



Der lange Weg zu Sustainable Aviation Fuels

Bert Beyers

1. September 2023

Fliegen ist für viele Menschen zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Absehbar wird der Luftverkehr von Personen und Gütern sich in den kommenden Jahrzehnten noch einmal verdoppeln oder gar verdreifachen. Aller „Flugscham“ zum Trotz. Die Märkte der Zukunft liegen aufgrund von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum in Indien, China und Afrika. Alternative Antriebsarten wie Wasserstoff brauchen noch viel Jahre, um im kommerziellen Flugbetrieb anzukommen. Für Mittel- und Langstreckenflüge ist bisher noch keine machbare Alternative zu flüssigen Treibstoffen in Sicht. Außerdem haben Flugzeuge eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten, deutlich länger als Autos. Die bestehende und wachsende Flotte von Maschinen wird also noch viele Jahre in Betrieb sein. All das lässt nur einen Schluss zu: Soll der Luftverkehr sich in Richtung Net Zero bewegen, geht an Sustainable Aviation Fuels (SAF) kein Weg vorbei.¹ SAF steht für Flugkraftstoffe, die nicht aus fossilen, sondern unterschiedlichen regenerativen Quellen stammen. Das aktuelle Angebot ist marginal – der zukünftige Bedarf umso größer.

Heute sind rund um den Globus mehr als 23.000 Großflugzeuge unterwegs. Sie tanken im Jahr rund 350 Milliarden Liter Treibstoff und emittieren rund eine Milliarde Tonnen CO₂. Das entspricht etwa 3 Prozent der Menschen gemachten CO₂-Emissionen. Dabei verursachen Langstreckenflüge (über 4.000 Kilometer) rund die Hälfte der Emissionen, obwohl sie gegenüber Kurz- und Mittelstrecken nur einen kleinen

¹ Die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs resultiert nicht nur aus CO₂-Emissionen, von Bedeutung sind auch Kondensstreifen, Zirruswolken und Stickoxide – die in der vorliegenden Betrachtung außen vor bleiben.

Prozentsatz ausmachen.² Die Luftfahrt, sei es Personen oder Fracht, ist ein wachsendes Geschäft. Alle Beobachter gehen von einer Verdoppelung oder gar Verdreifachung der Flugbewegungen bis 2050 aus. Dabei liegen die Märkte der Zukunft in Indien, China und Afrika. Dort leben viele hundert Millionen Menschen. Und davon werden immer mehr über die finanziellen Mittel verfügen, um zu reisen und große Distanzen rasch und komfortabel überbrücken zu können.

1990 waren 6,3 Liter Treibstoff nötig, um einen Passagier 100 Kilometer weit transportieren zu können. Im Jahr 2018 waren es nur noch 3,5 Liter.³ Und die Hersteller arbeiten weiter an effizienteren Flugzeugen und Turbinen. Aber das alleine ist nicht Lösung. In der Vergangenheit sind die Effizienzgewinne pro Passagier durch das Wachstum des Luftverkehrs, sprich: durch die steigende Zahl von Passagieren und Frachtgütern, bei weitem überkompensiert worden – der sogenannte Rebound Effekt. Und das wird im Flugverkehr wohl auch in den nächsten Jahren und Jahrzehnten so bleiben.

Die deutsche Lufthansagroup sieht sich als Pionier in Sachen SAF und verweist auf Erfahrungen im regulären Betrieb seit 2011. Nach eigenen Angaben hat sie im Jahr 2022 rund 13.000 Tonnen nachhaltigen Treibstoff konventionellem Kerosin beigemischt. Das waren 0,2 Prozent ihres Bedarfs.

Die Beratungsgesellschaft Bain & Company geht davon aus, dass die Luftfahrt bis 2050 annähernd 70 Prozent ihrer Emissionen senken kann⁴ – und nicht 100 Prozent, wie die International Air Transport Association (IATA) verspricht.⁵ Die derzeit noch hohen Kosten für SAF werden durch Skalierungseffekte, also die Produktion großer Mengen, wohl deutlich fallen. Wasserstoff- und elektrisch getriebenen Flugzeugen räumen die Berater nur geringe Chancen am Markt ein. Ob die Kosten für CO₂-armes Fliegen in Zukunft steigen werden, darüber gehen die Annahmen auseinander. PricewaterhouseCoopers (PwC) ist eher auf der optimistischen Seite und erwartet nur moderat steigende Ticketpreise.⁶

Und es gibt vielfältige Bemühungen, diesen vielversprechenden Markt zu bedienen.

Altes Frittenfett oder Fette aus der Tierproduktion, das sind die Ingredienzen für CO₂-armes Kerosin des finnischen Unternehmens Neste⁷. Nach eigenen Angaben ist Neste der weltweit größte Hersteller von

² Forschungsinitiative Energiewende im Verkehr. Kurzbericht zur „Roadmap für strombasierte Kraftstoffe“, Mai 2023. Hrsg: Verbundvorhaben BEniVer Begleitforschung Energiewende im Verkehr. Im Internet unter:

<https://www.energiesystem-forschung.de/> Abgerufen am

³ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/253315/umfrage/kerosinverbrauch-der-fluggesellschaften-aus-deutschland/#:~:text=Im%20Jahr%202018%20lag%20der,seitdem%20sinkt%20der%20Wert%20kontinuierlich.>

⁴ <https://www.bain.com/insights/a-realistic-path-to-net-zero-emissions-for-commercial-aviation/>

⁵ <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>

⁶ <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/2022/pr-real-cost-of-green-aviation.html>

⁷ <https://www.neste.de>

erneuerbaren Flugzeugtreibstoffen. In Zukunft will die Firma ihre Ressourcenbasis für die Produktion ihrer Bio-Fuels (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) erweitern: auf Holzabfälle, Müll, Abfälle aus Kläranlagen und auch Algen. Die globalen Investitionen gehen voran, im Jahr 2023 wurde die Raffinerie in Singapur massiv erweitert, Kosten: 1,6 Milliarden Euro. Gleichzeitig wurde die Anlage in Rotterdam ausgebaut. Damit steigt die Produktionskapazität des Unternehmens auf jährliche 1,5 Millionen Tonnen. Kunden der Firma sind unter anderen: Air France-KLM, American Airlines, Lufthansa und große Luftfrachtunternehmen wie Amazon Prime Air, DP-DHL und UPS.

Einen anderen Weg in der Herstellung von CO₂-armem Kerosin geht das deutsche Startup Ineratec⁸: nicht biobasiert, wie Neste, sondern strombasiert. Für den Power-to-Liquid-Weg braucht es Wasserstoff und CO₂. Angefangen hat die Firma mit modularen Anlagen, die in einen Schiffscontainer passen. Im Jahr 2023 soll nun in Frankfurt auf dem Gelände des Industrieparks Höchst der nächste Schritt erfolgen: Die weltgrößte Power-to-Liquid-Anlage geht in Betrieb, mit einer Kapazität von 3.500 Tonnen. Zur Einordnung: Mit diesen 3.500 Tonnen Jahresproduktion käme der größte deutsche Flughafen in Frankfurt gerade mal ein paar Stunden über die Runden. Rund 11,25 Millionen Tonnen werden dort täglich in die Maschinen gepumpt.

Die Grundlagen der Technik von Ineratec haben die deutschen Chemiker Franz Fischer und Hans Tropsch vor 100 Jahren gelegt, sie sind die Erfinder der nach ihnen benannten Fischer-Tropsch-Synthese. Während des Zweiten Weltkriegs konnte Deutschland mit großtechnischen Anlagen aus heimischer Kohle synthetische Treibstoffe herstellen – für die Wehrmacht unersetzlich. Aus einem ähnlichen Grund kam die Fischer-Tropsch-Synthese auch in Südafrika zum Einsatz. Das Land hat zwar große Kohle-, aber kaum Ölvorkommen. Während des Öl-Boykotts in der Zeit der Apartheid hat Südafrika deshalb eine synthetische Treibstoffproduktion aufgebaut. Eigens zu diesem Zweck wurde in den 1950er Jahre die staatliche Sasol gegründet, technologisch unterstützt von der deutschen Lurgi AG.

Auch bei Ineratec kommt die Fischer-Tropsch-Synthese zum Einsatz, allerdings auf Basis von erneuerbaren Ressourcen: grünem Wasserstoff und CO₂, vorwiegend aus Biogasanlagen. Bei der Fischer-Tropsch-Synthese entsteht ein Gemisch unterschiedlich langer Ketten von Kohlenwasserstoffen. In einem weiteren Schritt werden daraus Produkte wie Benzin, Diesel, Kerosin oder Wachs. Ineratec hat sich strategisch für den Markt der Flugtreibstoffe entschieden, dort gibt es feste Beimischungsquoten von CO₂-armen Treibstoffen – und damit eine gesicherte Nachfrage. Aber auch der Schiffsverkehr und die chemische Industrie sind erfolgversprechende Märkte.

Ineratec hat große Pläne. Die 3.500 Tonnen aus der Pilotanlage in Frankfurt sollen nur ein Anfang sein. Für das Jahr 2035 will das Unternehmen fünf Prozent des europäischen Rohölbedarfs durch eigene Kraftstoffe decken. Die benötigten Anlagen werden dann aber kaum in Deutschland stehen, wo die Stromkosten viel zu hoch sind. Sondern eher

⁸ <https://www.ineratec.de/de>

im Nahen Osten, in Nordafrika oder auch in Spanien, wo die Sonneneinstrahlung für Photovoltaik besonders hoch ist. Oder in Australien, Kanada oder Neuseeland, wo es Wasserkraft gibt. Über die aktuellen Preise von E-Fuels aus eigener Produktion schweigt sich Philipp Engelkamp von Ineratec aus. Sein Zielwert für die Zukunft: 1 Euro pro Liter Kraftstoff, vor Steuern.⁹

Noch einen anderen Weg bei der Produktion von CO₂-armem Kerosin geht Synhelion¹⁰, ein Spin-off der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Die Firma nennt ihr Produkt Solar fuel. In Jülich entsteht in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und dem Solar-Institut Jülich die Demonstrationsanlage DAWN, ein futuristisches Ensemble. Um einen 20 Meter hohen Solarturm ist ein Feld mit beweglichen Spiegeln montiert, mit einer Gesamtfläche von 1.500 Quadratmetern. Die sogenannten Heliostaten sammeln das Sonnenlicht, bündeln es und werfen es auf ein Fenster im Turm, wo sich der Solarstrahlungsempfänger befindet. Dort entstehen extreme Temperaturen von mehr als 1.500 Grad Celsius.

Die Solarenergie wird im nächsten Modul, dem thermochemischen Reaktor, eingesetzt. Er ist das Herzstück des von Synhelion entwickelten Prozesses. Dort trifft die Sonnenenergie auf ein Gasgemisch aus Wasser und CO₂, das, wie bei Ineratec, aus regenerativen Quellen stammt. In dem Reaktor entsteht ein Synthesegas, das dann konventionell in einer Fischer-Tropsch-Synthese zu Kohlenwasserstoffen verarbeitet wird – woraus man unter anderem Kerosin gewinnen kann. Davon sollen in Jülich einige tausend Liter hergestellt werden.

Ob sich die Vier-Millionen-Euro-Förderung des deutschen Wirtschaftsministeriums dereinst auszahlen wird, das muss sich noch erweisen. Gianluca Ambrosetti von Synhelion gibt sich optimistisch: „Mit DAWN legen wir den Grundstein für die industrielle Produkte von Solartreibstoffen. Die Erfahrungen, die wir dabei sammeln, werden uns beim Bau vieler weiterer und größerer Anlagen zugutekommen. Unser Ziel ist, in zukünftigen kommerziellen Anlagen bis 2030 eine Produktionskapazität von 875 Millionen Liter Treibstoff pro Jahr zu erreichen.“¹¹ Zwei Abnehmer für die Solar fuels gibt es bereits: Lufthansa und Swiss.

Es tut sich also einiges auf dem Feld der Produktion von CO₂-armem Kerosin, genannt SAF, Sustainable Aviation Fuel. Sei es Bio-Fuel, wie bei Neste oder E-Fuel, wie bei Ineratec. Qualität und Nachhaltigkeit von SAF-Anbietern werden in der zivilen Luftfahrt von mehreren Institutionen geregelt. Bio-basiertes SAF ist dabei nicht zu 100 Prozent klimaneutral, sondern „nur“ etwa 85 Prozent. In jedem Fall muss SAF drop-in-fähig sein, das heißt, es muss konventionellem Kerosin beigemischt werden können. Maximal geduldete Beimischungsquote derzeit: 50 Prozent. Anders ausgedrückt, eine Betankung mit reinem SAF ist im regulären Betrieb nicht zulässig. Bis 2025 fordert das EU-Parlament eine

⁹ <https://global-energy-solutions.org/das-ziel-ein-euro-pro-liter-e-fuel/>

¹⁰ <https://synhelion.com>

¹¹ <https://www.brainergy-park.de/synhelion/>

Beimischungsquote von 2 Prozent SAF zu konventionellem Kerosin, bis 2050 sollen es sogar 70 Prozent sein.

Die Drop-in-Fähigkeit ist ein entscheidender Vorteil von SAF. Es bedeutet, die bestehende Infrastruktur, also Pipelines, Betankungssysteme an den Flughäfen und natürlich die Maschinen selber, sind weiter im Spiel. Und Flugzeuge haben eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten. Sie werden intensiv gewartet und im Laufe ihres Lebens mehrfach generalüberholt und upgedatet.

Alternativen zu SAF sind in der Luftfahrt rar. Ja, es gibt einige batterieelektrisch getriebene Luftfahrzeuge. Ein Elektroflugzeug aus Slowenien erhielt 2020 als erstes rein elektrisch betriebene Flugzeug eine Zulassung in Europa. Aber die Maschine ist auch nur für zwei Passagiere ausgelegt. In Deutschland macht die Firma Volocopter¹² mit ihrem elektrisch betriebenen Flugtaxi von sich reden. Das Fluggerät ähnelt einem Hubschrauber, hat mehrere Rotoren und kann seine Abstammung von Lastdrohnen nicht leugnen. Aber alle diese Versuche sind allenfalls Nischenanwendungen. Denn dem Elektroantrieb im Flugverkehr sind physikalisch enge Grenzen gesetzt: Batterien sind einfach zu schwer und haben eine zu geringe Leistungsdichte, im Vergleich mit flüssigen Treibstoffen allemal. Die Leistungsdichte heutiger Lithium-Ionen-Batterien beträgt circa 7 Megajoule pro Kilogramm, die von Kerosin etwa 43 Megajoule pro Kilogramm, also das Sechsfache.

Wasserstoff getriebene Flugzeuge sind ebenfalls schon in der Luft, darunter Maschinen des deutschen Start-ups H2FLY¹³. Die Firma setzt vor allem auf Brennstoffzellen. Auch große Flugzeugbauer wie Airbus arbeiten an Wasserstoffflugzeugen. Airbus will ein Großraumflugzeug A380 mit einem Tank für Flüssigwasserstoff und einem Zusatztriebwerk am Heck ausstatten. Das Testflugzeug soll etwa 2025 abheben und Erkenntnisse für das Fluggerät der Zukunft sammeln. Ein Jahrzehnt später rechnet Airbus mit einem ersten Passagierflugzeug mit Wasserstoffantrieb. Dann beginnt die Serienfertigung – wenn alles gut geht. Das zeigt: Alternative Antriebsarten im Flugverkehr sind in einem frühen Stadium, bis sie kommerziell einsetzbar sind, werden noch viele Jahre vergehen. Für Mittel- und Langstreckenflüge sind derzeit noch gar keine Alternativen in Sicht. Bei der Dekarbonisierung der Luftfahrt geht auf absehbare Zeit an SAF also kein Weg vorbei.

Der Weg zu Net Zero im Flugverkehr ist vorgezeichnet. Sustainable Aviations Fuels werden während der kommenden Jahre und Jahrzehnte die Hauptlast tragen müssen. Es wäre ein „sanfter Übergang“, die Infrastruktur bliebe im Wesentlichen erhalten und der Umstieg könnte Schritt für Schritt erfolgen, per Drop-in-Verfahren. Aktuell werden SAF nur in homöopathischen Mengen produziert. Der nächste Schritt wäre der Aufbau von Produktionsanlagen im industriellen Maßstab: nicht ein paar Hunderttausend Tonnen pro Jahr, sondern mehrere Millionen. Und der langfristige Bedarf für eine vollständige Versorgung mit SAF liegt sogar bei circa 400 Milliarden Tonnen pro Jahr. Bis dahin ist es noch ein weiter Weg – der über staatliche Subventionen, eine transparente Regulation und große Investments von Unternehmen führt. Große Ölfirmen halten sich

¹² <https://www.volocopter.com>

¹³ <https://www.h2fly.de>

bislang auffällig zurück¹⁴ Versprechen – zum Beispiel der IATA – auf ein klimaneutrales Fliegen zur Jahrtausendwende sind durch die Realität bislang nicht gedeckt. Die entscheidende Frage ist, ob die benötigten Mengen SAF zur Verfügung gestellt werden können – und dies zu annehmbaren Preisen.

¹⁴ <https://global-energy-solutions.org/drei-bis-vier-mal-teurer-als-fossiles-kerosin/>