



Treibstoffe aus erneuerbarem Strom oder solarthermischer Energie – eine Lösung für fossilfreies Fliegen?

Aktenzeichen: BAZL-047.1-5/1

Sektion Umwelt (LEUW), in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie (BFE)

02. Juli 2020

Die Internationale Zivilluftfahrt Organisation (ICAO) hat sich zum Ziel gesetzt, den fossilen CO₂-Ausstoss der internationalen Zivilluftfahrt langfristig zu reduzieren. Ab 2020 soll das Wachstum des Aviatiksektors weltweit nur noch CO₂-neutral erfolgen. Da sich für relevante Transportleistungen der internationalen Zivilluftfahrt mittel- bis längerfristig keine alternativen Antriebslösungen, wie z.B. Elektro- oder Hybridantriebe, anbieten, besteht eine Lösung des Problems unter anderem darin, fossiles Kerosin durch alternative synthetische Treibstoffe zu ersetzen.

Synthetische Treibstoffe unterscheiden sich von fossilem Kerosin lediglich im zugrundeliegenden Rohstoff (Wasserstoff- und Kohlenstoffquelle) und dem damit verbundenen Produktionsprozess. Demzufolge hängt das CO₂-Reduktionspotenzial eines synthetischen Treibstoffes massgeblich von der Wahl des Rohstoffes und der Prozessenergie ab, die für die Herstellung benötigt wird.

In jüngster Zeit wurden vor allem grosse internationale Anstrengungen unternommen, biogene Treibstoffe¹ für die Aviatik zu entwickeln. Diese Treibstoffe haben die Nachteile, dass sie, falls sie nicht ausschliesslich aus Abfällen hergestellt werden, in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen können, intensive Nutzung von grossen Landflächen (inkl. möglicher Landnutzungsänderung) voraussetzen, sowie einen hohen Wasserverbrauch bei der Kultivierung aufweisen. Des Weiteren wird das Produktionsvolumen von biogenen Treibstoffen für die Luftfahrt massgeblich durch die limitierte Rohstoffverfügbarkeit begrenzt und steht oft in Konkurrenz zur kostengünstigeren Treibstoffproduktion für den Strassenverkehr.

Im Hinblick auf die genannten Schwachpunkte bilden aus erneuerbaren Quellen gewonnene strom- bzw. solarbasierte Treibstoffe eine interessante Alternative zu biogenen Treibstoffen, da bei entsprechend gewählter Produktion wenig CO₂-Emissionen anfallen und die benötigten Ressourcen beinahe unlimitiert zur Verfügung stehen.

Bis zum heutigen Zeitpunkt sind die Kosten für strom- bzw. solarbasierte Treibstoffe gegenüber konventionellem Kerosin drei- bis sechsmal höher. Solche Treibstoffe werden gegenüber konventionellem Kerosin in Zukunft erst dann wettbewerbsfähig, wenn ökonomische Skaleneffekte eintreffen und regulatorische Instrumente geschaffen werden, die Anreize für den Einsatz solcher Treibstoffe schaffen.

¹ hergestellt aus pflanzlichen Ölen/Fetten, Zucker oder Abfällen (aus Haushalt, Landwirtschaft oder Industrie)



1 Herstellungsverfahren für strom- und solarbasierte Treibstoffe

Die Herstellungsverfahren für strom- und solarbasierte Treibstoffe werden als «Power-to-Liquid» (PtL) und «Sun-to-Liquid» (StL) bezeichnet und beschreiben die Herstellung von synthetischen flüssigen Kohlenwasserstoffen, basierend auf Elektrizität oder Wärme, Wasser und CO₂.

1.1 Power-to-Liquid (PtL)

Bei dem Verfahren Power-to-Liquid (PtL) wird in einem ersten Schritt Wasserstoff (H₂) durch die Elektrolyse von Wasser (H₂O) hergestellt. Ein Teil des hergestellten Wasserstoffes wird anschliessend für die Herstellung von Kohlenmonoxid (CO) aus Kohlendioxid (CO₂) über die Wassergas-Shift-Reaktion verwendet. Für die Gewinnung von CO₂ als Kohlenstoffquelle gibt es folgende Möglichkeiten:

- Direkte Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre («direct-air-capture» DAC);
- Die Gewinnung aus biogenen Quellen (z.B. Biogas) oder
- Mittels Rauchgaswäsche von industriellen Anwendungen (z.B. CO₂ aus der Zementherstellung oder fossilen Kraftwerken).

In einem weiteren Schritt wird über das Fischer-Tropsch-Verfahren das Gemisch aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), welches als Synthesegas bezeichnet wird, zu Kohlenwasserstoffen (C_xH_y) synthetisiert. Da es sich beim Fischer-Tropsch-Verfahren um eine exotherme chemische Reaktion handelt, könnte die freigesetzte Wärme im Produktionsprozess (z.B. für die Elektrolyse) eingesetzt werden. Im letzten Schritt werden die so gewonnenen Ausgangsstoffe zu Flugtreibstoff weiterverarbeitet.

1.2 Sun-to-Liquid (StL)

Beim Verfahren «Sun-to-Liquid» (StL) wird im Gegensatz zu PtL Hochtemperaturwärme, die durch Sonnenenergie gewonnen wird, direkt als Prozessenergie für die Herstellung von Synthesegas verwendet. Dazu können die gleichen Kohlenstoffquellen wie bei PtL verwendet werden. In einer thermochemischen Reaktion wird Wasserdampf (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂) in die Bestandteile H₂ und CO zerlegt. Die Synthese mittels Fischer-Tropsch-Verfahren und die Veredelung von flüssigen Kohlenwasserstoffen erfolgen analog zum Produktionsprozess PtL.

2 Technologischer Entwicklungsstand

Elektrolyse: Bei der alkalischen Elektrolyse handelt es sich um eine etablierte Technologie, die heute zur Verfügung steht. Die saure Elektrolyse (PEM-Elektrolyse) findet zunehmend auch auf grösserer Skala Verbreitung und bietet den Vorteil höherer Stromdichten und eines flexibleren Betriebes². Weiter existiert die Festoxid-Elektrolysezellen (SOEC), welche sich noch stark in der Entwicklung befindet.

CO₂-Aufbereitung: Die Abscheidung von CO₂ aus Biogas³ sowie die Rauchgaswäsche sind industriell etablierte Verfahren, wohingegen die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre (DAC) technologisch noch weniger weit entwickelt ist.

Fischer-Tropsch-Verfahren: Das Verfahren ist technologisch weit ausgereift und wird bereits in diversen Treibstoffherstellungsverfahren, wie z. B. «coal-to-liquid» (Kohle zu flüssig Kohlenwasserstoff) in grossem Mass eingesetzt. Es ist als Verfahren nach der Norm ASTM D7566⁴ im Produktionsprozess

² Flexibler Betrieb: PEM-Elektrolyseure sind prädestiniert für die Nutzung hoher Anteile an elektrischer Energie aus Photovoltaik und Wind, welche täglich und saisonal stark fluktuieren.

³ Beim Gärungsprozess aus organischen Abfällen produzieren Bakterien ein Gasgemisch, das etwa zu zwei Dritteln aus Methan und zu einem Drittel aus CO₂ besteht. Soll «Biogas» als hochwertiger Brennstoff (hoher Brennwert) mit fast 100% Methananteil dienen, so muss das CO₂ abgeschieden werden. Dies erfordert eine entsprechende Technologie und Prozessenergie.

⁴ ASTM, D7566, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, 2018.

für synthetische Flugtreibstoffe bereits zugelassen. Die maximale Beimischung solcher synthetischen Flugtreibstoffe zu konventionellem Kerosin beträgt momentan 50 %, mit einem minimalen Gehalt an Aromaten von 8 % für das Treibstoffgemisch.

Sun-to-Liquid: Dieses Herstellungsverfahren ist gegenüber PtL noch wenig ausgereift. Bis zum heutigen Zeitpunkt schaffte dieses Verfahren den Sprung von der Forschung (BFE-Projekte: «SOLIFUEL», «FUELREC», «HYBREC», EU-Projekt «SOLAR-JET», Horizon2020-Projekt «Sun to Liquid»⁵) in die industrielle Anwendung noch nicht, wogegen für PtL erste grössere industrielle Anlagen in Planung sind.

3 Nachhaltigkeit von strom- und solarbasierten Treibstoffen

3.1 Klimaneutralität

Damit strom- bzw. solarbasierte Treibstoffe den CO₂-Ausstoss des Aviatiksektors massgeblich reduzieren, müssen sie möglichst klimaneutral hergestellt werden. Dabei ist für das PtL-Verfahren entscheidend, dass die für die Elektrolyse verwendete Elektrizität aus erneuerbaren Energien (Wasserkraft, Wind oder Sonne) stammt und das verwendete CO₂ entweder direkt aus der Luft abgeschieden wird, oder aus biogenen Reststoffen und Abfällen (wie z. B. Biogas aus Klärschlamm, Grünabfällen, landwirtschaftlichen Reststoffen oder Gülle) stammt. Zudem hängt die Umweltbilanz des Produktionsprozesses davon ab, wie die Abwärme des Fischer-Tropsch-Verfahrens in den Produktionsprozess integriert werden kann.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte, kann die CO₂-Einsparung, welche durch den Einsatz von strombasierten Treibstoffen erreicht werden kann, gegen 100 %⁶ im Vergleich zu konventionellem Kerosin⁷ betragen. Unter Berücksichtigung der Treibhausgasemissionen, welche durch den Bau der Produktionsanlagen anfallen, beträgt die Treibhausgasemissionsreduktion 69–88 % gegenüber konventionellem Kerosin. Im Vergleich dazu liegt das CO₂-Reduktionspotenzial von biogenen Treibstoffen bei 30–80 %, stark abhängig vom verwendeten biogenen Rohstoff und dem Produktionsverfahren⁸. Die Herstellung von synthetischen Treibstoffen mittels StL weist nach unseren ersten Einschätzungen eines der höchsten CO₂-Reduktionspotenziale der verschiedenen aufgezeigten Varianten auf⁹.

3.2 Wasserverbrauch

Beim Herstellungsverfahren PtL wird für die Elektrolyse Wasser als Rohstoff benötigt. Gemäss Schätzungen einer Studie des deutschen Umweltbundesamtes⁶ werden für die Herstellung von einem Liter synthetischem Treibstoff 1.3–1.4 Liter Wasser benötigt. Im Vergleich dazu beträgt die Wassermenge, die für einen Liter biogenen Treibstoff benötigt wird, je nach Rohstoff zwischen 1'500 und 20'000 Liter¹⁰. Dies ist mit ein Grund, weshalb im Bereich der biogenen Treibstoffe nur noch sogenannte «advanced biofuels» weiterverfolgt werden sollen, welche einen viel geringeren Wasserverbrauch aufweisen.

3.3 Landverbrauch

Die Photovoltaik-Anlagen, Windparks sowie Stauseen, welche für die Produktion von Elektrizität aus erneuerbaren Energien benötigt werden, beanspruchen pro Energieeinheit weniger Landfläche als biogene Treibstoffe. Für Windkraftanlagen kann mehr als 95 % der beanspruchten Fläche anderweitig, z. B. für Landwirtschaft verwendet werden. Bei Photovoltaik-Anlagen, die auf kultivierbarem Land

⁵ «Sun to Liquid». [Online]. Available: <https://www.sun-to-liquid.eu/> [Zugriff: 30.3.2020]

⁶ Umweltbundesamt (UBA): Power-to-Liquids (PtL): Sustainable alternative fuels produced from renewable electricity, 2016.

⁷ Die Treibhausgasemissionen entlang des gesamten Lebenszyklus für konventionelles Kerosin beträgt rund 89 gCO₂ eq/MJ (Grössenordnung, da Angaben für Lebenszyklus-Emissionen auch von der Berechnungsmethodik abhängen).

⁸ EASA Environmental Report, 2019.

⁹ StL ist noch in der Entwicklungsphase und wissenschaftliche Umweltbilanzierungen werden erst erarbeitet.

¹⁰ Joint Research Center of the European Commission (JRC): Bioenergy and Water, Report EUR 26160, 2013.

installiert werden, beträgt dieser Anteil ca. 66 %⁶. Ein interessanter Aspekt ist, dass unwirtschaftliches Land für die Produktion von Elektrizität aus erneuerbaren Energien, bzw. der direkten Produktion von Wärme aus Sonnenlicht genutzt werden kann. Dies birgt insbesondere für Staaten mit grossen Flächen an unproduktivem und in dafür geeigneten Gebieten gelegenen Land interessante wirtschaftliche Chancen.

4 Kosten von strom- und solarbasierten Treibstoffen

In Abhängigkeit von den Wirkungsgraden für den Produktionsprozess bilden die Kosten für die benötigten Energiemengen einen wesentlichen Faktor für die Produktionskosten solcher Treibstoffe. Zudem sind einzelne Prozessschritte, insbesondere bei StL, heute noch in der Entwicklungsphase. Insgesamt sind deshalb die Produktionskosten im Moment noch sehr hoch. Als Folge davon ist der Preis von PtL und StL gegenüber konventionellem Kerosin heute drei- bis sechsmal höher^{11 12 13}.

Kerosin aus PtL und StL wird gegenüber konventionellem Kerosin erst dann wettbewerbsfähig sein, wenn ökonomische Skaleneffekte eintreffen werden. Dies bedeutet, dass die bestehenden Anlagen vergrössert werden und neue Produktionsstätten errichtet werden müssen, damit grosse Mengen produziert werden können. Auch nach Eintreffen der erhofften ökonomischen Skaleneffekte werden bei PtL die Elektrizitätskosten der entscheidende Schlüsselfaktor für die Wettbewerbsfähigkeit sein. Für eine wirtschaftliche Produktion von synthetischen Flugtreibstoffen über PtL gilt es somit sicherzustellen, dass eine Produktionsanlage kostengünstigen Strom aus erneuerbaren Energien beziehen kann.

5 Förderung in der Schweiz

In der Schweiz laufen im Bereich Forschung und Technologieentwicklung sowohl für PtL als auch für StL viele Aktivitäten, die stark durch die öffentliche Hand (EU-Projekte, Projekte gefördert durch das Bundesamt für Energie BFE und den Schweizerischen Nationalfonds SNF) unterstützt werden.

Im Bereich der solaren Treibstoffe konzentrieren sich diese Aktivitäten auf die ETH Zürich¹⁴ und die beiden ETH-Spin-off-Unternehmen Synhelion¹⁵ und Climeworks¹⁶ sowie auf die Fachhochschule der italienischen Schweiz SUPSI¹⁷, zur solaren Wasserstoffproduktion auch auf die ETH Lausanne¹⁸. Die Schweizer Akteure sind auf diesem Gebiet im internationalen Vergleich führend. Im Bereich PtL sind ebenfalls vielfältige Aktivitäten im Gange mit Fokus auf erneuerbare Produktion von Wasserstoff (Forschungsprojekte zu Elektrolyse, verschiedene Pilotanlagen zu Power-to-Hydrogen oder Power-to-Methane)¹⁹.

Allgemein unterliegt die Stromversorgung basierend auf der Nutzung von Sonnen- und Windenergie starken saisonalen und täglichen Schwankungen. Als kontinuierliche erneuerbare Stromerzeugung für PtL bei sehr kleinen CO₂-Emissionen käme insbesondere die Wasserkraft in Frage (Bandenergie und lange Lebensdauer der Infrastruktur).

PtL Technologien stellen allenfalls eine Möglichkeit dar, bei der Nutzung von Sonne und Wind zur elektrischen Energieproduktion einen besseren Ausgleich zwischen Angebot (viel im Sommer) und

¹¹ AGORA, The future cost of electricity based synthetic fuels, 2018

¹² PROGNOSE, Status and Perspectives of Liquid Energy Sources in the Energy Transition, 2018

¹³ 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

¹⁴ <https://prec.ethz.ch>

¹⁵ <https://synhelion.com>

¹⁶ <https://www.climeworks.com>

¹⁷ <https://www.supsi.ch>, Institute for Mechanical Engineering and Materials Technology

¹⁸ <https://www.epfl.ch/labs/lrse/>

¹⁹ für eine Übersicht der Akteure im Bereich Wasserstoff siehe: <https://h2fc.ch>

Nachfrage (stark im Winter) zu schaffen. Die Erstellung grosser Produktionsanlagen zur Herstellung von Flugtreibstoffen aus erneuerbarem Strom (Wasserkraft, Wind oder Photovoltaik) sind aufgrund der dichten Besiedelung und des ohnehin schon grossen Ausbaubedarfs (Ersatz der Kernenergie, E-Mobilität) in der Schweiz als eher unrealistisch zu beurteilen. StL ist aufgrund der bescheidenen Solareinstrahlung und des Fehlens von geeigneten Flächen in der Schweiz nicht sinnvoll.

Die Luftfahrtbranche hat ein grosses Interesse am Einsatz nachhaltiger synthetischer Treibstoffe²⁰, wie aktuelle Absichtserklärungen von SWISS und der Lufthansa Gruppe für eine Partnerschaft mit Schweizer Akteuren (ETH Zürich, Synhelion, Climeworks) zur Weiterentwicklung, Skalierung und Marktreife nachhaltiger solarer Treibstoffe unterstreichen²¹.

²⁰ siehe <http://www.safug.org/>

²¹ siehe Pressemitteilung: <https://www.lufthansagroup.com/de/verantwortung/klima-umwelt/treibstoffverbrauch-und-emissionen/sustainable-aviation-fuel.html#cid2903>.