

CO₂-neutraler Flugverkehr – wie gross ist der Energieaufwand dafür?

In der folgenden Tabelle werden unterschiedliche Methoden, Flugzeuge CO₂-neutral zu betreiben, bezüglich Energieaufwand verglichen. Flugzeuge können entweder weiterhin mit fossilem Kerosin betrieben werden und die CO₂-Emissionen danach aus der Luft gefiltert und sicher eingelagert werden (DACCS) oder Flugzeuge werden mit CO₂-neutralen Treibstoffen betrieben. CO₂-neutrale Flugtreibstoffe sind: mit erneuerbaren Energien hergestellter Wasserstoff oder Kerosin (Power to Gas oder Synhelion).

Die untenstehende Tabelle listet unterschiedliche Methoden auf - Alle Zahlen geben an, wie viel Energie (in kWh) notwendig ist, um einen Liter Kerosin zu ersetzen. Es werden konservative Annahmen für DACCS und optimistische Annahmen für die Synfuels und Wasserstoff verwendet.

Methoden Kerosin kompensieren ¹ (kWh/Liter)	Fossiles Kerosin ²	Fossiles Kerosin	Wasserstoff ³	Power to Gas ⁴	Power to Gas	Synhelion Zukunft ⁵	Synhelion Zukunft
CO ₂ -Abscheidung bzw. CO ₂ -Quelle	DACCS ⁶ heute	DACCS 2050		Punktquelle CC	DAC 2050	Punktquelle CC	DAC 2050
Elektrische Energie DAC ⁷	0.79	0.57			0.46		0.46
Thermische Energie DAC	5.51	3.47			2.78		
Kompression CO ₂ (Sequestrierung/Transport) 120 kWh/t ⁸	0.38	0.38					
Elektrolyse Wasser (85 % Wirkungsgrad) ⁹ + Komprimierung (+12 %) ¹⁰			12.50				
CCS-Energy-Penalty Kraftwerk (80 kWh/t) ¹¹				0.25		0.25	
Power to Gas (75 % Wirkungsgrad) ¹²				12.64	12.64		
Energie Synhelion ¹³						9.60	9.60
Total elektrische Energie	1.17	0.95	12.50	12.89	13.10		
Total thermische Energie	5.51	3.47			3.47		
Umgerechnet auf Strom¹⁴	3.01	2.11	12.50	12.89	14.03	9.85	10.06

Die Tabelle lässt u.a. folgenden Schlüsse zu:

Der Betrieb der Flugzeuge mit fossilem Kerosin und dessen Entfernung aus der Atmosphäre mit DACCS benötigt ca. 5-7 mal weniger Energie und folglich massiv kleiner Flächen und Infrastruktur als die Gewinnung von Synfuels.

Würde eine Fläche, die genügend gross wäre, um synthetischen Treibstoff für den gesamten Flugverkehr herzustellen dafür verwendet, der Atmosphäre CO₂ zu entnehmen, so könnten neben der Kompensation der Flugemissionen (momentan ca. 4 % der globalen Emissionen¹⁵) zusätzlich noch ca. 15 % der momentanen CO₂-Emissionen der gesamten Menschheit aus der Luft geholt werden.

Wenn Flugzeuge mit dem Fortschreiten der Akku-Entwicklung dereinst elektrisch fliegen, kann die DACCS-Infrastruktur weiterhin sinnvoll betrieben werden, um die Atmosphäre weiter vom CO₂ zu befreien und zu gesunden 350 ppm CO₂ zu bringen. Die Synfuel-Infrastruktur würde hingegen mit dem Aufkommen der elektrischen Flugzeuge obsolet.

Danke an Patrick Hofstetter und Victor Garcia für Diskussionen und Inputs.

Dr. sc. ETH Jonas Hostettler

Fragen und Bemerkungen: jonas.hostettler@gmail.com

¹ 1 Liter Kerosin Jet A-1 hat einen Heizwert von 9.6 kWh

<https://web.archive.org/web/20170116182103/http://ftp.nirb.ca/01-SCREENINGS/COMPLETED%20SCREENINGS/2016/16XN003-GN-CGS-Tank%20Farm%20Expansion/01-APPLICATION/160204-16XN003-Petroleum%20Products%20Stored%20and%20Dispensed-IA2E.pdf> – es wird der Heizwert verwendet, da die Abgase in Triebwerken nicht kondensierend sind.

² Bei der Verbrennung von 1 Liter Kerosin werden 2.52 kg CO₂ freigesetzt (diesen Wert für Synhelion und Power to Gas Treibstoff verwenden),

https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Politik/Umwelt/was_bei_triebwerkenhintenherauskommt.pdf.download.pdf/was_bei_triebwerkenhintenherauskommt.pdf wird der Verarbeitungsaufwand zur Förderung, Raffinerie, Transport mit einberechnet (ca. 25 %) <https://de.wikipedia.org/wiki/Well-to-Tank> kommt man auf 3.15 kg CO₂ pro Liter im Flugzeug verbranntes Kerosin (diesen Wert für fossiles Kerosin verwenden).

³ Heizwert Wasserstoff: 119.972 MJ/kg = 33.33 kWh/kg <https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert> 0.288 kg Wasserstoff enthält den selben Heizwert wie 1 Liter Kerosin. Theoretischer Energieaufwand für Elektrolyse 237.2 kJ/mol = 32.94 kWh/kg Wasserstoff Wasserstoff (Freie Enthalpie Wasser flüssig)

https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/Thermodynamische_Daten).

⁴ Herstellung von Treibstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis aus Wasserstoff und CO₂. Der Wasserstoff wird per Elektrolyse hergestellt, die Umwandlung zu Kohlenwasserstoffen erfolgt durch Reaktion von Wasserstoff mit CO₂.

⁵ Verfahren des ETH-Spinoffs Synhelion: Direkte Herstellung von Kerosin aus CO₂ und Wasser mittels hoher Temperaturen, die durch konzentriertes Sonnenlicht erreicht werden <http://synhelion.com/>

⁶ DACCS: Direct Air Capture and Carbon Storage: CO₂ wird aus Luft gefiltert und sicher in Boden (Basalt, leere Erdgas- und Erdölquellen, Aquifer...) eingelagert. Potential und Kosten dieser Methoden:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9b> <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f/meta> <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabff4>

⁷ Energiebedarf für 1 t CO₂ heute: 250 kWh elektrische Energie, 1750 kWh Wärmeenergie. Energiebedarf konservativ geschätzt im 2050: 182 kWh und 1102 kWh <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619307772>

⁸ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/167/1/012031/pdf>

⁹ https://www.er.tu-berlin.de/fileadmin/a38331300/Dateien/Technischer_Stand_und_Flexibilit%C3%A4t_des_Power-to-Gas-Verfahrens.pdf

¹⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffspeicherung>

¹¹ <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610213003603?token=CCCBC843FDEAC38FC10578C50847A3D5A99C171EDDE3F288DA90480C504E558FF998024BBFA1E134A66F9C14EB9B4D5C>

¹² <https://www.iwr.de/news.php?id=35044>

¹³ Synhelion-Angaben dass dereinst in der Mojave-Wüste auf einer Fläche von 1 km² pro Tag 20'000 Liter Kerosin hergestellt werden können – pro Tag ergibt das einen Gewinn von 0.19 kWh Heizenergie pro Quadratmeter. Ein Vergleich mit der PV-Grossanlage¹³ "Deser Sulight Solar Farm" in der Mojave-Wüste ergibt, dass diese pro Tag 0.22 kWh pro Quadratmeter Strom gewinnt.

<https://www.scinexx.de/news/technik/treibstoff-aus-luft-und-sonnenlicht/>

¹⁴ Annahme: Photovoltaik hat einen Wirkungsgrad von 20 % (Typischer Wirkungsgrad Silicium Monokristallin <https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaik>), Solarthermie einen Wirkungsgrad von 60-75 % <https://de.wikipedia.org/wiki/Solarthermie> - Wärmeenergie benötigt also 3-4 mal weniger Fläche als die gleiche Menge elektrische Energie. Dies stimmt gut mit realistischen Erträgen von PV- und Solarthermieanlagen überein. Hier wird ein Faktor 3 angenommen.

¹⁵ https://de.wikipedia.org/wiki/Umweltauswirkungen_des_Luftverkehrs