

Kein Selbstläufer: Klimaschutz und Nachhaltigkeit durch PtX

Diskussion der Anforderungen und erste Ansätze
für Nachweiskriterien für eine klimafreundliche und
nachhaltige Produktion von PtX-Stoffen

Berlin, 29.07.2019

Impulspapier im Auftrag des BUND
im Rahmen des Kopernikus-Vorhabens „P2X“

Autor

Peter Kasten
Christoph Heinemann

unter Mitarbeit von
Dominik Seebach
Jürgen Sutter

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Hintergrund	5
1.1.	Leitlinien zur Nachhaltigkeitsbewertung von PtX-Stoffen	6
2.	Die PtX-Herstellung und die Bedeutung der verschiedenen Inputströme für die Nachhaltigkeits- und Treibhausgasbewertung	8
3.	Potenzielle Nachhaltigkeitswirkungen und mögliche Produktionskriterien	11
3.1.	Strombezug	11
3.2.	CO₂-Bezug	17
3.3.	Wasserbezug	22
3.4.	Flächeninanspruchnahme	24
4.	Schlussfolgerungen für die Förderung des Aufbaus von PtX-Produktionskapazitäten	26
	Literaturverzeichnis	29

1. Hintergrund

Der Beschluss des Pariser Abkommens im Jahr 2015, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 Grad, wenn möglich auf 1,5 Grad zu begrenzen, hat der Weltgemeinschaft einen Rahmen für den Klimaschutz gegeben, aus dem sich die Notwendigkeit ergibt, dass Industrienationen wie Deutschland kontinuierlich ihre Treibhausgasemissionen stark reduzieren und spätestens bis zum Jahr 2050 annähernd keine klimawirksamen Emissionen mehr erzeugen. Zeitgleich wurde in den letzten Jahren deutlich, dass durch die prioritäre Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel sowie durch die Begrenztheit geeigneter Flächen für den Biomasseanbau Biomasse langfristig nur im begrenzten Maßstab für die energetische und materielle Nutzung zur Verfügung stehen wird. Seit einigen Jahren steigt daher die Bedeutung synthetischer, strombasierter Stoffe (**Power-to-X**) als Treibhausgasminderungsoption in der Debatte um die Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland (z. B. BDI 2018; ÖI und Fraunhofer ISI 2015), aber auch auf internationaler Ebene (z. B. IPCC 2018; EC 2018) an.

Unstrittig ist in der Diskussion, dass der Einsatz nachhaltig hergestellter PtX-Produkte¹ mit unterschiedlichen Funktionen (z. B. Anwendungen ohne sonstige technische Alternative zu Energieträgern mit hoher Energiedichte und zu Kohlenwasserstoffen als Rohstoffquelle, Langfristspeicherung der volatilen Stromerzeugung) für das Gelingen des Klimaschutzes langfristig notwendig sein wird. Unterschiedliche Einschätzungen herrschen jedoch in Bezug auf die benötigte Menge. Sie unterscheidet sich in Abhängigkeit anderer Entwicklungen: Je geringer die Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse für die energetische und stoffliche Nutzung ist, je geringer die Reduzierung der Energienachfrage durch veränderte Konsum- und Verhaltensmuster ist, je geringer sich die direkte Nutzung erneuerbarer Elektrizität durchsetzt und je ambitionierter das Klimaschutzziel gesetzt wird, desto mehr nachhaltige PtX-Stoffe werden benötigt.

Die Diskussion um die Herstellung von PtX-Stoffen ist allerdings keine theoretische mehr. Erste Pilotanlagen existieren² und die Bundesregierung treibt die Skalierung der Technologie zu Demonstrationsanlagen über Reallabore an (BMW i 2018). Zudem wollen privatwirtschaftliche Akteure erste kommerzielle Anlagen zu Beginn der 2020er Jahre in Betrieb nehmen (Holen und Bruknap 2019). Und der Klimaschutz drängt: Deutschland läuft Gefahr, die selbst gesteckten³, aber auch die verbindlich auf EU-Ebene eingegangenen Klimaschutzziele in den Nicht-ETS-Sektoren⁴ (u. a. Wärme und Verkehr) zu verfehlen. Erhebliche Ausgleichszahlungen für die erreichte Treibhausreduktion in anderen europäischen Ländern und eine Belastung des Bundeshaushalts wären die Folge dieser Zielverfehlung (ÖI 2018). Aus diesem Grund sehen einige Akteure die Notwendigkeit, PtX-Produkte bereits kurzfristig trotz der hohen Treibhausgasminderungskosten als relevante Treibhausminderungsoption bis zum Jahr 2030 einzusetzen (BDI 2019). Kostenminderung und fördernde Rahmenbedingungen stehen für diese Akteure im Mittelpunkt. Darüber, ob dies eine geeignete und vor allem eine technisch umsetzbare kurz- bis mittelfristige Klimaschutzoption sein kann, besteht allerdings keine Einigkeit in der Debatte (ÖI 2019).

¹ In diesem Impulspapier verwenden wir den Begriff PtX-Stoff. Häufig steht die Nutzung der PtX-Produkte als Energieträger im Mittelpunkt, weswegen der Begriff efuels oft verwendet wird. Die stoffliche Nutzung als Wasserstoff- oder Kohlenstoffträger bleibt oft unerwähnt.

² z. B. Audi e-gas Anlage in Werlte (<http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/audi-e-gas-projekt/>).

³ z. B. BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050

⁴ EU (2018): Effort Sharing Regulation

Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von PtX-Stoffen haben für den Aufbau von PtX-Produktionskapazitäten bereits kurzfristig eine zentrale Bedeutung. Die meisten Studien zu PtX-Stoffen fokussieren auf möglichen Kostenentwicklungen und zukünftigen Vorzugsstandorten. Sie sprechen Nachhaltigkeitskriterien zwar als notwendig an, für deren Ausgestaltung werden aber keine Vorschläge im Detail genannt. Auch hat bisher zu diesem Thema kein gesellschaftlicher Aushandlungsprozess stattgefunden, der notwendig ist, um möglichst langfristig anzuwendende und möglichst gleichbleibende Kriterien zu entwickeln (siehe unterschiedliche Positionen in ÖI 2019).

Aus Industriesicht geben Nachhaltigkeitskriterien den Rahmen vor, in dem Produktionskapazitäten zukünftig operieren müssen (MWV; IWO; MEW; Uniti 2018). Sie sind notwendig, um überhaupt eine Investitionsentscheidung für oder wider PtX-Produktionsanlagen treffen zu können. Auch müssen sie möglichst langfristig Bestand haben, damit frühzeitig gebaute Anlagen zu einem späteren Zeitpunkt noch den gesetzten Rahmenbedingungen entsprechen. Dementsprechend groß ist der industrieseitige Druck auf die Politik, möglichst bald die Rahmenbedingungen für die PtX-Produktion, zu denen auch die Nachhaltigkeitskriterien gehören, zu beschließen; notfalls auch vor einer EU-weiten Einigung, die im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II für das Jahr 2021 vorgesehen ist.

Bis heute stehen die folgenden zentralen Fragen nicht im Mittelpunkt der Debatte um PtX-Stoffe:

Was sind die Anforderungen an die PtX-Produktion, die möglichst positive Nachhaltigkeitswirkungen sicherstellen und negative Auswirkungen möglichst ausschließen?

Und wie können diese Anforderungen verifizierbar nachgewiesen werden?

Erst durch die Beantwortung dieser Fragen und deren Umsetzung in nachweisbare Verfahren erhält die PtX-Produktion aus unserer Sicht die Legitimation, durch die Politik mit öffentlichen Geldern und sonstigen Politikinstrumenten gefördert zu werden. Ohne diesen Schritt besteht nicht nur die Gefahr, PtX-Stoffe mit geringer bzw. negativer Nachhaltigkeitswirkung für das Klima sowie für die am Produktionsstandort lokale Zivilgesellschaft am Markt zu etablieren. Vielmehr besteht auch das Risiko einer negativen Wahrnehmung von PtX-Stoffen in der deutschen und europäischen Zivilgesellschaft, wenn diese zwar teuer in der Herstellung sind, aber nicht das Nutzenversprechen – die positive Nachhaltigkeitswirkung – einhalten. Und für die Investoren und Hersteller dieser Technologie besteht das Risiko, dass ungeeignete Kriterien über die Zeit angepasst werden müssen und sich so die Rahmenbedingungen für die PtX-Herstellung immer wieder verändern und sich so das Investitionsrisiko erhöht.

Dieses Papier soll daher einen Impuls zur Beantwortung der zuvor aufgestellten Fragen geben. Das Papier soll aber auch einordnen, an welchen Stellen der Produktionskette aus unserer Sicht bereits heute soziale und ökologische Anforderungen an die PtX-Produktion formuliert werden können und an welchen Punkten ein zivilgesellschaftlicher Aushandlungsbedarf besteht. Auch sollen – wenn möglich - Anregungen gegeben werden, wie verifizierbare Nachweismethoden die diskutierten Anforderungen gegebenenfalls sicherstellen können. Ausdefinierte Nachhaltigkeitskriterien werden aber nicht ausgearbeitet.

1.1. Leitlinien zur Nachhaltigkeitsbewertung von PtX-Stoffen

Bevor wir in dem Papier auf Nachhaltigkeitsanforderungen für verschiedene Aspekte der PtX-Produktion eingehen, werden wir an dieser Stelle zunächst Leitlinien für die folgende Diskussion vorstellen. Einfach ist die Bewertung der Nachhaltigkeit nämlich nicht. Wir finden kein weißes Blatt vor, auf dem nur die PtX-Anlage für sich als abgegrenzte Einheit hinsichtlich der Nachhaltigkeits-

wirkung bewertet werden kann (direkte Effekte). Vielmehr werden die PtX-Anlagen neue Nachfrager in bestehenden Energie- und Wirtschaftssystemen mit existierenden gesetzlichen und steuerlichen Rahmenbedingungen sein, so dass sie immer auch eine Wirkung auf andere Teile dieser bestehenden Systeme haben werden (indirekte Effekte). Und um es noch komplexer zu machen: Die Energie- und Wirtschaftssysteme sowie das Anspruchsniveau an die Treibhausgasminderung sind dynamisch; sie ändern sich über die Zeit. Und die Energie- und Wirtschaftssysteme sind je nach Region und Land unterschiedlich entwickelt und organisiert. Zudem interagieren sie und Veränderungen in einer Region können eine starke Reaktion in anderen Regionen der Welt verursachen (räumlich und zeitlich differenzierte sowie interagierende Effekte).

Daraus folgt, dass das, was an einem Ort oder zu einem Zeitpunkt mit positiven Nachhaltigkeitswirkungen verbunden ist, an einem anderen Ort bzw. zu einem anderen Zeitpunkt weniger stark positive und gegebenenfalls sogar negative Wirkungen entfaltet. Dementsprechend wichtig ist die Leitlinie, dass dieser Systemgedanke bei der Analyse der Nachhaltigkeitswirkungen und der daraus abgeleiteten Nachhaltigkeitsanforderungen immer im Mittelpunkt steht.

Die Einführung der Biokraftstoffe ist ein geeignetes Beispiel, um die Notwendigkeit der Systembetrachtung in der Formulierung von Nachhaltigkeitsanforderungen zu verdeutlichen. Ähnlich wie es bei den PtX-Stoffen zu erwarten ist, besteht für Biokraftstoffe ein globales Produktions- und Nachfragesystem. Entscheidungen über Produktionsbedingungen und eine Nachfrageförderung in Deutschland und der EU werden somit zu Entwicklungen in anderen Weltregionen und anderen Teilsystemen unseres Wirtschaftens führen.

Obwohl negative direkte Effekte durch die Produktion von Biokraftstoffen von Beginn der Förderung an begrenzt wurden, ist die Nachhaltigkeitswirkung von Biokraftstoffen auf Basis von Nahrungs- und Futtermitteln aufgrund von systemischen Effekten heftig umstritten und wird von einigen Akteuren als nicht-nachhaltige Energieversorgungsoption abgelehnt (oxfam 2012; UBA 2013). Die erhöhte Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln hatte unter anderem die folgenden Entwicklungen zur Folge: Die Preise für Lebensmittel stiegen in einigen Weltregionen an; Kleinbauern wurden von Großkonzernen verdrängt und es entstand ein Flächendruck für den Nahrungs- und Futtermittelanbau, was zu negativen indirekten Landnutzungsänderungen (ILUC⁵) und Primär-Regenwald-Abholzungen führte (IEEP 2010; oxfam 2012; UBA 2013). So schätzte beispielsweise die kürzlich erschienene Studie der Global Environment Facility das die Sektoren Palmöl- und Sojaanbau sowie die Rinderzucht zusammen für 80% der weltweiten Abholzung in der jüngeren Geschichte verantwortlich sind (GEF 2016). Auch sieht die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) die Begrenzung der Biomasseproduktion für die Energienutzung weltweit als wichtigen Baustein an, um in den kommenden Jahrzehnten die Versorgung mit ausreichend Nahrungsmitteln sicherstellen zu können (FAO 2018).

Diese negativen systemischen Effekte führten neben einer zivilgesellschaftlichen Diskussion über die Sinnhaftigkeit der Biokraftstoffnutzung auch zu erheblichen regulativen Anpassungen. Die Nachhaltigkeitskriterien wurden nach und nach angepasst: Mit der ILUC-Richtlinie⁶ wurde die anrechenbare Menge dieser Biokraftstoffe im Verkehrssektor im Jahr 2015 zunächst auf 7 % begrenzt. In der Erneuerbaren-Energie-Richtlinie II wurde die Anrechenbarkeit weiter reduziert: Der anrechenbare Mengenanteil dieser Kraftstoffe ist mehr oder weniger auf die im Jahr 2020 produzierte Menge limitiert⁷. EU-Staaten können auch ein niedrigeres Anrechnungsniveau wählen. Zu-

⁵ Indirect Land Use Change

⁶ EU 2015/1513

⁷ Die anrechenbare Menge ist begrenzt auf den EE-Anteil an der Kraftstoffnachfrage des Straßen- und Schienenverkehrs des jeweiligen Landes im Jahr 2020 + 1 %-Punkt. Die maximale Anrechnung liegt bei 7 %.

sätzlich sind Biokraftstoffe, die ein hohes Risiko für indirekte Landnutzungsänderung mit sich bringen, ab dem Jahr 2030 komplett von der Anrechnung in der Erneuerbaren-Energie-Richtlinie II ausgeschlossen.

Durch die fehlende Berücksichtigung möglicher indirekter Wirkungen in der Formulierung der ursprünglichen Nachhaltigkeitskriterien konnten die Biokraftstoffe das in sie gesetzte Nutzenversprechen – die Treibhausgaserminderung – nicht im dem erwarteten Maßstab erfüllen. Zusätzlich wirkten sie sich negativ auf Entwicklungen in anderen Bereichen des Wirtschaftssystems aus und es führte zu sozialen Fehlentwicklungen in einigen Weltregionen. Auch für die Hersteller von Biokraftstoffen waren und sind die wechselnden Rahmenbedingungen für die Biokraftstoffproduktion wegen der fehlenden Investitionssicherheit problematisch (IEEP 2016; DG Ener 2017; ARUP und URS 2014).

Aus dem Beispiel der Markteinführung der Biokraftstoffe leiten wir an dieser Stelle eine zweite Leitlinie für die Formulierung von Nachhaltigkeitskriterien für PtX-Stoffe ab. Es ist zwar verführerisch, gerade in einer sehr frühen Technologieentwicklungs- und Marktphase zur Kostenreduktion und Technologieförderung die Nachhaltigkeitsanforderungen möglichst „weich“ auszugestalten. Sobald aber der Übergang von der reinen Technologieentwicklung und Demonstrationsphase zur Technologieskalierung stattfindet und Geschäftsmodelle entwickelt werden, müssen die Rahmenbedingungen so ausgestaltet sein, dass sie positive Nachhaltigkeitswirkungen sicherstellen und mögliche negative Wirkungen ausschließen. Vor allem müssen Pfadentwicklungen vermieden werden, die eine Lenkungswirkung hin zu wenig nachhaltigen Herstellungsprozessen und Anwendungen führen und gegebenenfalls einen ökonomischen und regulativen „Lock-In“ in solchen Prozessen generieren. Nur so entwickeln sich Anlagen- und Geschäftskonzepte, die dem Nutzenversprechen der PtX-Produktion gerecht werden.

- Bei der Ableitung von Nachhaltigkeitsanforderungen und deren Verifizierung sind neben direkten Effekten auch indirekte Effekte (z. B. Auswirkungen auf andere Sektoren und andere Nachhaltigkeitskategorien; Auswirkungen auf andere Regionen und Länder) zu beachten, die sich durch die Einbindung in das Energie- und Wirtschaftssystem ergeben.
- Die Nachhaltigkeitsanforderungen an die PtX-Produktion ändern sich über die Zeit durch den veränderten THG-Reduktionsanspruch. Kriterien, die heute formuliert werden, müssen mit den gesetzten Reduktionsansprüchen für den Zeitraum bis 2050 kompatibel sein.
- Spätestens beim Übergang von der Demonstrationsphase zur Skalierung der Technologie müssen Nachhaltigkeitsanforderungen mögliche positive Nachhaltigkeitswirkungen fördern und potenziell negative ausschließen. Pfadentwicklungen, die eine Lenkungswirkung für wenig nachhaltige Herstellungsprozesse und gegebenenfalls einen neuen „Lock-In“ in solche Prozesse generieren, müssen vermieden werden.

2. Die PtX-Herstellung und die Bedeutung der verschiedenen Inputströme für die Nachhaltigkeits- und Treibhausgasbewertung

Wir wollen in diesem Papier nicht im Detail auf die Produktionsprozesse von PtX-Stoffen eingehen. Dazu gibt es eine Vielzahl von Studien und Papieren (z. B. Lappeenranta University of Technology 2017; CTH und IVL 2017). Ein Grundverständnis über die Prozesskette und Kostenstrukturen ist aber für die folgende Diskussion um Nachhaltigkeitskriterien notwendig und hilfreich.

Ein zentraler Prozessschritt für alle PtX-Produkte ist die Elektrolyse, in der mittels Strom aus reinem Wasser (H_2O) unter Umwandlungsverlusten Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) gewonnen wird. Der Wasserstoff kann in verschiedenen Anwendungen direkt genutzt werden; für die Spei-

cherung und Verteilung muss der Wasserstoff allerdings verdichtet oder verflüssigt vorliegen, was mit zusätzlichem Energieaufwand verbunden ist. Außer im Industriesektor ist Wasserstoff bisher ein wenig eingesetzter Rohstoff. Die Brennstoffzellentechnologie sowie Verbrennungsmaschinen müssen weiterentwickelt bzw. angepasst werden und Transport- und Verteilinfrastrukturen müssen annähernd vollständig neu aufgebaut werden, wenn Wasserstoff ohne eine weitere Aufbereitung direkt genutzt werden soll.

In einem weiteren Prozessschritt (Synthese) kann der Wasserstoff allerdings auch zu Kohlenwasserstoffen wie Methan, Diesel und Kerosin sowie Kunststoffen und Chemikalien weiterverarbeitet werden. Dazu wird neben dem Wasserstoff aus der Elektrolyse Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid (CO_2) benötigt. Das CO_2 kann aus verschiedenen Quellen stammen, aus denen es mit unterschiedlichem Energieaufwand (Strom und Wärmeenergie) abgetrennt wird und es gegebenenfalls zur PtX-Produktionsanlage transportiert werden muss. Ein weiterer Prozessschritt bei Kohlenwasserstoffen ist die Aufbereitung der Endprodukte beispielsweise in Raffinerien und Gasreinigungsanlagen. Auch diese Prozessschritte sind mit Umwandlungsverlusten und Energieaufwand versehen. Bestehende Verbrennungsmaschinen sowie bestehende verfahrenstechnische Anlagen können die erzeugten Endprodukte im Gegensatz zum Wasserstoff einsetzen. Auch können bestehende Transport- und Verteilinfrastrukturen weitergenutzt werden, die je nach Produktionsstandort und Anwendung gegebenenfalls angepasst und erweitert werden müssten.

Allen Produktionsanlagen ist gemein, dass Strom der energetische Hauptinput in die PtX-Produktion ist und erhebliche Umwandlungsverluste entlang der Prozesskette entstehen. Die Art des Strombezugs ist somit der entscheidende Faktor für die Treibhausgasfreisetzung und Nachhaltigkeitswirkung des PtX-Stoffs (siehe Abschnitt 3.1 für Anforderungen an den Strombezug). Abbildung 2-1 verdeutlicht die Bedeutung der Treibhausgasemissionen des Strominputs für die Klimaschutzwirkung von PtX-Stoffen: Mit den heute vorkommenden und mittelfristig erwarteten Treibhausgasemissionen des deutschen Strommixes besitzen PtX-Stoffe eine schlechtere Treibhausgasbilanz als ihre fossilen Alternativen; und das bereits ohne der Einbeziehung von möglichen Treibhausgaseffekten durch den CO_2 -Bezug.

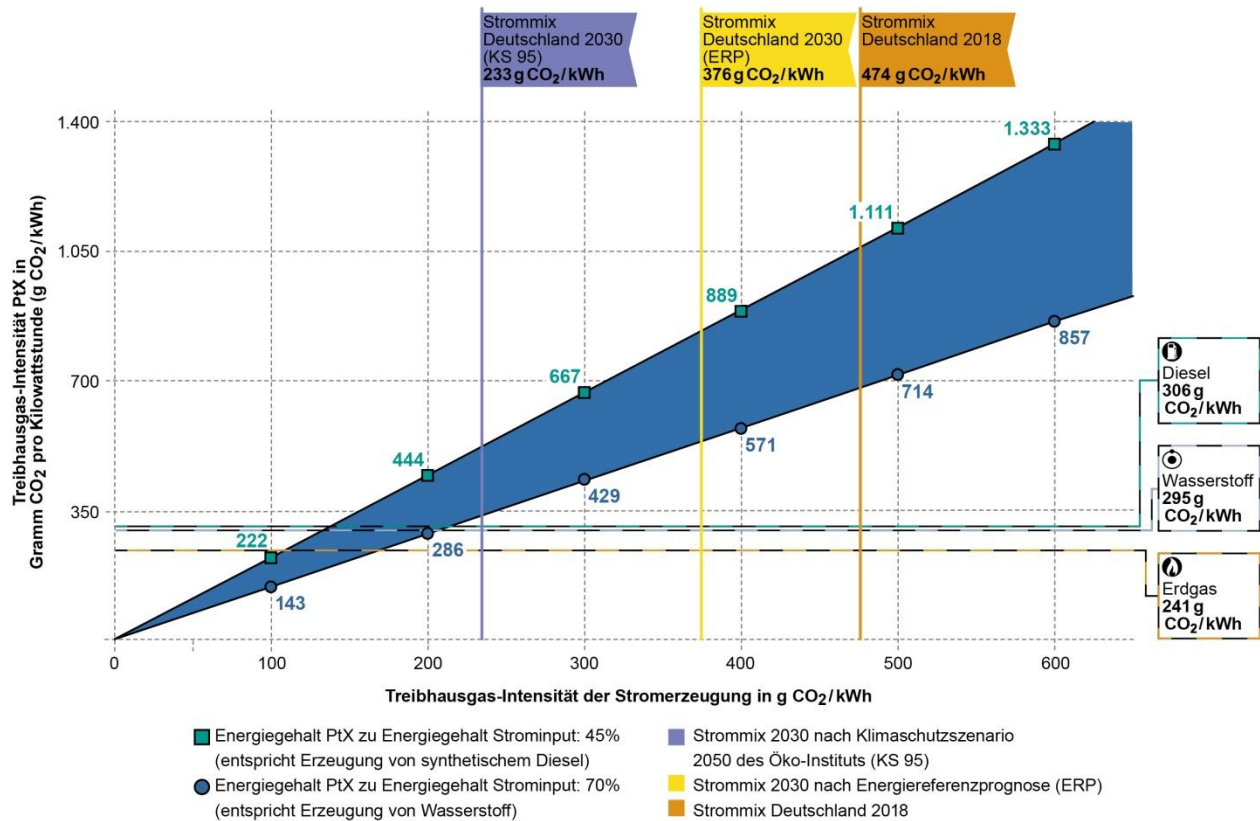
Aber auch der CO_2 -Bezug ist bei Kohlenwasserstoffen ein relevanter Aspekt der Klimaschutzbewertung. Durch die Nutzung strombasierter Stoffe wird im selben Maße CO_2 frei wie bei fossilen Kohlenwasserstoffen. Eine Treibhausgasminderung kann also nur dann entstehen, wenn das im Syntheseprozess gebundene CO_2 zuvor der Atmosphäre entnommen wurde oder ohnehin in die Atmosphäre entlassen worden wäre (siehe Abschnitt 3.2). Alleine durch die Nutzung ungeeigneter CO_2 -Quellen kann also dieselbe Treibhausgasfreisetzung entstehen wie bei der Verwendung fossiler Kohlenwasserstoffe.

Ein weiterer Inputstrom in die PtX-Produktion ist Wasser. Wasser hat global gesehen aus Klimaschutzgesichtspunkten einen geringen Stellenwert. Für weitere ökologische und soziale Nachhaltigkeitskriterien kann die Wassernutzung allerdings auf lokaler Ebene an den Produktionsstandorten einen relevanten Einfluss besitzen, auch wenn die benötigte Menge an Wasser für die PtX-Produktion im Vergleich zu anderen industriellen Prozessen vergleichbar ausfällt. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die Wasserverfügbarkeit in der Umgebung von PtX-Produktionsanlagen für eine Nachhaltigkeitsbewertung ebenfalls mit in den Blick zu nehmen (siehe Abschnitt 3.3).

Die erneuerbare Stromerzeugung und die CO_2 -Abtrennung aus der Luft sind flächenintensive Technologien, wobei die direkte Treibhausgaswirkung eher unwahrscheinlich ist. Indirekt kann die Flächeninanspruchnahme von Vorzugsflächen jedoch Auswirkungen auf das Stromsystem in der jeweiligen Produktionsregion hervorrufen, die mit sozialen und klimarelevanten Folgen verbunden

sein können. In Abschnitt 3.4 werden daher mögliche Anforderungen an die Flächeninanspruchnahme diskutiert.

Abbildung 2-1: CO₂-Intensität von PtX-Stoffen in Abhängigkeit der CO₂-Intensität des Strominputs bei unterschiedlicher Höhe der Umwandlungsverluste; keine Berücksichtigung sonstiger THG-Effekte (z. B. indirekte Wirkungen, Wärmebezug)



Quelle: Daten für CO₂-Emissionen der fossilen Energieträger aus ecoinvent 3.5, 2018 und GaBI 6.0, 2018

Für die Herstellungskosten sind zum Teil dieselben Stellschrauben zentral wie für die Nachhaltigkeitsbewertung (CTH und IVL 2017; Agora Verkehrswende; Agora Energiewende 2018): Aufgrund der hohen Umwandlungsverluste sind die Strombezugskosten eine zentrale Stellgröße für die PtX-Produktion. Der Strombezug definiert in Verbindung mit möglichen Wasserstoffzwischen Speichern auch die mögliche Auslastung einer PtX-Anlage, die wegen der hohen Investitionskosten der Anlagen ein relevanter Faktor für die Herstellungskosten ist. Und der CO₂-Bezug kann – je nach Bezugsquelle - bei der Herstellung von Kohlenwasserstoffen eine spürbare Position für die Produktionskosten ein. Je konzentrierter und in je größerer Menge CO₂-Ströme anfallen, desto günstiger und ökonomisch attraktiver ist die jeweilige CO₂-Quelle. Aus den hohen Kapitalkosten von PtX-Anlagen ergeben sich so Abschreibungszeiträume von 20 Jahren und mehr (MWV und FuelsEurope 2018), so dass die Nachhaltigkeitsbewertung sich auch auf Effekte über den gesamten Abschreibungszeitraum beziehen muss.

Bei der folgenden Diskussion um Nachhaltigkeitskriterien sollten die genannten Kostenfaktoren daher immer mitgedacht werden, da sie zum Teil in die entgegengesetzte Richtung zu den Nachhaltigkeitsanforderungen wirken⁸. Sie werden in dem von der Politik vorgegebenen Nachhaltigkeitsrahmen wesentlich sein für die Wahl der Produktionsstandorte und die eingesetzten Inputströme. Offensichtlich ist auch, dass eine Kostenreduktion durch eine Größenskalierung der Produktionsanlagen stattfinden wird und sich die Produktion nach und nach zu Vorzugsstandorten mit niedrigen Stromgestehungskosten für die erneuerbare Stromproduktion und genügend verfügbarer Fläche verlagern wird (MWV; IWO; MEW; Uniti 2018; Agora Verkehrswende; Agora Energiewende 2018; DECHEMA 2017). Diese Faktoren weisen darauf hin, dass die Produktion von PtX-Produkten nur im geringen Umfang in Deutschland stattfinden wird. Welche Vorzugsstandorte sich für die PtX-Produktion für Deutschland und die EU durchsetzen werden, ist offen: Sie reichen aber von Norwegen und Island, über die MENA-Region⁹ zu weiter entfernten Regionen und Ländern wie Südafrika, Chile und Australien (The Weltenergierat - Deutschland e.V. 2018; IWES 2017). Und für alle diese möglichen Länder müssen – ähnlich wie bei den Biokraftstoffen – die gesetzten Nachhaltigkeitskriterien Anwendung finden.

- Der Strombezug ist für die Klimaschutzwirkung strombasierter Stoffe der relevanteste Parameter. Bei ungeeignetem Strombezug können durch die PtX-Herstellung mehr Emissionen frei werden als bei der Nutzung fossiler Alternativen.
- Der CO₂-Bezug ist für die Klimaschutzwirkung strombasierter Stoffe ein relevanter Parameter. Bei ungeeignetem CO₂-Bezug können durch die Art der CO₂-Quelle Kohlenwasserstoffe produziert werden, die hinsichtlich ihrer THG-Bewertung äquivalent zu fossilen Stoffen zu werten sind und zu keiner THG-Minderung beitragen.
- Die Inanspruchnahme von Wasser und Flächen kann auf lokaler Ebene an den Produktionsstandorten zu positiven wie negativen sozialen Wirkungen führen. Die Flächeninanspruchnahme kann über indirekte Effekte zudem auch einen Effekt auf die Treibhausgasfreisetzung besitzen.
- Der Strom- und CO₂-Bezug sind relevante Faktoren für die Kosten der PtX-Herstellung. Eine kostengünstige Herstellung ist an vielen Punkten mit einer Produktion verbunden, die nicht zur THG-Minderung beiträgt. Der nachhaltige Zugang zu Wasser und zu Flächen kann zudem ein begrenzender Faktor für die Produktionsmenge und Skalierung der PtX-Produktion sein.

3. Potenzielle Nachhaltigkeitswirkungen und mögliche Produktionskriterien

3.1. Strombezug

Direkte Effekte durch den Strombezug

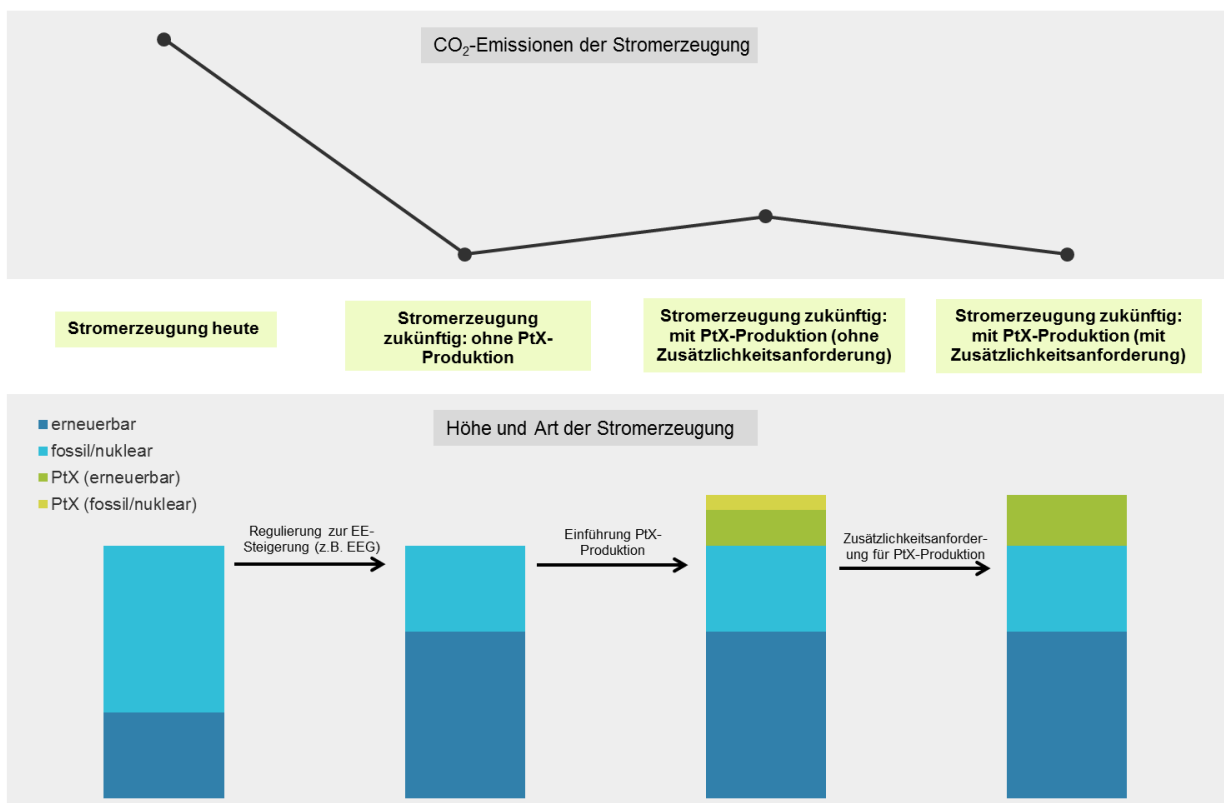
Die Produktionsprozesse der PtX-Herstellung benötigen große Mengen an Strom (siehe Abschnitt 2). Annähernd alle Studien und Stakeholder gehen – zum Teil implizit – davon aus, dass erneuerbare Energien (EE) zumeist in Form von Solar- und/oder Windenergie bei der PtX-Produktion zum Einsatz kommen (z. B. MWV; IWO; MEW; Uniti 2018; VDA 2017). Aus unserer Sicht ist allerdings noch ein weiteres Qualitätskriterium für den erneuerbaren Strom notwendig, um

⁸ Ein Beispiel ist die nachhaltige Produktion auf Basis von „Überschussstrom“. Dieser fällt nur in wenigen Stunden eines Jahres an, so dass die Auslastung einer PtX-Anlage, die mit „Überschussstrom“ systemdienlich betrieben werden soll, sehr gering ist. Eine niedrige Auslastung der PtX-Anlage führt aber zu hohen Herstellungskosten der PtX-Stoffe.

⁹ Middle East and North Africa

die PtX-Produktion auch tatsächlich als 100 %-ig erneuerbar bewerten zu können: Die **zusätzliche** Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien; und zwar eine Zusätzlichkeit auf **Systemebene** über den ohnehin bereits bestehenden Regulierungsrahmen hinaus. Nur so fallen im Stromsystem keine Mehrmissionen zur durch den Regulierungsrahmen vorgegebenen Treibhausgasminderungstrajektorie an und die Nutzung der PtX-Technologie erreicht auf Systemebene tatsächlich eine Treibhausgasminderung (Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Wirkung der zusätzlichen Stromnachfrage durch die PtX-Herstellung auf Art der Stromerzeugung und der dadurch erzeugten CO₂-Emissionen auf Systemebene mit und ohne Zusätzlichkeitsanforderung an den erneuerbaren Strom (schematische Darstellung)



Quelle: Eigene Abbildung

Wieso aber diese qualitative Zusatzanforderung? Sie ergibt sich aus der Art und Weise, wie die Stromproduktion marktwirtschaftlich in Europa und vielen anderen Märkten organisiert und der Ausbau der erneuerbaren Stromkapazitäten gefördert wird. Bei einer erhöhten Nachfrage nach Strom – wie sie durch die PtX-Produktion entsteht – basiert die Stromproduktion für die zusätzliche Nachfrage in Stunden ohne vollständig erneuerbare Stromversorgung (und noch verfügbarer Überkapazitäten) auf fossilen und Atomkraftwerken, was die Auslastung dieser Kraftwerke und die Treibhausgasemissionen im Stromsystem erhöht (ÖI 2017c).

Die notwendige Zusätzlichkeit der erneuerbaren Stromerzeugung für PtX-Anlagen lässt sich über zwei Wege erreichen: Einerseits kann erneuerbarer Strom genutzt werden, der wegen fehlender Abnehmer oder nicht ausreichender Transportkapazitäten ansonsten ungenutzt bliebe (markt- oder

netzbedingter „Überschussstrom“¹⁰), und andererseits können zusätzliche Stromerzeugungskapazitäten gebaut werden, die durch die bestehenden Regulierungen und Fördersysteme im Stromsektor ansonsten nicht entstehen würden. Daher muss für die Bewertung der Zusätzlichkeit die bestehende Regulierungs- und Förderlandschaft berücksichtigt werden.

Wir gehen nicht davon aus, dass der EU-ETS und andere perspektivisch rahmensetzende Instrumente (z. B. CO₂-Bepreisung) genug Innovationskraft generieren, um den Ausbau der erneuerbaren Stromkapazitäten im notwendigen Maßstab zu ermöglichen. Spezifische Instrumente werden weiterhin den EE-Anlagenausbau vorantreiben. Neue erneuerbare Stromerzeugungskapazitäten werden in Deutschland beispielsweise über das EEG¹¹ bis zu einem relativen Mengenziel gefördert. Mehr Stromnachfrage geht somit aus systemischer Perspektive auch nur mit einem anteiligen Anstieg der EE-Erzeugung entsprechend des relativen Ziels einher, während die verbleibenden Anteile durch zusätzliche fossile und nukleare Erzeugung abgedeckt werden. Erst durch ein Anheben dieses Ziels zur vollständigen Abdeckung der zur PtX-Produktion benötigten Strommenge oder eine Nichtanrechnung des erneuerbaren Stroms für PtX-Anlagen zur Zielerfüllung des EEG würde somit dem Anspruch von keinen Mehremissionen auf Systemebene gerecht werden¹².

Auf Systemebene ist davon auszugehen, dass zumindest ein Anteil des genutzten Stroms für die PtX-Produktion aus zusätzlichen erneuerbaren Stromkapazitäten stammt, wenn Elektrolyseure sich über die EEG-Umlage am Ausbau der erneuerbaren Stromkapazitäten finanziell beteiligen. In diesem Fall kann für die Treibhausbewertung auf systemischer Ebene in Annäherung mit dem Strommix gerechnet werden.¹³ Abbildung 2-1 zeigt jedoch deutlich, dass strombasierte Stoffe beispielsweise bei einer Produktion in Deutschland für diesen Fall mittelfristig bis in den Zeitraum nach 2030 zu keiner Treibhausgasminderung gegenüber fossilen Alternativen führen und sogar Mehremissionen erzeugt werden.

Auch die geographische Lokalisierung und der Betriebsmodus der Elektrolyseure besitzen aus Systemsicht eine Bedeutung für die Treibhausgasfreisetzung, wenn die PtX-Anlagen Strom aus dem Netz beziehen. Als neuer Stromnachfrager besteht das Risiko, als zusätzlicher Nachfrager hinter einem Stromnetzengpass die Belastung der Stromnetze zu verstärken. Um eine treibhausgasmindernde Betriebsweise der strombasierten Anlagen überhaupt erst zu ermöglichen, ist daher ein Netzanschluss vor Netzengpässen notwendig sowie eine Betriebsführung, welche sich an die Betriebssituation des Netzes anpasst.

Für eine mögliche Anrechnung strombasierter Stoffe auf Förderinstrumente (z. B. EE-Anteilsquoten, Investitionszuschüsse) ist im Gegensatz zu der Systembetrachtung die individuelle Perspektive der Betreiber von PtX-Anlagen relevant. Um auf dieser Ebene die Zusätzlichkeit des erneuerbaren Strombezugs zu fördern, existieren bisher keine Nachweissysteme. Eine Anpassung des bestehenden Systems der Herkunftsnachweise für erneuerbaren Strom wurde vom Öko-

¹⁰ „Überschussstrom“ sind Strommengen, die aufgrund von Verteilungsengpässen und aufgrund von nicht vorhandener Nachfrage nicht genutzt werden können.

¹¹ Erneuerbare-Energien-Gesetz: Nach dem EEG soll der EE-Anteil am Bruttostromverbrauch im Jahr 2035 bei 55 % bis 60 % und im Jahr 2050 bei mindestens 80 % liegen. Eine Zielerhebung auf einen 65 %-igen EE-Anteil im Jahr 2030 ist im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vorgesehen.

¹² ÖI (2017b) diskutiert die Anforderungen für die zusätzliche Stromnachfrage durch die batterieelektrische Mobilität stärker im Detail. Dieselben Prinzipien gelten für die zusätzliche Stromnachfrage durch PtX-Produkte.

¹³ In Fördersystemen mit absoluten EE-Ausbauzielen ist die Notwendigkeit der Anpassung des EE-Ausbauziels bzw. der Nichtanrechnung der EE-Anlagen für Elektrolyseure noch relevanter, da trotz der zusätzlichen Nachfrage und hohen Umwandlungsverluste der PtX-Anlagen dieselbe Menge an erneuerbarem Strom zur Verfügung steht. Die zusätzliche Nachfrage nach Strom würde somit zum großen Teil durch thermische Kraftwerke zur Verfügung gestellt werden und die Treibhausgasreduzierung des Stromsystems allgemein würde sich verlangsamen (siehe Diskussion der möglichen indirekten Effekte durch den Strombezug).

Institut dafür bereits in (Öl 2017c; 2017a) vorgeschlagen: Über Qualitätskriterien wie beispielsweise der Anforderung nach erst kürzlich errichteten erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen, die ohne öffentliche Förderung wie das EEG finanziert sind, ließe sich das System der Herkunftsnachweise anpassen. Die Nutzung von „Überschussstrom“ und ein netzdienlicher Betrieb könnte gegebenenfalls durch Netzbetreiber zertifiziert werden, wobei ein Konzept für geeignete sowie unabhängig nachweisbare und überprüfbare Kriterien für die Zertifizierung noch zu definieren wäre. Grundvoraussetzung für die Zusätzlichkeit auf Systemebene bleiben aber die zuvor genannten Kriterien und veränderten politischen Rahmenbedingungen.

Ohne Berücksichtigung der genannten Anforderungen können PtX-Produktionsanlagen aus unserer Sicht nicht als emissionsfrei und als vollständig erneuerbar bezeichnet werden. Für solche Anlagen können in Stunden ohne Bezug von „Überschussstrom“ bestenfalls die durchschnittlichen CO₂-Emissionen bzw. der durchschnittliche EE-Anteil des jeweiligen Stromsystems die Berechnungsgrundlage für die Treibhausgasemissionen eines PtX-Stoffes sein (siehe Abbildung 2-1). Ohne Beteiligung an den Kosten des ohnehin angestrebten EE-Ausbaus (z. B. in Deutschland Befreiung von der EEG-Umlage) müssten der PtX-Anlage sogar die marginalen Treibhausgasemissionen aufgrund der zusätzlichen Stromnachfrage angerechnet werden.

Für die Beschreibung möglicher Kriterien haben wir uns in den vorangegangenen Abschnitten häufig auf den deutschen Politikrahmen bezogen, da uns dieser am stärksten vertraut ist. Die genannten Prinzipien für die Treibhausgasbewertung gelten jedoch für alle Stromsysteme unabhängig vom Produktionsstandort. Für Importe strombasierter Stoffe aus Regionen außerhalb Europas ergibt sich daraus eine zusätzliche Problematik. Definierte und methodisch äquivalente Monitoring-Prozeduren für die THG-Intensität der Stromerzeugung existieren in den meisten Ländern außerhalb der EU nicht. Geeignete Methoden für die THG-Bewertung des Strombezugs in außereuropäischen Ländern müssen also geschaffen werden.

Die IEA veröffentlicht jährlich für viele Länder Informationen zur durchschnittlichen CO₂-Intensität der Stromerzeugung (International Energy Agency 2019); wie zuvor beschrieben ist allerdings die Wirkung der zusätzlichen Stromnachfrage auf der Systemebene durch die PtX-Produktion entscheidend für die Klimaschutzwirkung, die oftmals nicht über durchschnittliche Emissionsfaktoren abgebildet werden kann. Methoden zur Bewertung und Nachweisführung der Zusätzlichkeitsanforderungen für den erneuerbaren Strombezug der PtX-Herstellung auf internationaler Ebene existieren unserer Kenntnis nach nicht. Analyse- und Bewertungskonzepte, die Auswirkungen auf das jeweilige Energiesystem berücksichtigen sollen, gibt es jedoch im Rahmen der Anrechnungsregeln der internationalen Klimapolitik: Die bestehenden Methoden für THG-Bewertungen des Clean Development Mechanism (CDM) und sonstigen internationalen Klimaschutzprojekten¹⁴ könnten mit einer Weiterentwicklung der Standards die Basis für die Nachweisführung der zusätzlichen erneuerbaren Stromerzeugung in PtX-Anlagen außerhalb der EU bilden.

Indirekte Effekte durch den Strombezug

Beim internationalen Handel von strombasierten Stoffen stellt sich die Frage nach der Wirkung auf das exportierende Land und dessen Energie- und Wirtschaftssystem. Die möglichen externen Investitionen in innovative Technologien können positive Impulse im exportierenden Land entfalten;

¹⁴ Tools zur Berechnung von Strom-Emissionsfaktoren im Rahmen von CDM-Vorhaben (https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-07-v7.0.pdf/history_view); Standard (The Greenhouse Gas Protocol) des World Resource Institute zur Berechnung von THG-Minderungen durch netzintegrierte Strom-Projekte (https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/Guidelines%20for%20Grid-Connected%20Electricity%20Projects.pdf)

gleichermaßen sind aber auch negative Wirkungen nicht ausgeschlossen. Dabei ist davon auszugehen, dass diese indirekten Effekte durch die zusätzliche Stromnachfrage stärker werden, je größer die Produktionsmenge und je größer der Anteil der zusätzlichen Stromnachfrage im Stromsystem wird.

Der zusätzliche Impuls durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und der verfahrenstechnischen Anlagen kann die Wertschöpfung und den Lebensstandard vor Ort steigern; spezifisch für das Stromsystem besteht zudem die Chance, personelle (z. B. Facharbeitskräfte), organisatorische (z. B. vorbereitende Planungsprozesse) und auch technische (z. B. Spezialkräne) Strukturen für einen schnelleren und günstigeren Aufbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten unabhängig von PtX-Stoffen zu ermöglichen. Das Ausschöpfen dieser Potenziale für den regionalen und lokalen Mehrwert der PtX-Produktion nimmt nach Einschätzung vieler Akteure eine zentrale Rolle für den Erfolg der PtX-Technologie ein: Nur dann werden die Entscheider und die Bevölkerung im Exportland den Aufbau der benötigten technischen Anlagen und die Nutzung der im Land vorhandenen Ressourcen akzeptieren (ÖI 2019).

Die zusätzliche Nachfrage nach erneuerbarem Strom, der nicht für die Stromversorgung der Nachfragenden vor Ort zur Verfügung steht, kann aber auch negative Entwicklungen mit sich bringen. Grundsätzlich ist es so, dass mit denselben erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen im Stromsektor durch die Substitution fossiler Energieträger mehr Treibhausgasemissionen eingespart werden können als durch PtX-Stoffe. Die Kosten- und die Ressourceneffizienz (z. B. Gunststandorte, kritische Rohstoffe) für PtX-Stoffe ist niedriger als bei der direkten Stromnutzung. Somit kann mit demselben Finanzierungs- und Ressourcenaufwand weniger Klimaschutz betrieben werden. Bei beschränkten Mitteln für den Anlagenaufbau (z. B. fehlende Strukturen für den Aufbau, fehlende nutzbare Gunststandorte und Flächen) kann sich durch den Aufbau von PtX-Anlagen im schlechtesten Fall die Treibhausgasminderung gegenüber einem effizienten Einsatz im Stromsektor reduzieren. Die Emissionsminderung im Stromsektor des Produktionslandes sollte daher eine höhere Priorität besitzen als der schnelle Ausbau der PtX-Produktion für den Export.

Aus der niedrigeren Energieeffizienz der PtX-Produktion im Vergleich zur direkten Stromnutzung ergibt sich ein weiterer Effekt: Die Stromgestehungskosten und hohe Volllaststunden wirken sich dadurch stärker als bei der direkten Stromnutzung auf die Kosten von strombasierten Stoffen und die Endkundenpreise aus. Es ist daher wahrscheinlich, dass der erneuerbare Strom aus EE-Bestandorten mit den niedrigsten Gestehungskosten vor allem für PtX-Erzeugungsanlagen genutzt wird und diese EE-Vorzugsflächen nicht mehr für die eigene Stromversorgung des Exportlandes zur Verfügung stehen. Je nach Knappheit der EE-Vorzugsstandorte erhöht der zusätzliche Strombedarf für den Export von PtX-Stoffen die Stromkosten der Verbrauchenden und die Systemkosten der Dekarbonisierung des Energiesystems im Produktionsland. Gerade in Ländern, die ohnehin mit hohen Stromversorgungskosten und einem geringen Zugang zu Strom zu kämpfen haben, kann die PtX-Produktion für den Export soziale Probleme verursachen und gegebenenfalls den Zugang zu Strom verringern.¹⁵

Inwieweit die Verknappung von EE-Vorzugsstandorten sich auf die Stromkosten im Exportland und den Zugang zu Elektrizität auswirkt, ist stark abhängig vom jeweiligen regionalen Kontext und dem vorhandenen Stromsystem. Für quantitative Aussagen fehlen bisher regional-spezifische und globale Szenariorechnungen und Untersuchungen. Qualitativ können wir jedoch festhalten: Je geringer der Anteil der fossilen Stromerzeugung im Stromsystem, je mehr EE-Vorzugsflächen zur Ver-

¹⁵ Für Bewertung dazu wird normalerweise der Anteil der Haushalte mit der Möglichkeit des Strombezugs herangezogen. Ein Indikator, der die Kosten des Strombezugs in Verbindung zum verfügbaren Einkommen der Haushalte setzt, ist uns nicht bekannt.

fügung stehen und je günstiger sowie je verbreiteter der Zugang zu Strom ist, desto geeigneter ist der Produktionsstandort für die Herstellung von PtX-Produkten.

Aus den aufgeführten möglichen indirekten Wirkungen des erhöhten Strombedarfs für die Produktionsländer können wir verschiedene Nachhaltigkeitsleitlinien ableiten: Die Potenziale für positive Impulse auf die Wertschöpfung und den Lebensstandard vor Ort müssen genutzt werden. Gleichzeitig darf sich durch die PtX-Produktion die Dekarbonisierung des regionalen Strom- und Wirtschaftssystems nicht verlangsamen und mögliche Wirkungen auf höhere Energieversorgungskosten im Exportland müssen verhindert werden; speziell in Ländern und Gegenden, in denen der Zugang zu Strom und Energie bereits im Vergleich zur Kaufkraft teuer ist und ohnehin keine flächendeckende Versorgung mit Strom gegeben ist.

Die Umsetzung dieser Anforderungen in verifizierbare Nachhaltigkeitskriterien braucht Zeit, Forschung und gesellschaftliche Aushandlungsprozesse. Sie ist aber notwendig. Instrumente zur Förderung lokaler Wertschöpfung¹⁶ (z. B. durch Unterstützung bei Firmengründungen und durch geeignete Ausbildungsförderung¹⁷) und der lokalen Akzeptanz¹⁸ sollten möglichst für alle PtX-Anlagen gelten. Best-Practice Umsetzungen bekannter Anforderungen an Infrastrukturprojekte (z. B. Equator-Principles¹⁹) sowie die unabhängig evaluierte Maßnahmenumsetzung sollten die Mindestvorgabe für durch Politikinstrumente (z. B. Mindestquoten, Investitionszuschüsse) geförderte PtX-Anlagen sein, ohne die keine Förderung zur Verfügung gestellt wird.

Zur Vermeidung der potenziell negativen Effekte auf das jeweilige Energiesystem und die daraus entstehenden Folgewirkungen wäre es möglich – wie bei den Biokraftstoffen - Standorte mit sehr hohem Risiko für indirekte Effekte von Fördermaßnahmen vollständig oder teilweise auszuschließen und solche mit einem geringeren Risiko in der Förderung zumindest zu begrenzen, bis nicht mit Positivkriterien nachgewiesen werden kann, dass die negativen Wirkungen weitestgehend ausgeschlossen werden können. Dazu müssten zunächst Methoden der Risikobewertung entwickelt werden: Sie sollten unter anderem eine Bewertung der vorhandenen und für das eigene Energiesystem benötigten EE-Vorzugsflächen, des aktuellen Stromerzeugungsanteils durch nukleare und fossile Energiequellen sowie der erneuerbaren Energieerzeugung, möglicher Effekte auf die Kosten der Energieversorgung, des Zugangs zu Strom etc. umfassen. Vereinfachte erste Kriterien, die weiterentwickelt, konkretisiert und ergänzt werden sollten, sind:

- eine Mengengrenzung der PtX-Produktion in Regionen und Ländern mit niedrigen Anteilen erneuerbarer Stromerzeugung/hoher CO₂-Intensität der Stromerzeugung, wenn keine Verringerung der CO₂-Intensität der übrigen Stromversorgung des Exportlandes/-region erkennbar ist,
- eine Mengengrenzung der Nutzung für die PtX-Herstellung von EE-Vorzugsflächen mit hohem Erzeugungs- und Nutzungspotenzial für die direkte Stromnutzung (Ermöglichung hoher Volllaststunden in der Nähe von Siedlungsgebieten und bestehenden Stromnachfragern),
- eine Begrenzung des Anteils der für den PtX-Export genutzten EE-Vorzugsflächen am gesamten EE-Vorzugsflächenpotenzials einer Region bzw. eines Landes und
- anlagenspezifische Nachweisverfahren für die Wirkung auf die Stromverfügbarkeit und die Stromkosten der lokalen und regionalen Verbraucher und Verbraucherinnen.

¹⁶ DIE (2013) nennt beispielsweise „local content“-Anforderungen, finanzielle Anreize für die Nutzung lokaler Wertschöpfung, lokale F&E-Förderung als mögliche Instrumente der Förderung der lokalen Wertschöpfung.

¹⁷ Siehe Altenburg; Assmann (2017).

¹⁸ Terrapon-Pfaff et al. (2019) verweisen auf die Bedeutung des Erwartungs- und Informationsmanagements sowie der gerechten Verteilung des lokalen Nutzens für die Akzeptanz industrieller (erneuerbarer) Infrastrukturprojekte.

¹⁹ <https://equator-principles.com/>

Die genannten Kriterien sind als erste Ideen zu begreifen, die weiter zu diskutieren und auf ihre Wirksamkeit und Umsetzbarkeit zu überprüfen sind. Eine konkrete Handlungsempfehlung soll daraus nicht abgeleitet werden. Es zeichnet sich jedoch ab, dass spezifische Gutachten für mögliche Produktionsländer von strombasierten Stoffen erstellt werden müssen, um Nachhaltigkeitsanforderungen einhalten zu können. Im Sinne des Papiers sollen die zuvor genannten Kriterien als Impuls für die Diskussion um nachhaltig hergestellte PtX-Stoffe und dafür benötigte sowie kurzfristig umsetzbare Produktionskriterien dienen.

- Die PtX-Produktion besitzt nur dann keine THG-Emissionen, wenn die eingesetzte Energie vollständig erneuerbar ist und Kriterien für eine zusätzliche erneuerbare Stromversorgung auf Systemebene entspricht. Dazu müssen die politischen Rahmenbedingungen für die Förderung der erneuerbaren Stromerzeugung angepasst werden (z. B. Erhöhung der EE-Ausbauziele, keine Anrechnung auf bestehende EE-Ausbauziele). Auch dürfen die Anlagen mögliche Netzengpässe nicht verstärken.
- Für die Berücksichtigung in Förderinstrumenten ist die individuelle Betrachtungsweise relevant. Bisher existieren keine Nachweisverfahren, die die Förderung der zusätzlichen Stromversorgung der PtX-Anlagen sicherstellen. Es besteht die Möglichkeit, für die PtX-Produktion in der EU das bestehende System der EE-Herkunftsnachweise weiterzuentwickeln.
- Ansätze aus der THG-Bewertung der internationalen Klimapolitik könnten gegebenenfalls weiterentwickelt werden, um die Zusätzlichkeit der erneuerbaren Stromerzeugung für die PtX-Produktion außerhalb der EU nachweisen zu können.
- PtX-Anlagen können als große infrastrukturelle Projekte positive Wirkungen auf die lokale Wertschöpfung, den Lebensstandard vor Ort und die Strukturen für den Aufbau erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen erzeugen. Bei durch Politikmaßnahmen geförderten PtX-Anlagen sollten Best-Practice-Maßnahmen und die unabhängige Evaluierung dieser Maßnahmen verpflichtend sein, um negative Wirkungen zu vermeiden und die Wirkungen auf lokaler Ebene möglichst positiv zu gestalten.
- Die zusätzliche Stromnachfrage durch die PtX-Herstellung kann bei beschränkten Möglichkeiten des Aufbaus erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen (z. B. fehlende verfügbare Flächen, fehlende Strukturen zum Aufbau der Anlagen) durch die hohen Umwandlungsverluste zu Mehrmissionen im Stromsystem und zu höheren Stromkosten für die Verbraucherinnen und Verbraucher in den Produktionsländern führen. Vereinfachte Indikatoren zur Risikobewertung dieser Effekte könnten zunächst für eine Begrenzung der PtX-Produktion in Regionen/Ländern mit einem hohen Risiko für diese Effekte genutzt werden, bis gegebenenfalls besser geeignete Kriterien entwickelt sind.

3.2. CO₂-Bezug

Direkte Effekte durch den CO₂-Bezug

Der Syntheseprozess von Wasserstoff in Kohlenwasserstoffe benötigt eine Kohlenstoffquelle, z. B. Kohlenstoffdioxid (CO₂), als Ressourceninput. Reine CO₂-Ströme stehen jedoch nicht auf natürliche Weise zur Verfügung und müssen zunächst mit Energieaufwand aus potenziellen Quellen abgetrennt und gegebenenfalls aufbereitet sowie transportiert werden. Die Nutzung biogener und atmosphärischer Kohlenstoffquellen kann einen Kreislaufprozess des CO₂ erlauben, ohne eine zusätzliche Treibhausgaswirkung zu verursachen. Zudem fällt CO₂ konzentriert in Industrie- und Verbrennungsprozessen aus zumeist fossilen Quellen an. CO₂ aus geologischen Quellen kann ebenfalls für die PtX-Produktion eingesetzt werden. Für die beiden zuletzt genannten CO₂-Quellen

kann eine treibhausgasmindernde Wirkung jedoch nur unter bestimmten Rahmenbedingungen erreicht werden. Zudem muss die genutzte Energie für das Verfügbarmachen des CO₂ (z. B. Abscheidung, Aufbereitung für die Synthese, Transport) den im vorigen Abschnitt 3.1 genannten Prinzipien für die Nachhaltigkeits- und Treibhausgasbewertung unterliegen, um als nachhaltige und treibhausgasarme CO₂-Quelle zu gelten.²⁰

CO₂ aus der Luft steht in großer Menge zur Verfügung und wird daher sowie aufgrund des „direkten“ Kohlenstoffkreislaufs von vielen Akteuren langfristig als die zentrale Kohlenstoffquelle für PtX-Anwendungen gesehen (Agora Verkehrswende; Agora Energiewende 2018; MWV; IWO; MEW; Uniti 2018). Weitere Nachhaltigkeitsprinzipien außer in Bezug auf mögliche Auswirkungen auf die Flächeninanspruchnahme sind dafür nicht anzusetzen (siehe Abschnitt 3.4). Der Nachteil dieser Kohlenstoffquelle ist allerdings der Stand der Technik (heute im Übergang vom Pilot- zum Demonstrationsstadium) sowie die ökonomischen Nachteile im Vergleich zu den übrigen möglichen Bezugsquellen, die sich aus der niedrigen Konzentration des CO₂ in der Luft ergeben. Die Technologie wird also erst mittelfristig und als im Vergleich teure Option in der Praxis zur Verfügung stehen.

Über die Kohlenstoffbindung in Biomasse kann bei der Nutzung biogener Kohlenstoffquellen ein „indirekter“ erneuerbarer Kohlenstoffkreislauf hergestellt werden. Niedrigen Abscheidungskosten steht die Limitierung der verfügbaren Menge an nachhaltigem Kohlenstoff (je Standort, aber auch absolut) sowie die geringe Verfügbarkeit von Biomasse an einigen EE-Vorzugsstandorten gegenüber. Aus Nachhaltigkeitssicht ergeben sich für diese CO₂-Quelle dieselben Nutzungskriterien wie in der bestehenden Diskussion um die Biomassenutzung.

Bei geologischem CO₂ ergibt sich die Nachhaltigkeitsbewertung direkter Effekte nicht aus einem möglichen CO₂-Kreislauf. Als Bewertungsgrundlage, ob sich eine Treibhausgasminderungswirkung einstellt oder nicht, muss herangezogen werden, inwieweit auch ohne industrielle Verwendung das CO₂ in die Atmosphäre freigegeben worden wäre. Wegen der hohen Kohlenstoffkonzentration eignen sich vor allem geothermische Prozesse, in denen im Wasser gelöstes CO₂ mit an die Oberfläche gebracht wird, als ökonomisch attraktive, potenzielle CO₂-Quelle. Sobald eine Aktivierung des geothermischen Reservoirs stattgefunden hat und somit mehr CO₂ an die Oberfläche gelangt als ohne den industriellen Prozess, ist die Voraussetzung für einen CO₂-neutralen Betrieb nicht mehr gegeben. In diesem Fall muss das frei werdende CO₂ als fossil betrachtet werden (VDA 2017).²¹

Die Abscheidung des CO₂ aus industriellen Punktquellen ist aus ökonomischer Sicht vor allem wegen der hohen Verfügbarkeit von CO₂ an einem Standort und des niedrigen Energiebedarfs für die CO₂-Abscheidung attraktiv. Offensichtlich ist, dass kein erneuerbarer CO₂-Bezug vorliegt, solange fossile Ressourcen in den Industrieprozessen zum Einsatz kommen. Zudem hat die CO₂-Abtrennung aus Industrieprozessen eine Wirkung auf die Produktionsprozesse selbst und verringert die Effizienz der Prozesse erheblich. Reiter und Lindorfer (2015) geben für die CO₂-Abscheidung aus verschiedenen Kraftwerks- und Industrieprozessen an, dass für 100kg an abgetrenntem CO₂ zwischen rund 15kg (CO₂-Abscheidung in der Raffinerie) und rund 50kg (CO₂-Abscheidung im Zementherstellung) an zusätzlichen CO₂-Äquivalenten als Emissionen an die Umgebung abgegeben werden. Befürworter der Nutzung dieser Kohlenstoffquellen argumentieren

²⁰ In Abschnitt 3.1 wurde nur auf Strom als energetische Ressource eingegangen. Ähnliche Wirkeffekte und daraus abgeleitete Nachhaltigkeitsprinzipien gelten auch für den Energiebezug in Form von Wärme.

²¹ Inwieweit der genutzte Kohlenstoff in der bereits bestehenden Power-to-Methanol Anlage in Grindavik (Island) diesem Kriterium entspricht, ist uns unbekannt. Das erzeugte Methanol wird allerdings innerhalb der Erneuerbare-Energien-Richtlinie als erneuerbarer Kraftstoff nicht-biologischen Ursprungs anerkannt.

allerdings, dass in einigen Industrieprozessen unvermeidbare CO₂-Emissionen (z. B. CO₂-Emissionen aus dem Kalkbrennen in der Zementherstellung) auftreten und CO₂-Emissionen trotz der Klimaschutzanstrengungen der Industrie noch über mehrere Jahrzehnte anfallen werden.

Diese Argumentation für die Nutzung von CO₂ aus fossilen und geologischen Quellen zeigt die Bedeutung der projizierten und für den Klimaschutz notwendigen Emissionsentwicklung dieser Quellen für die Nachhaltigkeitsbewertung der PtX-Stoffe: Aus unserer Sicht muss die für den Klimaschutz benötigte Entwicklung an CO₂-Emissionen sowie die angestrebte Weiterentwicklung der Industrieprozesse die Referenz für die Nachhaltigkeitsbewertung sein. Die Nutzung von CO₂ als Ressource für die PtX-Produktion darf diese Minderung und die Transformation der Industrieprozesse nicht verlangsamen und die CO₂-Freisetzung nicht über die für den Klimaschutz benötigte Referenz erhöhen.²² Jede Erhöhung – wie sie beispielsweise durch die schlechtere Effizienz der Industrieprozesse beim Einsatz der CO₂-Abscheidung automatisch geschieht – über die zugrunde gelegte Referenzentwicklung ist demnach als zusätzliche Treibhausgasemission zu werten und muss in der Berechnung der THG-Emissionen von PtX-Stoffen berücksichtigt werden. So können PtX-Produkte alleine aufgrund der Art des CO₂-Bezugs im Maximalfall dieselbe Klimawirkung besitzen wie vergleichbare fossile Stoffe.

Aber was heißt das konkret für die Treibhausgasbewertung? Für den Klimaschutz und die dafür benötigte Emissionsminderung sind in der Industrie über die Zeit effizientere und neue Prozesse nötig und zu erwarten (ISI 2013). Bei geologischen Prozessen könnte nach und nach ein geschlossener Kreislauf für das CO₂ aus Klimaschutzgründen der Standard sein (VDA 2017). Und für die kurzfristige CO₂-Bindung aus diesen Quellen entsteht perspektivisch eine Konkurrenzsituation gegenüber Konzepten, die CO₂ langfristig in wiederverwertbaren Produkten binden (z. B. Kunststoffe in Langfristanwendungen) und bei Bedarf gegebenenfalls für negative Emissionen sorgen können²³. All diesen notwendigen Klimaschutzentwicklungen kann die Nutzung von CO₂ in PtX-Stoffen, wenn sie den Kohlenstoff nur kurzfristig binden, entgegenwirken.

Einige dieser notwendigen Entwicklungen (z. B. langfristige Bindung von CO₂ in wiederverwertbaren Produkten) scheinen zeitlich weit entfernt zu sein und für PtX-Anlagen, die kurz- und mittelfristig in den nächsten 10 Jahren aufgebaut werden, keine Rolle zu spielen. Aus unserer Sicht ist dem nicht so: Bei einem Abschreibungszeitraum und einer Betriebsdauer von 20 Jahren und mehr sind diese Anlagen zu einem Zeitpunkt in Betrieb, zu dem wir als Gesellschaft für ein Einhalten des Pariser Abkommens anfallende CO₂-Emission langfristig in Produkten binden und gegebenenfalls negative Emissionen erzielen müssen. Zeitlich noch viel früher notwendig ist die Treibhausgas-minderung in der Industrie durch Effizienzsteigerungen und veränderte Prozesse; Veränderungen in der Industrie müssen also schon zeitnah stattfinden. Der Vergleichsmaßstab für die Klimaschutzwirkung von PtX-Anlagen kann also nicht die heutige Situation und die heutige Höhe der Emissionen sein; vielmehr muss die für den Klimaschutz notwendige Entwicklung industrieller Punktquellen über den gesamten Betriebszeitraum der PtX-Anlage als Bewertungsreferenz gelten.

Einige Akteure ziehen in der Diskussion um die Nachhaltigkeit von PtX-Stoffen den EU-Emissionshandel (EU-ETS) als Grundlage dafür heran, dass die Nutzung von Treibhausgasemissionen aus Anlagen, die dem Emissionshandel unterliegen (z. B. Industrieprozesse), aufgrund des

²² Diese Anforderung gilt für alle PtX-Produkte, die den Kohlenstoff nicht langfristig binden und somit nicht als Kohlenstoffspeicher angerechnet werden können.

²³ Viele der mit Pariser Abkommen konformen Klimaschutzszenarien weisen auf die Notwendigkeit negativer Emissionen bis zum Jahr 2050 hin. Die Bindung von CO₂ in Biomasse bzw. die CO₂-Abscheidung aus Luft sind die Grundvoraussetzung, um über weitergehende Prozesse eine langfristige Speicherung des Kohlenstoffs zu erreichen. Negative Emissionen werden dann erzielt, wenn der für die gesamte Prozesskette der Speicherung genutzte Ressourceneinsatz weniger CO₂-Emissionen verursacht als in der CO₂-Speicherung gebunden werden.

„Cap“ an Emissionen aus Nachhaltigkeitssicht unproblematisch ist (siehe Diskussion von Stakeholder-Positionen in ÖI 2019). Daran hegen wir unsere Zweifel: Die CO₂-Emissionen werden bei einer Weiterverwendung in Anlagen, die nicht dem EU-ETS unterliegen (z. B. PtX-Produktionsprozesse), der Ursprungsanlage zugerechnet²⁴. Die Anforderungen an die CO₂-Minderung reduzieren sich also nicht durch die Weiterverwendung des CO₂ und der Pfad der Treibhausgas-minderung wird zunächst nicht verlangsamt, auch wenn das CO₂ nicht langfristig gebunden wird. Problematisch wird es allerdings, wenn sich ein „Markt“ für CO₂ als Rohstoff entwickelt und konzentrierte Mengen an CO₂ einen ökonomischen Wert erhalten. Dann reduziert sich zwar die Menge der zu hinterlegenden Emissionszertifikate nicht, die freigesetzten CO₂-Emissionen bekommen aber einen „Verkaufspreis“, so dass sich potenziell die Wirksamkeit des Emissionshandels verändert²⁵. Die als notwendige angesehene Reduktion der CO₂-Emissionen aus industriellen Punktquellen und die Transformation des Sektors könnte so verlangsamt werden; die THG-Emissionsminderung unter dem „Cap“ müssten dann andere regulierte Bereiche erzielen.

Die lange Betriebszeit von PtX-Anlagen bringt zudem ein weiteres Problem mit sich: Änderungen am Emissionshandelssystem sind über den Betriebszeitraum einer PtX-Anlage wahrscheinlich; die heutige Ausgestaltung des Emissionshandels kann daher nicht als Grundlage herangezogen werden, um die Interaktion des Emissionshandels mit einer PtX-Anlage über die gesamte Betriebsphase der Anlage zu bewerten. Und Anlagen außerhalb der EU unterliegen selbstverständlich auch nicht den Anforderungen des EU-ETS. Insgesamt wird also deutlich, dass bei der CO₂-Nutzung aus industriellen Punktquellen aus heutiger Sicht nicht sichergestellt werden kann, dass die PtX-Produktion die für den Klimaschutz notwendige CO₂-Emissionsentwicklung des Industriesektors nicht verlangsamt und somit potenziell zu zusätzlichen CO₂-Emissionen führen kann.

Wie bei Nachhaltigkeitsforderungen für den Strombezug können wir an dieser Stelle kein entwickeltes Set an umsetzbaren Kriterien und Nachweisverfahren für die nachhaltige Nutzung von CO₂ in PtX-Syntheseprozessen präsentieren. Schon die Definition, was eine aus Klimaschutzsicht notwendige Referenzentwicklung an CO₂ ist, erscheint sehr schwierig. Die aus Nachhaltigkeits- und Klimaschutzsicht mit dem geringsten Risiko verbundene Variante ist es daher, CO₂-Quellen mit einem hohen Risiko für eine zusätzliche CO₂-Freisetzung (z. B. CO₂ aus industriellen Prozessen auf fossiler Basis) grundsätzlich für die PtX-Produktion auszuschließen²⁶ (Agora Verkehrswende; Agora Energiewende 2018; ÖI 2017a; WWF Deutschland 2018).

Gegebenenfalls lassen sich Kriterien für den Zugang zu Förderinstrumenten bzw. den Betrieb von PtX-Anlagen entwickeln, die zumindest für eine zeitlich begrenzte Übergangsphase die Nutzung fossiler Emissionen in PtX-Produkten zulassen und gleichzeitig sicherstellen, dass mit der PtX-Produktion keine bzw. wenige zusätzliche Treibhausgasemissionen entstehen. Ansätze könnten sein,

²⁴ Artikel 48 der Monitoring-Richtlinie (EU) 601/2012. Ausgenommen davon sind Emissionen, die langfristig gespeichert werden (Artikel 49).

²⁵ Zur Verdeutlichung kann ein stark vereinfachtes Gedankenexperiment helfen: Nehmen wir für die CO₂-Abscheidung aus einem Zementwerk die Kosten von 40 EUR / t CO₂ an und für die CO₂-Abtrennung aus der Luft als optimistische Annahme 100 EUR / t CO₂ an (abgeleitet aus ICCT (2018)). In diesem Fall ist es für einen PtX-Anlagenbetreiber günstiger, die CO₂-Emissionen aus dem Zementwerk zu beziehen und dem Zementwerkbetreiber zusätzlich zu den Technologiekosten der CO₂-Abscheidung 50 EUR / t CO₂ als Preis für die „Lieferung“ des CO₂ zu bezahlen (40 EUR / t CO₂ + 50 EUR / t CO₂ = 90 EUR / t CO₂ < 100 EUR / t CO₂) als CO₂ aus der Luft abzutrennen.

²⁶ Siehe Nicht-Anrechnung der Biokraftstoffe mit hohem Risiko für indirekte Landnutzungsänderungen in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II

- dass bei der Verwendung CO₂-Emissionen aus fossilen Quellen für den Syntheseprozess vorgeschrieben wird, den Anteil des fossilen CO₂ über die Betriebsphase der PtX-Anlage zu verringern,
- dass bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen einer PtX-Anlage die CO₂-Emissionen aus fossilen Quellen zunächst weniger stark gewichtet werden, sich dies über die Betriebsphase der Anlage aber bis zu einer Vollanrechnung erhöht,
- dass unabhängig von der spezifischen PtX-Anlage sich die Gewichtung der CO₂-Emissionen aus fossilen Quellen von einer geringen Gewichtung über die Zeit hin zu einer Vollanrechnung erhöht,
- dass die Nutzung von CO₂ aus fossilen Quellen nur aus sehr effizienten Technologieprozessen erlaubt ist.

Die aufgezählten Ansätze sind keineswegs als finale Handlungsempfehlungen zu verstehen. Wie im vorigen Kapitel sollen sie als Denkanstöße dazu begriffen werden, ob es möglich ist, bei Sicherstellung der Treibhausgasminderungswirkung auf ökonomisch günstige Kohlenstoffquellen für eine Übergangsphase zugreifen zu können. Ob sich dadurch ein Kriterienset entwickeln lässt, welches die Nutzung fossiler CO₂-Emissionen in PtX-Stoffen auf nachhaltige Art und Weise erlaubt, ist nicht sicher.

Indirekte Effekte durch den Kohlenstoffbezug

Die Menge an günstigem und nachhaltigem CO₂ als Rohstoff für Industrieprozesse wird begrenzt sein. Daraus können sich grundsätzlich ähnliche, potenzielle indirekte Wirkungen wie beim Strombezug ergeben. Der Unterschied zum Strombezug ist allerdings, dass CO₂ heute keine relevante Ressource ist, die in der Industrie zum Einsatz kommt. Wie sich die CO₂-Nutzung im Gesamtsystem unseres Wirtschaftens auswirkt, ist daher schwieriger abzuschätzen als für die Nutzung von Strom. Auch hängen diese Effekte stark davon ab, welche Menge an CO₂ langfristig für die PtX-Produktion benötigt wird und welche sonstigen Anwendungen auf diese zurückgreifen werden. Auch hier lässt sich jedoch festhalten: Je stärker kohlenstoffhaltige PtX-Produkte zukünftig nachgefragt werden, desto stärker werden die indirekten Wirkungen durch die Verwendung des knappen Guts „nachhaltiges und ökonomisch günstiges CO₂“ ausfallen.

CO₂ wird eine Ressource für Industrieprozesse werden, die nicht nur nachgefragt werden wird für die Anwendung als Energieträger. Auch für die stoffliche Nutzung in Produkten der Grundstoff- und Spezialchemie (z. B. Kunststoffe, Lösungsmittel, Pharmazeutika), für die nur zum Teil stoffliche Alternativen existieren oder für die Prozesse auf CO₂-Basis einen möglichen treibhausgasneutralen Pfad darstellen, wird eine Nachfrage entstehen.²⁷ Die stoffliche Nutzung ist in aller Regel wegen der Möglichkeit einer effizienteren kaskadenartigen Kohlenstoffnutzung zu bevorzugen. Bei einer starken Nutzungskonkurrenz ist also zu erwarten, dass ähnlich wie bei der Biomassenutzung eine Nutzungskonkurrenz um CO₂ als Ressource entsteht und bei einer hohen Nachfrage nach kohlenstoffhaltigen PtX-Produkten auch vermehrt auf die teure und flächenintensive CO₂-Abscheidung aus der Luft zurückgegriffen werden muss. So würden für CO₂-Anwendungen, für die keine Alternativen existieren, bei einer ungeeigneten Allokation des CO₂ unnötig hohe Kosten und gegebenenfalls mengenmäßige Engpässe für den CO₂-Bezug entstehen. Die Konkurrenzsituation zur im vorigen Abschnitt angesprochenen und langfristig gegebenenfalls notwendigen Langfrist-

²⁷ Ein Beispiel ist Produktion von Ethylenoxid, die heute Lieferant für die industrielle CO₂-Nutzung ist. Eine Umstellung auf einen elektrochemischen Herstellungspfad auf CO₂-Basis ist eine derzeit stark erforschte treibhausgasneutrale Herstellungsoption für Ethylenoxid (siehe <http://www.co2exide.eu/>).

speicherung von CO₂ für die Erzeugung negativer Emissionen könnte auch von diesem indirekten Effekt betroffen sein.

Auf die Formulierung weiterer möglicher Nachhaltigkeitskriterien verzichten wir an dieser Stelle. Es lässt sich aber daran noch einmal verdeutlichen, dass nachhaltiger, günstiger Kohlenstoff – ähnlich wie erneuerbarer Strom – ein knappes Gut sein wird und die Nachfragereduzierung danach ein wesentlicher Bestandteil jeder Klimaschutzstrategie sein muss. Eine prioritäre Allokation des CO₂ in Prozessen mit einem höheren Effizienzpotenzial und in Prozessen mit einem geringen Potenzial für alternative, stoffliche Inputströme erscheint daher sinnvoll zu sein.

- Die Nutzung von CO₂ aus nachhaltiger Biomasse und der Luft sind die einzigen erneuerbaren Quellen, die keine Treibhausgasemissionen verursachen, wenn die notwendigen Nachhaltigkeitsregeln für die Biomassenutzung und den Energiebezug eingehalten werden. CO₂ aus geologischen und fossilen Quellen (z. B. industrielle Punktquellen) führt nur dann nicht zu Mehremissionen, wenn die für das Pariser Abkommen notwendige Treibhausgasemissionsminderungstrajektorie durch die Nutzung des CO₂ in PtX-Stoffen nicht verlangsamt wird.
- Die CO₂-Abtrennung aus der Luft befindet sich in der Demonstrations- und Entwicklungsphase. Eine technologiespezifische Förderung zur Weiterentwicklung und Skalierung der Technologie erscheint zielführend zu sein.
- Die aktuell gültigen Rahmenbedingungen stellen nicht sicher, dass die CO₂-Nutzung aus fossilen und geologischen Quellen nicht zu Mehremissionen gegenüber der für den Klimaschutz benötigten THG-Minderungstrajektorie führt. PtX-Stoffe auf Basis dieser CO₂-Quellen können also alleine durch die CO₂-Nutzung dieselbe Klimaschutzwirkung entfalten wie ihre fossilen Alternativen. Solange keine geeigneten Kriterien existieren, durch die CO₂-Mehremissionen vermieden werden können, ist die PtX-Produktion mit CO₂ aus diesen Quellen mit einem hohen Risiko für CO₂-Mehremissionen und eine verlangsamte Transformation des Industriesektors verbunden. Der Ausschluss bzw. die Begrenzung dieser CO₂-Quellen für die PtX-Produktion würde dieses Risiko verhindern. Gegebenenfalls können geeignete Kriterien für die Nutzung dieser CO₂-Quellen für eine zeitlich begrenzte Übergangsphase entwickelt werden.
- Nachhaltiges und günstiges CO₂ wird ein knappes Gut sein. Eine prioritäre Allokation des verfügbaren CO₂ in PtX-Anwendungen mit einem hohen Effizienzpotenzial bzw. in Anwendungen mit wenigen alternativen Technologieoptionen zu treibhausgasneutralen Kohlenwasserstoffen erscheint sinnvoll zu sein, um höhere Kosten und gegebenenfalls Verfügbarkeitsbegrenzungen von klimafreundlichen Optionen in diesen Anwendungen zu vermeiden.

3.3. Wasserbezug

Die Elektrolyse benötigt Wasser als stofflichen Input für die Herstellung von Wasserstoff. UBA (2016) leitet den Wasserbedarf für die strombasierte Kerosinherstellung aus der Stöchiometrie der Prozesse ab und gibt die benötigte Menge Wasser mit rund 1,4 Litern Wasser pro Liter Kraftstoff an. Weitere Wasserbedarfe können zudem für die Reinigung von Solarzellen oder Solarspiegel anfallen, wenn diese für die Stromerzeugung eingesetzt werden. Cerulogy (2017) geht davon aus, dass der Wasserbedarf für die Reinigung der Solaranlagen dabei wesentlich höher sein wird (~70 Liter pro Liter PtX-Kraftstoff) als die Wasserstoffproduktion in der Elektrolyse an sich.

Derzeit gehandelte Bestandorte für die PtX-Produktion weisen häufig eine hohe Sonneneinstrahlung auf und sind mit die trockensten Regionen der Welt. Aus Nachhaltigkeitssicht ist unstrittig, dass die PtX-Produktion nicht die Trinkwasserversorgung (Verfügbarkeit und Kosten) vor Ort für die Landwirtschaft und die Haushalte negativ beeinträchtigen darf. Im Idealfall sollte in Fällen, in

denen Wassermangel herrscht, sogar die lokale Bevölkerung von eingesetzten Technologien für die Wasserversorgung (z. B. Aufbau neuer Kapazitäten der Wasserentsalzung) profitieren.

Indikatoren, die die Wasserverfügbarkeit auf nationaler Ebene analysieren (z. B. Falkenmark-Indikator bzw. Water stress index, Einordnung des IWMI²⁸), bewerten der Bestandorte als Regionen unter Wassermangel (z. B. Südafrika, Australien, MENA-Region Südwesten der USA, China). In einigen Regionen mit Wassermangel sind zudem ein weiteres Ansteigen der Bevölkerung und ein Wechsel der Ernährungsgewohnheiten zu mehr Fleisch und Milchprodukten zu erwarten, so dass der regionale Wasserbedarf für die Versorgung der Bevölkerung in diesen Regionen mit hoher Wahrscheinlichkeit ansteigen wird (PwC 2015). Insgesamt können wir also davon ausgehen, dass einige der Vorzugsregionen für die PtX-Produktion bereits heute unter Wassermangel leiden und sich die Problematik der Wasserverfügbarkeit über die Zeit erhöht.

Cerulogy (2017) weist darauf hin, dass die benötigte Menge an Frischwasser für die PtX-Produktion sich in einer ähnlichen Größenordnung befindet wie für andere Industrieprozesse und dementsprechend ähnlich zu bewerten ist. Im Vergleich zur Nachfrage für die Landwirtschaft ist die potenzielle Wasserentnahme für die PtX-Herstellung gering und wird die Wasserentnahme dieser Länder und Regionen auf nationaler Ebene wahrscheinlich nicht in großem Umfang verändern. Zu hinterfragen ist jedoch, wie gerechtfertigt die Frischwassernutzung für die PtX-Herstellung ist, wenn PtX-Produkte vor allem exportiert und das im geringen Umfang verfügbare Wasser somit nicht im Herstellungsland der PtX-Stoffe genutzt werden.

Zudem kann der mögliche Aufbau der PtX-Produktion vor allem bei einem Anlagenbau über einen kurzen Zeitraum auf lokaler Ebene Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit verursachen; im positiven (z. B. durch Co-Benefits bei der Wasseraufbereitung der PtX-Anlage) wie im negativen Sinne (z. B. Rückgang der Wasserverfügbarkeit bzw. steigende Wasserpreise). Am Beispiel eines solarthermischen Solarkraftwerks in Marokko zeigen Terrapon-Pfaff et al. (2019), dass auf lokaler Ebene während des Anlagenbaus und des –betriebs negative Effekte auf die Wasserverfügbarkeit zu erwarten sind, wenn keine entsprechenden Gegenmaßnahmen getroffen werden. Aus Sicht von Terrapon-Pfaff et al. (2019) können sich durch Infrastrukturmaßnahmen bestehende Nachhaltigkeits Herausforderungen, die sich nicht alleine auf die Wasserentnahme beziehen, potenziell verstärken.

Neue Entsalzungsanlagen sind eine mögliche Gegenmaßnahme, um negative Effekte auf die lokale Wasserverfügbarkeit zu vermeiden und gegebenenfalls eine positive Nachhaltigkeitsentwicklung zu erzeugen. Die dominierende Technologie der Aufbereitung für Frischwasser ist heute die industrielle Umkehrosmose von Salzwasser (Jones et al. 2019). Aus Sicht der Klimaschutzwirkung ist offensichtlich, dass die eingesetzte Energie für die Meerwasserentsalzung – auch wenn es ein im Vergleich kleiner Energieinput ist – den Ansprüchen aus Abschnitt 3.1 genügen muss.

Lokale Umweltprobleme können durch die Entsalzung vor allem durch die Abgabe der mit Salz angereicherten und teilweise mit Chemikalien versetzten Sole in Gewässer entstehen. Sie sind zumeist auf die nahe Umgebung des Rückflusses in das jeweilige Gewässer begrenzt (Miller et al. 2015) und betreffen unter anderem benthische Organismen (z. B. Muscheln, Würmer, Algen), die auf dem Meeresgrund leben und über die Nahrungskette auch auf den Fischbestand eine Wirkung besitzen. Langfriststudien über die Umweltwirkungen existieren jedoch nicht (Roberts et al. 2010). Als wesentliche Vermeidungsmaßnahme für diese Wirkungen gilt die Standortwahl des Rückflusses der Sole: Marine Gebiete mit hoher Vulnerabilität sollten als Standorte für den Solerückfluss ausgeschlossen werden (Roberts et al. 2010). Eine weitere Möglichkeit, die Effekte der zurückge-

²⁸ International Water Management Institute

fürten Sole zu minimieren, ist die Verdünnung mit Speisewasser, was allerdings mit zusätzlichen Kosten verbunden ist (Roberts et al. 2010; Jones et al. 2019).

Aus unserer Sicht ist es daher sinnvoll, eine Nachhaltigkeitsbewertung auf Basis lokaler Indikatoren hinsichtlich der Wirkung auf Frischwasser durchzuführen, die neben der Wirkung auf die Wasserverfügbarkeit auch veränderte Kosten und Möglichkeiten der Anpassungen durch die Bevölkerung aufgreifen²⁹. Sind Entsalzungsanlagen zur Frischwasserproduktion Teil der PtX-Produktion, sollte die Nachhaltigkeitsbewertung zudem deren ökologische Wirkungen umfassen. Ein solches Assessment und daraus abgeleitete Nachhaltigkeitsmaßnahmen sowie deren unabhängige Evaluierung sollten für durch Politikmaßnahmen geförderte Anlagen verpflichtend sein. Aber auch aus Unternehmenssicht erscheint die Durchführung wirksamer Nachhaltigkeitsmaßnahmen zielführend, um eine negative öffentliche Wahrnehmung der Unternehmen, aber auch der Technologie an sich zu vermeiden³⁰.

- Der Aufbau von PtX-Herstellungskapazitäten kann in Regionen mit Wassermangel auf lokaler Ebene zu negativen (z. B. steigende Wasserkosten, mangelnde Wasserverfügbarkeit), aber auch zu positiven (z. B. erhöhte Wasserverfügbarkeit durch Meerwasserentsalzungsanlagen) Effekten hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit führen. Bei Entsalzungsanlagen können zudem lokale ökologische Effekte durch die Rückführung der mit Salz und Chemikalien angereicherten Sole auftreten. Für durch Politikmaßnahmen geförderte Anlagen sollten die Umsetzung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen sowie deren unabhängige Evaluierung verpflichtend sein.

3.4. Flächeninanspruchnahme

Die PtX-Produktion an sich nimmt wie ähnliche verfahrenstechnische Industrieanlagen wenig Fläche in Anspruch. Umfangreiche Flächen werden dagegen von der erneuerbaren Stromerzeugung genutzt, die die Elektrolyse und die übrigen Prozessschritte als Energieinput benötigen. Eine weitere flächenintensive Technologie ist die CO₂-Abscheidung aus der Luft, so dass sich für die PtX-Technologie die Frage nach einer nachhaltigen Flächennutzung und –inanspruchnahme stellt und einige Stakeholder die nicht ausreichend verfügbare Fläche (bzw. die fehlende Akzeptanz) neben den höheren Kosten als eine stark limitierende Größe für den Ausbau der Technologie in dichtbesiedelten Ländern wie Deutschland sehen (ÖI 2019). Die Flächeninanspruchnahme ist im Vergleich zur Nutzung von CO₂ auf Basis von Anbaubiomasse ist jedoch gering (UBA 2016).

Die Qualität der Ansprüche an Flächen ist im Vergleich zur Biomassenutzung ebenfalls eine andere: Während der Fokus bei der Biomassenutzung auf Flächen mit nährreichem Boden in klimatischen Vorzugsbedingungen liegt, sind für die PtX-Produktion vor allem die solare Einstrahlung bzw. konstant starke Winde für eine möglichst günstige erneuerbare Stromproduktion zentral. Anders als bei der Biomassenutzung stellt sich somit vor allem eine Flächenkonkurrenz gegenüber anderen Nutzungen des erneuerbaren Stroms ein (siehe Diskussion in Abschnitt 3.1). Auch aus diesem Grund werden PtX-Produkte häufig mit Anwendungen, die Strom mit einer wesentlich geringeren Flächenintensität direkt nutzen (z. B. direkte Stromnutzung in batterieelektrischen Fahrzeuge und Wärmepumpen), verglichen und schneiden wegen der Umwandlungsverluste dabei hinsichtlich des Flächenbedarfs negativ ab.

²⁹ Der „Water Poverty Index“ scheint ein geeigneter Indikator für eine detaillierte Bewertung der lokalen Effekte zu sein Sullivan et al. (2003).

³⁰ In PwC (2015) wird unter anderen das Risiko für negative öffentliche Wahrnehmung als unternehmerisches Risiko erwähnt, wenn die unternehmerischen Aktivitäten mit lokalen Bedürfnissen der Wasserversorgung kollidieren. Ähnliches äußerten einige Stakeholder in ÖI (2019) und verweisen auf die Tank-Teller-Diskussion bei den Biokraftstoffen.

Trotz des veränderten Fokus müssen für die genutzten Flächen durch die PtX-Produktion aus Nachhaltigkeitssicht Mindestanforderungen hinsichtlich Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung gelten³¹. Dabei gilt es zu beachten, dass auch eher unproblematisch wirkende Flächen wie aride Grenzertragsstandorte durchaus Flächen mit hoher Biodiversität sein können, die als schützenswert einzustufen sind. Im Idealfall kommen anspruchsvollere Kriterien hinsichtlich Kohlenstoffbindung und Schutz der Biodiversität bis hin zu sozialen Aspekten wie lokale Nutzungen zum Einsatz (z. B. HCV, HCSA, KBA³²).

Bisher nicht im Fokus der Flächendebatte steht die Konkurrenzsituation zu anderen möglichen Nutzungen der EE-Vorzugsstandorte. Kriterien für die Bewertung dieser Konkurrenzsituation existieren unserem Wissen nach daher nicht und sollten unserer Ansicht nach entwickelt werden. Ansätze können – wie bereits in Abschnitt 3.1 angedeutet – das erneuerbare Stromerzeugungs- (z. B. Bewertung möglicher Volllaststunden für verschiedene Stromerzeugungstechnologien, die Verfügbarkeit und die bereits genutzte Menge möglicher EE-Bestandorte im jeweiligen Energiesystem, die kulturelle Bedeutung von Flächen) und Nutzungspotenzial des Stroms (z. B. die Distanz zu Siedlungsgebieten, die mögliche Einbindung in das Stromsystem) sein. Solche Qualitätsbewertungen für Flächen sind die Voraussetzung für die Entwicklung verifizierbarer Verfahren zur Nachhaltigkeitsbewertung, die in Abschnitt 3.1 (EE-Stromerzeugungskapazitäten) und 3.2 (CO₂-Abscheidung aus der Luft) genannt sind.

Festgelegte Kriterien hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz der Flächeninanspruchnahme sind schwierig zu definieren. In Deutschland wird beispielsweise beim Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten versucht, über Beteiligungsverfahren und Abstandsregelungen zu Siedlungsflächen eine Akzeptanz für zusätzliche Anlagen zu schaffen. Beteiligungsverfahren der lokalen Bevölkerung und die Einhaltung von Abstandsregelungen sollten der Mindeststandard für den EE-Ausbau infolge der PtX-Produktion sein (siehe auch Einleitung in Terrapon-Pfaff et al. 2019). Inwieweit die Bevölkerung in möglichen Produktionsländern von PtX-Produkten die Nutzung ganzer Landstriche, wie es in einigen Studien mit technisch-ökonomischen Potenzialabschätzungen dargestellt ist, akzeptiert, muss genauso Teil der Nachhaltigkeitszertifizierung sein wie die zuvor geforderten Wirkungsanalysen zur Verfügbarkeit von Strom und Wasser sowie deren Kosten (siehe Abschnitte 3.1, 3.2 und 3.3).

Zudem sind solche Analysen notwendig, um von den heute in vielen Studien dargestellten techno-ökonomischen Produktionspotenzialen an PtX-Stoffen zur Bewertung realistischer, nachhaltiger Mengenpotenziale zu gelangen. Heute existieren dazu keine belastbaren Produktionspotenziale, so dass die mögliche Bedeutung der PtX-Technologien für den Klimaschutz in Deutschland und auf globaler Ebene mit dem heutigen Wissensstand nicht klar ist.

- Für die Bewertung des Flächenpotenzials müssen Kriterien für die Bewertung hinsichtlich des EE-Stromerzeugungs- sowie des Nutzungspotenzials des Stroms entwickelt werden. Solche Bewertungskriterien sind die Voraussetzung für die Entwicklung von Verifizierungsverfahren bezüglich des Strom- und CO₂-Kohlenstoffbezugs (siehe Abschnitt 3.1 und 3.2).
- Die genutzten Flächen für alle Anlagen entlang der Wertschöpfungskette müssen die geltenden Standards für den Schutz der Biodiversität und der Kohlenstoffspeicherung in Böden und Biomasse einhalten.

³¹ Anforderungen für Bioenergie sind in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (EU 2018/2001) und in der ISO-Norm 13065 ("sustainability criteria for bioenergy") genannt.

³² High Conservation Value (<https://hcvnetwork.org/>); High Carbon Stock Approach (<http://highcarbonstock.org/>); Key Biodiversity Areas (<http://www.keybiodiversityareas.org/home>)

- Beteiligungsverfahren der lokalen Bevölkerung sowie die Einhaltung möglicher Abstandsregelungen sind der Mindeststandard für den Aufbau von PtX-Anlagen. Langfristig sind weitere Untersuchungen notwendig, um eine Bewertung der maximalen Flächeninanspruchnahme und des daraus folgenden, gesellschaftliche akzeptierten PtX-Ausbaus je Region vornehmen zu können.

4. Schlussfolgerungen für die Förderung des Aufbaus von PtX-Produktionskapazitäten

PtX-Stoffe sind teuer in ihrer Herstellung; heute und auch langfristig (Agora Verkehrswende; Agora Energiewende 2018; MWV; IWO; MEW; Uniti 2018). Der Grund dafür sind die hohen Investitionskosten in die notwendigen Stromerzeugungs- und verfahrenstechnischen Anlagen sowie die Umwandlungsverluste des Stroms in den verschiedenen Prozessschritten (Elektrolyse und gegebenenfalls Syntheseprozesse), die die indirekte Nutzung des emissionsfreien Stroms in nicht-elektrischen Anwendungen möglich machen. Auch ist ein betriebswirtschaftlicher optimierter Betrieb im Normalfall nicht mit den Nachhaltigkeitsanforderungen an die PtX-Produktion vereinbar (siehe Abschnitt 2). Strombasierte Stoffe benötigen daher fördernde Rahmenbedingungen, wenn man einen Markteintritt anstrebt. Neben der direkten Förderung in Forschungskontexten und über Reallabore ist ein mögliches bestehendes Förderinstrument die Erneuerbare-Energien-Richtlinie II, die vor ihrer nationalen Umsetzung in den EU-Mitgliedsländern steht. Einige Akteure bringen auch direkte Fördermaßnahmen wie Ausschreibungsverfahren und Abnahmegarantien in die Debatte um die Inbetriebnahme erster kommerzieller PtX-Anlagen ein (ÖI 2019). Aus unserer Sicht ist es daher notwendig, die genannten Nachhaltigkeitsprinzipien im Rahmen von Fördermaßnahmen für die PtX-Technologie frühzeitig zu etablieren.

Bei den folgenden Schlussfolgerungen für die Förderung von PtX-Anlagenkapazitäten möchten wir wieder teilweise auf die Markteinführung der Biokraftstoffe verweisen. Unserer Meinung nach können Forschungsinstitute, die Regulatoren, aber auch die potenziellen Hersteller der PtX-Stoffe vieles aus der Förderung der Biokraftstoffe und -energie für die Formulierung von Nachhaltigkeitskriterien für ähnliche Fragestellung hinsichtlich der PtX-Stoffe lernen.

Offensichtlich ist, dass „weiche“, nicht umfassend formulierte Nachhaltigkeitskriterien, die systemische indirekte Wirkungen wie die indirekten Landnutzungsänderungen nicht berücksichtigt haben, bei den Biokraftstoffen nicht zu der erhofften Investitionssicherheit geführt haben. Dabei haben die Nachhaltigkeitskriterien zunächst eine starke Lenkungswirkung in Richtung nicht-nachhaltiger Biokraftstoffe entfaltet. Daraus schließen wir, dass Nachhaltigkeitskriterien für PtX-Stoffe beim Übergang von der Technologieentwicklung und Demonstrationsprojekten zur Skalierung der Anlagen bereits so formuliert sein müssen, dass negative Nachhaltigkeitswirkungen ausgeschlossen sind. Da einige ökonomischen Treiber der PtX-Herstellung für eine wenig nachhaltige Produktion sprechen (z. B. hohe Auslastung der Anlage unabhängig von der Qualität des eingesetzten Stroms, Nutzung von Strom ohne Zusätzlichkeitsanforderung, unregulierte Nutzung von fossilem CO₂), ist dies für eine frühzeitige Lenkungswirkung zur Verhinderung eines möglichen „Lock-in“ und Investitionen in nicht-nachhaltige Geschäftsmodelle und Anlagenkonzepte notwendig.

Ein weiterer Erfahrungswert aus der Markteinführung der Biokraftstoffe ist der regulative „Lock-In“: Als nachhaltig zertifizierte Biokraftstoffe werden häufig hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitswirkung und der Förderungswürdigkeit nicht mehr in Frage gestellt – selbst wenn negative Nachhaltigkeitswirkungen offensichtlich sind. Es entsteht somit ein regulativer „Lock-In“-Effekt. Auch aus diesem Grund sollten aus unserer Sicht die Nachhaltigkeitsregeln frühzeitig bereits so formuliert sein, dass sie langfristig direkte und indirekte negative Wirkungen möglichst umfassend ausschließen.

Die in Abschnitt 3 durchgeführte Diskussion notwendiger Nachhaltigkeitskriterien zeigt die Komplexität der Nachhaltigkeitsbewertung der PtX-Herstellung. Auch diese ist vergleichbar mit den Wirkungen der stofflichen und energetischen Biomassenutzung. Kurzfristig scheint es nicht möglich zu sein, Nachweisverfahren zu entwickeln und einen gesellschaftlichen Aushandlungsprozess zu gestalten, die dieser Komplexität umfänglich gerecht werden; aber auch langfristig ist es offen, ob für alle genannten Aspekte zukünftig verifizierbare Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung entwickelt werden können.

Die Lehre aus der Markteinführung der Biokraftstoffe und der Bioenergienutzung (siehe z. B. ILUC-Problematik) ist aus unserer Sicht, dass eine Risikominderungsstrategie zur Vermeidung wahrscheinlicher negativer Nachhaltigkeitseffekte für die langfristige Entwicklung der PtX-Technologien vorteilhaft sein kann. So können nämlich die angestrebte Klimaschutzwirkung, die Investitionssicherheit für die kapitalintensiven PtX-Anlagen sowie die gesellschaftliche Akzeptanz in den möglichen Produktions-, aber auch in den Importländern sichergestellt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wenig nachhaltige Produktionsprozesse bzw. Betriebsweisen sollten bei der Skalierung der Technologie unserer Meinung nach von politischen Fördermaßnahmen ausgeschlossen werden, auch wenn beispielsweise keine genauen Methoden zur Berechnung der Treibhausgasminderung von PtX-Stoffen für indirekte Wirkungen existieren.

Zentral ist für die Treibhausgasminderungswirkung die Ausgestaltung der Bedingungen für den Strombezug, mit dem sichergestellt ist, dass auf Systemebene des jeweiligen Stromsystems zusätzlicher, erneuerbarer Strom zum Einsatz kommt. Ohne diese Anforderung ist die Produktion von PtX-Stoffen in den Energiesystemen vieler europäischer Länder heute und auch mittelfristig mit höheren THG-Emissionen verbunden als die jeweiligen fossilen Alternativen. Wenn Kohlenwasserstoffe hergestellt werden, ist ein zweiter wichtiger Punkt für die Treibhausgasminderungswirkung die Regulierung des CO₂-Bezugs: Bei Nutzung von CO₂, welches als fossiles CO₂ zu werten ist, ist mit der Nutzung der PtX-Stoffe keine Treibhausgasminderung verbunden. Die Flächen- und Wasserinanspruchnahme ist vor allem für die lokale Bevölkerung an möglichen Produktionsstandorten relevant. Best-Practice Maßnahmen für die nachhaltige Entwicklung an den Produktionsstandorten sowie verbindliche, unabhängige Evaluierungen der Maßnahmen sind aus unserer Sicht eine Grundvoraussetzung für die Förderung von PtX-Anlagen.

Die Diskussion in diesem Papier weist auf ein weiteres „Problem“ für die Bewertung der Nachhaltigkeit von PtX-Stoffen hin. Im Hinblick auf die PtX-Technologien stand und steht derzeit die Technologieentwicklung im Mittelpunkt sowie die Forschung und das Wissen darüber, welche Effekte sich in unserem Energie- und Wirtschaftssystem durch die Integration der PtX-Produktion einstellen, erst am Anfang. Noch viel weniger Wissen besteht darüber, inwieweit sich mögliche Entwicklungen der PtX-Herstellung auf die genannten Nachhaltigkeitsaspekte auswirken, wenn sich eine globale Nachfrage nach PtX-Stoffen entwickelt. Auch hier ist ein Vergleich zur nachhaltigen Biomassenutzung möglich. Wissenschaftliche Analysen zeigen heute, dass das nachhaltige Potenzial der Biomassenutzung um ein Vielfaches kleiner ist als noch vor einiger Zeit angenommen wurde. Das technisch-ökonomische Potenzial für PtX-Anwendungen ist wie bei der Biomassenutzung enorm; wie stark es sich verringert, wenn verschiedene Nachhaltigkeitsanforderungen an die PtX-Produktion gestellt werden, ist auf dem heutigen wissenschaftlichen Stand nicht abschätzbar.

Daraus lässt sich eine weitere Leitlinie für die nachhaltige Nutzung der PtX-Potenziale ableiten. Es gibt stoffliche und energetische Anwendungen, die keine bzw. nur wenige Alternativen zur Treibhausgasminderung besitzen. So lange keine fundierten Untersuchungen Aufschluss dazu geben, welche Mengen an PtX-Produkten langfristig nachhaltig hergestellt werden können, sollten PtX-Stoffe für den Klimaschutz als ein knappes Gut behandelt werden. Die Förderung von PtX-Stoffen für Anwendungen mit geringen bzw. keinen weiteren technischen Klimaschutzalternativen sollte

daher Priorität besitzen. So kann ein möglicher „Lock-In“ der PtX-Nutzung in Anwendungen mit vielversprechenden und häufig effizienteren und günstigeren Alternativen (z. B. batterieelektrische Mobilität, Wärmepumpen) vermieden werden.

Literaturverzeichnis

- Agora Verkehrswende; Agora Energiewende (Hg.) (2018): Frontier Economics. Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe., Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende. Frontier Economics. Berlin, 2018.
- Altenburg, T.; Assmann, C. (Hg.) (2017). Green Industrial Policy, Concept, Policies, Country Experiences. UN Environment; Deutsches Institut für Entwicklungspolitik. Geneva, Bonn, 2017.
- ARUP; URS (2014): Advanced Biofuel Feedstock: An assesment of sustainability, Framework for Transport-Related Technical and Engineering Advice and Research (PPRO 04/45/12) - Lot 2 (Road Related Technical Engineering And Advice), 2014.
- BDI - Bundesverband der deutschen Industrie (Hg.) (2018): Gerbert, P.; Herhold, P.; Buchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Krichner, A.; Kemmler, A.; Wunsch, M. Klimapfade für Deutschland. The Boston Consulting Group; Prognos. Berlin, Basel, Hamburg, München, 2018.
- BDI - Bundesverband der deutschen Industrie (Hg.) (2019). Analyse Klimapfade Verkehr 2030. The Boston Consulting Group; Prognos AG, 2019.
- BMUB - Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.) (2016). Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin, 2016.
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2018). 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Innovationen für die Energiewende. Berlin, 2018.
- Cerulogy (2017): Malins, C. What role for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?, 2017.
- CTH - Chalmers University of Technology; IVL - Swedish Environmental Research Institute (2017): Brynolf, S.; Taljegard, M.; Grahn, M.; Hansson, J. Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Göteborg, 2017.
- DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (Hg.) (2017): Wagemann, K.; Ausfelder, F. E-Fuels - Mehr als eine Option, White Paper. Frankfurt am Main, 2017.
- DG Ener - European Commission - DG Energy (Hg.) (2017): Bauknecht, D.; Förster, H.; Hünecke, K.; Bracker, J.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Greiner, B.; Heinemann, C.; Hesse, T.; Kasten, P.; Keimeyer, F.; Kühnel, S. et al. Study on Technical Assistance in Realisation of the 2016 Report on Renewable Energy, in preparation of the Renewable Energy Package for the Period 2020-2030 in the European Union, RES-Study. ENER/C1/2014-688. Öko-Institut e.V.; e3 Modelling; ObservER; COWI; eclareon. Freiburg, 2017.
- DIE - Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (Hg.) (2013): Johnson, O. Exploring the Effectiveness of Local Content Requirements in Promoting Solar PV Manufacturing in India (Discussion Paper, 11/2013). Bonn, 2013.
- EC - European Commission (2018): A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, In-depth analysis in support of the commission; Communication COM (2018) 773, 2018.
- EU - European Union (2018): Regulation (EU) 2018/842 of the European Parliament and the Council of 30 May 2018 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement and amending Regulation (EU) No 525/2013. In: *Official Journal of the European Union (OJL)* (L 156), S. 26–42.

- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (Hg.) (2018). The future of food and agriculture, Alternative pathways to 2050. Summary Version. Rome, 2018, zuletzt geprüft am 01.07.2019.
- GEF - Global Environment Facility (2016). Taking Deforestation Out of Commodity Supply Chains, 2016, zuletzt geprüft am 05.07.2019.
- Holen, G.; Bruknapp, R. (2019): 100% Carbon Neutral, Disrupt or be disrupted. Kraftstoffe der Zukunft - 16. Internationaler Fachkongress für erneuerbare Mobilität. Nordic Blue Crude. Berlin, 22.01.2019.
- ICCT - International Council on Clean Transportation (2018): Searle, S.; Christensen, A. Decarbonization potential of electrofuels in the European Union (White Paper), 2018.
- IEEP - Institute for European Environmental Policy (2010): Bowyer, C. Anticipated Indirect Land Use Change Associated with Expanded Use of Biofuels and Bioliquids in the EU – An Analysis of the National Renewable Energy Action Plans, 2010, zuletzt geprüft am 19.03.2019.
- IEEP - Institute for European Environmental Policy (2016): Allen, B.; Baldock, D.; Nanni, S.; Bowyer, C. Sustainability criteria for biofuels made from land and non-land based feedstocks, Report for the European Climate Foundation., 2016.
- International Energy Agency (2019): Emissions per kWh of electricity and heat output. IEA CO2 Emissions from Fuel Combustion Statistics (database), International Energy Agency. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1787/data-00432-en>.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2018): Rogelj, J.; Shindell, D.; Jiang, K. Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development Global Warming of 1.5°C, Chapter 2 of Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global to the threat of climate change. sustainable development, and efforts to eradicate poverty, 2018.
- ISI - Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Hg.) (2013): Schlomann, B.; Fleiter, T.; Hirzel, S.; Arens, M.; Rohde, C.; Eichhammer, W.; Cebulla, F.; Elstrand, R.; Fehrenbach, D.; Singer, N.; Gerspacher, A.; Idrissova, F.; Jochem, E. et al. Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente (Innovationspotenziale). Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien; TU Berlin, 2013.
- IWES - Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Hg.) (2017): Pfennig, M.; Gerhardt, N.; Pape, C.; Böttger, D. Mittel- und Langfristige Potenziale von PtL und H₂-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen, Teilbericht im Rahmen des Projektes: KLIMAWIRKSAMKEIT ELEKTROMOBILITÄT - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik. Kassel, 2017.
- Jones, E.; Qadir, M.; van Vliet, M. T.H.; Smakhtin, V.; Kang, S.-m. (2019): The state of desalination and brine production, A global outlook. In: *Science of The Total Environment* 657, S. 1343–1356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
- Lappeenranta University of Technology (Hg.) (2017): Fasihi, M.; Breyer, C. Synthetic Methanol and Dimethyl Ether Production based on Hybrid PV-Wind Power Plants, Conference Paper. Lappeenranta, 2017.
- Miller, S.; Shermer, H.; Semiat, R. (2015): Energy and environmental issues in desalination. In: *Desalination* 366, S. 2–8. DOI: 10.1016/j.desal.2014.11.034.
- MWV - Mineralölwirtschaftsverband e.V.; FuelsEurope (2018). Vision 2050, Weiterentwicklung von raffinierten und flüssigen Energieträgern, 2018.

- MWV - Mineralölwirtschaftsverband e.V.; IWO - Institut für Wärme und Oeltechnik e.V.; MEW - Mittelständische Energiewirtschaft Deutschland e.V.; Uniti - Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen (Hg.) (2018): Hobohm, J.; Maur, A. auf der; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Koziel, S.; Kreidelmeyer, S.; Piégisa, A.; Wendring, P.; Meyer, B.; Apfelbacher, A.; Dotzauer, M.; Zech, K. Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende, Endbericht. Berlin, 2018.
- ÖI - Öko-Institut (2017a): Bracker, J.; Timpe, C. An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport, Policy paper for Transport & Environment. Freiburg, 2017. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Sustainability-criteria-for-synthetic-fuels.pdf>, zuletzt geprüft am 08.03.2018.
- ÖI - Öko-Institut (2017b): Kasten, P.; Bracker, J.; Timpe, C.; Hacker, F. Klimavorteil Elektromobilität?, Handlungsempfehlungen zur Gestaltung des Beitrags der Elektromobilität zum Klimaschutz. Policy Paper. Berlin, 2017.
- ÖI - Öko-Institut (2017c): Timpe, C.; Seebach, D.; Bracker, J.; Kasten, P. Improving the accounting of renewable electricity in transport within the new EU Renewable Energy Directive, Policy paper for Transport & Environment, 2017.
- ÖI - Öko-Institut (2018): Gores, S.; Graichen, J. Abschätzung des erforderlichen Zukaufs an Annual Emission Allowances bis 2030. Berlin, 2018.
- ÖI - Öko-Institut (2019): Kasten, P.; Kühnel, S. Positionen zur Nutzung strombasierter Flüssigkraftstoffe (efuels) im Verkehr, Darstellung von Positionen verschiedener gesellschaftlicher Akteure zum Einsatz von efuels im Verkehr. Erstellt als Teil des Kopernikus Fördervorhabens Power2X - Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“-Konzepten gefördert durch BMBF Förderkennzeichen: 03SFK2H0. Berlin, 2019.
- ÖI - Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Henneberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Ludig, S.; Loreck, C.; Scheffler, M. et al. Klimaschutzszenario 2050, 2. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, August 2015.
- oxfam - oxfam international (2012): Kelly, R. The Hunger Grains: The fight is on. Time to scrap EU biofuel mandates. (OXFAM Briefing Paper, 161), 2012.
- PwC - PricewaterhouseCoopers (2015). Collaboration: Preserving water through partnering that works, Identifying water as a potential business risk and understanding the strategies to reduce exposure, 2015.
- Reiter, G.; Lindorfer, J. (2015): Evaluating CO₂ sources for power-to-gas applications - A case study for Austria. In: *Journal of CO₂ Utilization* 10, S. 40–49.
- Roberts, D. A.; Johnston, E. L.; Knott, N. A. (2010): Impacts of desalination plant discharges on the marine environment, A critical review of published studies. In: *Water Research* 44 (18), S. 5117–5128. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.036.
- Sullivan, C. A.; Meigh, J. R.; Giacomello, A. M.; Fediw, T.; Lawrence, P.; Samad, M.; Mlote, S.; Hutton, C.; Allan, J. A.; Schulze, R. E.; Dlamini, D.J.M.; Cosgrove, W.; Delli Priscoli, J. et al. (2003): The Water Poverty Index, Development and application at the community scale. In: *Natural Resources Forum* 27 (3), S. 189–199. DOI: 10.1111/1477-8947.00054.
- Terrapon-Pfaff, J.; Fink, T.; Viebahn, P.; Jamea, E. M. (2019): Social impacts of large-scale solar thermal power plants: Assessment results for eh NOOR₀ I power plant in Morocco. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (113).
- The Weltenergierat - Deutschland e.V. (Hg.) (2018): Perner, J.; Bothe, D. INTERNATIONAL ASPECTS OF A POWER-TO-X ROADMAP, A report prepared for the World Energy Council Germany. Frontier Economics, 2018, zuletzt geprüft am 05.12.2018.

- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2013): Jering, A.; Klatt, A.; Seven, J.; Ehlers, K.; Günther, J.; Ostermeier, A.; Mönch, L. Umweltbundesamt: Globale Landflächen und Biomasse - nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. Umweltbundesamt, 2013.
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2016): Schmidt, P.; Weindorf, W.; Roth, A.; Batteiger, V.; Riegel, F. Power-to-Liquids, Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel (Background). Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH; Bauhaus Luftfahrt e.V. Dessau-Roßlau, 2016.
- VDA - Verband der Automobilindustrie (Hg.) (2017): Siegemund, S.; Trommler, M.; Kolb, O.; Zinnecker, V.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Zittel, W.; Raksha, T.; Zerhusen, J. E-Fuels Study: The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU, An expertise by LBST and dena. Deutsche Energie-Agentur GmbH; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Berlin, 2017.
- WWF Deutschland (Hg.) (2018). Wie klimaneutral ist CO₂ als Rohstoff wirklich?, WWF Position zu Carbon Capture and Utilization (CCU). Berlin, 2018.