

PROPOWER

Systemanalyse Power2Products –
Ökonomische und sozial-ökologische
Auswirkungen einer sektorübergreifenden
Nutzung von Strom

Handlungsempfehlungen aus
Teilprojekt A: Technische Analyse

PROPOWER

Systemanalyse Power2Products –
Ökonomische und sozial-ökologische
Auswirkungen einer sektorübergreifenden
Nutzung von Strom

Handlungsempfehlungen aus
Teilprojekt A: Technische Analyse

FKZ: 03ET4052A

Laufzeit: 01.01.2018 – 31.03.2021

Dr. Ulrike Ehrenstein, Angelina Berger*, Dr. Anna Grevé

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, UMSICHT
in Oberhausen

*bis 02-2021 bei Fraunhofer UMSICHT

Die Projektbearbeitung erfolgte in Kooperation mit dem Institut für
ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Teilprojekt B:
Sozial-Ökologische Analyse, FKZ 03ET4052B

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde
mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
unter dem Förderkennzeichen 03ET4052A gefördert



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Themenspezifische Handlungsempfehlungen	5
2.1	Technologie	5
2.2	Infrastruktur.....	7
2.3	Ökonomie und rechtlicher Rahmen	9
2.4	Ressourcen und Ökologie.....	14
2.5	Systemische Aspekte	16
2.6	Handlungsebenen.....	19
2.7	Soziale Aspekte.....	20
2.8	Methodik	21
3	Fazit.....	22
	Literaturverzeichnis.....	23

In dem Forschungsprojekt ProPower wurde eine umfassende **Analyse von Power-to-X-Technologien (PtX)** durchgeführt und eine **Bewertungsmethodik** für diese Technologien mit Blick auf u. a. technische, räumliche, ökonomische und ökologische Aspekte entwickelt. Aus den Erkenntnissen wurden die nachfolgend aufgeführten Handlungsempfehlungen abgeleitet, die sich an die Wirtschaft und an politische Akteure richten und als Orientierungswissen dienen sollen.

Der Bedarf für eine Bewertung von PtX-Technologien ergibt sich aus der aktuellen Phase der Energiewende, in der die **Sektorenkopplung** zunehmend an Bedeutung gewinnt. Hintergrund dieser Entwicklung ist die herausragende Bedeutung von erneuerbar produziertem Strom für das zukünftige Energiesystem. Dieser Strom bietet die Möglichkeit für nachhaltige Transformationen in allen Sektoren der Wirtschaft, weil er auf unterschiedlichen Wegen in das System integriert werden kann: durch die direkte Nutzung des Stroms in herkömmlichen Anwendungen, durch die zeitversetzte Nutzung mit einer Zwischenspeicherung in Batterien und auch durch die Elektrifizierung bislang anders betriebener Prozesse.

PtX-Technologien kommt dabei eine zentrale Rolle zu, denn die Bandbreite an möglichen Technologien und Anwendungsfeldern ist groß¹. Sie nutzen elektrischen Strom für die Herstellung von diversen Produkten und zur Bereitstellung unterschiedlicher Dienstleistungen, wie z. B. Mobilitätskonzepten oder Flexibilitätsleistungen². Stammt dieser Strom aus erneuerbaren Quellen, tragen PtX-Prozesse zum Erreichen der Klimaschutzziele bei.

Gleichzeitig stellt erneuerbarer Strom u. a. aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Flächen und der fehlenden Akzeptanz für einen massiven weiteren EE-Ausbau eine **limitierte Ressource** dar. Da der größte Anteil an der Stromerzeugung durch die fluktuierend produzierenden Windkraft- und PV-Anlagen übernommen werden wird, ergeben sich zudem zeitliche und räumliche Abweichungen zwischen Stromproduktion und Strombedarf, die ausgeglichen werden müssen. Damit stellt sich die Frage, welche PtX-Technologien und Geschäftsmodelle geeignet sind, um den erneuerbar produzierten Strom bestmöglich zu nutzen.

Die **Ableitung der Handlungsempfehlungen** aus dem Projekt ProPower erfolgte anhand der für die Methodikentwicklung vorgenommenen Analysen. Im Verlauf dieser Arbeiten wurden relevante Technologien ermittelt und charakterisiert. Die Ergebnisse wurden eingebettet in weitere Analysen zu Aspekten, die hinsichtlich der Umsetzung der Technologien und ihrer Implementierung in das Gesamtsystem von Bedeutung sind.

Eine ausführliche Beschreibung der Analysen und der Projektergebnisse ist dem Schlussbericht des Projekts (Stand der Bearbeitung: **Oktober 2021**) [Ehrenstein et al. (2021)] zu entnehmen. Die nachfolgend vorgestellten Handlungsempfehlungen basieren auf den im Projekt vorgenommenen Untersuchungen und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Ihre Zusammenstellung für dieses Papier erfolgte im **März 2022**. An einigen Stellen wurde daher eine Neueinordnung bzw. -bewertung von Zusammenhängen in Bezug auf aktuelle Entwicklungen vorgenommen. Eine kompakte Übersicht über die adressierten Themenfelder gibt die Kurzfassung der Handlungsempfehlungen³. Die Ergebnisse der sozial-ökologischen Analysen des Projekts hat das IÖW in eigenen Veröffentlichungen bereitgestellt⁴.

¹ vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 16 ff.; S. 27, Abb. 6

² Flexibilitäten sind erforderlich, um die Fluktuationen in der erneuerbaren Stromerzeugung bedarfsseitig auszugleichen.

³ <https://s.fhg.de/datenblatt-propower-pdf>

⁴ https://www.ioew.de/projekt/propower_systemanalyse_power2products

2 Themenspezifische Handlungsempfehlungen

Auf Basis einer vorgenommenen Begriffsdefinition für Power-to-X (PtX), die eine eindeutige Zuordnung von Technologien ermöglichen soll [Berger et al. (2020)], konnte eine Vielzahl an projektrelevanten Technologien identifiziert werden. Diese wurden den Cluster-Kategorien Power-to-Power, Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-Solid, Power-to-Heat und Power-to-Mobility zugeordnet. Die Cluster wurden technisch charakterisiert und anhand der Kriterien „Bestehender Forschungsbedarf“, „Flexibilisierungspotenzial“ und „Veränderungspotenzial“ bewertet. Auf dieser Basis wurden die Cluster Power-to-Gas, Power-to-Liquid und Power-to-Solid für die weiteren Analysen ausgewählt. Sie enthalten insgesamt 23 Technologien und decken ein weites Spektrum an Produktionsoptionen ab. Die Technologien wurden differenziert betrachtet und technologisch sowie hinsichtlich zugehöriger Märkte, ökologischer und infrastruktureller Aspekte beschrieben und weitergehend kriterienbasiert bewertet.

2.1 Technologie

Zu den technologischen bzw. verfahrenstechnischen Bewertungskriterien der Technologien zählen das TRL (Technology Readiness Level), der energetische Wirkungsgrad, das Flexibilisierungspotenzial des Prozesses und der Prozessunterschied zur konventionellen Synthese¹.

Handlungsempfehlung:

Technologiespezifische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten fördern

Die betrachteten Technologien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer TRL und den Wirkungsgraden, woraus abzuleiten ist, dass die für die Sektorenkopplung mittels PtX in Frage kommenden Technologien aus einem sich derzeit dynamisch entwickelnden Feld stammen. Zudem besitzen sie unterschiedliche Entwicklungsperspektiven. Um die darin liegenden Potenziale auszuschöpfen, sind weitere technologiespezifische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich. Dies betrifft oftmals die für verschiedene Syntheseschritte erforderlichen Katalysatoren sowie die Steigerung von Umwandlungseffizienzen bzw. Produktausbeuten und auch die Entwicklung günstiger Fertigungsprozesse für die Umwandlungsmodule, bspw. Elektrolyseure.

Handlungsempfehlung:

Systemdienliche Potenziale von PtX-Technologien ausschöpfen

Auch beim Flexibilisierungspotenzial unterscheiden sich die Technologien teilweise stark. Hier kann die Technologieentwicklung nur bedingt zu weiteren Verbesserungen führen. Es geht daher vielmehr darum, Technologien mit hoher Flexibilität so systemdienlich wie möglich in das Gesamtsystem einzufügen, um diese Eigenschaft möglichst optimal zu nutzen. Bei der Integration von nicht oder nur gering flexiblen Prozessen in das System ist zu berücksichtigen, dass ihre Bedarfe nicht nur quantitativ, sondern auch zeitlich festgelegt zu decken sind.

Handlungsempfehlung:

Flexibilität von PtX-Technologien der zweiten Verfahrensstufe erhöhen

Viele PtX-Technologien, insbesondere solche der zweiten Verfahrensstufe², weisen nur ein sehr begrenztes Maß an Flexibilität auf. Die Entwicklung dieser Verfahren erfolgte eingebettet in das konventionelle Energiesystem, in dem nicht die Notwendigkeit

¹ vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 32-33

² vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 16-18

bestand, Schwankungen in der Stromproduktion ausgleichen zu müssen. Im transformierten Energiesystem sind jedoch auch die Verfahren der zweiten Stufe noch indirekt von den Schwankungen betroffen: Sie beziehen ihre Edukte aus den vorgeschalteten PtX-Prozessen der ersten Stufe, die unmittelbar an die Stromversorgung geknüpft sind. Die Prozesse der zweiten Stufe müssen daher so weiterentwickelt werden, dass sie ein gewisses Maß an Schwankungen abfangen können, ohne dass dadurch die Produktqualität beeinträchtigt wird. Dies kann z. B. über neuartige Katalysatoren mit einer höheren Toleranz für variierende Zusammensetzungen der Eingangsstoffe oder über alternative Prozesskonzepte mit höherer Teillastfähigkeit erfolgen. Ist hierüber keine ausreichende Flexibilität zu erzielen, können auch Speicher (Energiespeicher- und/oder Speicher für die benötigten Edukte) eingesetzt werden. Derartige Weiterentwicklungen von Verfahren sollten im Rahmen von Forschungsprogrammen gefördert werden.

Handlungsempfehlung:

Leicht zugängliche Umstellungspotenziale zügig erschließen

PtX-Technologien können sich auf verschiedene Arten von den konventionellen Vergleichsprozessen unterscheiden: Bei einigen PtX Technologien muss für die Umstellung auf einen erneuerbar-basierten Prozess lediglich die Eduktbasis auf erneuerbare Stoffe umgestellt werden. Bei anderen Technologien muss dagegen eine komplette Prozessumstellung erfolgen. Dies hat sowohl Einfluss auf den anlagenbezogenen Aufwand zur Umstellung als auch auf die Infrastrukturanforderungen am Standort, die sich mit der Prozessumstellung ändern können. Prozesse mit einem vergleichsweise geringen Aufwand zur Prozessumstellung sollten zügig angepasst werden.

Handlungsempfehlungen:

Verstärkte Unterstützung kleiner und mittelständischer Unternehmen in der Implementierung von PtX-Technologien

Die Energie- und Rohstoffwende betrifft neben großen Industrieunternehmen mit hohen Treibhausgasemissionen auch kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), die ebenfalls Reduktionsziele erreichen müssen. Für diese Unternehmen ist eine Implementierung von PtX-Technologien in bestehende Prozesse oft schwierig, u. a. auf Grund begrenzter Investitionsmöglichkeiten sowie fehlendem Personal. Hier sollten gezielt Förderprogramme aufgesetzt werden, um die erforderlichen Transformationschritte für KMU zu erleichtern und zu beschleunigen. Dabei sollten auch Optionen vorgesehen werden, die den KMU den Zugang zu einer wissenschaftlich begleiteten Projektentwicklung und -bearbeitung erleichtern. Dies könnte bspw. über branchenspezifische Vermittlungsplattformen befördert werden.

2.2 Infrastruktur

Handlungsempfehlung:

Voraussetzungen für die nachhaltige Elektrifizierung von Prozessen schaffen

Die Verfügbarkeit von erneuerbar produziertem Strom ist die Voraussetzung für eine nachhaltige Elektrifizierung von Prozessen. Die bekannten Hemmnisse beim Ausbau von Windkraft- und PV-Anlagen (fehlende Ausbaugelände, Ausgestaltung der Abstandsregelungen, nicht zielführende Einspeiseregularien, lange Genehmigungsverfahren etc.) sind daher zu überwinden. Sinnvoll wäre auch die gezielte Förderung von Kombinationen aus EE-Anlagen und geeigneten Energiespeichern. Zahlreiche PtX-Technologien der zweiten Verfahrensstufe benötigen Wasserstoff als Edukt. Für diese Technologien ist daher die Schaffung einer Wasserstoffinfrastruktur wichtig, um den Transport des Wasserstoffs zu den Standorten der Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Das Zusammenspiel mit dem Erdgasnetz¹, den zulässigen Einspeisemengen [Dörr et al. (2016)] sowie Pfaden für den Ausbau eines Wasserstoffnetzes² sind hier wesentliche Aspekte, die insbesondere auch hinsichtlich der Planungssicherheit rechtlich an Verbindlichkeit gewinnen müssen.

Handlungsempfehlung:

Standortabhängigkeit bei Entscheidungen zur (De)Zentralität berücksichtigen

In der Diskussion um dezentrale bzw. zentrale Ansätze lässt sich generell folgende Aussage treffen: Insbesondere PtX-Technologien mit einem hohen Maß an Flexibilität sowie einem geringen zusätzlichen Prozessequipment-Bedarf bezüglich der Umstellung (z. B. für die Bereitstellung der Edukte oder die Aufarbeitung der Produkte), eignen sich aus technischer Sicht für einen dezentralen Ansatz. Hierunter fallen vor allem die PtX-Technologien der ersten Stufe. PtX-Technologien der zweiten Stufe, wie z. B. die Fischer-Tropsch-Synthese, die indirekte Ammoniaksynthese³ oder die Methanolsynthese, sind auf Grund der aufwändigen Produktaufarbeitung und des nicht trivialen Transports der Edukte und Produkte dagegen eher für zentrale Ansätze geeignet.

Darüber hinaus sind jedoch weitere Faktoren zu berücksichtigen, so dass sich die Eignung einer PtX-Technologie für dezentrale oder zentrale Ansätze nur wenig pauschal bestimmen lässt. Zu den relevanten Faktoren zählen bspw. die Art der eingesetzten PtX-Technologien, der Bezug der Edukte, die Nutzung der Produkte, die vorhandene Infrastruktur am Standort, ein positiver Business Case, etc. Hier sind daher größere Spielräume in der Projektförderung erforderlich, die es ermöglichen, standortangepasste Lösungen zu entwickeln. Zielvorgaben sollten insbesondere in der Emissionsreduktion oder der Transformation einer Branche insgesamt (z. B. dem Flugsektor) liegen.

Handlungsempfehlung:

Nutzung von Synergiepotenzialen an zentralen Standorten

An zentralen Standorten bietet sich die Möglichkeit, Synergiepotenziale mit anderen Prozessen zu nutzen. Derart ausgerichtete zentrale Standorte könnten über die Nutzung von Synergien zwischen den nur schwer vollständig elektrifizierbaren Prozessen der Industrie dazu beitragen, zusätzliche Treibhausgas-Einsparungen in nennenswertem Umfang zu erzielen. Synergiepotenziale liegen bspw. in der Nutzung von Abwärme, Dampf, Druckluft, entsalztem Wasser oder von Kühlsystemen. Die gezielte Entwicklung derartiger PtX-Standorte mit synergetisch aufeinander abgestimmten Prozessen bzw. die Weiterentwicklung bestehender Standorte in diesem Sinne, sollte daher gefördert werden.

¹ vgl. Kap. 2.5, Handlungsempfehlung: Die Funktionen und den Betrieb des Erdgasnetzes neu bewerten

² bspw. <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/wasserstoff-und-energiewende/h2vorort>

³ vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 29, Abb. 7: indirekte Ammoniaksynthese über Wasserstoff (rechte Spalte); direkte Synthese (linke Spalte)

Handlungsempfehlung:

Standortfindung für PtX-Prozesse optimieren

Die Standortfindung ist für eine Vielzahl an Forschungs- und Umsetzungsprojekten eine besondere Herausforderung, bspw. auf Grund geringer Flächenverfügbarkeiten, genehmigungsrechtlicher Hindernisse oder fehlender infrastruktureller Anbindungen. Für PtX-Technologien bzw. deren Projekte stellt sie nochmals eine besondere Herausforderung dar, da eine Vielzahl an Voraussetzungen geschaffen werden müssen, bevor diese Technologien umgesetzt werden können. Dazu zählen nicht nur die Bereitstellung von regenerativ-basiertem Strom, sondern auch die Eduktbeschaffung in Form von bspw. CO₂- und/oder Wasserstoffzulieferung oder die Produktlagerung. Der hohe Aufwand, um einen geeigneten Standort zu finden, muss naturgemäß zu Beginn eines Projektes geleistet werden, damit die Umsetzung erfolgreich erfolgen kann. Insbesondere für PtX-Projekte erscheint es daher sinnvoll, auf übergeordneter Ebene gezielt potenzielle Standorte zu identifizieren und zu analysieren. Beispielsweise stillgelegte Industriestandorte könnten hier besonders geeignet sein, bereits über ein gewisses Maß an erforderlicher Infrastruktur verfügen und somit zur Reduktion erforderlicher Investitionen beitragen. Neben den infrastrukturellen Aspekten sollten in der Analyse jedoch ebenfalls ökologische und soziale Kriterien berücksichtigt werden. Eine solche Identifizierung, Analyse und Katalogisierung besonders geeigneter Standorte erscheint geeignet, um die Transformation industrieller Produktionsprozesse insgesamt zu beschleunigen.

Handlungsempfehlung:

Den Aspekt der Standortentwicklung bei Exportvorhaben mitberücksichtigen

Nicht nur Technologien können exportiert werden¹, sondern auch das zugehörige Know-How bezüglich der Umsetzung ist ein wertvolles Produkt. Hierzu zählen bspw. Aspekte der Standort- und Prozessbewertung: die Bestimmung der Attraktivität von Standorten, die Bewertung der Infrastruktur, Mengenabschätzungen für alle benötigten Materialien und Hilfsstoffe, die Anlagenauslegung, der Aufbau sowie die Integration aller Komponenten, die Berücksichtigung der erforderlichen Abgaben, die Nutzung von Synergien unter verschiedenen Technologien an einem Standort (z. B. als Hubs). Unter dem Synergieaspekt können auch gezielt günstige Kombinationen von PtX-Technologien an einem Standort kombiniert werden, so sind bspw. Kombinationen von Elektrolyse, Fischer-Tropsch-Synthese und Elektrodenkessel denkbar, um den Standort sowohl produktseitig als auch bezüglich der Betriebsmittel nachhaltiger zu gestalten. Exportvorhaben könnten so als Gesamtpakete unter Einbeziehung von Wissenschaft, Technologie und Industrie angelegt werden.

¹ vgl. Kap. 2.3 Handlungsempfehlungen: Voraussetzungen dafür schaffen, dass Technologien als Produkte für den Export in Frage kommen

2.3 Ökonomie und rechtlicher Rahmen

Handlungsempfehlung:

PtX-Technologien beschleunigt zur Marktreife entwickeln

Anwendungsorientierte Forschungsprojekte sind sinnvoll, um den Entwicklungsprozess einer Technologie bis zur Marktreife voranzutreiben. Das Risiko für die beteiligten Unternehmen besteht darin, dass es unsicher ist, ob und wann die Technologie tatsächlich Marktreife erlangt und wirtschaftlich weiterbetrieben werden kann. Prozesse, die im Zuge der Energiewende umgestellt werden müssen und dafür auf noch nicht marktreife Technologien angewiesen sind, befinden sich dabei in einem Spannungsfeld: Auf der einen Seite gilt, dass der Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele und damit der gesellschaftliche Nutzen umso größer ist, je früher die Umstellung erfolgt. Hierfür ist ein Ramp-Up der PtX-Technologie-Implementierung als Meilenstein auf dem Weg der Energie- und Rohstoffwende dringend erforderlich. Ein gesellschaftliches Interesse besteht zudem an der langfristigen Sicherung von Produktionsstandorten. Auf der anderen Seite ist der Umgang mit Marktrisiken und die Investition in auch zukünftig tragfähige Geschäftsmodelle Kernaufgabe von Unternehmen. Hier muss im Sinne des gesamtgesellschaftlichen Nutzens ein Ausgleich gefunden werden, der es ermöglicht, die Technologieentwicklung zu beschleunigen und gleichzeitig eine angemessene Verteilung von Lasten, Risiken und Gewinnen zu erzielen. Der CO₂-Preis ist diesbezüglich ein Instrument, das aber, wie oben beschrieben, eigene Unsicherheiten beinhaltet. Diskutiert werden zudem Carbon Contracts for Difference (CCfD)¹, mit denen es für Unternehmen deutlich attraktiver werden soll, in Technologien zur CO₂-Einsparung zu investieren. Eine weitere Option könnte in Innovationsfonds liegen, die aus späteren Erlösen refinanziert werden².

Handlungsempfehlung:

Nutzung von (fossilen) CO₂-Punktquellen befördern

Die Industrie benötigt zur Produktion diverser Produkte Kohlenstoff. Die Eignung bestehender CO₂-Quellen zur Deckung dieses Bedarfs wird aktuell für verschiedene PtX-Technologien diskutiert und bewertet. Dabei fokussieren sich viele Projekte auf biogene Quellen oder auf den Bezug von CO₂ aus der Luft. Die biogenen Quellen stellen eine nachwachsende Ressource dar, ihre nachhaltige Nutzung ist jedoch mit Limitierungen verbunden (z. B. Naturschutzbelange, Flächenverfügbarkeiten für den Anbau, Konkurrenz mit anderen Branchen etc.). CO₂ aus der Luft ist auf Grund der geringen Konzentration energetisch nur sehr aufwändig zu gewinnen³. Die Nutzung von CO₂ aus industriellen Punktquellen [Fröhlich et al. (2019)] bietet dagegen die Möglichkeit, hochkonzentrierte CO₂-Ströme zu nutzen und Kohlenstoffkreisläufe zu schließen oder zumindest eine Mehrfachnutzung der Kohlenstoffquelle zu realisieren. Bei diesen Quellen handelt es sich derzeit jedoch zumeist noch um fossile Kohlenstoffquellen.

Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden: a) Eine Defossilisierung durch Umstellung auf biogene Kohlenstoffquellen sollte dort erfolgen, wo es – technisch und unter Berücksichtigung der oben genannten Limitierungen – möglich ist. In der Folge könnten hochkonzentrierte erneuerbar-basierte CO₂-Ströme für weitere Prozesse genutzt werden.

¹ bspw. www.ewi.uni-koeln.de/en/news/carbon-contracts-for-differences-ewi-team-shows-opportunities-and-risks/

² Ein solcher Ansatz wird bspw. auch zur Abpufferung spezifischer Risiken der Tiefengeothermie diskutiert: www.tiefengeothermie.de/news/neue-bdew-studie-zu-gruener-fernwaerme; www.solarserver.de/2022/02/02/fraunhofer-und-helmholtz-tiefe-geothermie-kann-waermebedarf-in-deutschland-zu-einem-viertel-decken/

³ Um Klimaneutralität zu erreichen, wird es jedoch als erforderlich angesehen, Direct Air Capture-Technologien (DAC) weiterzuentwickeln: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>

b) Einige Prozesse sind jedoch mit einer unvermeidbaren prozessbedingten Freisetzung von fossilem CO₂ verbunden¹, bspw. als Nebenprodukt der gewünschten chemischen Reaktion (z. B. bei der Zementherstellung). Sollen diese Prozesse langfristig weiter betrieben werden, muss die Abgabe des CO₂ an die Luft verhindert werden. Dabei sind wiederum zwei Fälle zu unterscheiden: i) Um letztlich Klimaneutralität erreichen zu können, werden Verfahren entwickelt, mit denen der Atmosphäre CO₂ entzogen und dauerhaft gebunden bzw. gespeichert werden soll (Carbon Capture and Storage – CCS)^{2,3}. Auch hierfür ist es von Vorteil, bereits aufkonzentrierte Stoffströme zu nutzen. ii) Für solche Produkte, die hierzulande hergestellt werden sollen, muss hier ebenfalls der oben genannte industrielle Bedarf an Kohlenstoff gedeckt werden, bspw. auch unter Nutzung der industriellen Punktquellen. Ziel sollte es sein, die CO₂-Nutzung insbesondere aus großen und/oder unvermeidbaren Punktquellen schnell zu erschließen, damit kurzfristig ein wichtiger Beitrag zur Emissionsreduktion geleistet werden kann. Attraktive Business Cases für Unternehmen können dazu beitragen, dieses Ziel zu erreichen.

Handlungsempfehlungen:

Vielfalt der Optionen zur Defossilisierung der Sektoren Verkehr und Industrie nutzen

Um langfristig eine vollständige Defossilisierung der Sektoren Verkehr und Industrie zu erreichen, sollte ein breiter Ansatz mit verschiedenen Technologie-Optionen verfolgt werden. Dies fördert den Wettbewerb, erhöht Erfolgchancen und verringert die Abhängigkeit sowie Verknappung von Ressourcen wie bspw. Lithium.

Im Verkehrssektor werden daher alternative Kraftstoffe auf Basis von Fischer-Tropsch- oder Methanol-to-Gasoline-Konzepten oder alternative Elektrifizierungen des Antriebs mittels Brennstoffzellen entwickelt. Solche Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Produkte sollten jedoch vorrangig dort eingesetzt werden, wo es keine oder kaum aussichtsreiche technologische Alternativen für die Defossilisierung gibt. Dies betrifft bspw. den Luft- und Seeverkehr sowie ggf. auch den Schwerlastverkehr⁴. Neue Verkehrskonzepte, mit denen dem Individualverkehr attraktive Alternativen gegenübergestellt werden, sind hier ebenfalls erforderlich, um den Energiebedarf insgesamt zu senken. Aber auch für die Herstellung vieler Industrieprodukte sollten die Alternativen zur reinen Prozess-Elektrifizierung geprüft werden, um die für die Defossilisierung benötigten Strommengen zu minimieren (u. a. der Einsatz von biogenen Reststoffen oder Einsatzstoffe, die aus der Vergasung von Hausmüll gewonnen werden). Die technologischen und konzeptionellen Optionen der Defossilisierung sollten daher technologieoffen in ihrer Vielfalt gefördert werden, um darauf aufbauend zukunftsfähige Gesamtkonzepte entwickeln zu können, die den unterschiedlichen Anforderungen und Bedarfen gerecht werden.

Handlungsempfehlungen:

Entwicklung von (Flug)kraftstoff-Additiven fördern

Der Treibstoff im Flugsektor besteht zu einem Großteil aus Kerosin, enthält aber weitere Komponenten zur Verbesserung der Eigenschaften [Cataluña et al (2021), Repetto et al. (2016)], wie bspw. verschiedene aromatische Verbindungen. Für eine langfristige Defossilisierung des Flugverkehrs müssen auch diese Beimischungskomponenten über biomasse- oder strombasierte Pfade synthetisiert werden. Dadurch kann

¹ vgl. [Energy4Climate.NRW_Diskussionspapier](#)

² vgl. [BGR_Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung](#)

³ vgl. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>

⁴ vgl. Für den Schwerlastverkehr wird auch an der Weiterentwicklung von Brennstoffzellen-LKW und der für den Betrieb erforderlichen Infrastruktur gearbeitet, z. B. [TU-Braunschweig: Entwicklung Brennstoffzellen-Lkw](#) oder <https://link.springer.com/article/10.1007/s35746-020-0111-x>

zudem der maximale Anteil an Sustainable Aviation Fuels (SAF) im Flugtreibstoff, der derzeit für die meisten Synthesepfade (HEFA, Alcohol-to-Jet, Fischer-Tropsch-Synthese) bei max. 50 % liegt¹, erhöht werden. Dies bietet langfristig die Möglichkeit, den Flugsektor sehr weitgehend zu defossilisieren². Zu beachten ist dabei, dass Additive für Flugkraftstoffe besondere Anforderungen³ erfüllen müssen und entsprechend zu zertifizieren sind. Additive sind aber auch für andere Kraftstoffe von Bedeutung⁴. Um hier frühzeitig Perspektiven für die Entwicklung nachhaltiger Produkte zu eröffnen, sollte die biomasse- bzw. strombasierte Herstellung von (Flug)kraftstoff-Additiven gefördert werden.

Handlungsempfehlung:

Unsicherheiten in der CO₂-Preis-Entwicklung als bremsenden Faktor erkennen

Der EU-Emissionszertifikatspreis für CO₂ wird als eine wesentliche Stellschraube in der Wirtschaftlichkeit der PtX-Produkte gegenüber den fossilbasierten Produkten gesehen. Dennoch ist die langfristige Entwicklung dieser Zertifikatspreise ungewiss und damit auch der Zeitpunkt, ab dem die Herstellung von PtX-Produkten, wie z. B. Flugkraftstoffen, rentabel wird. Damit sind große Unsicherheiten für Unternehmen verbunden, die über höhere Sicherheitsmargen in den Business Cases der Projekte abgebildet werden müssen. Dies beeinflusst die Planungsverfahren für mögliche Prozessumstellungen, kann sie verzögern oder auch dazu führen, dass sie als unwirtschaftlich eingestuft und nicht weiterverfolgt werden. Produktionen, die jedoch auch langfristig hier erfolgen sollen, sollten zur Erreichung der Klimaschutzziele rechtzeitig und zügig umgestellt werden. Dafür benötigen die Unternehmen positive Business Cases. Lassen sich diese auf Basis des deutlich zu niedrigen CO₂-Preises nicht darstellen, wie dies bspw. für regenerative Flugkraftstoffe der Fall ist, müssen andere Orientierungsgrößen angeboten bzw. langfristig verlässliche Entwicklungsszenarien aufgezeigt werden. Die aktuelle Krise könnte hier über die derzeit bestehenden großen Unsicherheiten in der Verfügbarkeit und dem Preis fossiler Brennstoffe zu einem eigenständigen Einflussfaktor werden, der sich beschleunigend auf Prozessumstellungen auswirkt.

Handlungsempfehlung:

Langfristige Quoten für grüne Produkte in allen Sektoren schaffen

Ein steigender CO₂-Preis führt dazu, dass Abnehmer vermehrt auch höhere Preise nachhaltig hergestellter Produkte akzeptieren [Hank et al. (2018); Tremel (2018)]. Diese Produkte können ihre Marktanteile bspw. über Beimischungen zu konventionellen Produkten erhöhen. Damit sind verpflichtende Beimischungsquoten für grüne Produkte neben dem CO₂-Preis ein weiteres Steuerungsinstrument zum Erreichen der Klimaschutzziele und können auch dort Entwicklungen forcieren, wo der CO₂-Preis noch unzureichend ist. Zudem ist die ökonomisch relevante Weiterentwicklung nachhaltiger Produktionstechnologien abhängig davon, in welchem Umfang Marktanteile für grüne Produkte erschlossen werden können. Aus dem Zusammenspiel dieser Einflussfaktoren – Preisvorgaben (fossil), Preisakzeptanz (grün), Quotenvorgaben, technologischer Fortschritt – könnte sich eine Dynamik ergeben, die unterstützt werden sollte: Eine CO₂-Preis- (oder durch die aktuelle Krise) induzierte Akzeptanz höherer grüner Produktpreise kann die Basis bieten, um Beimischungsquoten zu erhöhen bzw. in weiteren Sektoren einzuführen, um damit eine frühzeitige Umstellung auf grüne Produkte zusätzlich anzuregen und eine realistische Quotenerhöhung über die Jahrzehnte anzustreben. Abnahmeverträge können zur Sicherung der Produktionsmengen beitragen.

¹ <https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2021/05/PtL-Roadmap.pdf>

² Praxisbeispiel: <https://www.airliners.de/airbus-beluga-tank-erstmal-bremen-saf/64750>

³ <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/air-bp/documents/aviation-fuel/air-bp-avgas-3rd-a4-leaflet-uk-2019.pdf>

⁴ <https://www.atc-europe.org/public/Doc113%202013-11-20.pdf>

Handlungsempfehlungen: Beimischungsquoten von Sustainable Aviation Fuel: Roadmap mit Fokus Eduktbeschaffung erstellen

Der Fit for 55-Vorschlag der Europäischen Kommission vom 14. Juli 2021¹ verfolgt das Ziel, die von Flugzeugen verursachten Emissionen verpflichtend zu reduzieren. Vorgeesehen ist zu diesem Zweck eine Erhöhung des Beimischungsanteils von Sustainable Aviation Fuels (SAF) in Kerosin von mindestens 2 % in 2025, 5 % in 2030 und 63 % in 2050². Zwar gibt es eine Roadmap³, die bereits wichtige Aspekte beleuchtet. Die beschriebenen Pfade beschränken sich jedoch im Wesentlichen auf wenige Synthesen (Fischer-Tropsch- und Methanolsynthese). Es fehlt zudem eine klare Vorstellung bzw. Leitlinie, wie die genannten Ziele erreicht werden sollen – sowohl technisch hinsichtlich der einzusetzenden Verfahren mit für den Flugverkehr zertifizierten Produkten als auch auf ökonomischer Ebene. Bspw. ist insbesondere für die kohlenstoffhaltigen Einsatzstoffe, die in den SAF-Syntheserouten biologischen Ursprungs sind, derzeit nicht klar, wie die notwendige Menge zur Deckung der Beimischungsanteile bereitgestellt werden soll. Weiterhin ist die Zertifizierung Methanol-basierter Power-to-Liquid-Kraftstoffe für den Flugverkehr derzeit noch nicht geregelt und die Herstellung der erforderlichen Additive⁴ über PtX-Pfade zur Erhöhung der zulässigen Beimischungsquoten wird nicht thematisiert. Um hierfür einen klaren Fahrplan mit bindenden Leitlinien für die nächsten Jahre bereitzustellen, sollte eine Roadmap erarbeitet werden, die konkreter aufzeigt, wie die gesetzten Fit for 55-Ziele erreicht werden sollen bzw. können. Eine solche Roadmap wäre insbesondere für Unternehmen bezüglich der Planungssicherheit ein wichtiges Tool. So könnten Risiken, die mit neuartigen PtX-Projekten verbunden sind, reduziert und die Erfolgchancen für eine Umsetzung der Projekte erhöht werden.

Handlungsempfehlung: Steuerungsinstrumente zügig schärfen: RED II-Novelle und STAU-Reformen

Die Renewable Energy Directive II (RED II) ist für die Implementierung von PtX-Prozessen und den Einsatz der entsprechenden Produkte eine der wichtigsten Leitlinien. Von ihr ist u. a. abhängig, ob ein PtX-Produkt den Anforderungen für eine Zertifizierung entspricht. Zudem orientieren sich auch verschiedene PtX-Förderaufrufe an der RED II: PtX-Produkte müssen in diesen Fällen die RED II-Anforderungen erfüllen, damit Projekte gefördert werden. Umgekehrt ergeben sich aus geschärften Klimaschutzzielen und neuen gesetzlichen Anforderungen in den Ländern neue Positionen, aus denen wiederum RED-II-Anpassungsbedarfe resultieren, bspw. bezüglich der Berechnungen von Treibhausgasemissionspotenzialen verschiedener regenerativer Ansätze hinsichtlich CO₂-Bezugsquellen oder in der Definition von Strombezügen für RED II-konforme Verfahren. Anhand dieser Vorgaben wird festgelegt, welche Produkte als nachhaltig und damit als „grün“ zertifiziert werden können und dadurch entsprechend vermarktet werden dürfen (bzw. für welche Produkte ein Premiumpreis angesetzt werden kann). Gegenstand der Regelungen sind dabei bspw. Kreditvergaben oder der Netzstrombezug. Somit nimmt der Begriff „grün“ eine übergeordnete Steuerungsfunktion ein, die sich bremsend auf den Transformationsprozess auswirken kann, wenn er zu eng gefasst wird. Damit Unternehmen in Übereinstimmung mit der Verordnung Lösungsansätze entwickeln und rechtzeitig umsetzen können, benötigen sie frühzeitig Klarheit hinsichtlich der RED II-Anpassungen⁵. Dies gilt auch für erforderliche Reformen von Steuern, Abgaben und Umlagen (STAU). Verzögerungen in der Anpassung der Gesetzgebung können sich folglich ebenfalls bremsend auf den Transformationsprozess auswirken und sollten vermieden werden.

¹ vgl. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550&from=EN>

² [UFOP_1762_Fitfor55_260721_1559.pdf](https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2021/05/PtL-Roadmap.pdf)

³ <https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2021/05/PtL-Roadmap.pdf>

⁴ vgl. Kap. 2.3 Handlungsempfehlungen: Entwicklung von (Flug)kraftstoff-Additiven fördern

⁵ Beschluss wird für Ende 2022 erwartet: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en#revision-of-the-directive

Handlungsempfehlung:

Zertifizierung für EE-Produkte nutzenorientiert ausrichten und beschleunigen

Die Zertifizierung von EE-Produkten als Ersatz für fossilbasierte Produkte ist ein mehrjähriger Prozess, der beschleunigt werden sollte. Insbesondere im Verkehrs- und Industriesektor ist diese Zertifizierung relevant. Eine fehlende Zertifizierung führt oftmals dazu, dass in Unternehmen die Idee, fossilbasierte Edukte durch erneuerbar produzierte Stoffe zu ersetzen, verworfen wird. Dadurch entsteht eine Bremswirkung für den Transformationsprozess. Um dem entgegenzuwirken, sollten Zertifizierungsprozesse und die Phase des Markteintritts von zertifizierten Produkten deutlich beschleunigt werden. Der tatsächliche Nutzen der Prozessumstellung sollte für die Erteilung von Zertifikaten ausschlaggebend sein. Eine zu große Einengung auf spezifische Synthesewege kann hier hinderlich sein.

Handlungsempfehlung:

Nutzerfreundliche Aufbereitung des Rechtsrahmens zur Stärkung der Handlungsfähigkeit von Akteuren

Es bestehen nicht nur Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von rechtlichen Rahmenbedingungen, sondern auch Hemmnisse bezüglich der Zugänglichkeit der relevanten Regularien. Hier sollte an einer Verbesserung von Transparenz, Nachvollziehbarkeit und zielsicheren Auffindbarkeit aller für ein definiertes Vorhaben relevanten Bestimmungen gearbeitet werden, um auch in diesem Bereich die Handlungsfähigkeit von Akteuren zu stärken. Angesichts der hohen Relevanz des Themas und der Größe des betroffenen Akteurskreises (alle Sektoren müssen defossilisiert werden) kann auch dies zu einer nennenswerten Beschleunigung von Handlungsprozessen beitragen.

Handlungsempfehlung:

Voraussetzungen dafür schaffen, dass Technologien als Produkte für den Export in Frage kommen

PtX-Technologien sind selbst ebenfalls als Produkte anzusehen, die exportiert werden können. Eine Voraussetzung dafür, dass der Technologieexport als Markt erschlossen werden kann, sind die Markteinführung technologisch reifer PtX-Technologien und die Weiterentwicklung vielversprechender Technologien, wie bspw. die der direkten Ammoniaksynthese¹.

¹ vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 58

2.4 Ressourcen und Ökologie

Handlungsempfehlung

Wasser als begrenzte Ressource für die Energiewende betrachten und integrierte Wassermanagementstrategien erarbeiten

Ein Großteil der unter PtG und PtL betrachteten Technologien benötigt neben Strom auch Wasser oder – aus Wasser gewonnenen – Wasserstoff als Edukt für die Produktsynthesen oder für anderweitige Zwecke. Sowohl für die Wasserstoffproduktion hierzulande als auch im globalen Kontext – der überwiegende Anteil des Wasserstoffs soll zukünftig importiert werden¹ – ist es daher erforderlich, dass ein umfassendes Wassermanagement erfolgt, das auch in Bezug zu den Belangen der Energiewende gesetzt werden muss. Derzeit erfolgt die Behandlung des Themas Wasser weitestgehend unabhängig voneinander in zwei parallelen Diskussionssträngen: Im Bereich Umwelt und seitens der Wasserversorger werden die bereits zu beobachtenden und die noch zu erwartenden Folgen des Klimawandels für die Wasserversorgung auch in Deutschland deutlich herausgestellt^{2,3}. Dagegen wird im Bereich Energie zumeist lediglich darauf verwiesen, dass Wasser als Edukt für die Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion benötigt wird. Eine Konkretisierung der Problematik und der daraus abzuleitenden Handlungsbedarfe fehlt jedoch, sowohl global mit Blick auf die angestrebten Importe als auch für die Produktion in Deutschland⁴. Vor dem Hintergrund dieser Diskrepanz sollte sich die erforderliche Verknüpfung der Themen Wasser und Energie zukünftig auch in der Ausgestaltung der Förderprogramme zur Energiewende widerspiegeln. Zu berücksichtigen sind dabei bspw. der Einfluss des Klimawandels mit vermehrten Extremwetterlagen (Dürreperioden, Starkregen, Flutereignisse), unterschiedliche regionale Standortfaktoren, Nutzungskonkurrenzen mit der Trinkwasserversorgung, die Notwendigkeit, das in der Meerwasseraufbereitung abgeschiedene Salz sowie angereicherte Schadstoffe zu entsorgen oder die Erschließung alternativer Wasserquellen (z. B. Abwasser). Differenziert werden sollte zudem zwischen den unterschiedlichen Arten der Wassernutzung bzw. des -verbrauchs und den damit verbundenen spezifischen Umweltauswirkungen.

Handlungsempfehlung

Intensivierung der Forschung auf dem Gebiet der Ressourcenschonung

Neben erneuerbarem Strom und Wasser für die Wasserstoffproduktion sind im Zusammenhang mit PtX-Verfahren verschiedene weitere Stoffe als knappe Ressourcen anzusehen, insbesondere Stoffe, die für die Herstellung von Katalysatoren oder von Batterien benötigt werden, wie bspw. Kobalt. Hieraus folgt die Notwendigkeit zu einer Intensivierung der Katalysator- und der Batterieforschung für höhere Widerstandsfähigkeit gegen bspw. mechanische Degradierung, für längere Lebensdauern sowie zu einer Entwicklung leistungsfähiger Recyclingtechnologien und Wiederverwendungsstrategien.

¹ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>

² https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf

³ BDEW: VKU Positionspapier Klimawandel und Trockenheit

⁴ vgl. Nationale Wasserstoffstrategie (Fußnote 1): Lediglich in den Maßnahmen 34 und 36 wird erwähnt, dass die Verfügbarkeit von Wasser „zu berücksichtigen“ ist.

Handlungsempfehlung

Roadmap für grüne Plattformchemikalien erweitern und konkretisieren

Die vom Verband der Chemischen Industrie (VCI) beauftragte Studie¹ zeigt in der Breite Pfade zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie auf und bezieht sich dabei auf einen Zeitraum bis 2050. In dieser Studie werden dafür u. a. Power-to-X-Technologien als geeignete Optionen beschrieben – der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf Technologien mit bereits hohem Technology Readiness Level (TRL) – und es wird die Elektrifizierung energieintensiver Prozesse thematisiert. Mit Blick auf spezifische PtX-Pfade könnte die Studie erweitert und konkretisiert werden. Es sollten bspw. auch solche Technologien mitbetrachtet werden, die sich jetzt noch im Pilot- bzw. Demonstrationsmaßstab befinden. Derzeit werden PtX-Produkte insbesondere im Verkehrssektor als Alternativen zur direkten Elektrifizierung von Antrieben angesehen (z. B. für den Luft-, See- und den Schwerlastverkehr). Darüber hinaus gibt es jedoch zahlreiche potentielle PtX-Technologien, mit denen Produkte für die Chemieindustrie synthetisiert werden könnten (z. B. die strombasierte Ammoniaksynthese, das strombasierte Synol-Verfahren u. a.)². Eine wissenschaftlich begleitete Weiterentwicklung der zitierten VCI-Roadmap zur Herstellung vielseitig einsetzbarer grüner Plattformchemikalien könnte daher dazu beitragen, PtX-relevante Prozesse in der chemischen Industrie rechtzeitig und umfassend nachhaltig gestalten zu können. Hieraus könnte sich ein Aufschwung für PtX-Technologien ergeben, die bisher weniger im Fokus der Betrachtungen standen. Über die Produkte, die unter Verwendung grüner Plattformchemikalien hergestellt werden, und in deren Einsatzbereichen könnten so letztlich sektorenübergreifend Treibhausgas-Reduktionspotenziale neu erschlossen werden.

Handlungsempfehlung

Effizienz und Suffizienzbestrebungen intensivieren

Unterschiedliche Limitierungen und bestehende Unsicherheiten – z. B. die EE-Ausbaugeschwindigkeit und die Verfügbarkeit von erneuerbar produziertem Strom, die Verfügbarkeit von Wasser für die Wasserstoffproduktion, die zeitliche Perspektive für den Wasserstoffimport, die Verfügbarkeit von Stoffen für die Katalysator- und die Batterieherstellung – führen mit Blick auf die durch PtX-Verfahren zu deckenden Bedarfe zu dem Schluss, dass den Ressourcenlimitierungen angemessene Bedarfslimitierungen gegenüberzustellen sind. Maßnahmen, um dies zu erreichen, liegen in Effizienz- und Suffizienzbestrebungen. Während bezüglich der Energieeffizienz technologische Fortschritte weiterhelfen können, sind für Erfolge bei der Suffizienz Anstrengungen bzgl. der Anpassung von Lebensstilen erforderlich [Bierwirth et al. (2021), Warszawski et al. (2021), Zell-Ziegler et al. (2021)]. Daher bedarf es einer Priorisierung der Bedarfe, alternative Konzepte müssen geprüft werden und es ist erforderlich, Optionen zur Suffizienz in die Planungen einzubeziehen. Zudem sollten direktelektrische Anwendungen aufgrund der höheren Gesamtwirkungsgrade in den Prozessketten Vorrang haben, um die begrenzten EE-Mengenpotenziale bestmöglich zu nutzen.

¹ <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>

² vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 29, Abb. 7

2.5 Systemische Aspekte

Handlungsempfehlung

Speicherfunktion des Wasserstoffs in der Bewertung berücksichtigen

Durch das hohe Flexibilisierungspotential der Elektrolyse-Technologie¹ und die vielfältigen Einsatzoptionen für Wasserstoff in nahezu allen Sektoren, ist Wasserstoff ein wesentliches Medium für die Sektorenkopplung. Aus systemischer Sicht muss Wasserstoff dabei wie ein Speichermedium betrachtet und bewertet werden. Dies betrifft den Ausgleich von Angebot und Nachfrage angesichts der Fluktuationen in der erneuerbaren Stromproduktion, die Absicherung und Steigerung der Effizienz auf der Angebotsseite, die Minimierung der erforderlichen Erzeugerkapazitäten sowie die Reduzierung von Versorgungs- und Netzengpässen. Der Ausgleich im lokalen Kontext über die Nutzung von lokal erzeugtem Wasserstoff kann die Abhängigkeit vom Weltmarkt reduzieren.

Handlungsempfehlung

Das erforderliche optimierte Zusammenspiel der Technologien im zukünftigen Energiesystem bereits heute in Entscheidungen mitberücksichtigen

Um die erneuerbaren Energien bestmöglich in das zukünftige Energiesystem integrieren zu können, ist ein optimiertes Zusammenspiel vieler verschiedener Technologien mit unterschiedlichen Eigenschaften erforderlich. Dies betrifft nicht nur die Grobeinteilung (Stromerzeuger, -verbraucher, -speicher, weitere PtX-Technologien), sondern insbesondere auch die Ausdifferenzierung innerhalb dieser Kategorien (jeweils verschiedene Stromerzeuger, -verbraucher, -speicher und weitere PtX-Technologien). Zudem muss mit den bleibenden Unsicherheiten im Verlauf des Transformationsprozesses umgegangen werden. Hier können die Entscheidungen nicht alleine danach getroffen werden, welche Technologien bereits jetzt marktreif sind: Weit entwickelte Technologien, die schnell in die Anwendung gebracht werden können, werden benötigt, um den CO₂-Ausstoß zügig zu reduzieren. Weiter und neu zu entwickelnde Technologien werden benötigt, um das System auch zukünftig zu optimieren und weitergehende Reduzierungen von Treibhausgasemissionen zu erreichen. Für diese Optimierung werden u. a. unterschiedliche und sich sinnvoll ergänzende Flexibilitäten im System benötigt. Die Aussicht auf Effizienzsteigerungen kann ebenfalls dazu führen, dass mehrere erneuerbar-basierte Prozessrouten für ein bestimmtes Produkt parallel weiterverfolgt werden sollten. Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung von Ammoniak: Diese kann unter Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff über die konventionelle Haber-Bosch-Synthese erfolgen. Noch in der Entwicklung befindlich ist zudem die effizientere direkte Syntheseroute über eine Hochtemperatur-Elektrolyse von Stickstoff und Wasserdampf².

Handlungsempfehlung

Entwicklung einer systemisch-technologischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Transformationsvorhaben

Die systemischen Zusammenhänge sind in Wirtschaftlichkeitsanalysen oftmals noch nicht ausreichend repräsentiert. Erfolgen muss jedoch eine systemisch-technologische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Unternehmen, so dass auch systemisch wichtige und unter dem Aspekt eines beschleunigten klimawirksamen Handelns wertvolle Investitionsentscheidungen getroffen werden können. Hier besteht Forschungsbedarf für integrale und dynamische Wirtschaftlichkeitsanalysen, die es erleichtern, Investitionsentscheidungen im Rahmen des Transformationsprozesses auf Basis unsicherer

¹ vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 38, Abb. 08

² vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 58 ff.

Rahmenbedingungen zu treffen, Brüche im Markt und in der Nutzung von Technologien in die Planungen einzubeziehen und lokale Wertschöpfungsketten im Verhältnis zu Weltmärkten zu bewerten. Die im Sonderkapitel „Nachhaltiges und inklusives Wachstum – Dimensionen der Wohlfahrt messbar machen“ des Jahreswirtschaftsberichts 2022¹ vorgestellten quantitativen Indikatoren „Treibhausgasintensität des BIP“, „Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch“ und „Endenergieproduktivität“ können Anknüpfungspunkte für die Entwicklung eines solchen gesamtgesellschaftlich sinnvollen Ansatzes bieten.

Handlungsempfehlung

Den konstruktiven Umgang mit Unsicherheiten im Transformationsprozess weiterentwickeln

Auch bezüglich der im Projekt detailliert betrachteten Technologien bleiben wichtige Punkte offen, die im Rahmen des Projekts nicht zu beantworten sind. Dies betrifft bspw. produktseitige Fragen zur Suffizienz (Wovon benötigen wir wieviel?), Importfragen (Von welchen Produkten kann wann wieviel importiert werden?) oder die Geschwindigkeit des Infrastrukturausbaus. Zudem ist am Beispiel des Wassers zu sehen, dass auch heute nicht im Fokus der Betrachtung stehende Produkte später ggf. systembestimmend werden können und Prioritäten angepasst werden müssen, wenn sich die äußeren Rahmenbedingungen ändern. Der aktuell entstandene Bedarf, die große Abhängigkeit von Gas- und Ölimporten zu überwinden, ist ein Beispiel dafür, dass mitunter auch plötzlich auftretende gravierende Änderungen der Rahmenbedingungen aufgefangen werden müssen. Hieraus ergibt sich, dass die Frage der Priorisierung deutlich über den Projektrahmen hinausragt: Den bekannten Größen (z. B. Klimaschutzziele, derzeitige technische Möglichkeiten, Erwartung eines relevanten Importanteils an erneuerbarer Energie) stehen in verschiedenen relevanten Bereichen (z. B. Technologie, Ökonomie, Soziales, Globales) unbekannte Größen gegenüber: Welche technischen Optionen ergeben sich zukünftig? In welchem Umfang können die Bedarfe nachhaltig gedeckt werden? Welche globalen Verteilungen werden sich ergeben? Wie wird sich die Investitionsbereitschaft entwickeln? Wie wird sich die Bewertung von Fragen der Wirtschaftlichkeit entwickeln (z. B.: Ab wann lohnt eine Investition?) Wie können die Bedarfe priorisiert werden und welche Akzeptanz finden Maßnahmen zur Suffizienz?

Aufgrund der Notwendigkeit zu einer erheblichen CO₂-Reduktion bereits in diesem Jahrzehnt und zur Weichenstellung für die kommenden Jahrzehnte, ist es erforderlich, trotz der bestehenden Unsicherheiten zu zeitnahen Umsetzungen von Maßnahmen zu kommen. Beispielsweise im Bereich der Wasserstoffversorgung können integrierte dezentrale Lösungen dafür geeignet sein, weil sie weniger abhängig von der übergeordneten Infrastruktur, wie z. B. einem Wasserstoffnetz, sind. Der Aufbau solcher Lösungen sollte von vorn herein einher gehen mit regionalen Strombedarfsanalysen und einer Ermittlung des regionalen Wasserpotenzials. Werden die Systeme modular erweiterbar angelegt, ergeben sich zudem Optionen für eine voranschreitende Standortentwicklung.

Handlungsempfehlung

Die Funktionen und den Betrieb des Erdgasnetzes neu bewerten

Bereits vor dem Krieg in der Ukraine bestand eine große Unsicherheit hinsichtlich der Perspektive für das vorhandene Erdgasnetz. Neben der Notwendigkeit, den Betrieb dieses Netzes zu defossilisieren, wird es auch in Konkurrenz zu einem zukünftigen Wasserstoffnetz gesehen. Somit stellt sich die Frage, welche Teile des Erdgasnetzes zukünftig weiterbestehen werden. Die aktuellen Entwicklungen vergrößern diese Unsicherheit um die Frage der überhaupt zuverlässig bestehenden Erdgasverfügbarkeit. Dies ruft Bestrebungen hervor, Erdgas beschleunigt zu ersetzen und die Versorgungs-

¹ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/jahreswirtschaftsbericht-2022.pdf>

struktur zu diversifizieren, um das Energiesystem resilienter gegen unerwartet eintretende Einflüsse zu machen. Einerseits sollte dies dazu beitragen, die Energiewende zu beschleunigen, andererseits rückt in den Fokus, dass es derzeit nötig ist bzw. werden kann, andere konventionelle Energieträger als Ersatz für Erdgas verlängert zu nutzen (Kohlekraft, Atomkraft) bzw. deren Nutzung neu zu etablieren (LNG). Zudem wird geprüft, aus welchen Ländern vermehrt Erdgas importiert werden kann (z. B. aus Norwegen)¹, um den Importbedarf aus Russland zu reduzieren.

Mit Blick auf das Erdgasnetz ergibt sich daraus der Bedarf, dessen Perspektive unter den geänderten Randbedingungen nochmals neu zu bewerten: Mit dem Erdgasnetz verfügt Deutschland über eine bereits bestehende und gut ausgebaute Infrastruktur. Dabei erfüllt das Netz sowohl eine Verteil- als auch eine Speicherfunktion für das Gas.

Im Kontext der Energiewende wird diese großvolumige Speicherfunktion für solche Gase hervorgehoben, die neben dem Erdgas zusätzlich eingespeist werden können: aufbereitetes Biogas², Methan aus Power-to-Gas-Verfahren³ sowie – technisch limitierte Anteile [Dörr et al. (2016)] an – Wasserstoff. Zur Speicherkapazität des Erdgasnetzes tragen vor allem auch unterirdische Speicherstätten bei^{4,5}. Solche Untergrundspeicher werden mittlerweile auch als mögliche Lagerstätten für CO₂ aus Carbon Capture and Storage (CCS)-Prozessen angesehen^{6,7}. Geprüft werden sollte aber auch, ob die Speicherfunktion des Erdgasnetzes über diese Nutzungen hinaus mit Blick auf die sich verschärfende Wasserproblematik⁸ einen zukünftig relevanten Mehrwert darstellen kann: In Zeiten einer gleichzeitig hohen Verfügbarkeit von Strom und Wasser sollte besonders viel Wasserstoff und ggf. in einem weiteren Syntheseschritt auch Methan produziert werden. Diese Aspekte sollten in die Planungen zur mittel- und langfristigen Dimensionierung der Wasserstoff- und Erdgasnetze einbezogen werden.

¹ [BDEW: Kurzfristige Gassubstitution Deutschland](#)

² <https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/biomasse/der-ungenutzte-gasspeicher/>

³ <https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/power-to-gas-erdgasnetz-als-speicher-erneuerbare-energie>

⁴ <https://www.bveg.de/die-branche/speicher-in-deutschland/untergrund-gasspeicher/>

⁵ <https://www.enbw.com/energie-entdecken/verteilung-und-transport/gasnetz/erdgasspeicher.html>

⁶ [BGR: Nutzung tieferer Untergrund CO₂-Speicherung Speicherkataster](#)

⁷ [BGR: Nutzung tieferer Untergrund CO₂-Speicherung](#)

⁸ vgl. Kap. 2.4, Handlungsempfehlung: Wasser als begrenzte Ressource für die Energiewende betrachten und integrierte Wassermanagementstrategien erarbeiten

2.6 Handlungsebenen

Handlungsempfehlung:

Aktivierung aller relevanten Entscheidungs- und Handlungsebenen

Es wird weltweite, europaweite, deutschlandweite und verstärkt auch lokale Märkte im Bereich der Energieversorgung geben. Der Umbau der Energieversorgung weg von Großkraftwerken hin zu lokalen Energieerzeugern und Energiesystemen wird zu einer Verschiebung der Wertschöpfungsketten in die Regionen und Kommunen führen¹. Lokale und regionale Produktionen rücken aber auch deshalb in den Fokus, um eine größere Resilienz gegenüber globalen Versorgungsstrukturen zu gewinnen (aktuelle Beispiele: Holzmarkt, FFP2-Masken, Gasversorgung). Daher gewinnt die regionale bzw. kommunale Handlungsebene deutlich an Bedeutung. Verlässliche lokale Kooperationen könnten darüber hinaus auch zur Investitionssicherheit beitragen sowie für neue lokale Wertschöpfungsketten und Arbeitsplätze sorgen. Für die Umsetzung von Maßnahmen sind dabei alle Entscheidungs- und Handlungsebenen relevant: Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Hier erscheint es vor allem auch mit Blick auf die komplexen Themenfelder PtX und Sektorenkopplung erforderlich, das Bewusstsein für die jeweiligen Rollen zu schärfen, Anforderungen zu benennen und das Zusammenspiel der Ebenen zu optimieren, damit Hemmnissen zielorientiert begegnet werden und insgesamt ein Beitrag zu einer zügig gelingenden Energiewende geleistet werden kann. Das reicht von Zuständigkeiten und Datenschutzfragen über Datenverfügbarkeiten und Entscheidungsprozesse bis hin zu den rechtlichen Rahmenbedingungen und der frühzeitig anzugehenden Öffentlichkeitsarbeit.

¹ https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora_Dezentralitaet_WEB.pdf

2.7 Soziale Aspekte

Handlungsempfehlung:

Erweiterung des Betrachtungsrahmens bezüglich der sozial relevanten Auswirkungen von Prozessumstellungen

Die Umstellung von Produktionsprozessen auf PtX-Technologien kann dazu führen, dass Anpassungen in den Arbeitsabläufen der Unternehmen erforderlich werden, von denen letztlich die Mitarbeitenden der Unternehmen betroffen sind. Ein Beispiel hierfür ist die Schnittstelle „Prozessflexibilisierung und Schichtarbeit“. Hier konnte im Rahmen der Untersuchungen im ProPower-Projekt bisher kein direktes und wesentliches Konfliktpotenzial festgestellt werden. Deutlich stärker in den Blick genommen werden sollte aber die übergeordnete, gesellschaftliche Ebene, die jedoch nicht Gegenstand der Betrachtungen im Projekt war: Welche sozial relevanten Veränderungen sind mit den umfassend anstehenden Prozessumstellungen in den produzierenden Unternehmen verbunden? Beispielsweise bezüglich der Aspekte Mehrkosten für Endverbraucher, Dezentralisierung, Infrastrukturanforderungen und Klärung von Standortfragen sollten akzeptanzrelevante Fragestellungen frühzeitig mitberücksichtigt werden. So, wie Anlagen zur Stromerzeugung näher an die Bevölkerung heranrücken, werden auch dezentrale PtX-Anlagen im Umfeld sichtbar werden. Eine frühzeitige Einbindung der Bürger erscheint daher auch hier geboten. Neben Informationen zu den Technologien selbst sollten dabei auch die Optionen zur Stärkung der regionalen Wirtschaft durch PtX-Technologien thematisiert werden.

Handlungsempfehlung:

Allgemeinverständliche Erläuterung der erforderlichen Entwicklungsschritte

Die aktuelle Krise könnte über die derzeit bestehenden großen Unsicherheiten in der Verfügbarkeit und dem Preis fossiler Brennstoffe zu einem eigenständigen Einflussfaktor werden, der sich auch beschleunigend auf PtX-Prozessumstellungen auswirkt. Gleichzeitig verschärft sich derzeit jedoch insgesamt die finanzielle Belastung für Unternehmen und Endverbraucher. Hier sollte es neben Maßnahmen für eine sozialverträgliche Lastenverteilung auch vermehrt gut aufbereitete und allgemeinverständliche Informationen und Erläuterungen zu wesentlichen Zusammenhängen und den sich daraus ergebenden Anforderungen bezüglich der Energiewende geben, damit die erforderlichen Entwicklungsschritte bestmöglich mitgetragen werden.

Handlungsempfehlung:

Bewertung konkreter Prozessumstellungsoptionen in der Industrie

Die technologische Bewertung von PtX-Konzepten wurde auf einer übergeordneten Ebene vorgenommen, kann ihre Wirkung aber erst in der konkreten Anwendung unter zusätzlicher Auslotung der vor Ort gegebenen Möglichkeiten entfalten. Die Übertragung der technologischen Bewertungsmethodik in die konkrete Anwendung könnte daher einen bedeutenden Mehrwert für die Transformation industrieller Prozesse bieten. Hier lassen sich wesentliche Randbedingungen benennen sowie geeignete Konzepte für Prozessumstellungen entwerfen und methodisch miteinander vergleichen, um die beste Variante auszuwählen. Für eine solche Übertragung wären u. a. angepasste Sätze an Bewertungskriterien in Form von erweiterten oder alternativen Kriterien erforderlich.

Handlungsempfehlung:

Technologiemonitoring entwickeln

Die im Projekt erstellten Netzdiagramme zu den PtX-Technologien¹ können aber auch mit dem vordefinierten Kriteriensatz ein wertvolles Hilfsmittel für Akteure sein, die sich einen ersten Überblick über bereits heute oder mittelfristig verfügbare Technologien verschaffen möchten. Beispielsweise könnten produzierende Unternehmen, Energieversorger, aber auch die kommunale Politik und Entscheidungsträger mit Hilfe solcher Diagramme und anhand der lokalen Gegebenheiten prüfen, welche PtX-Technologien prinzipiell geeignet sind. In Verbindung mit einer integralen Wirtschaftlichkeitsanalyse² könnten darauf aufbauend Investitionsentscheidungen im Zusammenspiel der beteiligten Akteure vorbereitet werden. Die häufig unzureichende Datenlage erschwert bzw. verhindert es jedoch, solche Diagramme für alle relevanten Technologien in gleichwertiger Aktualität zu erstellen. Hieraus lässt sich als Empfehlung ableiten, dass ein Technologiemonitoring für PtX-Technologien etabliert werden sollte, dessen Ergebnisse aktuell und leicht zugänglich sein sollten. So könnten Akteuren nicht nur gegenwärtig sondern auch mittel- und langfristig die jeweils bestehenden technischen Optionen aufgezeigt werden.

Handlungsempfehlung:

Weiterentwicklung der Bewertungskriterien

Die Klimaschutzziele wurden verschärft³ und der Handlungsdruck zur Umstellung von Industrieprozessen hat sich somit erhöht, die Hemmnisse für die Umsetzung bestehen jedoch nach wie vor. Zeitlich relevante Bewertungskriterien müssen demnach an Gewicht gewinnen. Hierzu zählen bspw. das TRL und die Unabhängigkeit der Technologien von besonderen bzw. neuen Infrastrukturen. Aber auch Lösungen mit Erweiterungspotenzial, z. B. modulare Ansätze im regionalen Raum, können zeitlich relevant sein, weil sie Ankopplungspotenziale für weitere Projekte bilden und so Strukturen wachsen können. Dezentral eingesetzte Elektrolyseure für den schnellen Einstieg in die Wasserstofftechnologie sind ein Beispiel dafür. Langfristig ist aber ebenso denkbar, dass andere Bewertungskriterien, die bisher keine oder nur eine untergeordnete Rolle gespielt haben, relevant werden können. Die entwickelte Methodik bietet die Flexibilität, diese Bewertungskriterien dann entsprechend anzupassen und somit auf veränderte Rahmenbedingungen zu reagieren.

¹ vgl. Schlussbericht zum Projekt ProPower [Ehrenstein et al. (2022)]; S. 38 ff.

² vgl. Kap. 2.5 Handlungsempfehlung: Entwicklung einer systemisch-technologischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Transformationsvorhaben

³ <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672.pdf>

3 Fazit

Im Rahmen der Technischen Analyse wurden im Projekt ProPower eine Vielzahl an Handlungsempfehlungen für PtX-Technologien zu unterschiedlichen Themenschwerpunkten abgeleitet. Neben technischen und infrastrukturellen Aspekten wurde auch zu ökonomischen, rechtlichen, ökologischen, systemischen, organisatorischen, sozialen und methodischen Aspekten Stellung genommen.

Dieses breite Spektrum spiegelt wider, dass PtX-Technologien vielfältig sind und an einer sensiblen Stelle im Energiesystem ansetzen: Sie dienen der Integration von erneuerbarem Strom und dabei auch der Sektorenkopplung mittels Elektrifizierung von Prozessen. Die Sektorenkopplung muss erfolgen, um das Energiesystem in seiner Gesamtheit nachhaltig ausrichten zu können. Für die Elektrifizierung von Prozessen, insbesondere von Produktionsprozessen in der Industrie, ist es in einigen Fällen ausreichend, auf erneuerbar-basierte Edukte umzusteigen. In anderen Fällen müssen jedoch gänzlich neue Prozessrouten in die Umsetzung gebracht werden, womit ein deutlich höherer Aufwand verbunden ist. Dabei müssen PtX-Technologien einen Beitrag dazu leisten, die Systemeffizienz zu verbessern und sich optimal in bestehende Strukturen einfügen, bspw. indem Synergien genutzt werden. Diese Aspekte sind wiederum direkt mit Standortfragen verknüpft.

Die hier gegebenen Empfehlungen folgen aus der Analyse der aktuellen Situation. Sie fallen jedoch in eine Phase hoher Dynamik im Transformationsprozess: Die Warnungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)¹ verschärfen sich mit jedem Bericht, die gesetzten Klimaschutzziele wurden bislang nicht erreicht, die Energie- und Klimapolitik wird aktuell neu ausgerichtet und rechtliche Rahmenbedingungen werden überarbeitet, die globalen politischen Ereignisse nehmen massiv Einfluss. Die Änderung der Randbedingungen kann also ggf. auch Neubewertungen bzw. die Gewichtung von Anforderungen und Maßnahmen erforderlich machen.

Vor dem Hintergrund der sehr begrenzten Zeit für klimawirksames Handeln, dem Umfang dessen, was noch an Arbeit zu leisten ist und den bestehenden Unsicherheiten, mit denen umzugehen ist, wird es aber vor allem auf die Zielstrebigkeit ankommen, mit der der Transformationsprozess vorangetrieben wird. Die Aktivierung aller relevanten Entscheidungs- und Handlungsebenen und die zügige Umsetzung der bereits heute verfügbaren Technologien unter Berücksichtigung systemischer Anforderungen, die zielorientierte Bewertung und Beförderung grüner Produktionsprozesse und Produkte sowie die fortlaufende Optimierung des Gesamtsystems durch Entwicklung und Integration neuer Technologien erscheinen wesentlich, um die Klimaschutzziele erreichen zu können.

¹ <https://www.ipcc.ch/>

Berger et al. (2020)	Berger et al.; <i>Systematik im Power-to-X-Ansatz – Identifikation, Charakterisierung und Clusterung der Power-to-X-Technologien</i> ; Zeitschrift für Energiewirtschaft; Vol. 44; S. 177–193; 2020; https://doi.org/10.1007/s12398-020-00281-x
Bierwirth et al. (2021)	Bierwirth et al.; <i>Sondierungsstudie: Wuppertal klimaneutral 2035 – Wege und Herausforderungen auf dem Weg zur kommunalen Klimaneutralität 2035</i> ; Hrsg.: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Juli 2021
Cataluña et al. (2021)	Cataluña et al.; <i>Production process of di-amy ether and its use as an additive in the formulation of aviation fuels</i> ; Energy Policy, Vol. 157, October 2021; https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.167
Dörr et al. (2016)	Dörr et al.; <i>Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz – Auswirkungen auf den Betrieb von Gasanwendungstechnologien im Bestand, auf Gas-Plus-Technologien und auf Verbrennungsregelungsstrategien</i> ; DVGW G 201205; Abschlussbericht; 2016
Ehrenstein et al. (2021)	Ehrenstein et al.; <i>ProPower: Systemanalyse Power2Products – Ökonomische und sozial-ökologische Auswirkungen einer sektorübergreifenden Nutzung von Strom</i> , Schlussbericht zum Teilprojekt A: Technische Analyse; FKZ: BMWK 03ET4052A; 2021
Fröhlich et al. (2019)	Fröhlich et al.; <i>CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland – Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit</i> ; ifeu paper; Heidelberg 03/2019
Repetto et al. (2016)	Repetto et al.; <i>Chapter 11 – Current and Potential Aviation Additives for Higher Biofuel Blends in Jet A-1</i> ; Biofuels for Aviation – Feedstocks, Technology and Implementation; 2016; Pages 261-275; https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804568-8.00011-1
Hank et al. (2018)	Hank et al.; <i>Economics & carbon dioxide avoidance cost of methanol production based on renewable hydrogen and recycled carbon dioxide – power-to-methanol</i> , Sustainable Energy & Fuels; Jg. 2; Nr. 6; S. 1244–1261; 2018; https://doi.org/10.1039/C8SE00032H
Tremel (2018)	Tremel; <i>Electricity-based Fuels</i> ; Cham: Springer International Publishing; 2018; S.79; https://doi.org/10.1007/978-3-319-72459-1
Warszawski et al. (2021)	Warszawski et al.; <i>All options, not silver bullets, needed to limit global warming to 1.5 °C: a scenario appraisal</i> ; Environ. Res. Lett.; Vol. 16; Nr. 6; 2021
Zell-Ziegler et al. (2021)	Zell-Ziegler et al.; <i>Enough? The role of sufficiency in European energy and climate plans</i> ; Energy Policy; Vol. 157; 2021; https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112483

Aktualität der Internetadressen:

Alle in den Fußnoten und im Literaturverzeichnis aufgeführten Internetadressen wurden zuletzt im April 2022 aufgerufen.