels for the transport sector. A review of production costs. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, S. 1887–1905.

Burchardt, Jens; Franke, Katharina; Herhold, Patrick; Hohaus, Maria; Humpert, Henri; Päivärinta et al. (2021): Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Bundesverband der Deutschen Industrie; Boston Consulting Group. München.

Burre, Jannik; Bongartz, Dominik; Brée, Luisa; Roh, Kosan; Mitsos, Alexander (2020): Power-to-X: Between Electricity Storage, e-Production, and Demand Side Management. In: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (1-2), S. 74–84. DOI: 10.1002/cite.201900102.

Daiyan, Rahman; MacGill, Iain; Amal, Rose (2020): Opportunities and Challenges for Renewable Power-to-X. In: *ACS Energy Lett.* 5 (12), S. 3843–3847. DOI: 10.1021/acsenenergylett.0c02249.

Decourt, Benoit (2019): Weaknesses and drivers for power-to-X diffusion in Europe. Insights from technological innovation system analysis. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (33), S. 17411–17430. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.149.

Destatis (2021): Datenbank des Statistischen Bundesamtes (Genesis Online). 42131-003: Produktionswert, -menge, -gewicht und Unternehmen der Vierteljährlichen Produktionserhebung: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis (9-Steller). Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

Eveloy, Valerie; Romeo, Luis M.; Parra, David; Qadrdan, Meysam (2021): Editorial: Advances in Power-to-X: Processes, Systems, and Deployment. In: *Front. Energy Res.* 9, Artikel 650510. DOI: 10.3389/fenrg.2021.650510.

Farfan, Javier; Fasihi, Mahdi; Breyer, Christian (2019): Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X. In: *Journal of Cleaner Production* 217, S. 821–835. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.226.

Fischer, Corinna; Beznoska, Martin; Blanck, Ruth; Cludius, Johanna; Brohmann, Bettina; Förster, Hannah (2016): Konzept zur absoluten Verminderung des Energiebedarfs: Potenziale, Rahmenbedingungen und Instrumente zur Erreichung der Energieverbrauchsziele des Energiekonzepts. Umweltbundesamt. Freiburg.

Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien. Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer ISI. Stuttgart.

Habert, Guillaume; Miller, Sabbie; John, Vanderley; Provis, John; Favier, Aurélie; Horvath, Arpad; Scrivener, Karen (2020): Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. In: *Nature Reviews Earth & Environment* 1, S. 559–573.

Jugel, Christoph; Albicker, Martin; Bamberg, Carsten; Battaglia, Manuel; Brunken, Elias; Bründlinger, Thomas et al. (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Deutsche Energie-Agentur. Berlin.

Kenkmann, Tanja; Cludius, Johanna; Fischer, Corinna; Fries, Tilman; Keimeyer, Friedrich; Schumacher, Katja et al. (2019): Flächensparend Wohnen. Energieeinsparung durch Suffizienzpolitiken im Handlungsfeld „Wohnfläche“. Umweltbundesamt; Öko-Institut; Institut für Energie- und Umweltforschung. Dessau-Roßlau.

Kuhnhenh, Kai (2017): Wachstumsrücknahme in Klimaschutzszenarien. Konzeptwerk Neue Ökonomie. Leipzig.

Luderer, Gunnar; Kost, Christoph; Sörgel, Dominika; Günther, Claudia; Benke, Falk; Auer, Cornelia et al. (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam.

Pfennig, Maximilian; Böttger, Diana; Häckner, Benedikt; Geiger, David; Zink, Christoph; Bisevic, André; Jansen, Lukas (2022): Global GIS-based potential analysis and cost assessment of Power-to-X fuels in 2050. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2208.14887>.

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut. Berlin.

Purr, Katja; Günther, Jens; Lehman, Harry; Nuss, Philip; Adlunger, Kirsten; Balzer, Frederike et al. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE -Studie. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Rego de Vasconcelos, Bruna; Lavoie, Jean-Michel (2019): Recent Advances in Power-to-X Technology for the Production of Fuels and Chemicals. In: *Frontiers in chemistry* 7, S. 392. DOI: 10.3389/fchem.2019.00392.

Remus, Rainer; Aguado Monsonet, Migual; Roudier, Serge; Sancho, Luis Delago (2013): Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production. Industrial emissions directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control): Publications Office of the European Union.

Samadi, Sascha; Gröne, Marie-Christine; Schneidewind, Uwe; Luhmann, Hans-Jochen; Venjakob, Johannes; Best, Benjamin (2017): Sufficiency in energy scenario studies. Taking the potential benefits of lifestyle changes into account. In: *Technological Forecasting and Social Change* 124, S. 126–134.

Sensfuß, Frank; Lux, Benjamin; Bernath, Christiane; Kiefer, Christoph; Pfluger, Benjamin; Kleinschmitt, Christoph et al. (2022): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Szenarien T45. Fraunhofer ISI; Consentec; Institut für Energie- und Umweltforschung; TU Berlin. Karlsruhe.

Siegemund, Stefan; Trommler, Marcus; Kolb, Ole; Zinnecker, Valentin; Schmidt, Patrick; Weindorf, Werner et al. (2017): E-Fuels Study. The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU. Deutsche Energie-Agentur; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik. Berlin.

Sterner, Michael; Specht, Michael (2021): Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept. In: *Energies* 14 (20), S. 6594. DOI: 10.3390/en14206594.

Strogies, Michael; Gniffke, Patrick; Günther, Dirk; Schiller, Stephan; Kludt, Robert; Kunze, David et al. (2021): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2021. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2019. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Thiel, Gregory P.; Stark, Addison K. (2021): To decarbonize industry, we must decarbonize heat. In: *Joule* 5 (3), S. 531–550. DOI: 10.1016/j.joule.2020.12.007.

VCI (2020): Chemiewirtschaft in Zahlen 2020. Verband der Chemischen Industrie. Frankfurt.

WBGU (2016): Entwicklung und Gerechtigkeit durch Transformation: Die vier großen I. Sondergutachten. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Berlin.

Wiese, Frauke; Thema, Johannes; Cordoch, Luisa (2022): Strategies for climate neutrality. Lessons from a meta-analysis of German energy scenarios. In: *Renewable and Sustainable Energy Transition* 2, 100015.

Willett, Walter; Rockström, Johan; Loken, Brent; Springmann, Marco; Lang, Tim; Vermeulen, Sonja et al. (2019): Food in the Anthropocene. The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. In: *The Lancet* 393 (10170), S. 447–492.

WV Stahl (2020): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Düsseldorf.

Zell-Ziegler, Carina; Förster, Hannah (2018): Mit Suffizienz mehr Klimaschutz modellieren. Relevanz von Suffizienz in der Modellierung, Übersicht über die aktuelle Modellierungspraxis und Ableitung methodischer Empfehlungen. Umweltbundesamt; Öko-Institut. Berlin.

Zozmann, Elmar; Eerma, Mirjam Helena; Manning, Dylan; Økland, Gro Lill; Del Angel, Citlali Rodriguez; Seifert, Paul E. et al. (2021): The Potential of Sufficiency Measures to Achieve a Fully Renewable Energy System - A case study for Germany. TU Berlin. Berlin, Trondheim.