



Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

SWK E² Working Paper 3/2022

Nullemissionen-Luftfahrt im Jahr 2050:
Elektrischer Energiebedarf zur Herstellung von
strombasierten Treibstoffen

Jonas Schwarz

September 2022

SWK E²

Institut für Energietechnik und Energiemanagement

Hochschule Niederrhein

SWK E2 Institut für Energietechnik und Energiemanagement

Hochschule Niederrhein

Reinarzstraße 49

47805 Krefeld

Tel.: +49 (0) 2151-822 6693

E-Mail: energiezentrum@hs-niederrhein.de

Internet: <https://www.hs-niederrhein.de/swk-e2/publikationen/>

Jonas Schwarz

E-Mail: jonas.schwarz@stud.hn.de

ISSN: 2751-0050

Diese Working Paper Reihe wird von dem an der Hochschule Niederrhein angesiedelten SWK E2 Institut für Energietechnik und Energiemanagement herausgegeben. Die Urheberrechte verbleiben bei den Autorinnen und Autoren. Inhalte und Meinungen in Artikeln sind die der jeweiligen Autorin bzw. des jeweiligen Autors und geben nicht die Ansichten Instituts oder der Hochschule wieder.

Die Autorinnen und Autoren erklären hiermit, dass im Rahmen dieser Arbeit kein materieller oder immaterieller Interessenkonflikt vorliegt.

Abstract

Der massive Einsatz von strombasierten Treibstoffen wird nötig sein, um eine Netto-Nullemissionen Luftfahrt bis Mitte des Jahrhunderts zu ermöglichen und konform mit den Pariser Klimaschutzziele zu sein. Selbst die Einführung von nachhaltigen Antriebssystemen, hohen Effizienzsteigerungen sowie einem intensiven Einsatz von Biomasse-Treibstoffen lässt diese Notwendigkeit bestehen. Die Höhe des elektrischen Energiebedarfs zur Dekarbonisierung der Luftfahrt hängt dabei von vielen Faktoren ab. Die vorliegende Arbeit untersucht diese Faktoren, um anschließend unter Betrachtung verschiedener Szenarien den Energiebedarf zur Herstellung von strombasierten Treibstoffen im Jahr 2050 zu ermitteln.

Schlagwörter: Nachhaltige Treibstoffe, Luftfahrt, Power-to-Liquid, Dekarbonisierung

Inhalt

1. Einleitung.....	4
2. Einfluss der Luftfahrt auf den Klimawandel.....	5
3. Strombasierte Treibstoffe im Kontext einer Nullemissionen-Luftfahrt.....	6
4. Bedarf an strombasierten Treibstoffen	8
4.1 Szenarienbetrachtung	8
4.2 Verfügbarkeit von Biotreibstoffen.....	10
5. Herstellungsverfahren und Wirkungsgrad des PtL-Prozesses	11
5.1 Wasserelektrolyse.....	12
5.2 Direct Air Capture	13
5.3 Reverse Wassergas-Shift-Reaktion.....	13
5.4 Fischer-Tropsch-Synthese	14
5.5 Gesamtwirkungsgrad.....	14
6. Energiebedarf von strombasierten Treibstoffen im Jahr 2050	15
7. Diskussion.....	16
8. Fazit und Ausblick.....	17
Literaturverzeichnis.....	19

1. Einleitung

Das bei der *United Nations Climate Change Conference* im Jahr 2015 vereinbarte Ziel, die Erderwärmung auf unter 2°C zu begrenzen, erfordert eine deutliche Reduktion der Treibhausgase aller Sektoren (UNFCCC, 2015). Das gilt auch für die Luftfahrtindustrie, die etwa 2,5% der weltweiten Kohlenstoffdioxid-Emissionen verursacht (DLR, 2020). Diese hat sich das unverbindliche Ziel gesetzt, bis 2050 eine Netto-Nullemissionen-Luftfahrt zu erreichen. Als Vertreter der Industrie hat die *Air Transport Action Group* (ATAG) dazu einen Pfad erarbeitet, der in Abbildung 1 ersichtlich ist (ATAG, 2020).

Dabei werden operative Effizienzsteigerungen sowie technologische Weiterentwicklungen (z.B. Wasserstoffflugzeuge) im Jahr 2050 voraussichtlich nur einen geringen Beitrag zur

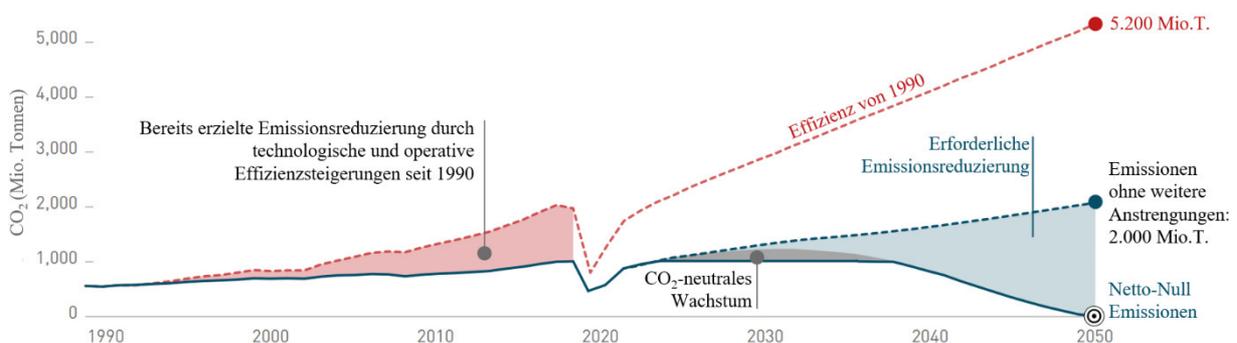


Abbildung 1: Pfad zu einer Netto-Nullemissionen-Luftfahrt im Jahr 2050 (Eigene Darstellung nach ATAG, 2020)

Emissionsreduzierung leisten können. Zudem wird das prognostizierte, starke Wachstum in den nächsten Dekaden die CO₂-Bilanz der Luftfahrt zusätzlich belasten (ATAG, 2020; Hasan et. al, 2021). Diese große Lücke lässt sich nur durch eine Transformation zu nachhaltigen Treibstoffen schließen. Die nachhaltigen Treibstoffe dürfen dabei keine Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus und ausreichend Produktionskapazität aufweisen (Schmidt et. al, 2018).

Bislang basieren nachhaltige Treibstoffe für die Luftfahrt hauptsächlich auf Biomasse. Diese werden voraussichtlich auch im Jahr 2050 einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Durch die limitierten Biomasse-Ressourcen reicht diese Art der nachhaltigen Treibstoffe jedoch nicht aus (ETC, 2021; O'Malley et. al, 2021).

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von nachhaltigen Treibstoffen ist das Power-to-Liquid (PtL)-Verfahren. Durch das PtL-Verfahren können strombasierte Treibstoffe hergestellt werden, die durch die Nutzung erneuerbarer Elektrizität sowie die Gewinnung von CO₂ aus der Atmosphäre den Kohlenstoffdioxid-Kreislauf schließen (Agora Verkehrswende et. al, 2018). Voraussichtlich stellen diese nachhaltigen, strombasierten Treibstoffe die wichtigste Säule zur Dekarbonisierung der Luftfahrt im Jahr 2050 dar (Arif Hasan et. al, 2021; ATAG, 2020).

Um ausreichend strombasiertes Kerosin herstellen zu können, werden große Mengen elektrischer Energie benötigt. Diese Arbeit soll den Gesamtenergiebedarf analysieren, um eine Netto-Nullmissionen-Luftfahrt im Jahr 2050 zu ermöglichen. Dabei wird folgende Methodik angewandt: Zunächst wird die Quantität des benötigten, nachhaltigen Kerosins bestimmt. Anschließend wird untersucht, wieviel davon mit biomassebasiertem und wieviel mit strombasiertem Kerosin voraussichtlich gedeckt werden wird. Um abschließend den elektrischen Energiebedarf zu bestimmen, wird der PtL-Produktionsprozess und dessen Gesamtwirkungsgrad analysiert.

2. Einfluss der Luftfahrt auf den Klimawandel

Etwa 2,5% der weltweiten, anthropogenen CO₂-Emissionen entfielen im Jahr 2018 auf den Luftfahrsektor (DLR, 2020). Von diesen 2,5% verursachten Mittel- und Langstreckenflüge den Großteil. Abbildung 2 veranschaulicht die Verteilung der CO₂-Emissionen in Europa nach Flugdistanz. Dabei entfielen 70% der Flüge im Jahr 2019 auf Strecken unter 1.500km. Diese machten jedoch nur 25% der Emissionen aus. Weit mehr Emissionen verursachten Langstreckenflüge über 5.000km mit etwa 44% der Gesamtemissionen (Eurocontrol, 2020). Weltweit ergibt sich eine vergleichbare Verteilung der Emissionen. Im Jahr 2018 waren die

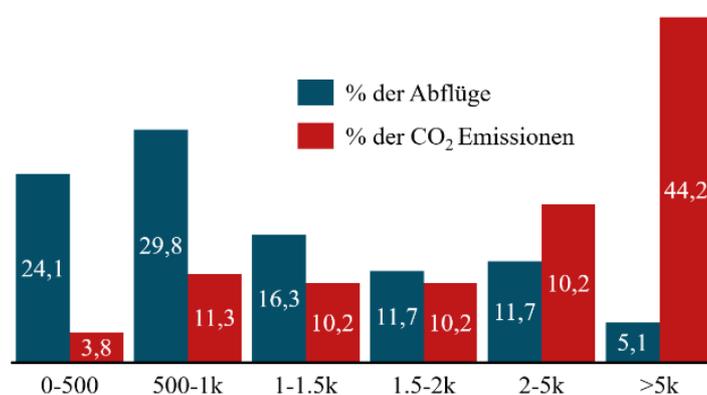


Abbildung 2: Verteilung der Emissionen nach Flugdistanz in Europa (Eigene Darstellung nach Eurocontrol, 2020)

Mittel- und Langstreckenflugzeuge (Flugzeuge ab 165 Sitzplätzen) für 73% der weltweiten Emissionen der Luftfahrt verantwortlich (FCH JU, 2020).

Neben dem Kohlenstoffdioxid entstehen weitere klimarelevante Emissionen wie Stickoxide, Wasserdampf, Ruß, Sulfat-Aerosolpartikel und Kondensstreifen sowie Kondensstreifen-Zirren. Die Wirkung dieser klimarelevanten Emissionen wirkt insgesamt kürzer als Kohlenstoffdioxid, hat dafür aber kurzfristig einen stärkeren Effekt. Das Konfidenzniveau der Effekte von Nicht-CO₂-Treibhauspotenzialen der Luftfahrt ist noch gering. Auch wenn die Effekte zukünftig weiter untersucht werden müssen, gehen erste Schätzungen von einem CO₂-Äquivalent/CO₂ für einen Zeitraum von 20 Jahren von 4 aus. Langfristig (Zeitraum von 100 Jahren) sinkt das CO₂-Äquivalent/CO₂ auf 1,7. Der Einfluss des Luftverkehrs auf die globale Erderwärmung erhöht sich dadurch auf 5 bis 10% (DLR, 2020; FCH JU, 2020; Lee et. al, 2021).

3. Strombasierte Treibstoffe im Kontext einer Nullemissionen-Luftfahrt

Bei der Entwicklung von klimaneutralen Technologien kommt in der Luftfahrt dem Energieträger eine außerordentliche Bedeutung zu. So ist der Energiebedarf eines Flugzeugs hoch, gleichzeitig ist aber das verfügbare Volumen und die mitzuführen Masse limitiert. Wie in Abbildung 3 ersichtlich ist, weist Kerosin eine gravimetrisch und volumetrisch hohe Energiedichte auf. Diese für ein Flugzeug wichtige Eigenschaften machen den Einsatz eines Alternativenergieträgers zu einer Herausforderung und verhindert die Einbindung von Nullemission-Technologien, die in anderen Sektoren bereits Anwendung finden (Bauen et. al, 2020; DLR, 2020).

Wasserstoff hat eine höhere gravimetrische Dichte im Vergleich zu Kerosin, jedoch ist die volumetrische Dichte bedeutend geringer. Um die volumetrische Dichte zu erhöhen, kann Wasserstoff verflüssigt werden. Allerdings müssen dafür große Veränderungen an der Flugzeugzelle vorgenommen werden, um den dafür notwendigen Kryotank zu installieren. Kryotanks sind hochisolierte und zylindrische Tanks, die tiefkaltes Flüssigwasserstoff unter Druck speichern können. Jedoch erreicht selbst Flüssigwasserstoff in Kryotanks die volumetrische Dichte von Kerosin nicht (Bauen et. al, 2020). Diese Eigenschaften begrenzen den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt: Ein Mittelstreckenjet (Referenz: Airbus A320neo mit 165 Sitzplätzen) wäre unter Betrachtung des voraussichtlichen technologischen Standes im

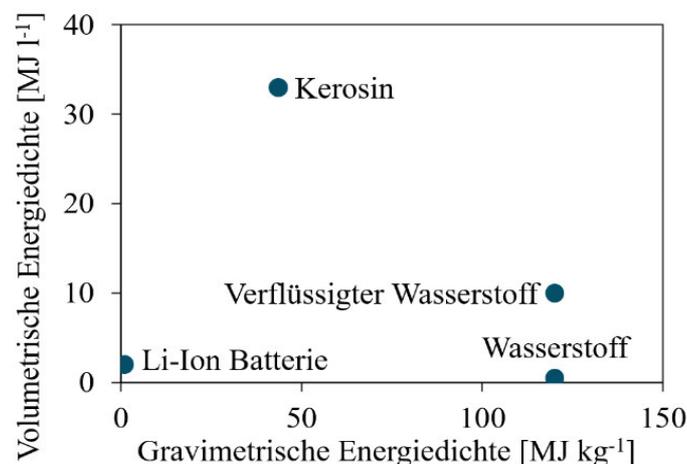


Abbildung 3: Vergleich verschiedener Energieträger für die Luftfahrt (Eigene Darstellung nach Bauen et. al, 2020)

Jahr 2035 auf eine Reichweite von etwa 3.000km begrenzt (Mukhopadhaya & Rutherford, 2022).

Batterien haben im Vergleich zu Kerosin sowohl eine geringere volumetrische als auch gravimetrische Dichte. Aktuelle Li-Ion Batterien sind bei der gleichen Energiemenge wie Kerosin etwa 50x schwerer. Zudem besteht der Nachteil, dass die Batteriemasse über den gesamten Flug mitzuführen ist, wohingegen Kerosin verbrannt wird und daher die Gesamtmasse über den Flug abnimmt. Da der Energieverbrauch eines Flugzeugs proportional zu seiner Masse ist, erhöht sich der Verbrauch durch diese zwei Charakteristika signifikant (Bauen et. al, 2020). Ohne einen revolutionären Fortschritt der Batterietechnik mit deutlich höherer Energiedichte bleibt die Elektrifizierung daher auf kleinere Flugzeuge mit Strecken <300km beschränkt (DLR, 2020).

Aus diesen Gründen ist insbesondere die Entwicklung von alternativen Antriebssystemen für Langstreckenflugzeuge nicht in Sicht und bis 2050 unrealistisch (The Boston Consulting Group, 2018). Sollten bis zur Mitte des Jahrhunderts entgegen allen Voraussagen revolutionäre, nachhaltige Antriebskonzepte für Langstreckenflugzeuge verfügbar sein, gestaltet sich die weltweite Einführung als langwierig (DLR, 2020). Dabei besteht besonders bei Mittel- und Langstreckenflugzeugen die Notwendigkeit der Dekarbonisierung, da diese den Großteil der Emissionen verursachen (Eurocontrol, 2020; FCH JU, 2020). Dies führt zu der Einschätzung, dass bis Mitte des Jahrhunderts eine erhebliche Emissionsreduktion des Luftverkehrs nur mit nachhaltigen Treibstoffen zu erreichen ist (Arif Hasan et. al, 2021).

Die nachhaltigen Treibstoffe, die in der Luftfahrt Anwendung finden, werden in der Branche Sustainable Aviation Fuels (SAF) genannt. Diese haben eine nahezu identische Energiedichte wie konventionelles Kerosin und teilen sich somit die Problematik der zuvor angesprochenen Alternativenergieträger nicht (FfE, 2019; Zschocke et. al, 2012). SAFs haben den weiteren Vorteil, dass sie einfach zu lagern und transportieren sind. Zudem können sie in die heutige Flughafeninfrastruktur integriert werden und sind mit konventionellen Flugzeugen kompatibel (DLR, 2020).

Sustainable Aviation Fuels können durch verschiedene Produktionspfade hergestellt werden. Dabei unterscheiden sich die Treibstoffe sowohl in technischen als auch in ökonomischen, gesellschaftlichen und umwelttechnischen Aspekten (Ahmad et. al, 2021). Heute werden fast alle eingesetzten Sustainable Aviation Fuels aus Biomasse gewonnen. So machten SAFs mit Basis auf Alt- und Pflanzenölen im Jahr 2018 mit 360.000 Tonnen Treibstoff den größten Anteil in der EU aus (O'Malley et. al, 2021). Neben Alt- und Pflanzenölen können viele weitere Ausgangsprodukte eingesetzt werden; zum Beispiel: Holzabfälle aus der Forstwirtschaft oder der Holzindustrie, schnellwüchsige Gehölze wie Pappeln (Kurzumtriebsplantagen) oder landwirtschaftliche Reststoffe wie Stroh (Ahmad et. al, 2021). Die Nachhaltigkeit und Verfügbarkeit dieser biomassebasierten SAFs sind jedoch umstritten. Insbesondere schnellwüchsige Gehölze oder Pflanzenöle benötigen viel Land und Wasser zur Produktion (Batteiger et. al, 2022). Die Verfügbarkeit der Biomasse im Jahr 2050 zur Produktion von SAF wird im nächsten Abschnitt detaillierter untersucht.

Im Gegensatz zu Biotreibstoffen haben strombasierte Treibstoffe einen geringen Land- und Wasserbedarf. Im Hinblick auf das weltweite, riesige Potenzial an erneuerbaren Energien bieten sich PtL-Treibstoffe für eine gestaffelte Masseneinführung an und könnten zum Schlüsselement für die Energiewende im Luftverkehrssektor werden (Batteiger et. al, 2022).

Strombasierte Treibstoffe werden auch PtL-Treibstoffe, eFuels/eKerosin oder synthetische Treibstoffe genannt. Sie fallen unter den Sammelbegriff der Sustainable Aviation Fuels und beschreiben die Herstellung von flüssigen Treibstoffen aus Strom, Wasser und CO₂. Für einen Treibhausgaserminderungsbeitrag ist der Einsatz zusätzlicher erneuerbarer Energiequellen entscheidend. Werden erneuerbare Energiequellen eingesetzt und das CO₂ aus der Atmosphäre abgeschieden, schließt sich der Kohlenstoffdioxidkreislauf (Agora Verkehrswende et. al, 2018; BMWi, 2021). In dieser Arbeit wird daher ausschließlich der Herstellungsprozess mittels CO₂ aus der Atmosphäre und dem Einsatz erneuerbarer Elektrizität betrachtet.

4. Bedarf an strombasierten Treibstoffen

Die Höhe des im Jahr 2050 weltweit benötigten, nachhaltigen Treibstoffs hängt von vielen Faktoren ab. Es ist zum einen davon auszugehen, dass die Luftfahrt in den nächsten Jahrzehnten weiterhin stark wächst und damit den Bedarf erhöht. Effizienzgewinne und neue Technologien haben hingegen einen gegenläufigen Effekt auf den Bedarf (ATAG, 2020; DLR, 2020).

Das im Jahr 2050 verwendete, nachhaltige Kerosin lässt sich dabei voraussichtlich in biomassebasierte und in strombasierte Treibstoffe unterteilen. Heute sind Biotreibstoffe über 50% günstiger als strombasierte Treibstoffe. Dieser Kostenvorteil wird vermutlich auch über die nächsten Jahrzehnte bestehen. Allerdings ist die Biomasse als Ressource begrenzt und wird daher den Bedarf an nachhaltigen Treibstoffen nicht decken können (ETC, 2021; IEA, 2021). Insofern wird in dieser Arbeit angenommen, dass biomassebasierte Treibstoffe durch den Kostenvorteil priorisiert eingesetzt werden. Im Folgenden wird daher untersucht, wieviel nachhaltiges Kerosin im Jahr 2050 benötigt wird und wieviel davon mit Biomasse gedeckt werden kann. Für den ungedeckten Bedarf an SAFs werden strombasierte Treibstoffe verwendet.

4.1 Szenarienbetrachtung

Der Bedarf an nachhaltigen Treibstoffen orientiert sich an denen von der Luftfahrtindustrie (ATAG) aufgezeigten Szenarien, bei denen bis zur Mitte des Jahrhunderts eine Netto-Nullemissionen Luftfahrt erreicht werden soll. Dieses Ziel soll nach ATAG durch vier Säulen realisiert werden: Technologische Weiterentwicklungen, Effizienzsteigerungen bei operativen Abläufen und der Infrastruktur, Einsatz von nachhaltigen Treibstoffen und CO₂-Kompensationen (z.B. durch Kohlenstoffabscheidung und -speicherung). Die in dieser Arbeit untersuchten Szenarien und Treibstoffbedarfe beziehen sich auf die kommerzielle Luftfahrtindustrie. Die privaten, militärischen und staatlichen Luftfahrtsektoren sind nicht Teil der Betrachtung (ATAG; 2020).

Die *Air Transport Action Group* unterscheidet bei ihrem Pfad zur Nullemissionen-Luftfahrt bis zur Mitte des Jahrhunderts nach drei Szenarien. Zudem zeigt Szenario 0 das Beibehalten von aktuellen Trends (Baseline-Szenario) auf – siehe Abbildung 4:

Szenario 0: Weiterführung von aktuellen Trends, konservativer technologischer Fortschritt sowie konservativer Einsatz von SAF. CO₂-Kompensationen als wesentlicher Faktor zur Zielerreichung.

Szenario 1: Ambitionierte technologische Entwicklungen sowie operative Effizienzverbesserungen.

Szenario 2: Ambitionierter Einsatz von SAF.

Szenario 3: Sehr ambitionierte Einführung neuer Technologien. Elektrische Flugzeuge für bis zu 100 Sitze, Wasserstoffflugzeuge für 100-200 Sitze und hybrid-elektrische Antriebe für größere Flugzeuge.

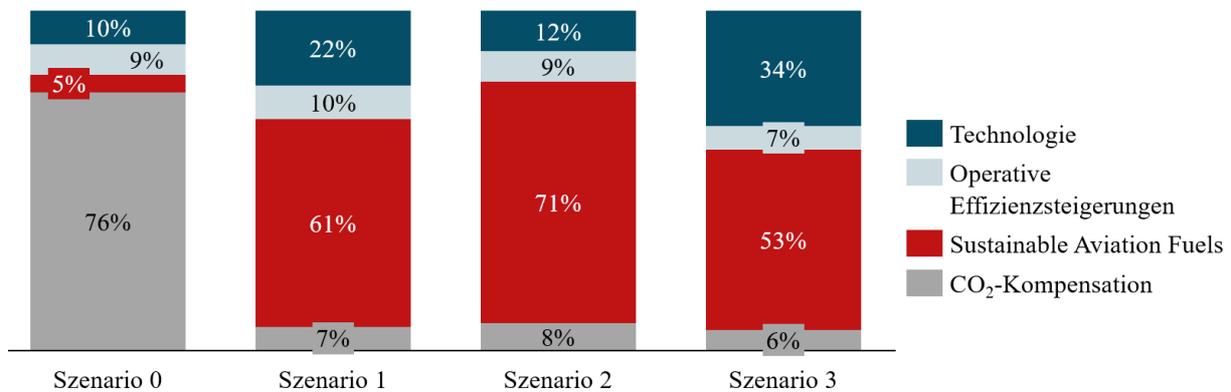


Abbildung 4: Beitrag zur CO₂-Emissionsreduzierung im Jahr 2050 nach Szenario 0 bis 3 (Eigene Darstellung nach ATAG, 2020)

Diesen Szenarien werden zusätzlich verschiedene Wachstumsentwicklungen unterstellt. Dabei geht die ATAG von einem durchschnittlichen, jährlichen Wachstum von 3,1% für den wahrscheinlichsten Fall aus. Ein unerwartet niedriges Wachstum wird mit 2,3% angesetzt, ein unerwartet hohes Wachstum mit 3,3% (ATAG, 2020).

Bei allen Szenarien wird ein großer Beitrag zur Emissionsreduzierung durch Sustainable Aviation Fuels erzielt (abgesehen von Baseline-Szenario 0). Selbst bei sehr ambitionierter Einführung von neuen Technologien leisten diese einen geringeren Beitrag zur Emissionsreduzierung als nachhaltige Treibstoffe (Szenario 3). Auch unabhängige Studien kommen zu dieser Einschätzung und sehen Sustainable Aviation Fuels als wesentlichen Schlüssel zur Dekarbonisierung der Luftfahrt (Arif Hasan et. al, 2021; Transport and Environment, 2018).

Aus den verschiedenen Szenarien sowie Wachstumsentwicklungen lassen sich die benötigten Mengen nachhaltigen Treibstoffs im Jahr 2050 ableiten. Diese sind in Tabelle 1 gelistet. Die geklammerten Zahlen geben die Quantität an, die benötigt werden würde, falls von CO₂-Kompensation abgesehen werden sollte. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass die ursprünglich durch CO₂-Kompensation erreichten Einsparungen durch SAFs erzielt werden.

[Mio. Tonnen]	2,3% Wachstum	3,1% Wachstum	3,3% Wachstum
Szenario 0	20 (343)	30 (503)	34 (572)
Szenario 1	259 (288)	380 (423)	432 (481)
Szenario 2	303 (335)	445 (491)	506 (557)
Szenario 3	225 (250)	330 (367)	375 (417)

Tabelle 1: Im Jahr 2050 benötigtes, nachhaltiges Kerosin in Mio. Tonnen

4.2 Verfügbarkeit von Biotreibstoffen

Wieviel von diesen notwendigen Sustainable Aviation Fuels durch Biomasse abgedeckt werden kann, hängt von zwei Variablen ab: Wie viel Biomasse im Jahr 2050 zur Verfügung steht und wieviel dieser limitierten Ressource der Luftfahrt zugeschrieben wird (ETC, 2021).

Verschiedene Studien sehen ein weltweites Biomasse-Potenzial im Jahr 2050 von 28 bis 287 Exajoule (Primärenergie). Die teils erheblichen Unterschiede stammen größtenteils aus unterschiedlichen Annahmen über Landnutzung und Nachhaltigkeitskriterien. Studien, die von einer größeren Menge Biomasse ausgehen, beziehen diese meist aus Nichtlebensmittel- bzw. Energiepflanzen (Blanshard et. al, 2021; ETC, 2021).

Zur Abschätzung von verfügbarer Biomasse im Jahr 2050 werden Studien von der *International Energy Agency (IEA)*, der *Energy Transitions Commission (ETC)* und dem *World Economic Forum (WEF)* untersucht. Die in diesen Studien angenommene, verfügbare Primärenergie in Exajoule (EJ) ist in Abbildung 5 dargestellt.

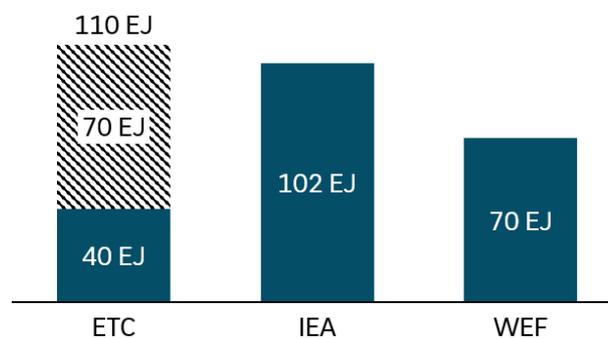


Abbildung 5: Schätzung vorhandener Biomasse im Jahr 2050 in Exajoule (Eigene Darstellung nach ETC, 2021; IEA, 2021a; WEF, 2020)

Die *Energy Transitions Commission* geht bei einer vorsichtigen Schätzung von etwa 40 Exajoule im Jahr 2050 aus. Diese setzen sich hauptsächlich aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen, kommunalen/industriellen Abfällen sowie Nichtlebensmittelpflanzen zusammen. Die Steigerung auf 110 EJ erreicht die ETC in ihrem „Maximalpotenzial“-Szenario insbesondere durch Steigerung von Nichtlebensmittelpflanzen und Biomasse aus der Forstwirtschaft. Diese Steigerung würde erfordern, dass zusätzliche landwirtschaftliche Flächen für den Anbau von Bioenergie freigesetzt werden würde (ETC, 2021). Die Studien der IEA (2021a) und des WEF (2020) liegen zwischen diesen zwei Szenarien der ETC.

Um die limitierte Verfügbarkeit von Biomasse wird im Jahr 2050 zudem eine Nachfragekonkurrenz bestehen. Diese Bioressourcen sind dabei nicht nur für die Dekarbonisierung im Energiebereich relevant, sondern insbesondere auch für das eigentliche Material an sich. So kann mit der Nutzung von Biomasse im Energiebereich eine Fehlallokation wertvoller Ressourcen riskiert werden – zum Beispiel für Holz im Bauwesen oder biobasierten Faseranwendungen (ETC, 2021).

Trotz dem Risiko dieser Fehlallokation scheint die allgemeine Auffassung zu sein, dass der Luftfahrtindustrie ein wesentlicher Bestandteil zugeschrieben werden sollte. So wird die Luftfahrt als einzige klare Priorität neben der Materialnutzung gesehen (IEA, 2021a; ETC, 2021). ETC (2021) geht von 15 EJ aus, die der Luftfahrt im Jahr 2050 zugeschrieben werden könnte. Dies entspräche nach ETC der Hälfte der Treibstoffnachfrage. IEA (2021) nennt keinen

absoluten Wert, sieht allerdings eine Allokation zur Deckung von 45% der im Jahr 2050 benötigten Treibstoffmengen für realistisch. Von welchen Treibstoffmengen die Studien dabei ausgehen, ist in beiden Fällen nicht ersichtlich. Das WEF (2020) differenziert in ihrer Studie nicht zwischen den Anwendungsgebieten. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher angenommen, dass im Jahr 2050 15 Exajoule Biomasse für die Luftfahrt verfügbar sein werden. Bedingt durch die hohen Umwandlungsverluste entsprechen 15 Exajoule Biomasse nur 5,9 Exajoule und damit 135 Mio. Tonnen biomassebasierten Kerosins jährlich (Blanshard et. al, 2021).

Strombasiertes Kerosin ist durch das weltweite, riesige Potenzial erneuerbarer Energiequellen in seiner Verfügbarkeit nahezu unlimitiert (Batteiger et. al, 2022).

Der Sammelbegriff Sustainable Aviation Fuels und dessen Verfügbarkeit lässt sich nun zwischen biomassebasiertem und synthetisch hergestelltem Kerosin differenzieren. Die voraussichtlich verfügbaren 135 Mio. Tonnen biomassebasierten Treibstoffs werden von den benötigten Mengen nachhaltigen Treibstoffs in Tabelle 1 abgezogen. Daraus ergibt sich die notwendige Quantität von strombasierten Treibstoffen im Jahr 2050, die differenziert nach den ATAG-Szenarien in Tabelle 2 gelistet sind.

[Mio. Tonnen]	2,3% Wachstum	3,1% Wachstum	3,3% Wachstum
Szenario 0	0 (208)	0 (368)	0 (437)
Szenario 1	124 (153)	245 (288)	297 (346)
Szenario 2	168 (200)	310 (356)	371 (422)
Szenario 3	90 (115)	195 (232)	240 (282)

Tabelle 2: Im Jahr 2050 benötigtes, strombasiertes Kerosin in Mio. Tonnen

5. Herstellungsverfahren und Wirkungsgrad des PtL-Prozesses

Um aus den in Tabelle 2 dargestellten Mengen von PtL-Treibstoffen den elektrischen Energiebedarf zur Herstellung abzuleiten, muss der Gesamtwirkungsgrad bekannt sein. Im Folgenden wird daher der Herstellungsprozess, insbesondere mit Bezug auf Energiebedarf und Wirkungsgrad, analysiert, um im Anschluss den Gesamtwirkungsgrad des Prozesses festzustellen.

Für die Herstellung von PtL-Treibstoffen gibt es aktuell zwei Herstellungspfade: Die Fischer-Tropsch-Synthese und die Methanol-Synthese. Im Gegensatz zu der Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese oder FTS) ist die Methanol-Synthese jedoch noch nicht durch ASTM (Internationale Standardisierungsorganisation *American Society for Resting and Materials*) D7566, der vorherrschenden Flugtreibstoff-Spezifikation der Industrie, für die Nutzung von Kerosin zertifiziert (BWMi, 2021). ASTM Zulassungen sind aufwendig, kosten viele Ressourcen und benötigen mehrere Jahre zum Testen (Heyne et. al, 2021). Zudem beruhen bisherige Anlagen und Erfahrungswerte zur Produktion von strombasiertem Kerosin auf der FT-Synthese und umfassendere Analysen bezüglich der Methanol-Synthese sind notwendig, um die Eignung final zu bewerten (Schmidt et. al, 2018). Trotz des langen Zeithorizonts soll

aus diesem Grund im Folgenden ausschließlich die FT-Synthese betrachtet werden. Differenz der Effizienz sowie Kosten der Herstellung im Jahr 2050 sind bei den beiden Verfahren voraussichtlich vernachlässigbar gering (Siegemund et. al, 2017).

Die Umwandlung von Strom und Kohlendioxid in Kohlenwasserstoffe via PtL-FTS umfasst drei Reaktionsschritte: die Wasserelektrolyse, die reverse Wassergas-Shift-Reaktion und die Fischer-Tropsch-Synthese (Dieterich et. al, 2020). Der Kohlenstoffdioxid als Ausgangsprodukt wird mittels *Direct Air Capture* aus der Atmosphäre gewonnen. Dieser wird durch die reverse Wassergas-Shift-Reaktion zu Kohlenmonoxid reduziert und bildet in Kombination mit dem Wasserstoff das sogenannte Synthesegas (Syngas). Synthesegas ist das Ausgangsprodukt der FT-Synthese. Das Endprodukt der FT-Synthese ist ein Roh-Flüssigkraftstoff (Syncrude), der anschließend noch veredelt werden muss (Agora Verkehrswende et. al, 2018). Der Prozess ist in Abbildung 6 dargestellt.

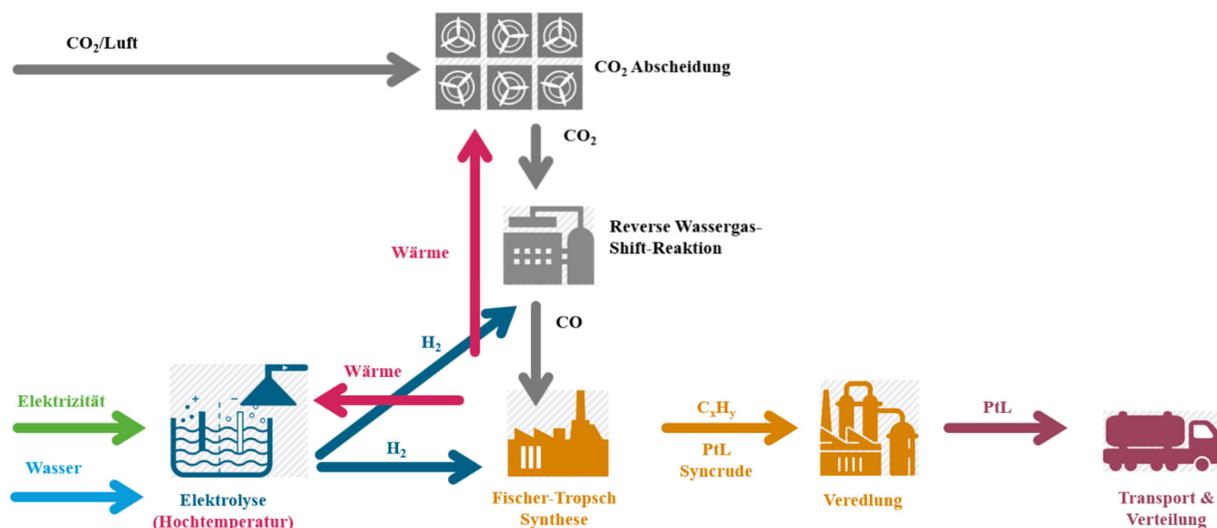
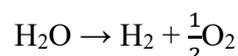


Abbildung 6: PtL-Produktionsprozess mittels Fischer-Tropsch Synthese (Eigene Darstellung nach Batteiger et. al, 2022)

5.1 Wasserelektrolyse

Als Wasserelektrolyse wird ein Verfahren bezeichnet, das Wassermoleküle mittels elektrischer Spannung in Wasserstoff und Sauerstoff teilt. Auch wenn dafür verschiedene Verfahren Anwendung finden können, gilt dabei stets folgende Reaktion (Buttler & Spliethoff, 2018):



Für die Gewinnung von Wasserstoff durch Wasser und Strom werden aktuell drei verschiedene Verfahren eingesetzt: Die alkalische Elektrolyse, die Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Elektrolyse und die Festoxid-Elektrolyse. Die alkalische und die PEM-Elektrolyse weisen Temperaturen von unter 100°C auf und werden als Niedrigtemperatur-Elektrolyseverfahren bezeichnet. Vorteil dieser beiden Verfahren ist die hohe Produktreife sowie die kurze Anlaufzeit. Letzteres trifft insbesondere auf die PEM-Elektrolyse zu. Nachteil ist die geringe Effizienz von 50-60%. Die Festoxid-Elektrolyse findet bei Temperaturen bis zu 900°C statt (Hochtemperatur-Elektrolyse) und weist eine höhere Effizienz auf (Buttler & Spliethoff, 2018; Dieterich et. al, 2019). Dieses Verfahren benötigt im Vergleich zur Niedrigtemperatur-

Elektrolyse deutlich weniger elektrische Energie, dafür jedoch zusätzliche thermische Energie (Batteiger et. al, 2022). Insgesamt steigt die Effizienz auf bis zu 81% (Buttler & Spliethoff, 2018). Interessant ist die Festoxid-Elektrolyse insbesondere dann, wenn Abwärme aus anderen Prozessen genutzt werden kann. Das ist bei der PtL-Herstellung durch die exotherme FT-Reaktion der Fall. Diese Abwärme kann für die Festoxid-Elektrolyse genutzt werden, um dadurch den PtL-Gesamtwirkungsgrad zu steigern (Batteiger et. al, 2022). Die Festoxid-Elektrolyse ist noch nicht so ausgereift wie die Niedrigtemperatur-Verfahren und hat den weiteren Nachteil, dass die Anlaufzeit bedeutend länger ist. So hat die PEM-Elektrolyse eine Kalt-Anlaufzeit von 5-10 Minuten, die Festoxid-Elektrolyse hingegen von mehreren Stunden (Buttler & Spliethoff, 2018). Daher kann diese weniger flexibel eingesetzt werden, was die Einbindung von fluktuierenden Energiequellen wie Solar oder Wind erschwert (Batteiger et. al, 2022).

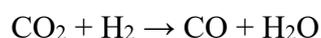
5.2 Direct Air Capture

Als Direct Air Capture (DAC) wird die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre bezeichnet. Das Verfahren befindet sich noch in einem frühen Stadium und muss erst noch industrialisiert werden (Fasihi et. al, 2019). Ein aktuell vielversprechender Ansatz des Direct Air Capture ist die *Temperature Swing Adsorption (TSA)*. Die TSA fängt CO₂ mittels eines Filters auf und löst diese durch Wärme wieder aus (Agora Verkehrswende et. al, 2018). Dieses Verfahren findet bereits in einem nicht-industriellem Maßstab Verwendung. Führend sind dabei Climeworks aus der Schweiz und Global Thermostat aus den USA. Das Verfahren mit dem aktuell geringsten Energiebedarf (Jahr 2019) stammt dabei von Global Thermostat und benötigt 150-260 kWh_{el} und 1170-1410 kWh_{th} für eine Tonne CO₂ aus der Umgebungsluft (Fasihi et. al, 2019). Bezogen auf eine Tonne synthetischem Flüssigkraftstoff entspricht das 305-528,58 kWh_{el} und 2.379-2.867 kWh_{th}, da für die Herstellung von einer Tonne Flüssigkraftstoff 2,033 Tonnen CO₂ benötigt werden (Agora Verkehrswende et. al, 2018). Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig der Energiebedarf des DAC-Verfahrens weiter sinkt (Fasihi et. al, 2019).

Noch ist allerdings die Gewinnung von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre energetisch aufwendig. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass der Anteil in der Atmosphäre gering ist. Der hohe Energiebedarf wirkt sich negativ auf die Kosten und den Gesamtwirkungsgrad des PtL-Prozesses aus. Die Nutzung einer CO₂-Punktquelle (z.B. einem Abgasstrahl) erhöht den Gesamtwirkungsgrad der synthetischen Kraftstoffherstellung um ca. 10% (Batteiger et. al, 2022). Daher erscheint es zumindest für die Übergangsphase zu einer emissionsfreien Industrie sinnvoll, Punktquellen mit hohem CO₂-Anteil in den Prozess einzubinden (Agora Verkehrswende et. al, 2018). Unter anderem durch den hohen Energiebedarf vervierfachen sich die Kosten zur CO₂-Gewinnung bei DAC-Verfahren im Vergleich zur Abscheidung aus dem Abgasstrahl eines Gaskraftwerks oder der Zementproduktion (Dieterich et. al, 2020).

5.3 Reverse Wassergas-Shift-Reaktion

Durch das DAC-Verfahren wird Kohlenstoffdioxid gewonnen, allerdings wird für die FT-Synthese Kohlenstoffmonoxid benötigt. Für die dadurch notwendige Reduktion ist ein weiterer Zwischenschritt notwendig, die reverse Wassergas-Shift-Reaktion (rWGS) (González-Castaño et. al, 2021):



Da das Kohlenstoffdioxid-Molekül sehr stabil ist, wird für die Spaltung der C=O Bindungen viel Energie benötigt (González-Castaño et al., 2021). Zudem sollte die endotherme Reaktion

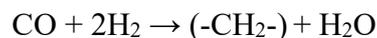
bei Temperaturen über 900°C stattfinden. So werden ungewollte Nebenreaktionen, die zur Gesteuerung von Methan und Ruß führen, verhindert (Meurer und Kern, 2021). Die Höhe des Energiebedarfs der reversen Wassergas-Shift-Reaktion hängt von einigen Faktoren ab. Dabei ist insbesondere die gewünschte Reinheit des Endprodukts (Kohlenstoffmonoxid) und der eingesetzte Katalysator von Bedeutung (Keller und Otomo, 2020). Durch den begrenzten Umfang dieser Arbeit wird auf eine detailliertere Analyse des Energiebedarfs verzichtet.

Die rWGS-Reaktion wurde bereits in Realbedingungen demonstriert, eine Industrialisierung steht jedoch noch aus (Batteiger et. al, 2022).

Zukünftig könnte die sogenannte Co-Elektrolyse die rWGS-Reaktion und die Wasserelektrolyse kombinieren, somit einen Prozessschritt einsparen und den Gesamtwirkungsgrad erhöhen. Diese Technologie benötigt allerdings noch eine große technologische Weiterentwicklung (Batteiger et. al, 2022; Schmidt et. al, 2018). Obgleich in Karlsruhe seit 2019 eine PtL-Testanlage mit Co-Elektrolyse im Betrieb ist und weitere größere Anlagen in Planung sind, soll das Verfahren in dieser Arbeit aus dem oben genannten Grund nicht weiter untersucht werden (Dieterich et. al, 2020).

5.4 Fischer-Tropsch-Synthese

Das Synthesegas, eine Mischung aus H₂ und CO, dient als Ausgangsbasis der Fischer-Tropsch-Synthese. Das Endprodukt ist das Syncrude. Bei der Synthese lassen sich eine Vielzahl von einfachen Kohlenwasserstoffketten unterschiedlicher Länge (hier angegeben als (-CH₂-)) herstellen (Schmidt et. al, 2018):



Die Verteilung der Kettenlängen der Kohlenwasserstoffe im Syncrude wird durch die Kettenwachstumswahrscheinlichkeit α bestimmt. Die Wachstumswahrscheinlichkeit α ist dabei abhängig von Temperatur, Druck und der Zusammensetzung des Synthesegases (Verhältnis H₂/CO) während der Synthese (Dieterich et. al, 2020). Die Parameter sind für eine größtmögliche Ausbeute von Kerosin (8 bis 16 Kohlenstoffatome) entsprechend einzustellen (Meurer & Kern, 2021). Dabei kann der massebezogene Anteil von Kerosin am Endprodukt auf bis zu 60% gesteigert werden (Schmidt et. al, 2016).

Durch gezielte Nachbehandlung des Syncrudes kann der Anteil an Kerosin weiter gesteigert werden. Durch Oligomerisierung können kurzkettige Kohlenwasserstoffe in langkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden, welche dann im Bereich des Kerosins liegen. Dieser Prozess benötigt allerdings zusätzliche Energie, somit sinkt der Gesamtwirkungsgrad und die Kosten steigen (de Klerk, 2016). Insofern soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass Kerosin einen Anteil von 60% des PtL-Endproduktes hat. Ohnehin sind die Nebenprodukte des PtL-FT-Prozesses wertvoll und können für anderweitige, erneuerbare Bereiche vermarktet werden – wie etwa der Chemieindustrie (Batteiger et. al, 2022).

Das FT-Syncrude ist noch nicht für den Einsatz geeignet und muss ähnlich zur Rohölraffinerie veredelt werden (Batteiger et. al, 2022). Der Wirkungsgrad der FT-Synthese inklusive der Veredlung wird aktuell auf 56% geschätzt und könnte bis 2050 auf 66% steigen (dena, 2018).

5.5 Gesamtwirkungsgrad

Aus der Betrachtung der einzelnen Wirkungsgrade einen Gesamtwirkungsgrad des Prozesses abzuleiten ist nur bedingt sinnvoll. So kann etwa durch die Nutzung von Abwärme der

exothermen Fischer-Tropsch-Synthese durch endotherme Prozessschritte der Gesamtwirkungsgrad erhöht werden (Batteiger et. al, 2022). Insofern werden für die Beurteilung des Gesamtwirkungsgrades der PtL-Herstellung Erfahrungswerte und Abschätzungen aus der Literatur herangezogen. Dazu wird sowohl der heutige als auch der im Jahr 2050 voraussichtlich erreichte Wirkungsgrad betrachtet. Die Zusammenfassung der Recherche ist in Tabelle 3 einzusehen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass PtL-Verfahren mit Hochtemperatur-Elektrolyse etwa 5-10% effizienter sind als diejenigen mit Niedrigtemperatur-Elektrolyse. Im Jahr 2050 wird der Gesamtwirkungsgrad in der Literatur auf 48% bei Hochtemperatur-Elektrolyse-Verfahren und auf 42% bei Niedrigtemperatur-Elektrolyse-Verfahren geschätzt. Der Wirkungsgrad von 47% im Jahr 2018 mit Niedrigtemperatur-Elektrolyse betrachtet den Prozess nur bis zum Syncrude und exkludiert die Veredlung (Vidal Vasquez, 2018). Somit kann von einem insgesamt etwas geringerem Gesamtwirkungsgrad ausgegangen werden.

Für diese Arbeit wird der Gesamtwirkungsgrad von 48% im Jahr 2050 angenommen, der durch den PtL-Prozess mit Festoxid-Elektrolyse vorrausichtlich realisiert werden kann.

Eigenschaften des PtL-Prozesses	Kurzfristiger Wirkungsgrad (Jahr)	Langfristiger Wirkungsgrad (2050)	Quelle
FT-Synthese, Festoxid-Elektrolyse, rWGS-Reaktion, DAC durch Temperature Swing Absorption	47% (2015)	48%	(Siegemund et. al, 2017)
FT-Synthese, Festoxid-Elektrolyse, rWGS-Reaktion, DAC durch Temperature Swing Absorption	45% (2015)	47%	(Zittel et. al, 2016)
FT-Synthese, Festoxid-Elektrolyse, rWGS-Reaktion, DAC durch Temperature Swing Absorption	41% (2030)	48%	(Pfennig et. al, 2017)
FT-Synthese, PEM-Elektrolyse, rWGS-Reaktion, DAC durch Temperature Swing Absorption (Wirkungsgrad nur bis Syncrude, exklusive Nachbehandlung)	47% (2018)	-	(Vidal Vázquez et. al, 2018)
FT-Synthese, Niedrigtemperatur-Elektrolyse (keine Angabe zum genauen Verfahren), rWGS-Reaktion, DAC durch Temperature Swing Absorption	36% (2015)	42%	(Siegemund et. al, 2017)
FT-Synthese, PEM-Elektrolyse, rWGS-Reaktion, DAC durch Temperature Swing Absorption	39% (2018)	42%	(Schmidt et. al, 2018)

Tabelle 3: Literaturrecherche zur Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades des PtL-Prozesses

6. Energiebedarf von strombasierten Treibstoffen im Jahr 2050

Anhand des ermittelten Gesamtwirkungsgrades des PtL-Prozesses und der Herleitung der notwendigen PtL-Treibstoffmengen im Jahr 2050 (Tabelle 2) wird im Folgenden die dafür notwendige elektrische Energie hergeleitet.

Die Energiedichte von Flugturbinentreibstoff (Jet A-1) entspricht 43,5 MJ/kg (Heizwert). Eine Tonne enthält somit 12,06 MWh Energie. Dieser Wert kann sowohl für konventionelles als auch für biomassebasiertes und synthetisches Kerosin angenommen werden (FfE, 2019; Zschocke et. al, 2012).

Da der Anteil von Kerosin am Ausgangsprodukt der Fischer-Tropsch Synthese mit 60% angenommen wurde, wird für eine Tonne Kerosin 1,66 Tonnen des Fischer-Tropsch Endproduktes benötigt. Diese 1,66 Tonnen entsprechen einer Energie von 20,02 MWh (Annahme: Die unterschiedlichen Bestandteile des PtL-Endproduktes haben dieselbe gravimetrische Energiedichte). Bei einem Gesamtwirkungsgrad von 48% wird somit für eine Tonne PtL-Kerosin 41,7 MWh elektrische Energie benötigt. Ein vereinfachtes Energieflussbild ist dazu in Abbildung 7 ersichtlich.

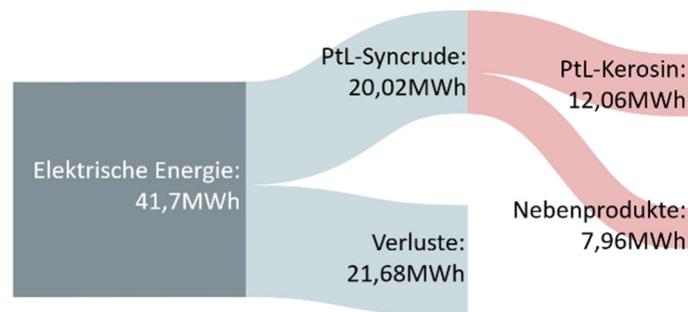


Abbildung 7: Vereinfachtes Energieflussbild zur Herstellung einer Tonne PtL-Kerosins

Zur Berechnung des elektrischen Energiebedarfs werden die benötigten Mengen PtL-Kerosins aus Tabelle 2 herangezogen und mit 41,7 MWh multipliziert. Zur Veranschaulichung dient folgende Rechnung mit Szenario 1 und 3,1% jährlichem Wachstum:

$$245 \text{ Mio.t} * 41,7 \text{ MWh/t} = 10.217 \text{ TWh}$$

Für eine Nullemissionen-Luftfahrt zur Mitte des Jahrhunderts sind die in Tabelle 4 angegebenen, elektrischen Energiemengen zur Produktion von PtL-Kerosin notwendig. Diese gliedern sich in die im Abschnitt 4.1 dargestellten Szenarien. Die Werte in Klammern geben die benötigten Energiemengen an, die ohne CO₂-Kompensation nötig wären. Sollte im Jahr 2050 keine Biomasse zur Herstellung von nachhaltigem Kerosin verwendet werden, würde ein Mehrbedarf von 135 Mio. Tonnen strombasierten Kerosins jährlich anfallen. Das entspräche 5.630 TWh und müsste auf alle Szenarien aufaddiert werden.

[TWh]	2,3% Wachstum	3,1% Wachstum	3,3% Wachstum
Szenario 0	0 (8.674)	0 (15.345)	0 (18.223)
Szenario 1	5.171 (6.380)	10.217 (12.009)	12.385 (14.428)
Szenario 2	7.006 (8.340)	12.927 (14.845)	15.471 (17.597)
Szenario 3	3.753 (4.796)	8.132 (9.674)	10.008 (11.759)

Tabelle 4: Elektrischer Energiebedarf zur Herstellung von PtL-Kerosin im Jahr 2050

7. Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurden viele Annahmen getroffen. So ist der Bedarf an strombasiertem Kerosin im Jahr 2050 insbesondere von der Wachstumsentwicklung der Luftfahrt, der technologischen Weiterentwicklung und der Verfügbarkeit von Biomasse

abhängig. Zudem bestimmt die Effizienz des PtL-Herstellungsprozesses den elektrischen Energiebedarf maßgeblich. Welche Verfahren sich bis 2050 durchsetzen und welche Wirkungsgrade realisiert werden, bleibt offen. All diese Faktoren sind mit Unsicherheiten behaftet (ATAG, 2020; Batteiger et. al, 2022; ETC, 2020).

Auch im Hinblick auf die Klimaneutralität wurden Annahmen getroffen, die zu hinterfragen sind. So unterstellt die *Airline Transport Action Group* den Sustainable Aviation Fuels Nullemissionen während des gesamten Lebenszyklus (ATAG, 2020). Das ist zumindest aktuell nicht der Fall, da die Materialbeschaffung der Biomasse und der Bau von Produktionsanlagen für Biotreibstoffe Kohlendioxidemissionen verursachen. Der Bau von Windkraft- oder Photovoltaikanlagen für die Herstellung strombasierter Kerosins verursacht ebenso Emissionen. Bei einer zu erwarteten Transformation zu sektorübergreifenden Null-/Niedrigemissionsprozessen ist zumindest bei PtL-Treibstoffen zu erwarten, dass die Emissionen über den Lebenszyklus im Gegensatz zu konventionellen Treibstoffen um über 95% sinken (Schmidt et. al, 2018).

Weiterhin bleibt jedoch die Problematik von Nicht-CO₂-Emissionen der Luftfahrt bestehen. Auch wenn synthetisches Kerosin sauberer verbrennt und dadurch die Klimawirkung verringert (z.B. durch geringeren Ruß-Ausstoß), bleiben die in Abschnitt 2 beschriebenen Emissionen im Wesentlichen vorhanden (Batteiger et. al, 2022). Selbst mit der Annahme, dass strombasierte Treibstoffe über ihren Lebenszyklus keine CO₂-Emissionen verursachen, sinkt die Gesamtklimawirkung im Vergleich zu konventionellem Kerosin nur um 30 bis 60% (FCH JU, 2020).

In Bezug auf den Produktionsprozess könnte die Ausbeute von Kerosin am PtL-Prozess erhöht werden, wenn zukünftig statt der Fischer-Tropsch-Synthese die Methanisierung Verwendung findet. Diese könnte die Ausbeute von Kerosin auf über 80% erhöhen. Weitere Untersuchungen und eine ASTM-Zertifizierung wären hierfür notwendig. Vorläufige Ergebnisse lassen jedoch darauf schließen, dass dieser Produktionsprozess nicht weniger geeignet ist als die FT-Synthese (Schmidt et. al, 2018).

8. Fazit und Ausblick

Neben den vielen Variablen, die die Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors im Jahr 2050 beeinflussen, bleibt eine Konstante: der immense Energiebedarf. Diese Eigenschaft wird durch den Wechsel auf strombasierte Treibstoffe weiter verschärft, da durch den verlustbehafteten Herstellungsprozess der Gesamtenergiebedarf steigt.

Im Folgenden wird der hohe Energiebedarf anhand eines hypothetischen Beispiels veranschaulicht. Dafür wird ein Flug von Düsseldorf nach Mallorca angenommen, für den das notwendige PtL-Kerosin mit bestehenden Windkraftanlagen aus dem Umland des Düsseldorfer Flughafens hergestellt werden soll. Ein auf dieser Strecke häufig eingesetzter Flugzeugtyp (Airbus A320neo mit CFM International CFM56-5A1 Triebwerken) verbraucht etwa 2,4 Tonnen Kerosin stündlich (M. Schwarz, persönliche Kommunikation, 11. Mai 2022). Sollen diese Windkraftanlagen den strombasierten Treibstoff zeitgleich zum Flug produzieren, müssten diese eine Leistung von 100,08MW aufweisen (bei 48% Wirkungsgrad des PtL-Prozesses und 60% Kerosinausbeute). Ein Windkraftrad im Regierungsbezirk Düsseldorf hatte im Jahr 2019 eine tatsächliche, durchschnittliche Leistung von 0,33904MW. Somit müssten für

einen Mittelstreckenflug 296 der 406 bestehenden Windkraftanlagen im Regierungsbezirk Düsseldorf für die PtL-Produktion allokiert werden (LANUV, 2022).

Die gesamte Lufthansa Gruppe würde für den jährlichen Treibstoffverbrauch von 10,4 Mio. Tonnen Kerosin im Jahr 2019 435 TWh für die Produktion von strombasiertem Treibstoff benötigen (Deutsche Lufthansa AG, 2021). Das entspricht 72% des in Deutschland erzeugten Stroms im Jahr 2019 und ist 3,37x mehr, als alle deutschen Windkraftanlagen im Jahr 2019 produziert haben (IEA, 2021b).

Diese Betrachtung lässt erahnen, wie hoch der Bedarf an erneuerbarem Strom für die weltweite Produktion von PtL-Kerosin im Jahr 2050 sein wird. Für eine Dekarbonisierung der Luftfahrt im zentralen Szenario 1 mit 3,1% durchschnittlichem, jährlichem Wachstum bis 2050 würden 10.217 TWh erneuerbarer Strom benötigt werden. Das entspricht 44,6% des im Jahr 2019 weltweit erzeugten Stroms. Im selben Jahr wurden weltweit 7.014 TWh Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt. Daher würden alle erneuerbare Anlagen, die aktuell weltweit vorhanden sind, nicht ausreichen, um genügend Strom für eine Nullemissionen-Luftfahrt im Jahr 2050 zu erzeugen (IEA, 2021b).

Dabei ist in der Betrachtung bereits ein beachtlicher Anteil durch Biomasse-Treibstoffe gedeckt worden. Sollten der Luftfahrt durch Konkurrenzsektoren oder zunehmenden Diskussionen um Landnutzung und Wasserverbrauch zukünftig weniger Biomasse zur Verfügung stehen als angenommen, würde sich der Bedarf an Elektrizität weiter dramatisch erhöhen (bis zu 5.630 TWh bei komplettem Wegfall der Biomasse).

Da für eine Dekarbonisierung der Luftfahrt bis zur Mitte des Jahrhunderts höchstwahrscheinlich keine Alternative verfügbar sein wird, müsste in sehr großem Stil in erneuerbare Energien und PtL-Produktionsanlagen investiert werden (The Boston Consulting Group, 2021). Gleichwohl die benötigte Energie zur Herstellung von synthetischem Kerosin hoch ist, ist das Potenzial von erneuerbaren Energiequellen noch viel höher. So wird das weltweite, technische Potenzial auf 1.350.000 TWh jährlich geschätzt (Batteiger et. al, 2022). Diese Arbeit zeigt daher: Die Transformation der Luftfahrt zu einer CO₂-neutralen Branche bis zum Jahr 2050 stellt eine enorme Herausforderung dar – sie ist jedoch möglich.

Literatur

- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics. (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*.
- Ahmad, S., Ouenniche, J., Kolosz, B., Greening, P., Andresen, J., Maroto-Valer, M., & Xu, B. (2021). A stakeholders' participatory approach to multi-criteria assessment of sustainable aviation fuels production pathways. In *International Journal of Production Economics* 238 (108156). doi:10.1016/j.ijpe.2021.108156
- Air Transport Action Group (ATAG). (2020). *Waypoint 2050*.
- Batteiger, V., Ebner, K., Habersetzer, A., Moser, L., Schmidt, P., Weindorf, W., & Rakscha, T. (2022). *Power-to-Liquids: A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation*. (German Environment Agency, Hrsg.)
- Bauen, A., Bitossi, N., German, L., Harris, A., & Leow, K. (2020). Sustainable Aviation Fuels : Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. In *Johnson Matthey Technol. Rev.* 64 (3) (S. 263-278). doi:10.1595/205651320X15816756012040
- Blanshard, A., McCurdy, M., Reid-Kay, A., & Chokhani, S. (2021). *Fueling Net Zero: How the aviation industry can deploy sufficient sustainable aviation fuel to meet climate ambitions*. (ICF International, Hrsg.)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). (2021). *PtL-Roadmap: Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland*.
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (3) (S. 2440-2454). doi:10.1016/j.rser.2017.09.003
- de Klerk, A. (2016). Aviation Turbine Fuels Through the Fischer–Tropsch Process. In *Biofuels for Aviation* (S. 241-259). doi:10.1016/B978-0-12-804568-8.00010-X
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2018). *Heutige Einsatzgebiete für Power Fuels*.
- Deutsche Lufthansa AG. (2021). *Factsheet Nachhaltigkeit 2020*.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (2020). *Zero Emission Aviation – Emissionsfreie Luftfahrt*.
- Dieterich, V., Buttler, A., Hanel, A., Spliethoff, H., & Fendt, S. (2020). Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: a review. In *Energy Environ. Sci.* 13 (S. 3207-3252). doi:10.1039/D0EE01187H
- Energy Transitions Commission (ETC). (2021). *Bioresources within a Net-Zero Emissions Economy – Making a Sustainable Approach Possible*.

- European Organisation for the Safety of Air Navigation (Eurocontrol). (2020). *Performance Review Report (PRR) 2019*.
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. In *Journal of Cleaner Production* 224 (S. 957-980). doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.086
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE). (2019). *CO₂-Bilanz des CAPHENIA Prozesses: Ökologische Bewertung des CAPHENIA Prozesses im Vergleich zu Power-to-Liquid Verfahrensrouten*.
- Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH JU). (2020). *Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*.
- González-Castaño, M., Dorneanu, B., & Arellano-García, H. (2021). The reverse water gas shift reaction: a process systems engineering perspective. In *React. Chem. Eng.* 6 (S. 954-976). doi:10.1039/d0re00478b
- Hasan, A., Al Mamun, A., Rahman, S., Malik, K., Al Amran, I., Khondaker, A. N., & Alismail, F. S. (2021). Climate Change Mitigation Pathways for the Aviation Sector. In *Sustainability* 13 (S. 3656). doi:10.3390/su13073656
- Heyne, J., Rauch, B., Le Clercq, P., & Colket, M. (2021). Sustainable aviation fuel prescreening tools and procedures. In *Fuel* 290 (120004). doi:10.1016/j.fuel.2020.120004
- International Energy Agency (IEA). (2021a). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*.
- International Energy Agency (IEA). (2021b). *Key World Energy Statistics 2021*.
- Keller, M., & Otomo, J. (2020). CO production from CO₂ and H₂ via the rWGS reaction by thermochemical redox cycling in interconnected fluidized beds. In *Journal of CO₂ Utilization* 40 (101191). doi:10.1016/j.jcou.2020.101191
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). (2022). *Potenzialstudie Windenergie NRW*.
- Lee, D., Fahey, D., Skawron, A., Allen, M., Burkhardt, U., Chen, Q., . . . Wilcox, L. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In *Atmospheric Environment* 244 (117834). doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117834
- Meurer, A., & Kern, J. (2021). Fischer–Tropsch Synthesis as the Key for Decentralized Sustainable Kerosene Production. In *Energies* 14 (1836). doi:10.3390/en14071836
- Mukhopadhyaya, J., & Rutherford, D. (2022). *Performance analysis of evolutionary hydrogen-powered aircraft*. (International Council on Clean Transportation, Hrsg.)
- Pfennig, M., Gerhardt, N., Pape, C., & Böttger, D. (2017). *Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H₂-Importen aus internationalen EE-Vorzugsgebieten*. (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesy., Hrsg.)
- Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W., & Raksha, T. (2018). Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option. In *Chemie Ingenieur Technik* 90 (1-2) (S. 127-140). doi:10.1002/cite.201700129

- Schmidt, P., Weindorf, W., Roth, A., Batteiger, V., & Riegel, F. (2016). *Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel*. (German Environment Agency, Hrsg.)
- Siegemund, S., Trommler, M., Kolb, O., Zinnecker, V., Schmidt, P., Weindorf, W., . . . Zerhusen, J. (2017). *The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU*. (Deutsche Energie-Agentur GmbH, Hrsg.)
- The Boston Consulting Group GmbH. (2018). *Klimapfade für Deutschland*.
- Transport and Environment. (2018). *Roadmap to decarbonising European aviation*.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). *Adoption of the Paris Agreement FCCC/CP/2015/L.9*.
- Vidal Vázquez, F., Koponen, J., Ruuskanen, V., Bajamundi, C., Kosonen, A., Simell, P., . . . Piermartini, P. (2018). Power-to-X Technology Using Renewable Electricity and Carbon Dioxide from Ambient Air: SOLETAIR Proof-of-Concept and Improved Process Concept. In *Journal of CO2 Utilization Volume 28* (S. 235-246). doi:10.1016/j.jcou.2018.09.026
- World Economic Forum (WEF). (2020). *Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation*.
- Zittel, W., Schmidt, P., Weindorf, W., & Raksha, T. (2016). *Renewables in Transport 2050: Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity*. (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmasch. e.V., Hrsg.)
- Zschocke, A., Scheuermann, S., & Ortner, J. (2012). *High Biofuel Blends in Aviation (HBBA): ENER/C2/2012/420-1 Final Report*.