

# CO<sub>2</sub>-neutraler Flugverkehr – wie gross ist der Energieaufwand dafür?

In der folgenden Tabelle werden unterschiedliche Methoden, Flugzeuge CO<sub>2</sub>-neutral zu betreiben, bezüglich Energieaufwand an erneuerbaren Energien verglichen. Flugzeuge können entweder weiterhin mit fossilem Kerosin betrieben werden und die CO<sub>2</sub>-Emissionen danach aus der Luft gefiltert und sicher eingelagert werden (DACCS) oder Flugzeuge werden mit CO<sub>2</sub>-neutralen Treibstoffen betrieben. CO<sub>2</sub>-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 bzw. die Emissionen von einem Liter fossilen Kerosin aus der Luft zu entfernen (DACCS). Es werden konservative Annahmen für DACCS und optimistische Annahmen für die Synfuels und Wasserstoff verwendet.

Methoden Kerosin kompensieren <sup>1</sup> (kWh/Liter)	Fossiles Kerosin <sup>2</sup>	Fossiles Kerosin	Wasserstoff <sup>3</sup>	Power to Gas <sup>4</sup>	Power to Gas	Synhelion Zukunft <sup>5</sup>	Synhelion Zukunft
CO <sub>2</sub> -Abscheidung bzw. CO <sub>2</sub> -Quelle	DACCS <sup>6</sup> heute	DACCS 2050		Punktquelle CC	DAC 2050	Punktquelle CC	DAC 2050
Elektrische Energie DAC <sup>7</sup>	0.79	0.57			0.46		0.46
Thermische Energie DAC	5.51	3.47			2.78		
Kompression CO <sub>2</sub> (Sequestrierung/Transport) 120 kWh/t <sup>8</sup>	0.38	0.38					
Elektrolyse Wasser (85 % Wirkungsgrad) <sup>9</sup> + Komprimierung (+12 %) <sup>10</sup>			12.50				
CCS-Energy-Penalty Kraftwerk (80 kWh/t) <sup>11</sup>				0.25		0.25	
Power to Gas (75 % Wirkungsgrad) <sup>12</sup>				12.64	12.64		
Energie Synhelion <sup>13</sup>						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		
<b>Umgerechnet auf Strom<sup>14</sup></b>	<b>3.01</b>	<b>2.11</b>	<b>12.50</b>	<b>12.89</b>	<b>14.03</b>	<b>9.85</b>	<b>10.06</b>

## 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.

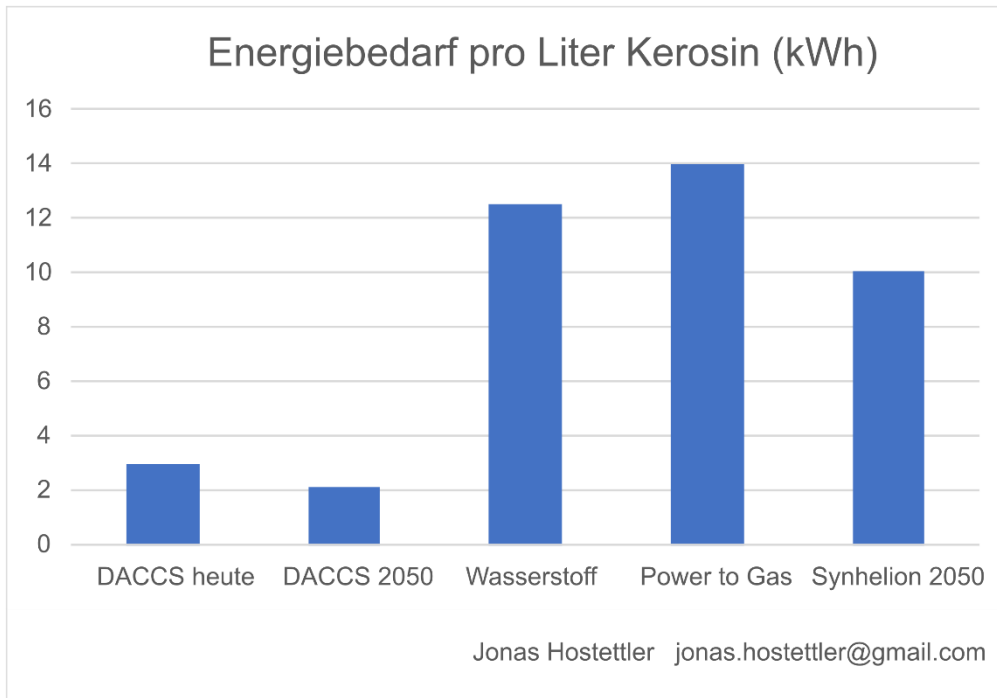
Würde eine Fläche, die genügend gross wäre, um synthetischen Treibstoff für den gesamten Flugverkehr herzustellen dafür verwendet, der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entnehmen, so könnten neben der Kompensation der Flugemissionen (momentan ca. 4 % der globalen Emissionen<sup>15</sup>) zusätzlich noch ca. 15 % der momentanen CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> zu befreien und zu gesunden 350 ppm CO<sub>2</sub> zu bringen. Die Synfuel-Infrastruktur würde hingegen mit dem Aufkommen der elektrischen Flugzeuge obsolet.

Danke an Patrick Hofstetter, Anthony Patt und Victor Garcia für Diskussionen und Inputs.

Dr. sc. ETH Jonas Hostettler

Fragen und Bemerkungen: [jonas.hostettler@gmail.com](mailto:jonas.hostettler@gmail.com)



Energiebedarf, um die Emissionen von 1 Liter Kerosin aus der Luft zu entfernen (DACCS) bzw. Energiebedarf für die Herstellung von 1 Liter synthetischem Kerosin oder Wasserstoff mit demselben Energiegehalt (Brennwert)

## Ist DACCS überhaupt realistisch?

Die oftmals gestellte Frage: "Gibt es überhaupt genügend Orte, wo CO<sub>2</sub> sicher eingelagert werden kann und ist das sicher?" wird im "IPCC Special Report Global Warming of 1.5°C<sup>16</sup>" von 2018 wie folgt beantwortet:

**Potential (Kapitel 2.4.2.3):** "The IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (IPCC, 2005) found that that, worldwide, it is likely that there is a technical potential of at least about 2,000 GtCO<sub>2</sub> of storage capacity in geological formations. Furthermore, the IPCC (2005) recognized that there could be a much larger potential for geological storage in saline formations, but the upper limit estimates are uncertain due to lack of information and an agreed methodology. Since IPCC (2005), understanding has improved and there have been detailed regional surveys of storage capacity (Vangkilde-Pedersen et al., 2009; Ogawa et al., 2011; Wei et al., 2013; Bentham et al., 2014; Riis and Halland, 2014; Warwick et al., 2014; NETL, 2015) and improvement and standardization of methodologies (e.g., Bachu et al. 2007a, b). Dooley (2013) synthesized published literature on both the global geological storage resource as well as the potential demand for geologic storage in mitigation pathways, and found that the cumulative demand for CO<sub>2</sub> storage was small compared to a practical storage capacity estimate (as defined by Bachu et al., 2007a) of 3,900 GtCO<sub>2</sub> worldwide"

**Sicherheit (Kapitel 4.3.1.6):** "CO<sub>2</sub> retention in the storage reservoir was recently assessed as 98% over 10,000 years for well-managed reservoirs, and 78% for poorly regulated ones (Alcalde et al., 2018). "

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Bei der Verbrennung von 1 Liter Kerosin werden 2.52 kg CO<sub>2</sub> 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](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 %) <http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/frischknecht-2008-Energiesysteme.pdf> kommt man auf 3.15 kg CO<sub>2</sub> pro Liter im Flugzeug verbranntes Kerosin (diesen Wert für fossiles Kerosin verwenden).

<sup>3</sup> 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 (Freie Enthalpie Wasser flüssig) [https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung\\_Chemie/Thermodynamische\\_Daten](https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/Thermodynamische_Daten)).

<sup>4</sup> Herstellung von Treibstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub>. Der Wasserstoff wird per Elektrolyse hergestellt, die Umwandlung zu Kohlenwasserstoffen erfolgt durch Reaktion von Wasserstoff mit CO<sub>2</sub>.

<sup>5</sup> Verfahren des ETH-Spinoffs Synhelion: Direkte Herstellung von Kerosin aus CO<sub>2</sub> und Wasser mittels hoher Temperaturen, die durch konzentriertes Sonnenlicht erreicht werden <http://synhelion.com/>

<sup>6</sup> DACCS: Direct Air Capture and Carbon Storage: CO<sub>2</sub> 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>

<sup>7</sup> Energiebedarf für 1 t CO<sub>2</sub> 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>

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

<sup>9</sup> [https://www.er.tu-berlin.de/fileadmin/a38331300/Dateien/Technischer\\_Stand\\_und\\_Flexibilit%C3%A4t\\_des\\_Power-to-Gas-Verfahrens.pdf](https://www.er.tu-berlin.de/fileadmin/a38331300/Dateien/Technischer_Stand_und_Flexibilit%C3%A4t_des_Power-to-Gas-Verfahrens.pdf)

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

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

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

<sup>13</sup> Synhelion-Angaben dass dereinst in der Mojave-Wüste auf einer Fläche von 1 km<sup>2</sup> 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-Grossanlage<sup>13</sup> "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/>

<sup>14</sup>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.

<sup>15</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Umweltauswirkungen\\_des\\_Luftverkehrs](https://de.wikipedia.org/wiki/Umweltauswirkungen_des_Luftverkehrs)

<sup>16</sup> <https://www.ipcc.ch/sr15/>