



TransHyDE

Policy Paper

zur Sicherstellung einer mittel- bis
langfristigen klimaneutralen
Rohstoffversorgung der Raffinerie
Schwedt

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Autorinnen und Autoren

Natalia Pieton – Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG), Cottbus

Marius Neuwirth – Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Dr.-Ing. Matthias Jahn – Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden

Prof. Dr. Mario Ragwitz – Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG), Cottbus

Zitationsvorschlag

Pieton N.; Neuwirth M.; Jahn, M.; Ragwitz, M. (2022): Policy Paper zur Sicherstellung einer mittel- bis langfristigen klimaneutralen Rohstoffversorgung der Raffinerie Schwedt. Cottbus: Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Dresden: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS.



Mit besonderem Dank an die Reviewer

Dr. Florian Ausfelder – DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt am Main

Prof. Dr. Robert Schlögl – Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

Prof. Dr. Martin Wietschel – Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe



Disclaimer

Die Erarbeitung des Positionspapiers erfolgte durch eine ausgewählte Autorenschaft des Verbundprojektes Systemanalyse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE. Die Inhalte der TransHyDE-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Impressum

Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE
Geschäftsstelle Kommunikation und Koordination
E-Mail: koordination@transhyde.de

Webseite:
www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde
Linked-In: Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE

cruh21 GmbH
Erste Brunnenstraße 1
20459 Hamburg

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen
und Geothermie IEG
Gulbener Straße 23
03046 Cottbus

Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Stiftstraße 34-36
45470 Mülheim an der Ruhr

Inhaltsverzeichnis

01 Motivation	S. 08
02 Rohstoff- und Infrastrukturbedarfe der Raffinerie Schwedt	
S. 09 Status Quo	
S. 10 Mögliche Transformationspfade	
S. 13 Diskussion	
03 Zusammenfassung und Ausblick	S. 15
04 Anhang	S. 17

Abbildungsverzeichnis

- S. 10** Abbildung 1: Nachfrageentwicklung der heutigen Raffinerieprodukte in der Region Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern 2020-2045: Kerosin, Bitumen, Plattformchemikalien, Diesel/Heizöl, Ottokraftstoffe.
- S. 11** Abbildung 2: Ein möglicher Transformationspfad der Raffinerie Schwedt in Bezug auf Produktionskapazitäten zur Rohölveredlung und klimaneutralen Pfaden FT-Synthese und MtO.
- S. 13** Abbildung 3: Industriestandort Schwedt und strategisch wichtige Infrastrukturen.

Verzeichnis der Anhänge

- S. 18 Appendix 1.1: Leitungsgebundene Infrastruktur in der Nähe der Raffinerie Schwedt: Öl- und Erdgasleitungen, deren Transportmedium, Verlauf (von/nach), Kapazität und Distanz zwischen der Leitung und der Raffinerie Schwedt
- S. 19 Appendix 1.2: Häfen in der Nähe der Raffinerie Schwedt: Größe, möglicher Eisstand, Verfügbarkeit eines Ölterminals und Distanz zur Raffinerie Schwedt [31]
- S. 20 Appendix 2.1: PtL-Bedarfe in den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie in Deutschland für 2030 und 2045 basierend auf dem Vergleich der BIG5-Studen durch Ariadne [15]
Appendix 2.2: Bedarfe für heutiges fossil produziertes Kerosin und zukünftig klimaneutrales Kerosin für den nationalen und internationalen Flugverkehr in Deutschland für 2030 und 2045 bzw. 2050 basierend auf den BIG 5-Studien [10–14, 19] sowie der PtL-Roadmap der Bundesregierung [34] und des Vorschlags der Europäischen Kommission für die EU[17]
Appendix 2.3: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments für einen nachhaltigen Luftverkehr: Anteile SAF (synthetische und biogene Anteile) an Flugkraftstoffen 2025-2050 in Europa [17]
- S. 21 Appendix 3.1: Produktion von synthetischen Kraftstoffen im Fischer-Tropsch-Pfad [35]. Eigene Ergänzung um Rohstoffarten und Produkte (grau)
Appendix 3.2: Produktion von synthetischen Kraftstoffen im Methanol-Pfad [32]. Eigene Ergänzung um Rohstoffarten und Produkte (grau)
- S. 22 Appendix 3.3: Produktverteilungen bei der Kraftstoffherzeugung im konventionellen Pfad und potentiellen klimaneutralen Pfaden in der Raffinerie Schwedt [5, 20, 36]
- S. 23 Appendix 4.1: Strategische klimaneutrale Sourcingoptionen zur Rohstoffdeckung je Technologiepfad.
Appendix 4.2: Rohstoffbedarfe für die Kerosinproduktion der zukünftigen Raffinerie Schwedt auf Basis von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff
- S. 24 Appendix 4.3: Stromerzeugungspotentiale für Ostdeutschland in TWh [26]
Appendix 4.4: Flächennutzung und zusätzlich nutzbare Freiflächen im Industriepark Schwedt [27]

Executive Summary

Dem Raffineriestandort Schwedt kommt eine wichtige Rolle als Kraftstofflieferant für Ostdeutschland zu. Durch das kommende Ölebargo aufgrund des Russland-Ukraine-Krieges steht dieser Standort aktuell vor großen Herausforderungen. Im Zuge der deutschen Klimaziele stellt sich zudem zukünftig die Frage, ob und wie sich Raffineriestandorte wie Schwedt für eine klimaneutrale Zukunft rüsten können. Dieses Papier legt Konzeptideen für eine mittel- und langfristige Rohstoffversorgung zur Erreichung eines klimaneutralen Produktportfolios des Standortes vor. Dabei geht es etwa um die Frage, wie sich Rohöl ersetzen lässt, um Kraftstoffe künftig klimaneutral zu erzeugen.

Mit dem Ziel der Bundesregierung, in Deutschland bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen und gleichzeitig strukturschwache Regionen zu stärken, ist es wichtig, den Raffineriestandort zu erhalten und klimaneutral auszurichten. Der Weg in ein klimaneutrales Deutschland bedarf einer großflächigen Elektrifizierung, sodass einige der heutigen Raffinerieprodukte - wie Kraftstoffe im Straßenverkehr sowie Heizöle im Gebäudewärmebereich - in 2045 keine relevante Anwendung finden werden. Gleichzeitig sind der **Flug- und Schiffsverkehr** (Kerosin und Schiffsdiesel) und einige Prozesse der **Grundstoffchemie** schwer oder nicht durch direkte Elektrifizierung zu dekarbonisieren. Daher ist langfristig für die Erzeugung von klimaneutralen Kraftstoffen ein Aufbau der neuartigen Pfade **Fischer-Tropsch (FT)** oder **Methanol-to-Synfuels (MtSynfuels)** notwendig.

Diese Kurzstudie analysiert die **Rohstoff- und Infrastrukturbedarfe** auf dem Weg zu einem **klimaneutralen Produktportfolio**. Dazu wird anhand von Energiesystemstudien die mögliche Entwicklung der regionalen Nachfrage der Raffinerieprodukte erhoben. Diese Untersuchung zeigt, dass ein erster Schritt der Aufbau von Elektrolysekapazitäten zur Erzeugung von **0,8 TWh/a Wasserstoff bis 2030**

ist, um den erdgasbasierten Wasserstoff bei der Rohölveredlung zu ersetzen und Emissionen zu mindern. Zusätzlich muss ein paralleler Hochlauf der FT- oder MtSynfuels-Technologien erfolgen, um bis 2045 ein 100% klimaneutrales Produktspektrum abzudecken. Bei Betrachtung der regionalen Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen, würde sich die **Kapazität der klimaneutralen Raffinerie deutlich verringern** (nach den aktuellen Studien wird mit ca. 20% der aktuellen Kapazität gerechnet). Daraus ergäbe sich ein Strombedarf von 38 TWh in 2045 für den Betrieb einer Elektrolyse sowie einer Direct-Air-Capture-Anlage zur Bereitstellung von 5,3 Mio. t CO₂. Alternativ könnten biomasse-basierte Kohlenstoffquellen genutzt werden. Bei Einbezug günstiger Potenziale zur Erzeugung von Erneuerbaren Energien insbesondere in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern könnten die Produktionskapazitäten weiter skaliert und höhere Marktanteile für synthetische Produkte erzielt werden.

Die **strategisch gute Infrastrukturanbindung** erlaubt eine sichere und flexible Rohstoffversorgung und der Ausbau der erneuerbaren Energien kann damit in Kombination mit einer angepassten **CO₂-Infrastruktur zu einer langfristigen Wertschöpfung** in der Region beitragen und zukunftsfähige Arbeitsplätze schaffen. Damit könnte der Standort einen **Modellcharakter für andere Strukturwandelregionen** besitzen. Diese Entwicklung sollte durch einen Dialogprozess mit den regionalen Akteuren begleitet werden, damit auch weitere Nutzungsoptionen für grüne Produkte berücksichtigt und insbesondere auch neue Start-Ups und Industrieansiedlungen gefördert werden.

Die Analysen haben gezeigt, dass für die Raffinerie Schwedt verschiedene Optionen bestehen, um als wichtiger Industriestandort in Brandenburg auch künftig erhalten zu bleiben und dabei einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten.

1

Motivation

Der derzeitige russisch-ukrainische Krieg und das daraus resultierende Ölembargo der EU gegen Russland demonstrieren die Abhängigkeit des Raffineriestandortes Deutschland von russischen Ölimporten. Der zentrale Treibstoffproduzent für Nordostdeutschland, die Raffinerie Schwedt, ist der letzte deutsche Abnehmer russischen Erdöls und das Rohöl versiegt nach jetzigem Stand gänzlich ab dem 01.01.2023 [1]. Speziell für die Versorgung in Brandenburg sowie in anderen Teilen Ostdeutschlands und Polens ist die Raffinerie Schwedt von hoher Bedeutung. Mittel- und langfristig benötigt die Raffinerie Schwedt deshalb klimaneutrale und wettbewerbsfähige Rohstoffoptionen zum russischen Erdöl, wobei Lieferatendiversifikation und ein Rohstoffwechsel berücksichtigt werden müssen.

Nach der Sicherstellung des kurzfristigen Betriebs spielt die zukünftige Ausrichtung der Raffinerie eine bedeutende Rolle und könnte durch neue Anteilseigner entscheidend geprägt werden [2]. Demzufolge sollen in der Ölbranche tätige Konzerne aus Polen (Orlen) und Estland (Liwathon) ihr Interesse bekundet haben [3]. Gleichzeitig seien aber auch zwei deutsche Unternehmen (Enertrag, Verbio) mit Erfahrung im Bereich Erneuerbarer Energien im Hinblick auf eine Transformation zu einer nachhaltigen Raffinerie in Schwedt interessiert [4].

Das Klimaschutzgesetz des Bundes sieht vor, bis 2045 Klimaneutralität in Deutschland zu erreichen (BMU 2021) und eine langfristige Weichenstellung ist bereits heute wichtig für die Etablierung eines nachhaltigen Geschäftsmodells. Vergleichbare Pläne in Richtung Klimaneutralität gibt es bereits für die Raffinerien Leuna und Heide.

Diese stellen sich in den nächsten Jahren auf die Produktion von nachhaltigem Methanol ein, welches sie direkt als Kraftstoff (-zusatz) nutzen oder über die Methanol-to-Olefins-Prozessroute zu wichtigen Plattformchemikalien weiterverarbeiten. Die Raffinerie Schwedt ist hauptsächlich auf die Produktion von konventionellen Kraftstoffen ausgelegt. Durch alternative Antriebe und das Ziel der Klimaneutralität wird der Kraftstoffbedarf im Transportsektor und Heizölbedarf im Gebäudesektor bis 2045 deutlich sinken. Aus diesem Grund ist die frühzeitige Erarbeitung einer Zukunftsstrategie und die Erschließung wichtiger Zukunftsmärkte von großer Dringlichkeit. Der Industriestandort Schwedt umfasst neben der Raffinerie zudem eine Vielzahl weiterer Unternehmen der nachfolgenden Wertschöpfung und damit verbundene Arbeitsplätze. Zur Erhaltung des Industriestandortes und der Wirtschaftsleistung ist die frühzeitige Erarbeitung einer Roadmap unumgänglich.

Ziel dieser Ausarbeitung ist es, die wesentlichen technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen als Grundlage für eine Roadmap zu erarbeiten, um den Betrieb der Raffinerie Schwedt mittel- bis langfristig zu sichern und Handlungsoptionen für eine Rohstoffversorgung, das Produktportfolio, Klimaneutralität und Wettbewerbsfähigkeit bis 2045 aufzuzeigen. Auf dieser Basis sind regulatorische Rahmenbedingungen zu erarbeiten und Fördermaßnahmen zu setzen, wodurch ein klimaneutrales Deutschland ein attraktiver Standort für Raffinerien in der Transformation bis 2045 und darüber hinaus bleiben kann.

2

Rohstoff- und Infrastrukturbedarfe der Raffinerie Schwedt

2.1 Status Quo

2.1.1 Rohstoffe und Produkte

Die Raffinerie Schwedt kann jährlich bis zu 10,8 Mio. t Rohöl verarbeiten, was etwa 11 % des deutschen Rohölsatzes in 2021 entspricht [5, 6]. Daraus werden in Schwedt bis zu 3,8 Mio. t Dieselmotorkraftstoffe, 3 Mio. t Ottomotorkraftstoffe und 0,4 Mio. t Kerosin erzeugt. Neben Treibstoffen produziert die Raffinerie Heizöl (1,8 Mio. t Kapazität) und in kleineren Mengen Flüssiggase, Bitumen und Plattformchemikalien. Ein Kraftwerk versorgt zudem die Region mit Fernwärme und Strom (300 MW Kapazität) [5].

2.1.2 Infrastruktur

Leitungsgebundener Transport: Die Raffinerie Schwedt ist infrastrukturell durch die direkte Anbindung an drei Rohöl- sowie eine Produktpipeline in Richtung Berlin strategisch vorteilhaft aufgestellt [7]. Der Flughafen BER liegt in der Nähe der von der Raffinerie Schwedt ausgehenden Produktleitung. Des Weiteren befinden sich in der Nähe vier wesentliche Erdgasleitungen und das fünf Kilometer entfernte Vierraden ist an zwei Höchstspannungsleitungen angebunden, über die erneuerbarer Strom in entsprechenden Mengen zugänglich ist. Jeweils eine weitere Erdgas- sowie Hochspannungsleitung sind in kurzer Distanz in Planung. Eine Auflistung der leitungsgebundenen Infrastrukturen, deren Transportmedium, Verlauf, Kapazität und Distanz zwischen der Leitung und der Raffinerie Schwedt befinden sich im Anhang (Appendix 1.1) [8, 9].

Schiffstransport: In Ergänzung zum leitungsgebundenen Transport von Rohstoffen liegt die Raffinerie Schwedt in einer geografisch

günstigen Position für den Rohstoffimport per Schiff. Innerhalb von 205 km Luftlinie befinden sich vier Häfen unterschiedlicher Größe in Deutschland und Polen, die über Ölterminals verfügen. Der 180 km entfernte Großhafen Rostock z.B. ist über eine Ölleitung mit Schwedt verbunden. Darüber hinaus ist der 325 km entfernte Großhafen Danzig über eine Gasleitung an Schwedt angebunden. Für eine Auflistung aller Häfen mit Ölterminals in Polen und Deutschland, deren Hafengröße, möglichem Eisstand und Distanz zur Raffinerie Schwedt siehe Appendix 1.2.

Somit wird deutlich, dass die Raffinerie Schwedt Rohstoffe sowohl leitungs- als auch schiffsgebunden importieren kann und zukünftig ausreichend Potenzial besteht eine Rohstoffversorgung gegen Ausfälle infrastrukturell abzusichern. Dazu müssen nicht zwingend Infrastrukturen mit großen Kapazitäten genutzt werden, da auch im Sinne einer Diversifikation eine Rohstoffversorgung durch mehrere Zulieferer, Leitungen und Häfen, hierunter auch kleinere nahegelegene Häfen (wie z.B. Swinemünde in Polen und Wismar) möglich ist. Für eine klimaneutrale Raffinerie werden derzeit klimaneutrale Rohstoffe diskutiert, die das Potenzial bieten, sowohl als Primärrohstoff (Strom, Wasser) als auch als Sekundärrohstoff (Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid) oder flüssiges Zwischenprodukt (Fischer-Tropsch-Crude, Methanol) eingekauft zu werden. Diese Art der Rohstoffflexibilität ermöglicht es, zukünftige Raffineriewertschöpfungsketten in Abhängigkeit der gegebenen Infrastrukturen flexibel aufbauen zu können.

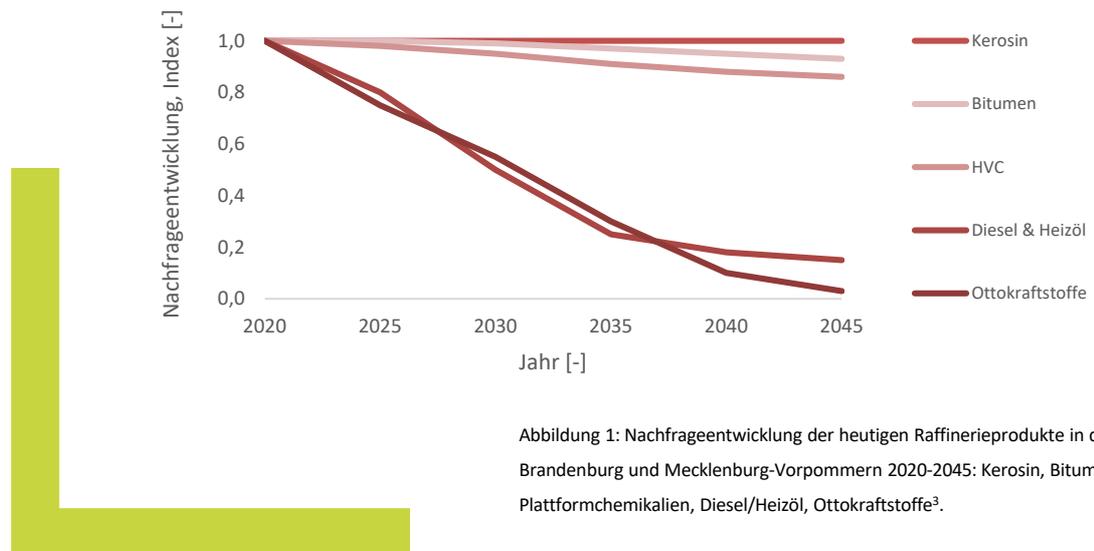


Abbildung 1: Nachfrageentwicklung der heutigen Raffinerieprodukte in der Region Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern 2020-2045: Kerosin, Bitumen, Plattformchemikalien, Diesel/Heizöl, Ottokraftstoffe³.

2.2 Mögliche Transformationspfade

2.2.1 Prognosen zu zukünftigen Kraftstoffbedarfen

Wesentlich für die Ausrichtung der Raffinerie Schwedt ist die Entwicklung des Kraftstoffmarktes. Chemieprodukte sind mengenmäßig nicht der Fokus der Raffinerie Schwedt, da die unmittelbare räumliche Nähe zu Standorten der chemischen Industrie fehlt. Deshalb sind Kraftstoffe, insbesondere Kerosin und Diesel, der Fokus dieser Ausarbeitung [5].

Bedarfe für Power-to-Liquids (PtL): Ein Vergleich der BIG5-Studien¹ des Kopernikus-Projektes Ariadne zeigt die Bedarfe für synthetische flüssige Energieträger (oder Power to Liquids, kurz: PtL) in Deutschland bis 2045 [15]. Die BIG5-Studien untersuchen die Entwicklung der sektoralen Energiebedarfe unter der Voraussetzung, dass Klimaneutralität bis 2045 bzw. 2050 erreicht wird. Im Schnitt beträgt der PtL-Bedarf über alle Sektoren hinweg für 2030 etwa 3 TWh und für 2045 164 TWh (vgl. Appendix 2.1).

Bedarfe für klimaneutrales Kerosin: Der Kerosinbedarf für den nationalen und internationalen Flugverkehr in 2019 betrug 110 TWh [16] und die BIG5-Studien sind sich einig, dass Kerosin ein unersetzbarer Energieträger im internationalen Flugverkehr der Zukunft ist. Zudem herrscht Konsens, dass die Kerosinbedarfe etwa konstant bleiben werden und Kerosin künftig klimaneutral erzeugt werden muss. In der PtL-Roadmap geht die Bundesregierung davon aus, dass bis 2030 eine heimische Produktion von 2,4 TWh synthetischem Kerosin realistisch sei (vgl. Appendix 2.2).

Klimaneutrale Flugkraftstoffe (engl.: Sustainable Aviation Fuels, kurz: SAF) umfassen synthetische und biogene Erzeugnisse. Die Europäische Kommission schlägt für die EU folgende SAF- Mindestvolumenanteile vor: 5% SAF bzw. 1% synthetisches Kerosin in 2030 und 63% SAF bzw. 28% synthetisches Kerosin in 2050. (vgl. Appendix 2.3) [17]. Das Europäische Parlament [18], IATA und die BIG5-Studien streben jedoch höhere SAF-Quoten von bis zu 100% in 2045 an².

Bedarfe für klimaneutralen Diesel, Ottokraftstoffe, Plattformchemikalien und Bitumen: Durch den Fokus der Raffinerie auf den Kraftstoffbereich wird die Entwicklung im Verkehrssektor in den Bundesländern Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern als Grundlage für die zukünftige Entwicklung des Produktspektrums herangezogen. Unter Einbeziehung der Studie LFS III [12] und Projektion der Klimaneutralität auf das Jahr 2045 zeigt sich im zeitlichen Verlauf gegenüber der heutigen Nachfrage ein Bedarf von etwa 55% Ottokraftstoffen, 50% Dieselkraftstoffen und 100% Kerosin in 2030. Bis 2045 wird ein Rückgang auf 5% Ottokraftstoffe und 15% Dieselkraftstoffe prognostiziert, wohingegen die Nachfrage an Kerosin weiterhin nahezu konstant bei 100% liegt. Unterschiede zeigen sich aufgrund der Schifffahrt und vorhandenen Häfen in Mecklenburg-Vorpommern beim Rückgang der Dieselmotoren. So wird in 2045 mit lediglich 3% der heutigen Dieselnachfrage in Brandenburg gerechnet, wohingegen in Mecklenburg-Vorpommern weiterhin 30% des heutigen Bedarfs nachgefragt werden. Abbildung 1 zeigt den aus LFS III abgeleiteten zeitlichen Verlauf der Nachfrageentwicklung [12].

¹ BIG5-Studien:

- BDI - Klimapfade 2.0 (2021) [10]
- Dena - Leitstudie. Aufbruch Klimaneutralität (2021) [11]
- Fraunhofer ISI - Langfristszenarien III, LFS III (2021) [12]. Klimaneutralität wird erst in 2050 erreicht.
- Prognos, Öko-Institut - Klimaneutrales Deutschland 2045 (2021) [13]
- Ariadne - Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität (2021) [14].

² Das Europäische Parlament fordert bis 2050 eine schrittweise Erhöhung des SAF-Anteils auf 85%. Die Mitglieder der IATA planen bis 2050 mit Hilfe von synthetischem und biogenem Kerosin gänzlich klimaneutral zu werden [23]. Die BIG5-Studien prognostizieren für 2030 einen Bedarf in Höhe von 0,1-20 TWh und für 2045 bzw. 2050 15-130 TWh für klimaneutrales Kerosin (Appendix 2.2).

³ Basierend auf LFS III für Verkehrsaufkommen in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern [12], den BIG5-Studien für den nationalen HVC-Bedarf [10, 11, 19, 13, 14] und eigenen Annahmen zu Bitumen.

2.2.2 Transformationspfade für Rohstoffe und Produkte

Für einen zukünftigen Raffineriebetrieb gibt es drei Technologiepfade, die durch unterschiedliche Ambitionsniveaus zur Emissionsvermeidung gekennzeichnet sind und jeweils unterschiedliche Produktverteilungen, Rohstoff- und Infrastrukturbedarfe aufzeigen:

- Rohölveredlung (Substitution von Erdgas)
- Fischer-Tropsch-Synthese (kurz: FT)
- Methanol-to-Synfuels (kurz: MtSynfuels)

Bei der Rohölveredlung wird heute bereits erdgasbasierter Wasserstoff aus der Dampfreformierung eingesetzt, um Schadstoffe oder Unreinheiten aus dem Rohöl zu binden. Die Fischer-Tropsch-Synthese sowie der Methanol-to-Synfuels-Pfad zur Erzeugung von synthetischen Treibstoffen erfordern eine Erneuerung der Produktionsprozesse und Umstellung auf strombasierte Rohstoffe. Hierfür könnten bestehende Anlagen teilweise für eine synthetische Erzeugung weiterhin genutzt werden. Für beide Pfade sind Wasser, Strom und Kohlenstoffquellen die primären Rohstoffe bzw. die daraus gewonnen sekundären Rohstoffe Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. Beide Pfade erlauben eine Vorwärtsintegration in der Produktionskette, sodass im FT-Pfad ein FT-Crude (vgl. Appendix 3.1) und im MtSynfuels-Pfad Methanol (vgl. Appendix 3.2) als Rohstoffbasis eingekauft werden können.

Produktverteilung je Technologiepfad: Die heutige rohölbasierte Raffinerie ist darauf ausgelegt 430 kt Kerosin zu erzeugen, was 4 % des Produktstroms entspricht. Mengenmäßig ist Diesel (38 %) das Hauptprodukt, gefolgt von Ottokraftstoffen (30%). Weitere Erzeugnisse sind Heizöl (18%) und Plattformchemikalien (3%). Naphtha ist ein Zwischenprodukt (18%) und Ausgangsmaterial für Ottokraftstoffe und Plattformchemikalien und wird in der Raffinerie Schwedt größtenteils zu Ottokraftstoffen weiterverarbeitet [5]. Im FT-Pfad kann eine relativ flexible Produktverteilung von Kerosin, Diesel/

Heizöl und Naphtha durch die Variation von Prozessparametern (Katalysator, Druck, Temperatur, Verweilzeit) erreicht werden. Im MtSynfuels-Pfad werden zudem weitere Leichtöle erzeugt. Jedoch können weder Bitumen noch Schwefel in diesen Pfaden erzeugt werden, anders als in heutigen Raffinerieprozessen. Beispielhafte Produktverteilungen der beiden Pfade sind in Appendix 3.3 dargestellt [20]. Eine potenzielle alternative Herstellung von Schwefel und Bitumen könnte biomassebasiert erfolgen. Da Schwefel in Biomasse nur in sehr kleinen Anteilen vorkommt (< 1 Vol.-%), ist ein sehr starker Rückgang der zukünftigen Schwefelproduktion anzunehmen, weshalb die Schwefelproduktion hier vernachlässigt werden kann.

Im Zielpfad (vgl. Appendix 3.3) ergibt sich in der Langfristperspektive eine Auslastung im Vergleich zur heutigen Produktion von 20% basierend auf der vorherig beschriebenen projizierten Nachfrageentwicklung für synthetische Produkte (vgl. Abbildung 2). Zur Deckung der regionalen Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen wird eine lineare Transformation der Produktionskapazitäten bis 2045 angenommen. Hierbei nimmt die Produktion im FT-Prozess und einem parallelen MtO-Prozess unter Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen stetig zu, wohingegen die Rohölveredlung stetig abnimmt.

Mit einer konstanten Nachfrage nach Kerosin (4% der heutigen Gesamtkapazität) im Zusammenspiel mit den verbleibenden Nachfragen nach synthetischen Dieselfraktionen bzw. Heizöl für den Einsatz im Schiffsverkehr (9%) sowie weiteren kleinteiligen Nischenanwendungen (2%) und einer schwach abnehmende Nachfrage nach Plattformchemikalien und Bitumen (6%) ergibt sich die folgende Produktverteilung in 2045: Kerosin 430 kt, Diesel/Heizöl 840 kt, Ottokraftstoff 90 kt, Nischenprodukte 100 kt, Plattformchemikalien 260 kt, Bitumen 280 kt, Total 2.000 kt.

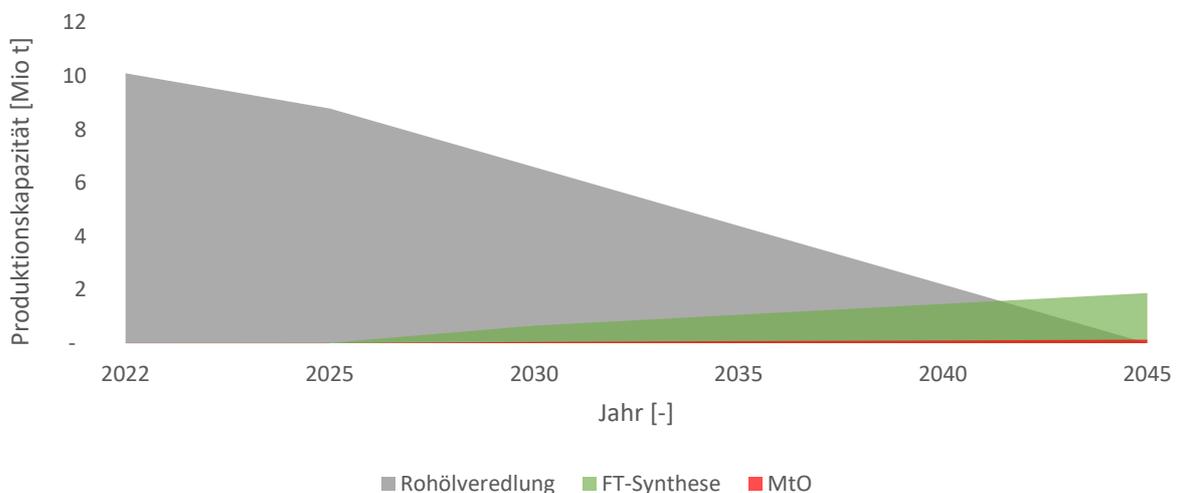


Abbildung 2: Ein möglicher Transformationspfad der Raffinerie Schwedt in Bezug auf Produktionskapazitäten zur Rohölveredlung und klimaneutralen Pfaden FT-Synthese und MtO.

Rohstoffbedarfe je Technologiepfad: Der nationale Wasserstoffbedarf in Raffinerien bezifferte sich 2018 auf 22,7 TWh, wovon rund 78% aus internen Raffinerieprozessen und 22% aus externer Dampfreformierung stammen [21]. Nach bisherigen Analysen entspricht der gesamte Wasserstoffbedarf der Raffinerie Schwedt ca. 2,6 - 3,5 TWh [22]. Für die Raffinerie Schwedt wird angenommen, dass ein Dampfreformer extern Wasserstoff zuführt. Der aus der Dampfreformierung zugeführte Wasserstoff (0,6 - 0,8 TWh) könnte zukünftig klimaneutral über eine Wasserelektrolyse erzeugt werden. Für eine Substitution von Erdgas der heutigen fossilen Kraftstoffproduktion wären auf Primär- bzw. Sekundärrohstoffbasis etwa folgende Rohstoffmengen in 2030 nötig (vgl. Appendix 4.2):

- a. Primärrohstoffbasis: 1,1 TWh Strom und 203 kt Wasser
- b. Sekundärrohstoffbasis: 23 kt (0,8 TWh) Wasserstoff

Abgesehen vom Austausch des Dampfreformers durch eine Elektrolyse, bleiben die Prozesse und Produkte unverändert, jedoch kann in diesem Pfad keine sektorübergreifende Klimaneutralität erreicht werden, aufgrund von anfallenden fossilen Emissionen im Transportsektor.

Um die im Zielpfad dargestellten klimaneutralen Produktionskapazitäten (0,2% der heutigen Kapazitäten in 2030 und 20% in 2045) zu realisieren, sind bei FT- bzw. MtSynfuels folgende Rohstoffmengen nötig (vgl. Appendix 4.1):

- a. Primärrohstoffbasis:
 - 2030: 0,4 TWh Strom und 66 kt Wasser
 - 2045: 39 TWh Strom und 6,6 Mio. t Wasser
- b. Sekundärrohstoffbasis:
 - 2030: 7 kt (0,2 TWh) Wasserstoff und 53 kt CO₂
 - 2045: 734 kt (24 TWh) Wasserstoff und 5,3 Mio. t CO₂
- c. Flüssige Intermediate:
 - 2030: 17 kt FT-Crude oder 38 kt Methanol
 - 2045: 1,7 Mio. t FT-Crude oder 3,8 Mio. t Methanol

Im Falle einer klimaneutralen Primärrohstoffversorgung sind für den Betrieb einer Elektrolyse und Direct Air Capture-Anlage (kurz: DAC) Strom sowie Wasser notwendig. Da Brandenburg unter Wasserstress leidet, wären weitere Überlegungen zur Deckung des Wasserbedarfs notwendig [23]. Laut Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg sind max. 10% (ca. 175 Mio. t) der Wasservorräte in Brandenburg bisher ungenutzt. Zur Deckung des Wasserbedarfs könnten unter Mehrkosten diese Wasservorräte geschöpft oder alternativ Meerwasser entsalzt und von der Ostsee importiert werden [24, 25].

Als Sekundärrohstoffe werden Wasserstoff und CO₂ benötigt. Das CO₂ kann entweder über Punktquellen (z.B. aus der Zement- oder Kalkherstellung) (CCU) oder durch DAC abgegriffen werden. Alternativ zu Sekundärrohstoffen kann im FT-Pfad FT-Crude oder für den MtSynfuels-Pfad etwa doppelt so viel Methanol⁴ als flüssige Zwischenprodukte eingekauft werden. Neben der Eigenerzeugung bietet sich zudem die Möglichkeit Wasserstoff, CO₂, FT-Crude oder Methanol zu importieren.

Laut Berechnungen des Fraunhofer ISI im H2-Masterplan Ostdeutschland beläuft sich das Stromerzeugungspotenzial aus Erneuerbaren Energien allein in Brandenburg auf 62 TWh, was knapp dem Vierfachen des heutigen Strombedarfs in diesem Bundesland entspricht [26]. Das windreiche Mecklenburg-Vorpommern weist ein EE-Erzeugungspotenzial von 82 TWh auf, welches etwa 12-mal höher ist als der heutige regionale Strombedarf und bietet somit weitere 75 TWh EE zum Export (vgl. Appendix 4.3) [26]. Hieraus wird deutlich, dass ausreichend EE-Potenzial vorhanden ist, um den Strombedarf für eine synthetische Kerosinerzeugung der Raffinerie Schwedt regional zu decken. Somit würde der Aufbau einer Elektrolyse, die bis 2030 0,8 TWh Wasserstoff liefert, um entweder Erdgas gänzlich zu substituieren oder sogar bereits den FT- oder MtSynfuels-Pfad stufenweise aufzubauen, 4% des bei einer heutigen Wirtschaftsstruktur nicht benötigten EE-Potentials in Brandenburg erfordern. Um 20% der heutigen Kapazitäten in 2045 auf synthetische Prozesse umzustellen wären in 2045 bis zu 39 TWh EE-Strom zu beziehen, was knapp 80% des heute regional nicht benötigten EE-Potentials in Brandenburg entspricht. Fraglich ist zu welchen Kosten bzw. Preisen der verfügbare EE-Strom bezogen werden kann und ob die Eigenerzeugung eher auf Primär-, Sekundärrohstoffbasis oder als flüssiges Zwischenprodukt wirtschaftlich und technisch sinnvoller ist.

⁴ Da Methanol im Vergleich zum FT-Crude viel Sauerstoff in sich trägt, der für die Produktion von PtL im Prozessverlauf als Wasser ausgeschleust wird, und ein geringeres Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis aufweist, ist mengenmäßig etwa doppelt so viel Methanol wie FT-Crude zur Erzeugung gleicher Produktmengen nötig.

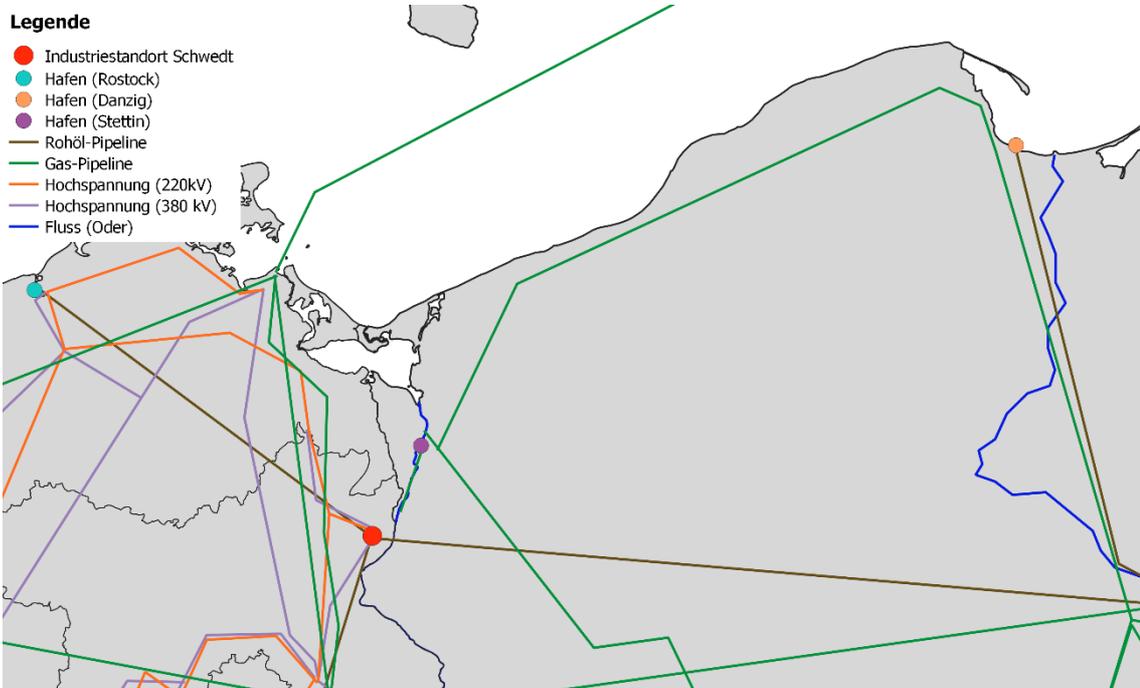


Abbildung 3: Industriestandort Schwedt und strategisch wichtige Infrastrukturen.

2.2.3 Infrastruktur

Je nach Rohstoffbasis wird eine andere Infrastruktur benötigt. Abbildung 3 zeigt die bestehende Infrastruktur im Großraum um Schwedt. Bei einem Aufbau der Produktionsketten basierend auf den Primärrohstoffen Strom und Wasser müssten ggf. spätestens bis 2045 Strom- und Wasserleitungen ausgebaut werden, um Engpässe zu vermeiden. Ausgehend von einer Sekundärrohstoffbasis ist die Umwidmung von Erdgasleitungen zu Wasserstoffleitungen bzw. ein Neubau von Wasserstoffleitungen nötig. Hier sollte man insbesondere für die Dimensionierung von Wasserstoffleitungen von Beginn an die Nachfrage in 2045 im Blick haben, um mehrfache zeitaufwändige Verlegungen der Pipelines zu vermeiden, ähnliches ist für den Transport von CO₂ anzunehmen.

Über Häfen kann Wasserstoff verflüssigt und gebunden in LOHC oder Ammoniak importiert und zu Wasserstoff rekonvertiert werden. Entsprechende Verluste bei der Konversion und Rekonversion sind zu berücksichtigen. Beim Einsatz flüssiger Zwischenprodukte wie FT-Crude oder Methanol als Rohstoffbasis ist der Transport über Rohölpipelines, Schienenverkehr und der Schifftransport über gegenwärtige Rohöl- oder Chemikalienschiffe denkbar.

2.3 Diskussion

2.3.1 Den Industriestandort Schwedt langfristig erhalten

Die Raffinerie Schwedt ist ein wesentlicher Bestandteil des Industriestandortes Schwedt und eine wichtige Versorgungseinheit in Bezug auf Treibstoffe und Energie sowie Arbeitsplätze und Unternehmen im weiteren Downstream der Wertschöpfungskette in der Region. Je stärker rückwärtsintegriert eine klimaneutrale Raffinerie Schwedt in der Zukunft ist, desto mehr **Wertschöpfung** kann vor Ort genutzt werden. Um die Existenz der Raffinerie Schwedt in der Zukunft zu sichern, ist es wichtig, die Rohstoffzufuhr dauerhaft und langfristig **klimaneutral** abzusichern. Hierzu ist eine Diversifikation

von Lieferanten notwendig, um eine **sichere Rohstoffversorgung** auf mehrere Zulieferer und ggf. unterschiedliche Rohstoffbasen bzw. Infrastrukturen zu verteilen. Zudem finanziert der Bund überwiegend nur klimaneutrale Technologien, sodass eine **Abkehr vom Rohöl** unausweichlich wird.

2.3.2 Neue Wertschöpfungsketten und Flächennutzung

Die Transformation der Raffinerie Schwedt bietet die Chance für den Aufbau neuer Wertschöpfungsketten sowie die Neuansiedlung von Unternehmen im Industriepark. Insbesondere die verstärkte Einbindung und Nutzung von Biomasse stellt eine attraktive Option für eine zukunftssträchtige Neuaufstellung des Industrieparks dar, welche Abfallprodukte als Rohstoffbasis einschließen. Zu biomassebasierten Prozessen sind jeweils die Rohstoffverfügbarkeiten und konkurrierenden Anwendungen zu prüfen. Bereits heute produziert die Verbio Diesel Schwedt GmbH & Co. KG (NUW) jährlich bis zu 250 kt Biodiesel und bietet aufgrund der unmittelbaren Nähe die Möglichkeit eines Erfahrungsaustausches oder gar Kooperation. Konkrete Beispiele für weitere biogene Erzeugungen könnten die biobasierte Bitumenherstellung für einen nachhaltigen Straßenbau sowie der Downstream von Plattformchemikalien sein.

Appendix 4.4 zeigt die heutigen Flächenverfügbarkeiten im Industriepark Schwedt [27]. Dabei sind aktuell im Industriepark selbst etwa 85 ha Freifläche für die Neuansiedlung von Unternehmen neuer Wertschöpfungsketten oder dem Aufbau klimaneutraler Raffinerieproduktionsanlagen vorhanden. Zusätzlich werden ca. 120 ha Erweiterungsfläche ausgewiesen. Neben neuen Unternehmen könnte diese Fläche zudem zum Ausbau von erneuerbarer Stromerzeugung sowie dem Aufbau von Elektrolysekapazitäten genutzt werden. Eine frühzeitige Entwicklung in diese Richtung ermöglicht eine schnelle Reduktion der Emissionen durch Nutzung Erneuerbarer Energien sowie eine Eigenversorgung erster Pilotanlagen neuer Produktionsrouten ohne Abhängigkeiten externer Belieferung.

2.3.3 Wahl des Transformationspfades

Lock-In-Effekte abfangen: Die Wahl des Transformationspfades kann ohne weitere Analysen zur Produktnachfrage, Herstellkosten, Importmengen und -preisen sowie auch Infrastrukturengpässen zu Lock-In-Effekten führen. Für alle drei Pfade ist jedoch sicher, dass Wasserstoff aus der Elektrolyse eine Anwendung finden kann. So könnten die ersten Elektrolysekapazitäten mit einer Erzeugung von bis zu 0,8 TWh Wasserstoff bis 2030 aufgebaut und Wasserstoff zur Substitution von Erdgas eingesetzt werden. Bei einer parallelen und stufenweisen Umstellung auf klimaneutrale Prozesse (FT oder MtSynfuels) können diese Elektrolysekapazitäten zukünftig zur Erzeugung der flüssigen Zwischenprodukte genutzt und weiter ausgebaut werden. Zur Erzeugung synthetischer Energieträger wären im Vergleich 0,2 TWh in 2030 und 24 TWh Wasserstoff in 2045 notwendig.

Als Option ist ein Import flüssiger Zwischenprodukte (FT-Crude, Methanol) und Weiterverarbeitung zu synthetischen Wertprodukten denkbar. Bereits aufgebaute Elektrolysekapazitäten können integriert oder Wasserstoff in ein zukünftiges Wasserstoffnetz eingespeist werden.

Nutzung vorhandener Produktionsanlagen: Bei einer Umstellung auf eine klimaneutrale Produktion können je nach klimaneutralem Pfad einige Produktionsanlagen weiterhin genutzt werden. Ein möglicher Vorteil des FT-Pfades liegt in der Weiternutzung von Crackern und Destillationsanlagen zur Auftrennung in einzelne Wertprodukte. Da die Anlagen jedoch dauerhaft im Teillastbetrieb gefahren würden (im Zielpfad ca. 15%), ist eine techno-ökonomische Prüfung für solch einen Anlagenbetrieb durchzuführen. In beiden Pfaden ist die weitere Nutzung der Infrastruktur (Leitungen, Kompressoren, Aufreinigung) der bestehenden fossilen Wasserstoffproduktion möglich. Zudem wird bei der Erzeugung der flüssigen Zwischenprodukte (FT-Crude oder Methanol) Wärme frei, die entweder in ein Wärmenetz zur städtischen Wärmeversorgung oder im Kraftwerk zur Erzeugung von Dampf oder Strom genutzt werden kann. Weiterhin sind Synergien mit Produktionsanlagen anderer Chemiestandorte denkbar. Bestehende Produktionsanlagen in Downstreamprozessen können somit weitergenutzt werden. Zu den bestehenden Produktionsanlagen, die in den klimaneutralen Produktionspfaden keinerlei Anwendung finden können, gehört die Clausanlage, welche den aus dem Rohöl gebundenen Schwefel aufreinigt.

Für den MtSynfuels- sowie den Konkurrenzpfad zur Erzeugung von Plattformchemikalien, Methanol-to-Olefines, ist eine vollständige Neuausrichtung der Prozesse erforderlich.

Wahl der Rohstoffbasis: Die Umsetzbarkeit einer klimaneutralen Raffinerieproduktion auf Basis der Primärrohstoffe (Strom, Wasser), Sekundärrohstoffe (Wasserstoff, CO₂) oder flüssiger Zwischenprodukte (FT-Crude oder Methanol) hängt neben der Rohstoffverfügbarkeit und -kosten von Transportkapazitäten und -kosten ab. Auf der Primärrohstoffbasis sind Strom- und Wasserleitungen notwendig, wohingegen auf der Sekundärrohstoffbasis Erdgasleitungen umzuwidmen bzw. neue Leitungen für den Transport von

Wasserstoff zu errichten sind. Ebenfalls muss für den Transport von CO₂ Transportkapazität geschaffen werden. Die Region Brandenburg weist ausreichend technische EE- und Wasserpotentiale auf, welche jedoch nur unter zu bestimmenden Mehrkosten zu heben oder zu importieren sind. Werden flüssige Zwischenprodukte als Rohstoffbasis verwendet, so ist zu prüfen, ob bestehende Rohölleitungen hierzu genutzt werden können. FT-Crude oder Methanol wären hierdurch kosteneffizient aus Regionen mit günstigen EE-Potenzialen per Schiene regional und per Schiff oder per Rohölleitung sogar weltweit beziehbar. Die Infrastrukturanforderungen für flüssige Zwischenprodukte sind am geringsten, allerdings wird dadurch der Großteil der potentiellen Wertschöpfung ausgelagert.

Den Wettbewerb im Auge haben: Die Raffinerie in Leuna ist aktuell der größte Methanolproduzent Europas und plant weitere Investitionen in Höhe von 300 Mio. Euro zum Aufbau klimaneutraler Methanolkapazitäten [28, 29]. Ähnliche Vorhaben zur Methanol-to-Olefines-Prozessroute sind aus der Raffinerie Heide zu verzeichnen. Da die Raffinerie Heide zusätzlich eine direkte Nähe zu den Großhäfen Brunsbüttel und Wilhelmshaven aufweist, sind hier künftig Importe von grünem Methanol und Ausbau von Produktionskapazitäten von synthetischen Treibstoffen denkbar.

2.3.4 Herausforderungen

Der Raffineriesektor befindet sich auf dem Weg zur Klimaneutralität und der damit verbundenen Rohstoffversorgung vor zahlreichen Herausforderungen. Zum einen bestehen hohe Unsicherheiten zu zukünftigen Entwicklungen und politischen Rahmenbedingungen zur Erzeugung und Verwendung von klimaneutralen Kraft- und Kunststoffen und deren mittelfristigen Bedarfen. Dementsprechend sind hohe Investitionen und extreme Neuerungen in eine klimaneutrale Treibstoffproduktion unter aktuellen Umständen mit einem hohen Risiko behaftet. Kurzfristig kann die Erreichung von Klimaneutralität zwar ein untergeordnetes Ziel sein, jedoch mittelfristig ein Wettbewerbsvorteil und sogar zu einer Wettbewerbsvoraussetzung werden, da bereits ähnliche Ambitionen aus der Raffinerie Heide und Leuna zu verzeichnen sind. Ein weiteres Problem stellt momentan die Unsicherheit bei Herstellkosten und Rohstoffpreisen dar. Insbesondere die Konkurrenz heimischer Produktion mit Rohstoffen aus Ländern mit weitreichenden und günstigen EE-Potenzialen scheint wirtschaftlich herausfordernd.

3

Zusammenfassung und Ausblick

Ein unverzichtbarer Verbund: Die Raffinerie Schwedt ist die einzige Raffinerie ihrer Größenordnung in Nordostdeutschland. Sie bildet einen unverzichtbaren Verbund zur Versorgung mit Kraftstoffen. Ein umfassendes Knowhow am Standort sowie wertvolle Anlageninvestitionen sind vorhanden.

Eine Anpassung des Produktportfolios für ein klimaneutrales Deutschland ist notwendig: Heute werden in der Raffinerie Schwedt überwiegend Diesel und Ottokraftstoffe erzeugt, dessen Anwendungen in einem klimaneutralen Deutschland aufgrund von Elektrifizierung im Straßentransport deutlich abnehmen werden. Lediglich der Flug- und Schiffsverkehr werden zukünftig weiterhin Kerosin und Diesel in größeren Umfang benötigen, jedoch entweder synthetisch oder biogen erzeugt. Zudem erfolgt heute in geringen Mengen die Herstellung von Plattformchemikalien sowie Bitumen und Schwefel. Der Bedarf an Plattformchemikalien wird aufgrund von Nutzerverhalten und Recycling von Kunststoffen aller Wahrscheinlichkeit nach zurückgehen. Bitumen und Schwefel können in einer Raffinerie der Zukunft nicht mehr als Nebenprodukt produziert werden. Dies erfordert die Entwicklung von Alternativen.

Nur eine Transformation der Prozesse kann zu Klimaneutralität führen: Bei der Substitution von Erdgas durch Elektrolysewasserstoff wird die bestehende Dampfreformierung ersetzt und somit ein erster Schritt des Transformationsprozesses erreicht, der für alle folgenden Transformationsschritte sinnvoll ist. Da jedoch aufgrund des weiterhin erfolgenden Einsatzes von fossilem Rohöl

keine sektorübergreifende Klimaneutralität erreicht wird, müssen weitere Schritte erfolgen. Hierfür bieten sich die beiden klimaneutralen Pfade Fischer-Tropsch (FT) und Methanol-to-Synfuels (MtSynfuels) zur Erzeugung von synthetischen Produkten auf der Basis von Erneuerbarem Strom an. Aber insbesondere für den MtSynfuels-Pfad ist eine grundlegende Umstrukturierung der vorhandenen Produktionsprozesse notwendig.

Transformationspfade unterscheiden sich bei der Weiternutzung bestehender Produktionsanlagen, Mengen flüssiger Zwischenprodukte und Flexibilität bei der Plattformchemikalienerzeugung: Auf dem Pfad zur Klimaneutralität können unterschiedliche Rohstoffbasen ausgewählt werden. So kommen als Primärrohstoffe für alle Pfade Strom und Wasser, als Sekundärrohstoffe Wasserstoff und CO₂ oder flüssige Zwischenprodukte in Frage. Im FT-Pfad wird das flüssige Zwischenprodukt FT-Crude eingekauft und im MtSynfuels-Pfad Methanol. Hierbei bedarf Methanol für den gleichen Raffinerieoutput etwa der doppelten Rohstoffmenge. Die Mengen an Primär- bzw. Sekundärrohstoffen sind für den FT- und MtSynfuels-Pfad hingegen gleich. Zusätzlich können im FT-Pfad bestehende Anlagen im Teillastbetrieb weitergenutzt werden. Im MtSynfuels-Pfad kann darüber hinaus das Methanol optional für eine Direkterzeugung von Plattformchemikalien eingesetzt werden.

Strategisch günstige Infrastrukturpositionierung erlaubt eine sichere und flexible Rohstoffversorgung: Durch eine infrastrukturell günstige Positionierung in der Nähe zahlreicher Pipelines, Stromleitungen und Ölterminals können für die Erzeugung von synthetischen Produkten in der Raffinerie Schwedt der Zukunft entweder die Primärrohstoffe Strom und Wasser, die Sekundärrohstoffe Wasserstoff und CO₂ oder flüssige Zwischenprodukte importiert werden. Für die Ausschöpfung von Potentialen bei Erneuerbaren Energien (EE) und Wasser muss jedoch mit Mehrkosten gerechnet und ggf. Engpässe in der Infrastruktur berücksichtigt werden. Auf Sekundärrohstoffbasis müssen ausreichende CO₂-Mengen über entweder Direct Air Capture-Anlagen oder aus Punktquellen sichergestellt werden, wozu u.a. bestehende Erdgasleitungen umgewidmet werden können. Bei flüssigen Zwischenprodukten wären Transportkapazitäten für Methanol doppelt so hoch wie für FT-Crude.

Ausreichende regionale EE-Potenziale für eine Deckung der zukünftigen Nachfrage: Eine Raffinerie Schwedt der Zukunft hat das Potential nachhaltige Gesamtwertschöpfungsketten der Treibstoff-erzeugung sowie Plattformchemikalien und regionale Wärmeversorgung zu etablieren. Um eine klimaneutrale Raffinerie Schwedt zur Erzeugung der nachgefragten Mengen im Zielpfad zu versorgen, wäre ein Strombedarf von bis zu 39 TWh in 2045 nötig. Die Ausschöpfung des Potenzials der erneuerbaren Energien, die aufgrund der Standortbedingungen in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern vorhanden sind, erfordert jedoch einen erheblichen weiteren Zubau an Stromerzeugungs- und Wasserkapazitäten. Damit können weitere regionale Wertschöpfungspotenziale gehoben werden.

Marktanteile an synthetischen Produkten frühzeitig sichern und Produktionskapazitäten skalieren: Durch ein angepasstes Produktportfolio, welches die zukünftige regionale Nachfrage an Kraftstoffen und Plattformchemikalien abdecken soll, reduziert sich die Gesamtkapazität der Raffinerie Schwedt - basierend auf den Prozessen FT, MtSynfuels und ggf. MtO - auf 20% der heutigen Kapazitäten. Durch eine frühe Reaktion und Umrüstung auf klimaneutrale Prozesse könnten jedoch frühzeitig neue Marktanteile für synthetische Produkte gesichert und somit zusätzliche Kapazitäten weiter skaliert werden.

In den nächsten Schritten ist eine detaillierte regionale Bedarfsschätzung für Kerosin, Diesel und Plattformchemikalien bis 2045 vorzunehmen. Ausgehend von einer genauen Bedarfsschätzung kann das Produktportfolio der Raffinerie optimiert werden. Zur Analyse der Konkurrenzfähigkeit sollten die Herstellkosten für die regional synthetisch erzeugte Rohstoffe ermittelt und globalen Herstell- und Importkosten gegenübergestellt werden. Daneben verfügt das Umland über landwirtschaftliche Betriebe und Biogasanlagen, die für eine biogene Kraftstofferzeugung mit einbezogen werden könnten. Unter anderem könnten zukünftig Teilhaber aus dem EE-Bereich wie z.B. die Bioraffinerie Verbio Diesel Schwedt GmbH & Co. KG (NUW) eine zukunftsorientierte Lösung darstellen.

Die Analysen haben gezeigt, dass für die Raffinerie Schwedt verschiedene Optionen bestehen, um als wichtiger Industriestandort in Brandenburg auch künftig erhalten zu bleiben und dabei einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten.

4

Anhang

Appendix

A.1 Status Quo: Existierende Infrastrukturen

Appendix 1.1: Leitungsgebundene Infrastruktur in der Nähe der Raffinerie Schwedt: Öl- und Erdgasleitungen, deren Transportmedium, Verlauf (von/nach), Kapazität und Distanz zwischen der Leitung und der Raffinerie Schwedt.

Bezeichnung der Leitung	Medium	Status	Von	Nach	Kapazität	Distanz	Quelle
Druhza-Ölleitung	Rohöl	In Betrieb	Russland	Schwedt	20-22,5 Mio.t/Jahr	0 km	[7, 30]
PCK Raffinerie GmbH	Rohöl	In Betrieb	Rostock	Schwedt	3-6,8 Mio.t/Jahr	0 km	[7, 30]
MVL Rohölleitung	Rohöl	In Betrieb	Schwedt	Spergau/Leuna	4,8-13,5 Mio.t/Jahr	0 km	[7]
Produktleitung	Produktöl	In Betrieb	Schwedt	Berlin		0 km	[7]
Europäische Gas-Anbindungsleitung (EUGAL)	Erdgas	In Betrieb	Greifswald (LNG Terminal) 5	Olbernhau	55 Mrd. m ³ p.a	20 km	[1, 30]
Ostsee-Pipeline-Anbindungsleitung (OPAL)	Erdgas	In Betrieb	Greifswald (LNG Terminal) 6	Olbernhau	35 Mrd. m ³ p.a.	30 km	[1, 30]
Doldna-Oder-Kraftwerksanbindung	Erdgas	In Planung	Swinemünde, Polen (LNG Terminal)	Nowe Czarnowo, Polen	(8,4 MPa)	30 km	[7]
Jamal-Gas-Anbindungsleitung (JAGAL)	Erdgas	In Betrieb	Mallnow, Brandenburg	Rückersdorf, Thüringen	24 Mrd. m ³ p.a.	100 km	[7]
220-kV-Leitung Pasewalk-Vierraden	El. Strom	In Betrieb	Pasewalk	Bertikow-Vierraden	220 kV	5 km	[8]
380-kV-Leitung Krajnik-Vierraden	El. Strom	In Betrieb	Krajnik, Polen	Vierraden	380 kV	5 km	[8]
Uckermarkleitung	El. Strom	In Planung	Vierraden	Neuenhagen	380 kV	5 km	[8]

⁵ LNG-Terminal vor Lubmin: Dezember 2022 voraussichtliche Inbetriebnahme durch RWE und Stena-Power [1].

⁶ LNG-Terminal vor Lubmin: Dezember 2022 voraussichtliche Inbetriebnahme durch RWE und Stena-Power [1].

Appendix 1.2: Häfen in der Nähe der Raffinerie Schwedt: Größe, möglicher Eisstand, Verfügbarkeit eines Ölterminals und Distanz zur Raffinerie Schwedt [31].

Hafen	Hafengröße	Eisstand	Ölterminal	Distanz (Luftlinie)
Stettin (Polen)	M	Nein	Ja	45 km
Swinemünde (Polen)	S	Nein	Ja	90 km
Rostock	L	-	Ja	180 km
Wismar	S	Ja	Ja	205 km
Hamburg	L	Ja	Ja	290 km
Kiel	L	Nein	Ja	300 km
Bützfleth	S	-	Ja	320 km
Gdingen (Polen)	L	Nein	Ja	325 km
Danzig (Polen)	L	Ja	Ja	325 km
Polnocny (Polen)	M	Ja	Ja	330 km
Brunsbüttel am Elbehafen	XS	Nein	Ja	350 km
Brunsbüttel Kanal	S	Ja	Ja	350 km
Bremen	L	Nein	Ja	365 km
Flensburg	S	Nein	Ja	365 km
Nordenham	S	Ja	Ja	380 km
Wilhelmshaven	S	Nein	Ja	405 km
Emden	M	Nein	Ja	470 km

Innerhalb von 205 km Luftlinie befinden sich vier Häfen unterschiedlicher Größe in Deutschland und Polen, die über Ölterminals verfügen: Der mittelgroße Hafen Stettin (45 km Entfernung von der Raffinerie Schwedt), der Kleinhafen Swinemünde (90 km), der Großhafen Rostock (180 km) und der Kleinhafen Wismar (205 km). In Deutschland befinden sich insgesamt zwölf Häfen mit Anschluss an ein Ölterminal 194 bis 531 km von der Raffinerie Schwedt entfernt [31]. Zudem ist der nahegelegene Großhafen Rostock direkt über eine Ölleitung mit der Raffinerie Schwedt verbunden. Die Oder (10 km) bildet eine natürliche Grenze zwischen Polen und Deutschland und bietet Zugang zum baltischen Meer. Extremes Niedrig- und Hochwasser sowie Eisstand führen jedoch dazu, dass die Oder zwischen Schwedt und Stettin für durchschnittlich drei Monate im Jahr nicht befahrbar ist [32]. Polen verfügt über insgesamt fünf Ölterminals, die 45 bis 330 km von der Raffinerie Schwedt entfernt sind, wobei der Zugang zum nahegelegenen Hafen Swinemünde durch Eisstand behindert werden kann [31, 33].

A.2 Zukünftige PtL- und Kerosinbedarfe

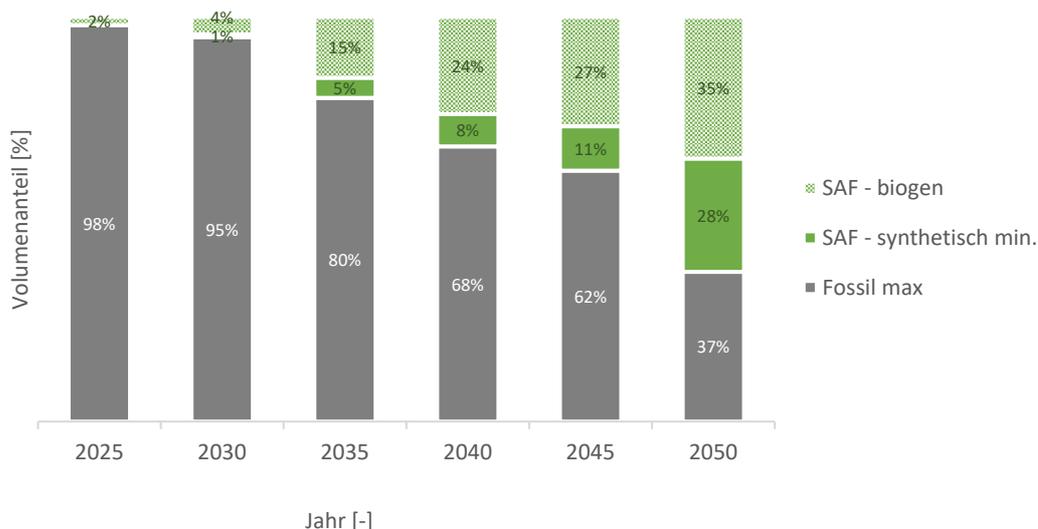
Appendix 2.1: PtL-Bedarfe in den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie in Deutschland für 2030 und 2045 basierend auf dem Vergleich der BIG5-Studen durch Ariadne [15].⁷

	2030		2045	
	Spannweite in TWh	Median in TWh	Spannweite in TWh	Median in TWh
Nationaler Verkehr	0-47	2	0-90	32
Internationaler Verkehr	0-3	2	0-106	80
Industrie	0-17	0	0-173	35
Gebäude	0-0,5	0	0-33	0
Total	0-57	3	0-305	164

Appendix 2.2: Bedarfe für heutiges fossil produziertes Kerosin und zukünftig klimaneutrales Kerosin für den nationalen und internationalen Flugverkehr in Deutschland für 2030 und 2045 bzw. 2050 basierend auf den BIG 5-Studien [10–14, 19] sowie der PtL-Roadmap der Bundesregierung [34] und des Vorschlags der Europäischen Kommission für die EU[17].⁸

	2019	2030			2045 bzw. 2050			Quelle
	in TWh	Spannweite in TWh	Median in TWh	Anzahl Szenarien	Spannweite in TWh	Median in TWh	Anzahl Szenarien	
Umweltbundesamt	110	-	-	-	-	-	-	[16]
Bundesregierung		2,4	2,4	1	k.A.	-	-	[18]
BIG 5 Studien		0,1-20	1	5	15-130	113	9	[10–14, 19]
Europ. Kommission		6	6	1	42 bzw. 69	42 bzw. 69	1	[17]

Appendix 2.3: Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments für einen nachhaltigen Luftverkehr: Anteile SAF (synthetische und biogene Anteile) an Flugkraftstoffen 2025-2050 in Europa [17].

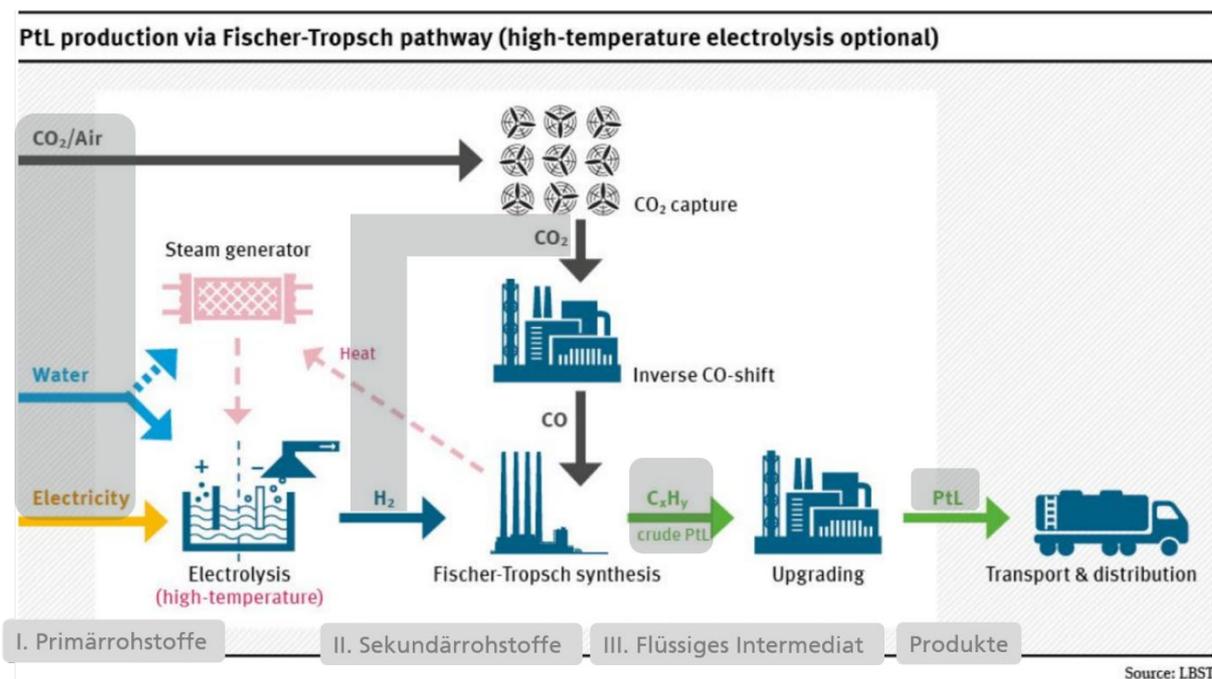


⁷ Aufgezeigt sind die sektoralen Nachfragen von 7 ausgewählten Szenarien als Spannweiten und Durchschnitt (Median). In der Industrie ist die stoffliche Nutzung von PtL berücksichtigt.

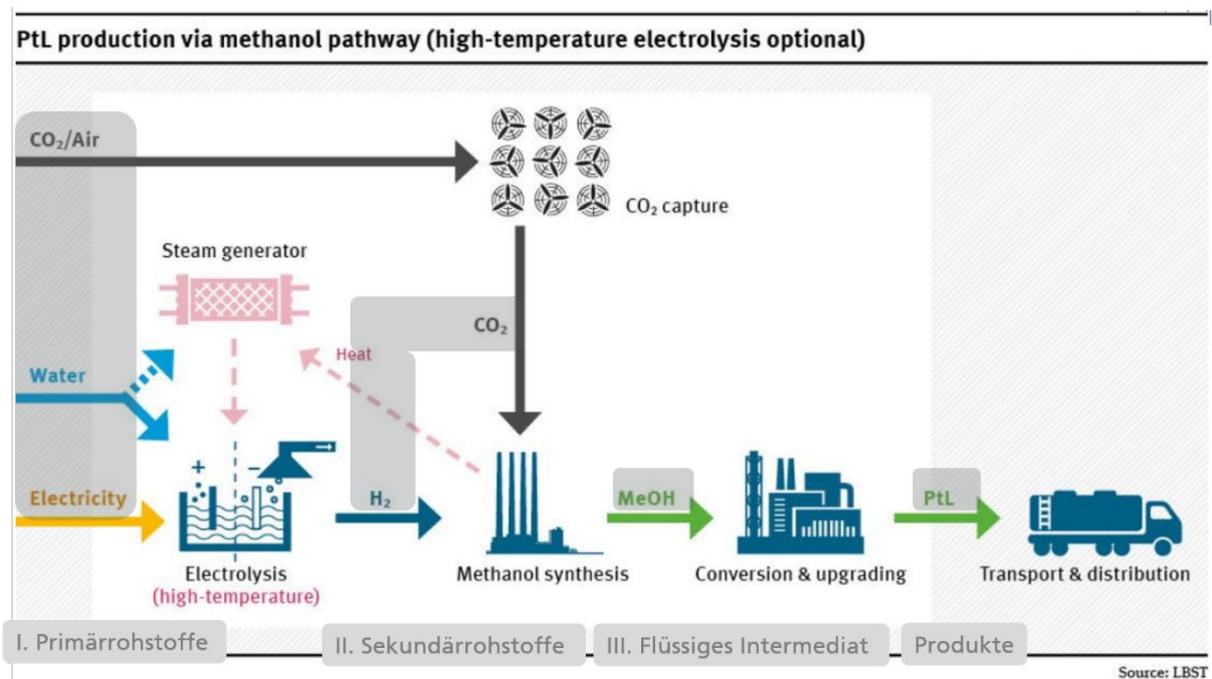
⁸ Aufgezeigt sind die Nachfragen von bis zu neun Szenarien aus fünf der BIG5-Studien als Spannweiten und Durchschnitt (Median). Die Ergebnisse der Langfristszenarien des ISI haben 2050 als Zielerreichungsjahr für Klimaneutralität, die anderen BIG5-Studien 2045. Die Szenarien Strom und Wasserstoff der Ariadne-Studie bleiben hierbei unberücksichtigt, da für den Flugverkehr keine direkte Strom- oder Wasserstoffanwendung postuliert werden. Dabei werden die Anteile an synthetischem und biogenem Kerosin in diesen Studien nicht weiter spezifiziert.

A.3 Klimaneutrale PtL-Produktionspfade

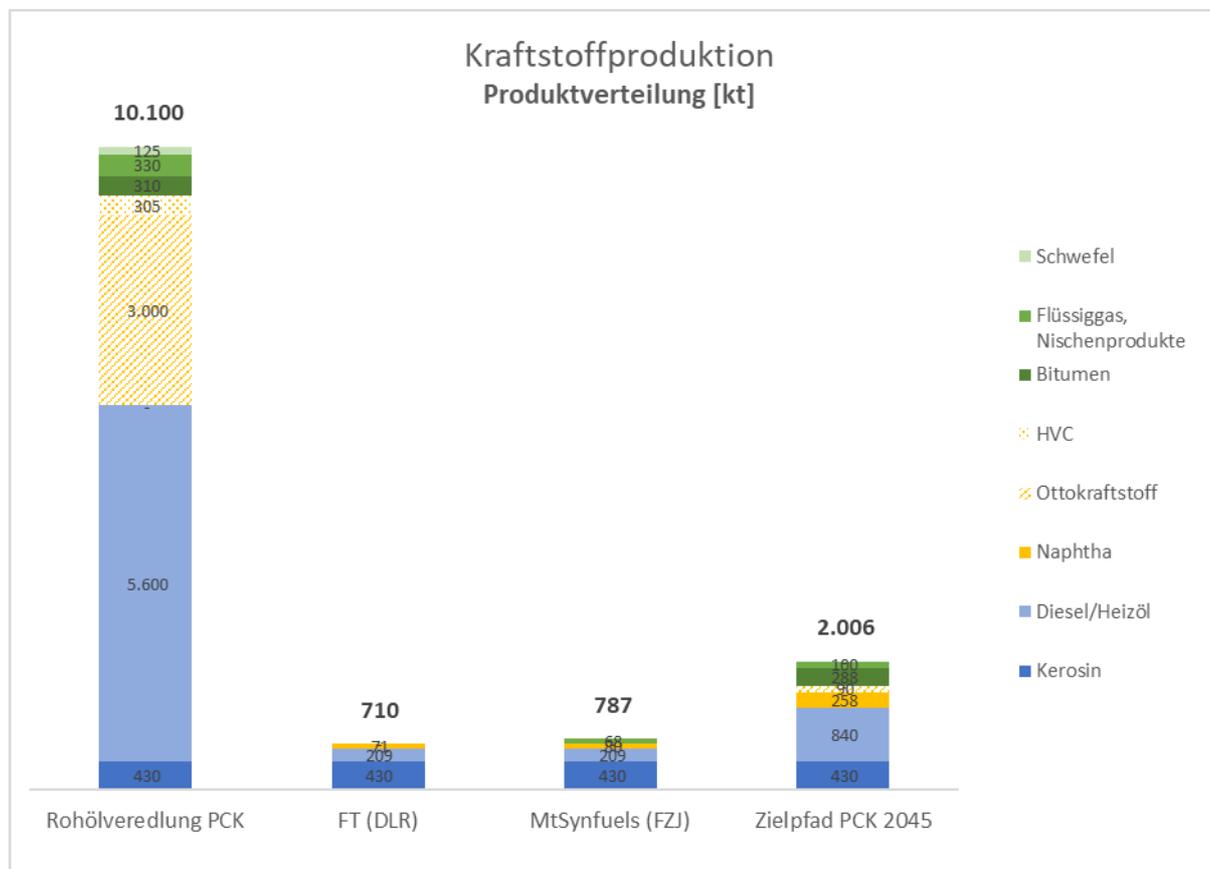
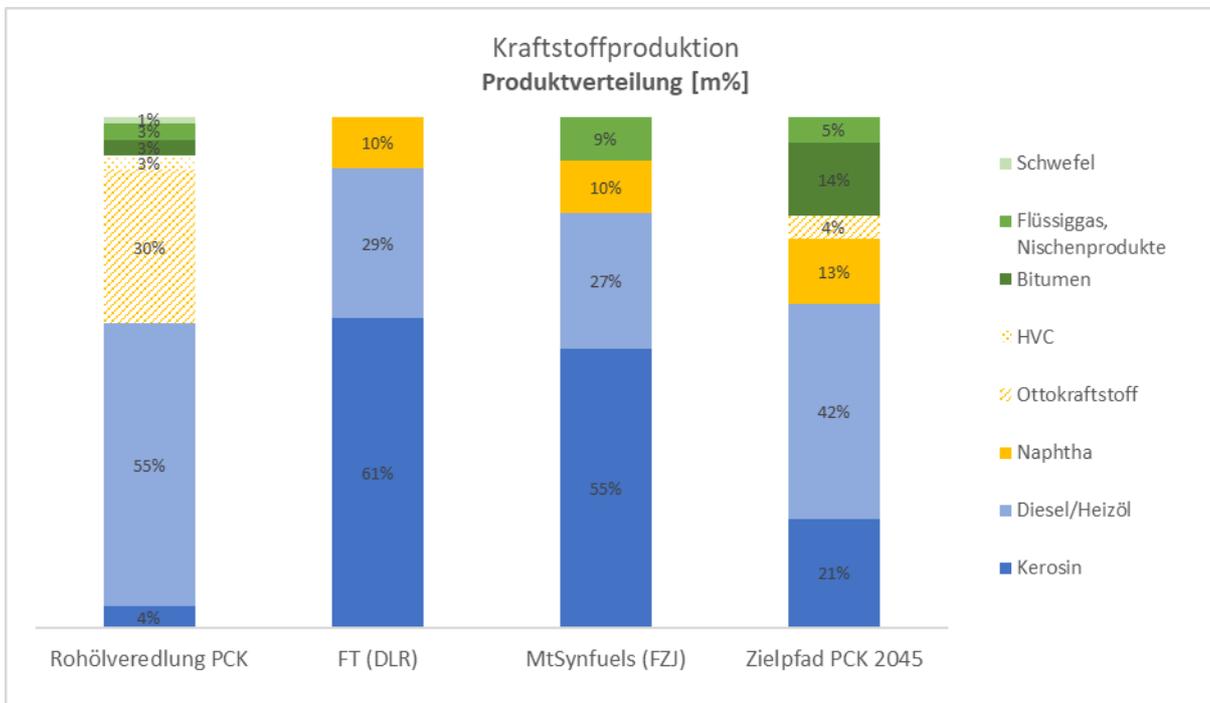
Appendix 3.1: Produktion von synthetischen Kraftstoffen im Fischer-Tropsch-Pfad [35]. Eigene Ergänzung um Rohstoffarten und Produkte (grau).



Appendix 3.2: Produktion von synthetischen Kraftstoffen im Methanol-Pfad [32]. Eigene Ergänzung um Rohstoffarten und Produkte (grau).



Appendix 3.3: Produktverteilungen bei der Kraftstoffherzeugung im konventionellen Pfad und potentiellen klimaneutralen Pfaden in der Raffinerie Schwedt [5, 20, 36].⁹



⁹ Naphtha kann zu Ottokraftstoffen und/oder HVC weiterverarbeitet werden. Im Zielpfad wird ein klimaneutraler Pfad (FT oder MtSynfuels) verwendet, bei dem die Produktverhältnisse an die Marktnachfrage in 2045 angepasst sind; die Hälfte der HVC wird über MtO hergestellt. Für die Bitumenerzeugung muss eine biogene Anlage errichtet werden.

A.4 Klimaneutrale Rohstoffbedarfe zur PtL-Erzeugung in Schwedt

Appendix 4.1: Strategische klimaneutrale Sourcingoptionen zur Rohstoffdeckung je Technologiepfad. ¹⁰

Technologiepfad	Produktion in kt	Rohstoffversorgung			
		Strategie	Ad-hoc	2030	2045
a. Rohölveredlung (Erdgassubstitution)	Kerosin 430	Make	Kleinelektrolyse	0,1 GW Elektrolyse (0,8 TWh H ₂)	Klimaneutralität wird nicht erreicht
	Diesel/Heizöl 5.600				
	Otto-KS 3.000				
	HVC 305	Buy (Import)	Verhandlungen für 2030: H ₂	23 kt H ₂ (0,8 TWh)	Klimaneutralität wird nicht erreicht
	Schwefel 125				
	Bitumen 310				
b. Zielpfad	Kerosin 430	Make	Kleinelektrolyse + DAC-Miniplant	0,03 GW Elektrolyse (0,2 TWh H ₂) + 52 kt DAC-Pilotplant	3,1 GW Elektrolyse + 5.180 kt DAC-Megaplant
	Diesel/Heizöl 840				
	Otto-KS 90				
	HVC 358	Buy (Import)	Verhandlungen für 2030: H ₂ und CO ₂ ODER FT-Crude oder Methanol	7 kt H ₂ (0,2 TWh) + 52 kt CO ₂ ODER 17 kt FT-Crude ODER 53 kt Methanol	734 kt H ₂ (0,2 TWh) + 5.180 kt CO ₂ ODER 1718 kt FT-Crude ODER 5180 kt Methanol
	Schwefel 0				
	Bitumen 288				

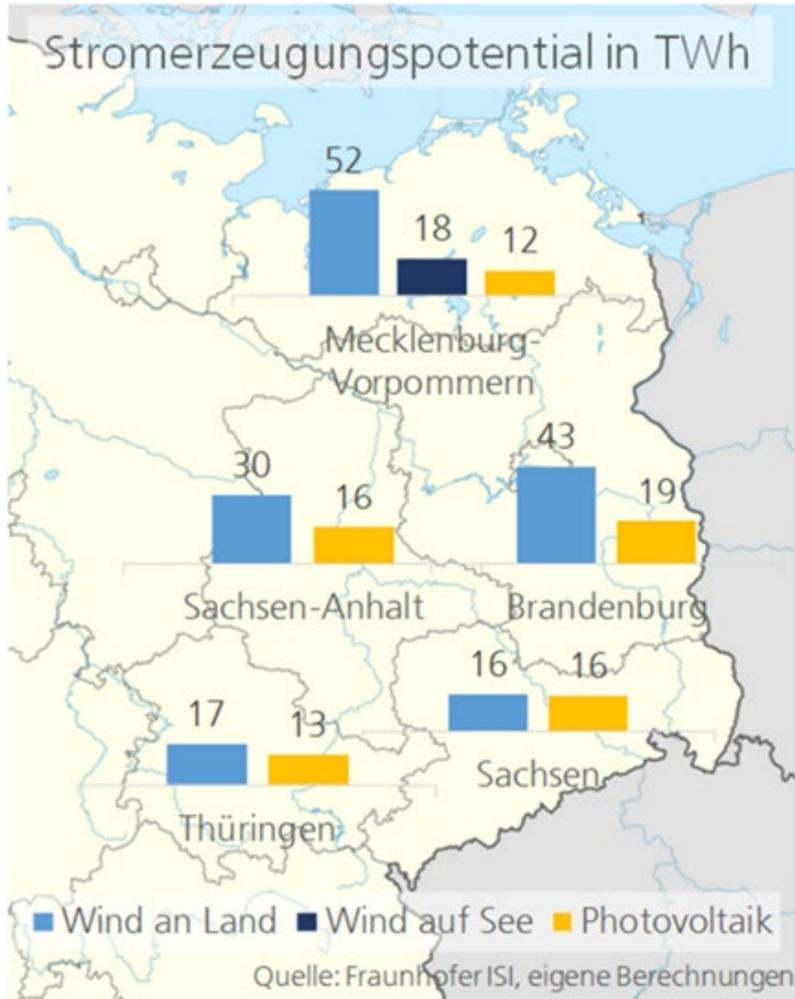
Appendix 4.2: Rohstoffbedarfe für die Kerosinproduktion der zukünftigen Raffinerie Schwedt auf Basis von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff. ¹¹

Technologiepfad	Jahr	I. Primärrohstoffe		II. Sekundärrohstoffe		III. Flüssiges Zwischenprodukt	Quelle
		Wasser	El. Strom	H ₂	CO ₂	b. FT crude, c. Methanol	
		kt	TWh	kt	kt	kt	
a. Rohölveredlung (Erdgassubstitution)	2030	203	1	23	-	-	[5, 21, 37]
	2045	-	.	-	-		
b. Zielpfad	2030	66	0,4	7	22	51	[36]
	2045	6.563	38	734	2.242	5.180	[20, 36]

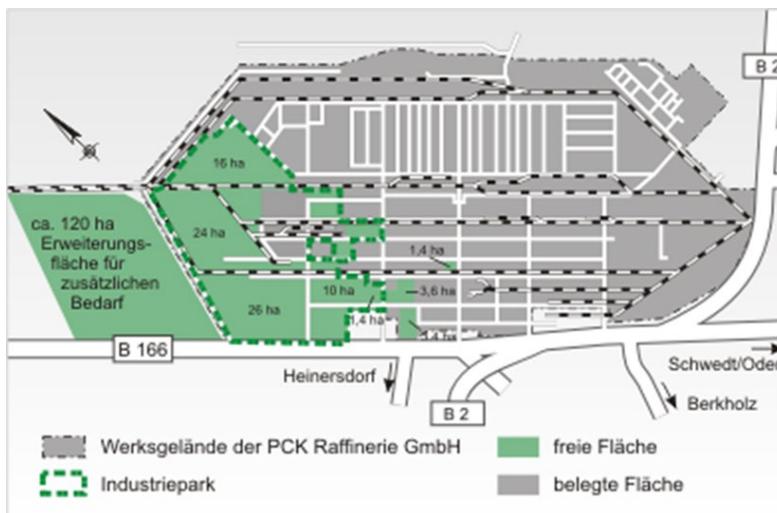
¹⁰ Annahmen: 8.000 Betriebsstunden; Der Zielpfad beschreibt eine nachfrageorientiertes Produktportfolio für 2045. Für die Berechnungen im Zielpfad ist die FT-Synthese zugrunde gelegt. HVC (engl.: High Value Chemicals, oder Plattformchemikalien) enthalten Nischenprodukte. Biogene Anlagen werden zur Erzeugung von Bitumen verwendet. Es wurden folgende Konversionsfaktoren verwendet: 0,44 t H₂ je t FT-Crude, 3 t CO₂ je t FT-Crude, der Elektrolyseur hat eine Effizienz von 67% [36].

¹¹ Annahmen: 8.000 Betriebsstunden; Der Zielpfad beschreibt eine nachfrageorientiertes Produktportfolio für 2045. Für die Berechnungen im Zielpfad ist die FT-Synthese zugrunde gelegt. HVC (engl.: High Value Chemicals, oder Plattformchemikalien) enthalten Nischenprodukte. Biogene Anlagen werden zur Erzeugung von Bitumen verwendet. Es wurden folgende Konversionsfaktoren verwendet: 0,44 t H₂ je t FT-Crude, 3 t CO₂ je t FT-Crude, der Elektrolyseur hat eine Effizienz von 67% [36].

Appendix 4.3: Stromerzeugungspotentiale für Ostdeutschland in TWh [26]



Appendix 4.4: Flächennutzung und zusätzlich nutzbare Freiflächen im Industriepark Schwedt [27]



Literaturangaben

- [1] DPA: *Energie: Bund: RWE und Stena-Power betreiben LNG-Terminal vor Lubmin*. In: *Die Zeit* (2022-08-01)
- [2] TAGESSCHAU: *Woher das Rohöl künftig kommen soll* (2022). URL <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/oelversorgung-schwedt-rosneft-russland-embargo-101.html> – Überprüfungsdatum 2022-09-28
- [3] SPIEGEL: *Investoren melden Interesse an Öltraffinerie in Schwedt an*. URL <https://www.spiegel.de/wirtschaft/investoren-melden-interesse-an-oelraffinerie-in-schwedt-an-a-977e66f2-a2a9-47cc-aa82-3155d069e674>. – Aktualisierungsdatum: 2022-09-28
- [4] ECOREPORTER: *Wasserstoff-Pläne: Enertrag will Öltraffinerie in Schwedt umbauen*. URL <https://www.ecoreporter.de/artikel/enertrag-will-%C3%B6ltraffinerie-in-schwedt-umbauen/> – Überprüfungsdatum 2022-09-28
- [5] PCK: *PCK - Spitzen-Raffinerie in Europa : Unternehmenswebseite*. URL <https://www.pck.de/unternehmen>. – Aktualisierungsdatum: 2022-09-08 – Überprüfungsdatum 2022-09-08
- [6] STATISTA: *Erdölverbrauch in Deutschland bis 2021*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36171/umfrage/verbrauch-von-erdoel-in-deutschland-seit-1990/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-07-17 – Überprüfungsdatum 2022-07-17
- [7] MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E. V. (Hrsg.): *Mineralölversorgung mit Pipelines*. Februar 2021
- [8] VDE: *Deutsches Höchstspannungsnetz : Online-Karte*. 17.09.2022
- [9] GLOBAL ENERGY MONITOR: *Global Gas Infrastructure Map : Tracker Map*. URL <https://globalenergymonitor.org/projects/global-gas-infrastructure-tracker/tracker/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-06-22 – Überprüfungsdatum 2022-09-28
- [10] BDI (Hrsg.): *Klimapfade 2.0 : Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. Gutachten für den BDI (BCG). 21.10.2021
- [11] DENA: *dena-Leitstudie : Aufbruch Klimaneutralität*. Abschlussbericht. 2021
- [12] KRAIL, Michael ; SPETH, Daniel ; GNANN, Till ; WIETSCHEL, Martin; Consentec GmbH (Mitarb.); ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Mitarb.); Technische Universität Berlin (Mitarb.) : *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland : Treibhausgasneutrale Hauptszenarien - Modul Verkehr*. Karlsruhe, 2021
- [13] PROGNOSE ; ÖKO-INSTITUT ; WUPPERTAL-INSTITUT: *Klimaneutrales Deutschland 2045 : Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. June 2021
- [14] STREFLER, J. ; MERFORT, A. ; FUSS, S. ; KALKUHL, M. ; GRUNER, F.: *Ariadne-Report : Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045*. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam, 2021

Literaturangaben

- [15] ARIADNE: *Szenarien zur Klimaneutralität: Vergleich der „Big 5“-Studien : Datenanhang, Version 1.0*. URL <https://ariadneprojekt.de/news/big5-szenarienvergleich/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-03-17 – Überprüfungsdatum 2022-09-15
- [16] UMWELTBUNDESAMT: *Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs*. URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#endenergieverbrauch-steigt-seit-2010-wieder-an>. – Aktualisierungsdatum: 2022-09-17 – Überprüfungsdatum 2022-09-17
- [17] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr : Anhänge*. Brüssel, 14.07.2021 ({SEC(2021) 561 final} - {SWD(2021) 633 final} - {SWD(2021) 634 final})
- [18] HABE, David: *EU-Kommission für höhere SAF-Quoten und Umweltkennzeichnung von Flugzeugen*. In: *airliners.de* (2022-07-07)
- [19] FLEITER, Tobias ; MANZ, Pia ; NEUWIRTH, Marius ; HERBST, Andrea: *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 : Modul Industrie*. Karlsruhe, Dezember 2021
- [20] HÖHLEIN, Bernd ; GRUBE, Thomas ; BIEDERMANN, Peter ; BIELAWA, Hubert ; ERDMANN, Georg ; SCHLECHT, Ludmilla ; ISENBERG, Gerhard ; EDINGER, Raphael: *Methanol als Energieträger*. Schriften des Forschungszentrums Jülich. FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH (Hrsg.); Lurgi Öl-Gas-Chemie GmbH (Mitarb.); Technische Universität Berlin (Mitarb.); DaimlerChrysler AG (Mitarb.) . 2003
- [21] DENA: *Factsheet Erdölraffinerie*. In: *Einsatzgebiete für Power Fuels* (2018). URL https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/Factsheet_PowerFuels_Erdoelraffinerie.pdf – Überprüfungsdatum 2022-08-03
- [22] NEUWIRTH, Marius ; FLEITER, Tobias ; MANZ, Pia ; HOFMANN, René: *The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany*. In: *Energy Conversion and Management* 252 (2022), S. 115052
- [23] MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND KLIMASCHUTZ: *Wasser in Brandenburg*. URL <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/umwelt/wasser/wasser-in-brandenburg/#>. – Aktualisierungsdatum: 2022-10-19 – Überprüfungsdatum 2022-10-19
- [24] TAGESSCHAU: *Anhaltende Trockenheit: Warum in Brandenburg das Wasser knapp wird*. In: *tagesschau.de* (2022-06-27)
- [25] MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES BRANDENBURG: *Klimawandelmonitoring im Land Brandenburg : Basisbericht*. In: *Fachbeiträge des Landesamtes für Umwelt* (2018), Nr. 154. URL https://lfu.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/fb_154.pdf – Überprüfungsdatum 2022-10-19

Literaturangaben

- [26] RAGWITZ, Mario ; KSCHAMMER, Kristin ; HANKE, Anja ; PFLUGER, Benjamin ; UNGER, Alexander ; WIETSCHEL, Martin ; NEUWIRTH, Marius ; ZENKER, ANDREA, HORVAT, DJERDJ ; JAHN, Matthias: *H2 Masterplan Ostdeutschland : Bericht*. URL <https://h2-masterplan-ost.de/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-09-17 – Überprüfungsdatum 2022-09-17
- [27] KUMMUNALE WIRTSCHAFTSFÖRDERUNG: *Industriepark Schwedt*. URL <https://www.schwedt.eu/de/investoren/industrie-und-gewerbeflaechen/industriepark-schwedt/108639>. – Aktualisierungsdatum: 2015-02-21 – Überprüfungsdatum 2022-10-25
- [28] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GRENZFLÄCHEN- UND BIOVERFAHRENSTECHNIK IGB: *TotalEnergies, Sunfire und Fraunhofer geben den Startschuss für grünes Methanol in Leuna*. 15.06.2021. URL <https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2021/totalenergies-sunfire-und-fraunhofer-geben-den-startschuss-fuer-gruenes-methanol-in-leuna.html> – Überprüfungsdatum 2022-03-08
- [29] VAN ALST, Melain: *Produktion von Methanol erhöhen: Raffinerie Leuna investiert 300 Millionen Euro*. In: *mz.de* (2019-04-26)
- [30] GLOBAL ENERGY MONITOR: *Tracker Map : Global Oil Infrastructure Tracker*. URL <https://globalenergymonitor.org/projects/global-oil-infrastructure-tracker/tracker-map/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-06-22 – Überprüfungsdatum 2022-09-10
- [31] MARITIME SAFETY OFFICE: *World Port Index*. URL <https://msi.nga.mil/Publications/WPI>. – Aktualisierungsdatum: 2022-09-01 – Überprüfungsdatum 2022-09-08
- [32] GALOR, Wieslaw: *The Analysis of the Possibility of Navigation the Sea-River Ships on the Odra River*. In: WEINTRIT, Adam (Hrsg.): *Marine Navigation : Proceedings of the 12th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav 2017), June 21-23, 2017, Gdynia, Poland*. London : CRC Press, 2017, S. 321–325
- [33] GOOGLE MY MAPS: *World Ports*. URL https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1QsYE6qNJ3j9toDihR7biVdAyui0&hl=en_US&ll=53.833197881031104%2C13.028814722923462&z=9. – Aktualisierungsdatum: 2022-09-08 – Überprüfungsdatum 2022-09-08
- [34] BUNDESREGIERUNG; NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Mitarb.): *PtL-Roadmap*. 04/2021
- [35] GERMAN ENVIRONMENT AGENCY: *Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives* (2016). URL https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/16_1005_uba_hintergrund_ptl_barrierefrei.pdf – Überprüfungsdatum 2022-09-18
- [36] ARNDT, Christoph ; NEULING, Ulf ; VORSATZ, Martin ; PRAUSE, Juliane: *Konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe : Abschlussbericht*. 10.08.2021
- [37] Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg: *Wasserstoffatlas*. URL <https://wasserstoffatlas.de/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-07-20 – Überprüfungsdatum 2022-09-07