



Faktenmaterial Wege zu fossilfreiem Fliegen¹

(Stand Mai 2020)

Für den Betrieb von grossen Luftfahrzeugen werden ohne technische Quantensprünge auf lange Sicht nach wie vor Kerosin und kerosinähnliche Treibstoffe benötigt. Aus diesem Grund besteht der Schlüssel zu fossilfreiem Fliegen in der fossilfreien Herstellung von Treibstoffen.

Die von einem Flugzeug für seinen Flug benötigte Energie, muss sich bereits zu Beginn der Reise in Form eines geeigneten Energiespeichers an Bord befinden. Um lange Flugstrecken mit Passagieren und Fracht und an Bord befindlichem Treibstoff zurücklegen zu können, muss die Energieeffizienz eines Flugzeuges entsprechend hoch sein. Dies bedeutet insbesondere auch, dass die verwendeten Energiespeicher nicht zu viel wiegen dürfen, da jedes zusätzlich transportierte Kilogramm mit mehr Schub kompensiert werden muss. Flugzeugturbinen sind verhältnismässig leicht und gehören zu den effizientesten Verbrennungsmotoren überhaupt. Die Einführung von fossilfreien Treibstoffen könnte die Klimawirkung des Luftverkehrs drastisch senken². Der Weg zu fossilfreiem Fliegen führt deshalb zur Frage, ob Kerosin in der Zukunft auch aus fossilfreien Quellen gewonnen werden kann.

Bereits heute kann Kerosin aus einer beliebigen Kohlenstoffquelle zusammen mit Wasserstoff und entsprechender Prozessenergie synthetisch hergestellt werden. Als Kohlenstoffquelle kommen Biomasse, Abfälle, CO₂-Abgase bzw. CO₂, welches der Luft entzogen wird, in Frage. Die Prozessenergie kann mittels Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen werden («Power to Liquid»). Dabei wird beispielsweise der für die Kerosinherstellung benötigte Wasserstoff mittels Elektrolyse, d.h. aus Wasser und Strom, hergestellt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Sonnenenergie direkt als gebündelte Wärme für die Gewinnung der Kerosinbausteine aus der Luft zu nutzen («Sun to Liquid»). «Power to Liquid» ist für die Produktion von Kerosin im industriellen Massstab schon weit entwickelt, wogegen «Sun to Liquid» noch in den Anfängen steckt. Das Hauptproblem sind bislang die hohen Kosten solcher Kerosinproduktionsarten.

1. Treibstoffe im Vergleich

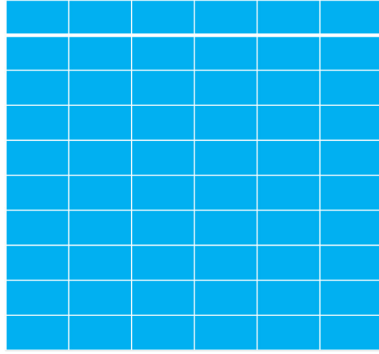
1.1. Kerosin und elektrische Energie

Kerosin speichert pro Kilogramm und pro Liter sehr viel Energie und braucht dementsprechend wenig Platz (hohe Energiedichte bezüglich Masse und Volumen). Der Energieinhalt in einem Kilogramm Kerosin ist rund 60 Mal höher als bei den besten zurzeit einsetzbaren aufladbaren Batterien. Dafür wäre der Wirkungsgrad eines batteriebetriebenen Flugzeuges theoretisch etwa zwei Mal höher, wenn das Gewicht des Flugzeuges gleichbleiben würde³.

¹ Das Faktenmaterial erhielt Inputs, Quellenangaben und ein Review von der ETH, Prof. K. Boulouchos, Leiter der Schweizer Kompetenzzentren für Energieforschung (SCCER). Der Inhalt wurde bezüglich Korrektheit allgemeiner Angaben im Austausch mit dem Bundesamt für Energie (BFE) und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) verifiziert.

² Fossiles CO₂ kann drastisch reduziert werden. Das Reduktionspotenzial weiterer Klimaeffekte durch fossilfreie Treibstoffe ist unklar.

³ Der thermische Wirkungsgrad von Flugzeugturbinen (Kerosin → Rotation des Propellers) beträgt im Reiseflug über 50 %. Der elektrische Wirkungsgrad (Batterie → Rotation des Propellers) beträgt über 90 %.



Energieinhalt 1 kg Kerosin



Energieinhalt 1 kg Hochleistungsbatterie

Gleichzeitig ist das benötigte Volumen bei heutigen Batterien mindestens 20 Mal grösser als bei Kerosin, um die gleiche Menge Energie unterzubringen. Kerosin ist auch bezüglich Flugsicherheit ein idealer Energiespeicher⁴. Ausserdem besteht weltweit die nötige Infrastruktur für die Kerosinbetankung. Die entsprechende Infrastruktur für elektrisches Fliegen müsste überall komplett neu aufgebaut werden. Trotz des höheren Wirkungsgrads von Elektroantrieben wird es auf lange Sicht nicht möglich sein, Passagierflugzeuge komplett elektrisch betreiben zu können. Selbst eine Steigerung des heutigen Energieinhalts von Hochleistungsbatterien um den Faktor 5 wäre dazu noch nicht ausreichend⁵. Im Bereich der elektrischen Antriebe sind Hybridantriebe in den kommenden Jahrzehnten am ehesten umsetzbar. Diese verwenden als Hauptenergiespeicher nach wie vor Kerosin und zusätzlich Batterien sowie elektrisch angetriebene Turbinen. Darüber hinaus besteht eine Reihe weiterer Rahmenbedingungen, welche elektrische Passagierflüge noch auf viele Jahre hinaus unrealistisch und ökologisch problematisch machen (Details dazu im *Faktenblatt elektrisches Fliegen*).

1.2. Wasserstoff

Wasserstoff als Treibstoff kann in Brennstoffzellen in Kombination mit Batterien für elektrische Antriebe oder direkt in Flugzeugturbinen als Antriebsenergieträger verwendet werden. Wasserstoff ist ein kohlenstofffreier Treibstoff, welcher direkt aus Strom und Wasser herstellbar ist, beispielsweise mit «Überschussstrom» aus Photovoltaik oder Wind mittels Elektrolyse.

Ein Kilogramm Wasserstoff enthält fast drei Mal so viel Energie wie ein Kilogramm Kerosin, jedoch ist das dafür benötigte Speichervolumen pro kWh Energie wesentlich grösser und deshalb das Hauptproblem für die Mitnahme grosser Energiemengen in einem Flugzeug. Für den Einsatz von Wasserstoff in Flugzeugen muss dessen Volumen auf ein Minimum verkleinert werden. Die Speicherung bei sehr hohen Drücken (um 700 bar), wie sie bei ersten käuflichen Wasserstoffautos angeboten wird, kommt für Flugzeuge mit entsprechendem Reichweitenbedarf nicht in Frage. Die Tanks wären angesichts der für Flüge benötigten Energiemenge immer noch viel zu gross und viel zu schwer. Eine wesentlich leichtere und kompaktere Variante ist die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form – wie beim Einsatz in Weltraumraketen. Damit Wasserstoff unter normalem Druck flüssig bleibt, muss er bei extrem niedriger Temperatur in isolierten Tanks aufbewahrt werden. Die Lagerungstemperatur liegt bei atmosphärischem Druck für flüssigen Wasserstoff bei minus 253° C, also nahe des absoluten Nullpunkts (Kryogenik⁶). Das benötigte Speichervolumen ist dabei noch etwa vier Mal so gross wie bei der Verwendung von Kerosin. Wasserstoff benötigt damit trotz Verflüssigung zu viel Tankvolumen, um damit genügend Energie für lange Strecken an Bord eines Flugzeuges bringen zu können.

Im Jahre 1988 baute der russische Flugzeughersteller Tupolev ein Flugzeug des Typs TU-154 für den Betrieb mit flüssigem Wasserstoff um (Bezeichnung TU-155). Der Flugzeughersteller Tupolev demonstrierte damit die grundsätzliche Machbarkeit eines Wasserstoffflugzeuges. Insgesamt wurden mit diesem

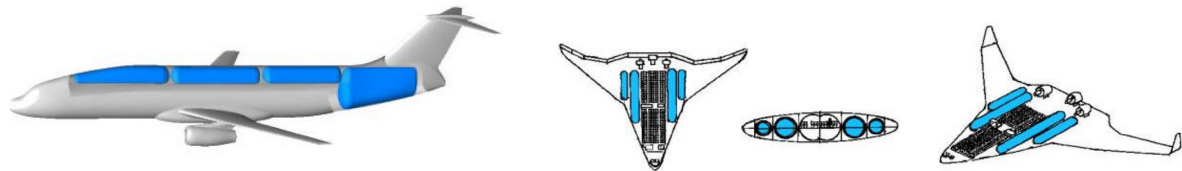
⁴ Der Flammpunkt ist ausreichend hoch. Der Gefrierpunkt liegt (für den häufig verwendeten Jet A1) bei -47°C.

⁵ Analyse BAZL und Bauhaus Luftfahrt

⁶ Kryogenik ist die Technik zur Erzeugung und Nutzung von Materialien bei sehr tiefen Temperaturen, üblicherweise unter -150°C. Für die Verflüssigung von Wasserstoff muss dessen Temperatur aus physikalischen Gründen unter -240°C liegen. Auch bei einem Mehrfachen des atmosphärischen Drucks muss die Temperatur des Wasserstoffs tiefer als -240°C sein, damit er flüssig bleibt.

System aber nur wenige Flüge durchgeführt. Welche Gründe zur Aufgabe des umfangreichen Projektes geführt haben, ist unklar; später wurde das Flugzeug zur Verwendung mit verflüssigtem Erdgas umgebaut.

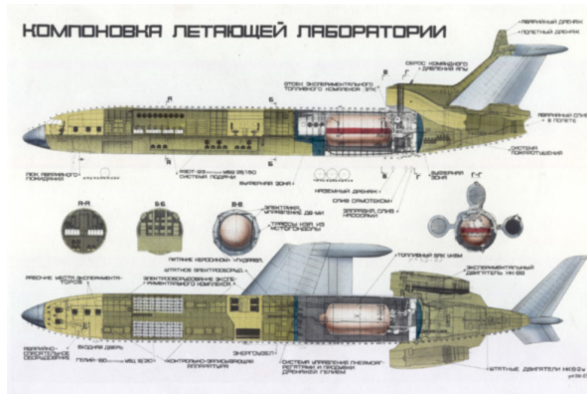
In den Jahren 2000 bis 2002 wurde in einem umfangreichen EU-Forschungsprojekt (CRYOPLANE)⁷ unter der Leitung von AIRBUS die Weiterentwicklung von Flüssig-Wasserstoff-Passagierflugzeugen für eine allfällige Markteinführung untersucht. Es zeigte sich, dass ein solches Flugzeug bei gleicher Transportleistung kaum schwerer als ein herkömmliches Flugzeug wäre, aber wegen des grösseren Volumens vermutlich ca. 10 % mehr Energie benötigen würde. Die nachfolgenden Bilder aus dem CRYOPLANE-Forschungsbericht zeigen Varianten der Unterbringung der Flüssig-Wasserstofftanks:



Quelle: CRYOPLANE

Sowohl die Bereitstellung, die Zwischenspeicherung und der Transport von flüssigem Wasserstoff bei minus 253° C wären aufwändig und mit hohem Energieaufwand verbunden. Das CRYOPLANE-Projekt schätzte einen zusätzlichen Energieaufwand von 30 % und bezeichnete die Kosten alleine schon für den Aufbau einer komplett neuen, globalen Betankungsinfrastruktur für kryogenen Wasserstoff als hoch. Im Gegensatz dazu ist Kerosin einfach zu lagern, zu transportieren und zu verteilen.

Auch 17 Jahre nach dem CRYOPLANE-Projekt stellt die Speicherung des Wasserstoffs für die übliche Grösse und den Reichweitenbedarf von Passagierflugzeugen ein grosses Problem dar⁸. Eine Brennstoffzellen-Batteriekombination fällt als Antriebstechnik aufgrund des hohen Leistungsbedarfs grosser Flugzeuge bis auf weiteres weg: Mit heutiger Batterietechnologie würde alleine das Gewicht von Pufferbatterien für die Brennstoffzellen das Gesamtgewicht heutiger Passagierflugzeuge übersteigen⁹. Ob



Originalzeichnung von Tupolev. Der Wasserstofftank befindet sich im hinteren, druckbelüfteten Rumpfabschnitt, um abgedampften Wasserstoff ins Freie zu befördern. Das rechte Triebwerk wurde für die Wasserstoffverbrennung umgebaut. (Quelle: Tupolev)



Aufnahme der stillgelegten TU-155. (Quelle: Juergen Schiffmann)

Brennstoffzellen oder Gasturbinen: CO₂-Emissionen gäbe es keine, aber die Wasserdampfemissionen würden in grosser Höhe verglichen mit der Kerosinverbrennung um bis zu einem Faktor 3 steigen¹⁰. Es ist nicht klar, ob dies zu einer Verstärkung der nicht durch CO₂ bedingten Klimawirkung des Luftverkehrs führen könnte. Im September 2018 wurde in Europa das Nachfolgeprojekt ENABLEH₂ gestartet¹¹, welches technische, ökologische und ökonomische Aspekte weiter untersucht.

⁷ EU Projektnummer GRD1-1999-10014, Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis

⁸ Dauerhafte Speicher- und Leitungsmaterialien für ein Flugzeug, Speicherverluste (Boil-off), Aufbereitung in der Luft, Lebensdauer der Komponenten

⁹ Limitierungen der maximalen Leistungsabgabe von Brennstoffzellen und Batterien und Zusammenhang mit der Lebensdauer. Ein Flugzeug mit 180 Sitzen braucht beim Start ca. 30 Megawatt Antriebsleistung. Angaben zum Gewicht: siehe Faktenblatt Elektrisches Fliegen

¹⁰ Abschätzung aus dem Energiebedarf der Antriebsvarianten für ähnliche Transportleistung und den chemischen Reaktionsgleichungen

¹¹ ENABLING cryogenic Hydrogen based CO₂ free air transport, EC grant no 769241, Horizon 2020, <https://www.enableh2.eu/>

1.3. Eignung der verschiedenen Treibstoffe

Auf Grund ihrer physikalischen und technischen Eigenschaften stellt die Herstellung und der Betrieb von elektrisch oder mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen die Wissenschaft und das Ingenieurwesen vor technische und praktische Herausforderungen für die zurzeit keine Lösungen bestehen. Daher könnten grosse Passagierflugzeuge mit alternativen Antrieben – sollten die geschilderten Probleme gelöst werden können – voraussichtlich erst in einigen Jahrzehnten eingeführt werden. Kerosinbetriebene Flugzeuge, welche heute und in den kommenden Jahren in Verkehr gesetzt werden, haben eine durchschnittliche Einsatzdauer von 30 Jahren. Kerosin wird demnach voraussichtlich bis mindestens 2050 der wichtigste Energieträger für die globale Luftfahrt bleiben. Davon ausgehend muss sich eine realistische Reduktion von fossilem CO₂ in der Luftfahrt in naher Zukunft neben der Reduktion des Verbrauchs¹² primär darauf fokussieren, den Kohlenstoff im Kerosin aus nicht fossilen Quellen zu gewinnen und die Prozessenergie für die Herstellung des Treibstoffs mittels Nutzung erneuerbarer Energien bereitzustellen.

2. Herstellung von Treibstoff mit nicht fossilem Kohlenstoff

Bereits heute kann Kerosin aus einer beliebigen Kohlenstoffquelle zusammen mit Wasser und entsprechender Prozessenergie synthetisch hergestellt werden. Für eine reale und globale Reduktion von CO₂ sind die Wahl der Kohlenstoff- und Energiequelle für die Treibstoffherstellung zentral. Die Energiequelle darf selber nur sehr wenig CO₂ generieren, sonst besteht die Gefahr, dass global durch die synthetische Treibstoffherstellung sogar mehr CO₂ produziert wird, als durch die Verwendung des fossilen Kerosins¹¹.

2.1. Kohlenstoffquellen

Pflanzen werden bereits heute als Kohlenstoffquelle zur Herstellung synthetischer Treibstoffe verwendet. Pflanzen holen den für ihr Wachstum nötigen Kohlenstoff aus der Luft (Photosynthese). Da dieser bei der Verbrennung des daraus gewonnenen Treibstoffs wieder in die Atmosphäre gelangt, wird der Kohlenstoffkreislauf geschlossen. Die Nutzung biogener Treibstoffe kann so zu einer Reduktion der Klimawirkung beitragen, da bei der Verbrennung kein zusätzliches CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Allerdings steht diese Nutzung von Pflanzen in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, einhergehend mit einem grossen Verbrauch von Landflächen und einem hohen Wasserbedarf¹³.

Treibstoffe können auch aus *kohlenstoffhaltigen Abfällen* (z.B. Haushalts-, Landwirtschafts- und Industrieabfälle) hergestellt werden. Diese Produktionsart hat über die ganze Prozesskette gesehen ein besseres CO₂-Reduktionspotenzial als die Verwendung von eigens dafür angebaute Pflanzen. Die verfügbaren Rohstoffmengen können aber nur einen beschränkten Beitrag an die benötigten Mengen von alternativen Treibstoffen leisten.

Kohlenstoff für die Treibstoffherstellung kann schliesslich über *CO₂-Entnahme aus der Luft* erfolgen: Die Herstellung von Treibstoff mit Kohlenstoff aus der Atmosphäre oder aus nicht fossilen CO₂-emittierenden Produktionsprozessen¹⁴ ist die klimawirksamste Lösung – unter der Bedingung, dass die Prozessenergie dabei möglichst ohne Umwege direkt aus den CO₂-ärmsten erneuerbaren Energiequellen (Wasserkraft, direkte Sonnenenergie) gewonnen wird. Für die Herstellung solcher möglichst klimaneutraler Treibstoffe aus erneuerbarer Energie sind grundsätzlich folgende Schritte nötig:

1. Aufnahme von CO₂ und H₂O (Wasser) aus der Luft;
2. Reduktion dieser Komponenten zu den sogenannten Synthesegasen CO (Kohlenmonoxid) und H₂ (Wasserstoff);
3. Herstellung von Kerosin aus den Synthesegasen.

¹² Die effizienteste Massnahme bezüglich Umweltwirkung wäre wie in anderen Sektoren die globale Reduktion des Konsums.

¹³ German Environment Agency (UBA), Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel, 2016, Authors: LBST, BHL M. S. Wigmostaet al., National microalgaebiofuelproduction potentialand resourcedemand, Water Resour. Res., 47, W00H04, 2011. Ein besonders negatives Beispiel ist die Produktion von Palmöl.

¹⁴ Beispielsweise aus der Zementproduktion: In diesem Falle würden deren CO₂-Emissionen als Flugemissionen emittiert. Die Nutzung von CO₂ eines fossilen Kraftwerks, welches elektrische Energie erzeugt, wäre indessen als globale CO₂-Reduktionsmassnahme unbrauchbar (siehe Fussnote 15).

3. Herstellung von Kerosin aus den Synthesegasen

Die Wahl der Energiequelle für den Prozess entscheidet neben den Ausgangsstoffen, wie klimaneutral der hergestellte Treibstoff ist. Nach den aktuellen Erkenntnissen der Schweizer Kompetenzzentren für Energieforschung (SCCER)¹⁵ generiert Wasserkraft für die Stromproduktion am wenigsten CO₂ pro kWh, gefolgt von Windkraft und Photovoltaik. Bei Verwendung von Photovoltaik und Wind braucht es für einen kontinuierlichen Betrieb der Anlagen ausserdem Stromspeicher, welche wiederum in der Herstellung CO₂ verursachen – und zusätzlich Kosten. Es wäre deshalb ideal, Strom aus Wasserkraft zu verwenden. Für die Schweiz scheint ein weiterer Ausbau der Wasserkraft indessen schwierig zu sein, obwohl deren Stromproduktion am klimafreundlichsten wäre. Es gibt viel Konkurrenz von Energiesektoren für die Nutzung der Wasserkraft, gerade weil sie in der Form von erneuerbarer elektrischer Bandenergie (24 Stunden am Tag) und Regelenergie sehr wertvoll und langfristig günstig ist. Ohne auf länderspezifische Besonderheiten einzugehen, wird Prozessenergie deshalb auch aus Photovoltaik und Wind gewonnen werden müssen.

Es gibt Treibstoffproduktionen wie z.B. «Solar to Liquid» (siehe unten), welche nicht in erster Linie Strom, sondern Hochtemperaturwärme benötigen. Wird die Prozesswärme für die Treibstoffherstellung direkt aus der Strahlung der Sonne gewonnen, so ist die Nutzung der Sonnenenergie äusserst CO₂-arm und auf ähnlichem Niveau wie die Wasserkraft. Auch die lokale Kurzzeitspeicherung von Hochtemperaturwärme, um Abschattungen oder die Nacht zu überbrücken, ist viel einfacher als die Speicherung von elektrischer Energie.

Für die ersten beiden Schritte der Treibstoffherstellung (siehe oben) stehen heute mindestens zwei Verfahren zur Verfügung:

- a. «Direct Air Capture **Power to Liquid (PtL)**»: CO₂ wird mittels grosser Filteranlagen direkt aus der Luft gewonnen. Parallel dazu wird aus Wasser durch ein mit erneuerbarer Energie betriebenes Elektrolyseverfahren Wasserstoff hergestellt. Ein Teil des Wasserstoffs wird verwendet, um das CO₂ in CO umzuwandeln¹⁶. In dieser Prozesskette entsteht sogenanntes Syngas (CO und H₂), woraus Kerosin erzeugt werden kann. Die Gesamtbilanz des gewonnenen Treibstoffs bezüglich CO₂-Reduktion ist abhängig davon, wie energie- und ressourcenaufwändig die verwendete Infrastruktur ist und zu welchen Teilen die Prozessenergie (Wärme- und elektrische Energie) aus erneuerbaren Energiequellen stammt.
- b. «**Sun to Liquid (StL)**»¹⁷: CO₂ und Wasserdampf werden direkt der Umgebungsluft entzogen und mit Hilfe von thermochemischen Reaktoren, welche durch konzentrierte Solarstrahlung (via Sonnenspiegel) beheizt werden, zu Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) umgewandelt. Auch hier wird aus dem entstandenen Synthesegas Kerosin erzeugt. Die Gesamtbilanz bezüglich CO₂-Reduktion und Ressourcenschonung kann als sehr gut bezeichnet werden, da Kohlen- und Wasserstoff, die Grundbausteine des Treibstoffs, aus der Luft und die Prozesswärme direkt von der Sonne stammen.



StL-Demonstrator, Móstoles, Spanien (Photo: Christophe Ramage ©ARTTIC 2019)

¹⁵ SCCER Joint Activity: White Paper Power-to-X, Juni 2019, PSI, ETH, Empa, Université de Genève, ZHAW, HSR, Universität Luzern, darin: C.Bauer, S. Hirschberg (eds.) et al, «Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies», 2017

¹⁶ durch die sog. umgekehrte Water-Gas-Shift-Reaktion

¹⁷ <https://www.sun-to-liquid.eu/>

Der dritte Schritt, die Herstellung des Kerosins aus den Synthesegasen erfolgt in diversen Anwendungen bereits seit Jahrzehnten und ist für die Luftfahrt zertifiziert. Dieser Schritt erzeugt mehr Wärmeenergie als benötigt wird, um den Prozess am Laufen zu halten. Es braucht also keine weitere Energiequelle, sobald der Prozess einmal gestartet ist.

Die beiden Verfahren (PtL und StL) bieten folgende Vorteile:

1. Das CO₂, welches bei der Verbrennung des Kerosins in die Atmosphäre gelangt, wurde bei dessen Herstellung bereits der Atmosphäre entzogen. In dem Sinne ist der Treibstoff CO₂-neutral.
2. Bei StL muss die erneuerbare Energie für den Treibstoffgewinnungsprozess kaum gespeichert oder umgewandelt werden, da das Verfahren auf die direkte Nutzung der Sonnenwärme ausgerichtet ist.
3. Bei StL wird der Kohlen- und der Wasserstoff aus der Luft gewonnen. Somit können Produktionsanlagen auf unwirtlichen Flächen aufgebaut werden.
4. Bei StL ist der Flächenbedarf für die Sonnenspiegel (Heliostaten) vergleichsweise gering, wenn die Produktion in sonnenreichen Gegenden stattfindet. Eine Fläche wenig grösser als die Schweiz könnte ausreichen, um den heutigen globalen Bedarf an Kerosin abzudecken¹⁸.
5. PtL ist bereits heute auf einem hohen Entwicklungsstand.
6. Der gewonnene Treibstoff kann schon heute in allen mit konventionellem Kerosin betriebenen Flugzeugen mit einem Anteil von 50 % beigemischt werden, ohne dass an den Flugzeugen irgendeine technische Anpassung notwendig wäre. Neue Flugzeuge könnten auf die Verwendung von 100 % synthetischem Kerosin aus PtL oder StL ausgelegt werden¹⁹.
7. Die weltweit für den Luftverkehr vorhandene Logistik- und Betankungsinfrastruktur kann uneingeschränkt genutzt werden. Es braucht keine zusätzlichen Ressourcen, weil keine neue Infrastruktur für die weltweite Verteilung des Treibstoffs und die Betankung aufgebaut werden muss.
8. Das Kerosin aus diesen beiden Verfahren ist frei von Schwefel und Aromaten und reduziert auch in bestehenden Triebwerken die Partikelemissionen, was sich zusätzlich positiv auf die lokale Luftqualität an Flughäfen und die Klimawirkung des Luftverkehrs auswirkt (Vermeidung von Kondensationskeimen für Wasserdampf).

3.1. Herausforderungen

Kosten: Die Herstellungskosten pro Liter synthetischem Kerosin können heute nicht mit den Kosten für das erdöl-, kohle- oder erdgasbasierte Produkt mithalten²⁰. Für heutige kleine Demonstrationsanlagen liegen die Kosten pro Liter synthetisches Kerosin in der Grössenordnung fünf bis sechs Mal höher als für fossiles Kerosin. Die Kosten dürften mit fortschreitender Industrialisierung deutlich geringer werden. Gleichzeitig erhöht die Bepreisung von fossilem CO₂ durch Emissionshandel und dem globalen CORSIA-Standard²¹ die Konkurrenzfähigkeit von synthetischem Kerosin. Bei PtL und Verwendung von CO₂ aus der Luft stellen die Kosten für die CO₂-Filteranlagen das grösste Hindernis dar.

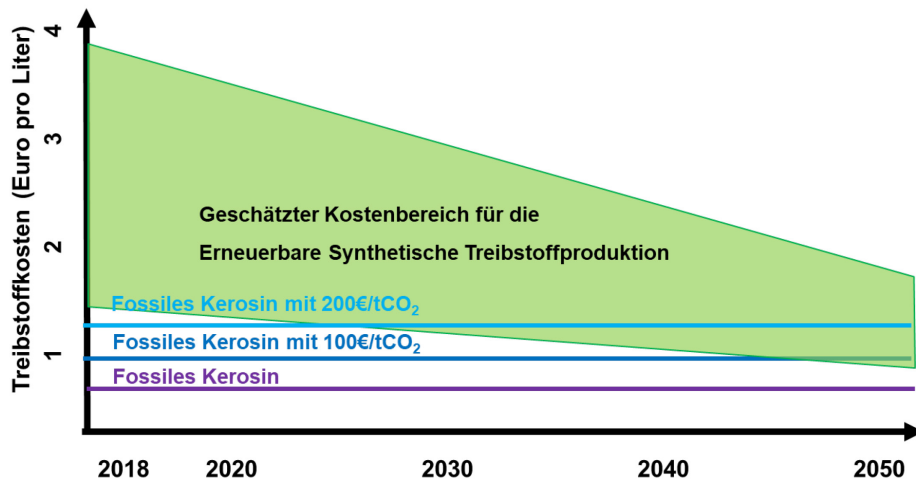
Schätzungen zufolge könnten die Treibstoffkosten von synthetischem Kerosin bereits vor 2030 unter die Kosten von fossilem Kerosin fallen, wenn fossiles CO₂ global mit 200 Euro pro Tonne bepreist werden könnte.

¹⁸ Persönliche Kommunikation von Prof. Aldo Steinfeld, ETH

¹⁹ 100 % synthetisches Kerosin ohne Aromaten hat eine geringe Schmierwirkung.

²⁰ SUN-to-LIQUID DeliverableD1.6: Economic analysis and risk assessment

²¹ Luftfahrtstandard (global) zur Kompensation des Zuwachses der CO₂-Emissionen aus dem weltweiten Luftverkehr. Erstes Bemessungsjahr 2020.



Prognostizierte Preisentwicklungen von synthetischen und fossilem Kerosin (BAZL²²)

Standortwahl: Geeignete Standorte können aus Sicht der Primärenergiebereitstellung relativ einfach definiert werden, beispielsweise über den Bedarf an jährlicher direkter Sonneneinstrahlung. Zusätzlich sollten bevorzugt Orte gewählt werden, in welchen «Green Refineries» installiert oder bestehende adaptiert werden können. Dabei stellt sich die Frage, ob die Herstellung von synthetischem Kerosin an eigentlich dafür geeigneten Standorten auch auf Grund der lokal herrschenden Rahmenbedingungen möglich ist

Die Realisierung der Umsetzung von PtL und StL benötigt von allen Beteiligten ein grosses Engagement. Dabei sind die folgenden drei Bereiche hervorzuheben:

1. Verstärkung der Forschungsanstrengungen zur Steigerung des Wirkungsgrades und neuer Materialien der beschriebenen PtL- und StL-Anlagen, um die Kosteneffizienz zu verbessern²³.
2. Förderung der Erstellung grösserer Anlagen, um insbesondere StL konkurrenzfähiger zu machen.
3. Zwischenstaatliche Gespräche zur Findung geeigneter Produktionsstandorte und Vereinbarung fairer Rahmenbedingungen.

Die Vermeidung von neuen CO₂-Emissionen ist langfristig zielführender als die nachträgliche Kompensation von Emissionen.

²² Quellen: 1) AGORA, The future cost of electricity based synthetic fuels, 2) PROGNOSE, Status and Perspectives of Liquid Energy Sources in the Energy Transition, 3) Climate Impact and Economic Feasibility of Solar Thermochemical Jet Fuel Production, C. Falter et al., Environmental Science and Technology, 50(1), pp 470 – 477, 2016

²³ C. Falter, Climate Impact and Economic Feasibility of Solar Thermochemical Jet Fuel Production, Environ. Sci. Technol., 2016, 50 (1)