

Status quo SAF (1)

# ***Aktuelle europäische klimapolitische Maßnahmen in der Luftfahrt***

Exklusiv für airliners+ Abonnenten

Die Luftfahrt steht vor der Herausforderung, umweltfreundlicher zu werden. Ein Blick auf die bereits getroffenen politischen Neuregelungen von Umwelt- und Klimaökonomin Anna Straubinger.

Von Anna Straubinger



© Adobe Firefly KI

*Die Luftfahrt steht vor einer großen Herausforderung: Sie muss dafür sorgen, dass Fliegen umweltschonender wird. Ein wesentlicher Baustein ist SAF. Um nachhaltiges Kerosin einzuführen, ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten aus verschiedenen Bereichen erforderlich, beispielsweise aus den Bereichen Technologie, Politik und Wirtschaft. Die aktuelle Serie zeigt den Status quo der Maßnahmen auf<sup>1</sup>. Den Auftakt macht Umwelt- und Klimaökonomin Anna Straubinger vom ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung mit einem Blick auf die bereits beschlossenen politischen Rahmenbedingungen.*

Über drei Prozent der menschengemachten CO<sub>2</sub>-Emissionen stammen von der Luftfahrt. Zudem lassen sich laut Studien circa 5,6 Prozent der Klimaerwärmung auf die Luftfahrt zurückführen. Da die Dekarbonisierung in diesem Sektor aber besonders herausfordernd ist, ist zu erwarten dass dieser Anteil noch weiter steigt. Technologischer Fortschritt und Effizienzsteigerung können zwar zu einer Reduktion der Emissionen beitragen. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass diese Reduktionen ausreichen, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen.

Klimapolitische Maßnahmen im Luftverkehr sind daher essenziell und können zusätzliche Anreize für Forschung und Entwicklung setzen. Die aktuellen klimapolitischen Maßnahmen im Luftverkehrssektor sind von Region zu Region sehr unterschiedlich ausgestaltet. Die deutsche und europäische Politik sieht sich daher mit dem Vorwurf konfrontiert, dass sie regional ansässige Fluggesellschaften benachteiligt. Mit den geplanten Verschärfungen unter dem "Fit for 55"-Paket der EU werden diese Vorwürfe sicher lauter werden.

## ***Der EU-ETS***

Derzeit werden innereuropäische Flüge durch das europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) abgedeckt. Der EU-ETS umfasst verschiedene Sektoren, darunter die Stahl- und Zementindustrie, die Energieerzeugung sowie seit 2012 auch den Luftverkehr. Die EU-27, Norwegen, Island und Liechtenstein (EWR) sind Teilnehmer des EU-ETS. Des Weiteren sind Flüge von und in das Vereinigte Königreich sowie die Schweiz ebenfalls Teil des ETS.

Ursprünglich fielen 2012 alle Flüge in, aus und zwischen den betroffenen Ländern darunter. Nach einer Icao-Sitzung, bei der eine weltweite marktbasierende Maßnahme in Aussicht gestellt wurde, wurde diese Regelung jedoch ausgesetzt und auf innereuropäische Flüge beschränkt ("Stop the Clock"). Mit der Einführung von Corsia (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) hat die Icao dieses Versprechen eingelöst. Corsia soll 2026 neu bewertet werden.

Die Idee eines Emissionshandels im Allgemeinen und des EU-ETS im Speziellen, basiert auf dem Konzept, eine verbindliche, jährliche Obergrenze für CO<sub>2</sub>-Emissionen festzulegen. Für jede erlaubte Tonne CO<sub>2</sub> wird ein Zertifikat ausgestellt.

In einem ansonsten unregulierten Emissionshandelssystem würden diese Zertifikate gehandelt und von denjenigen Unternehmen gekauft, die eine höhere Zahlungsbereitschaft als den resultierenden Marktpreis haben (deren Kosten zur Vermeidung einer zusätzlichen Tonne CO<sub>2</sub> über dem Zertifikatspreis liegen). Für die übrigen Unternehmen ist es vorteilhafter, Emissionen zu vermeiden, sodass sie auf den Erwerb von Zertifikaten verzichten können.

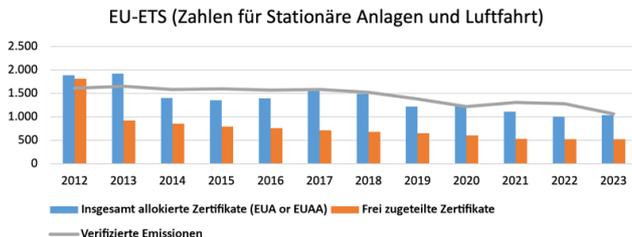


Abbildung: CO<sub>2</sub>-Emissionen, allokierte Zertifikate und frei zugeweilte Zertifikate in der Luftfahrt und für stationäre Anlagen. Quelle: EU-ETS Data Viewer

© Dr. Anna Straubinger

Um internationale Wettbewerbsnachteile auszugleichen, werden den emissionsintensiven Industrien allerdings zum Teil kostenlose Zertifikate zugeteilt (siehe Abbildung). Dies ist auch in der Luftfahrt der Fall. Derzeit werden im Rahmen des EU-ETS kostenlose Zertifikate an rund 500 Airlines vergeben. Seit 2021 wurden diese pro Jahr um 2,2 Prozent reduziert. Zusätzlich kam es zu einer Verringerung der Zertifikate, um die Effekte der Pandemie aufzufangen.

Im Rahmen des "EU Green Deal" und des "Fit for 55"-Pakets wurden die Regeln für das EU-ETS im Luftverkehrssektor neu festgelegt. Die wohl weitreichendste Entscheidung ist dabei die schrittweise Einstellung der freien Zuteilung von Zertifikaten bis 2026. Aktuell wird außerdem die Aufnahme sogenannter Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte in den EU-ETS geprüft.

## Artikelserie in Kooperation mit GARS

Diese *airliners.de*-Fachserie ist in Zusammenarbeit mit der German Aviation Research Society (GARS) entstanden. GARS ist eine gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung der Luftverkehrsforschung. Die Stärkung des Dialogs zwischen der Wissenschaft und den Praktikern in Unternehmen und Behörden sowie die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gehören zu den Hauptzielen der Gesellschaft.



© GARS

Mehr Informationen: [gars.science](https://gars.science)<sup>2</sup>

## Corsia

Mit Corsia hat die Icao, die erste globale marktbasierende klimapolitische Maßnahme eingeführt. Das Ziel ist es, dem Luftfahrtsektor ein CO<sub>2</sub>-neutrales Wachstum durch Offsets zu ermöglichen. Dabei müssen Airlines Offsetting-Zertifikate für CO<sub>2</sub>-Emissionen von grenzüberschreitenden Flügen kaufen, die über 85 Prozent ihrer Emissionen von 2019 liegen. Die auszugleichenden Emissionen resultieren dabei sowohl aus dem individuellen aber auch dem sektoralen Wachstum. Häufig werden die niedrigen Anforderungen an die unter Corsia zulässigen Offsets kritisiert. Deren Kosten liegen aktuell bei im Schnitt rund 20 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>.

Corsia wird in drei Phasen umgesetzt: Pilotphase (2021-2023), erste Phase (2024-2026), zweite Phase (2027-2035). Für einige Länder ist die Teilnahme ab Phase zwei verpflichtend, andere Länder haben sich schon jetzt zur Teilnahme verpflichtet. Aktuell gibt es jedoch keinen Mechanismus, der Airlines oder Länder sanktioniert, die sich nicht an die Vorgaben halten. Ausgenommen von der Maßnahme sind Flüge, die unter den EU-ETS fallen oder deren Herkunfts- oder

Zielland zu schwer erreichbaren Entwicklungsländern gehört. Zudem gibt es verschiedene Kraftstoffe, deren (Lebenszyklus-)Emissionen unter denen von konventionellem Kraftstoff liegen, die von Corsia ausgenommen sind.

## Die europäische SAF-Quote

Der Green Deal sieht eine Reduktion der europäischen Treibhausgasemissionen um 55 Prozent bis 2030 vor. Um das Ziel zu erreichen, wurde das "Fit for 55"-Paket aufgesetzt. Ein Baustein des Pakets ist es durch die "ReFuelEU"-Initiative den Markt für Sustainable Aviation Fuels (SAF) zu unterstützen.



SAF-Produktion.

© DLR

Es gibt verschiedene Arten alternativer Kraftstoffe, wie beispielsweise HEFA, BtL, oder PBtL, deren Produktionspfade und Lebenszyklus-Emissionen sich unterscheiden. Bei der Verbrennung von SAF entsteht zwar ähnlich viel CO<sub>2</sub> wie bei der Verbrennung von konventionellem Kerosin, jedoch sind die Lebenszyklus-Emissionen je nach SAF-Typ bis zu 80 Prozent niedriger.

Im Rahmen von "Fit for 55" führt die EU ab 2025 eine SAF-Quote ein, die für alle Flüge Anwendung finden soll, die in der EU starten – unabhängig davon, wo sie landen. Ab 2025 soll die SAF-Quote zwei Prozent betragen, ab 2035 20 Prozent und ab 2050 70 Prozent. Ab 2030 ist dann eine Sub-Quote für sogenannte "e-Fuels"(zum Beispiel PtL oder PBtL) geben, die erst bei 1,2 Prozent, ab 2035 bei fünf Prozent und ab 2050 bei 50 Prozent liegen soll.

Die Regulierung betrifft dabei nicht nur Airlines, sondern auch Kraftstofflieferanten und Flughäfen. Für Kraftstofflieferanten ist es dann verpflichtend, EU-Flughäfen mit Kraftstoffen entsprechend der gültigen Quotenvorschrift zu versorgen. Um Tankering zu verhindern, sind Airlines verpflichtet, den für den jeweiligen Flug notwendigen Treibstoff in der EU zu tanken. Außerdem verpflichtet die Regulierung EU-Flughäfen dazu, eine für SAF geeignete Infrastruktur bereitzustellen.

Auch an der SAF-Quote wird Kritik geübt. Die Preise für SAF betragen derzeit das 1,5- bis sechsfache der Kerosinpreise. Die Quote wird also zu höheren Kosten bei den Airlines führen. Außerdem ist zurzeit die Produktionskapazität noch nicht ausreichend, um spätere Quotenziele zu erfüllen. Für 2030 wird ein Bedarf von 2,3 Millionen Tonnen SAF prognostiziert. Die derzeitige Produktionskapazität liegt aber bei nur zehn Prozent dieser Menge. Ob das politische Signal ausreicht um die Kapazitäten zu erhöhen, bleibt abzuwarten.

Die aktuelle Regelung sieht vor, dass SAF vor Ort bereitgestellt wird und in die jeweiligen Flugzeuge getankt wird. Dies kann zu hohen Logistikkosten führen, da gewisse Regi-

onen einen komparativen Vorteil haben, besonders bei der Herstellung stromintensiver SAF-Arten. Häufig wird deshalb der sogenannte "Book and Claim"-Ansatz diskutiert. Dabei muss der gekaufte Liter SAF nicht zwangsläufig auf dem jeweiligen Flug genutzt werden, sondern kann auch auf anderen Flügen eingespeist werden. Über Zertifikate können solche Mechanismen kontrolliert werden.

Uneinigkeit besteht zudem darüber, ob nicht mehr Technologieoffenheit nötig ist, um radikalere Veränderungen, wie Elektrifizierung (vor allem auf der Kurzstrecke) und die Entwicklung von Wasserstoffflugzeugen weiter voranzubringen.

## **Luftverkehrsabgabe**

Im Gegensatz zu anderen Kraftstoffen wird Kerosin in Deutschland und in den meisten anderen Ländern nicht besteuert. Als Alternative dazu wird in Deutschland eine Luftverkehrsabgabe, die sogenannte Ticketsteuer, erhoben. Sie kann zwar einen Einfluss auf Luftfahrtemissionen haben, allerdings wird sie eher als Substitut zur fehlenden Energiebesteuerung gesehen und dient überwiegend der Generierung von Einnahmen. Die Luftverkehrsabgabe ist zwar nach Distanzen gestaffelt, ermöglicht damit aber keine exakte Preisung der Umweltexternalität.

## **Wie realistisch ist das Netto-Null-Ziel?**

Der Luftverkehrssektor ist einer der am schwersten zu dekarbonisierenden Sektoren. Lange Entwicklungszyklen, wenig passende alternative Antriebstechnologien und hohe Sicherheitsansprüche stellen die Branche vor große Herausforderungen. Die stark steigende Nachfrage im globalen Luftverkehrsmarkt, erschwert die Dekarbonisierung zusätzlich. So fragt eine größer werdende Mittelschicht in Asien mehr Flüge nach. In einer globalisierten Welt Luftverkehr zu verbieten und einzuschränken ist nicht möglich, da er auch ein volkswirtschaftlicher Treiber ist.

Aber schon jetzt trägt der Luftverkehr zum Klimawandel bei. Der relative Anteil wird sich in den kommenden Jahren eher erhöhen, da andere Sektoren Fortschritte in der Dekarbonisierung machen.

Es ist wichtig, auch in der Luftfahrt klimafreundliche Entwicklungen voranzutreiben und Instrumente einzuführen, die Airlines und Hersteller dazu bringen, klimafreundlichere Entscheidungen zu treffen.

Die EU hat unter "Fit for 55" ein Maßnahmenpaket für die Luftfahrt geschnürt, das deutlich restriktiver ist als in anderen Teilen der Welt. Damit werden auch bei steigender Nachfrage Emissionsreduktionen erzielt werden können. Corsia als weltweite Maßnahme wird mit den gegebenen Offset-Preisen und Qualitäten aber nur einen kleinen Beitrag

zur Dekarbonisierung leisten können. In Anbetracht des globalisierten Systems und der niedrigen Stringenz der Politik-

maßnahmen weltweit bleibt es also fraglich, ob das Netto-Null-Ziel der Iata bis 2050 erreicht werden kann.

## Über die Autorin

Anna Straubinger ist seit 2022 wissenschaftliche Mitarbeiterin beim ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung und arbeitet im Forschungsbereich „Umwelt- und Klimaökonomik“ an numerische Simulationen, an der Schnittstelle zwischen Umwelt- und Verkehrsökonomik. Sie hat an der VU Amsterdam promoviert und an der TU Dresden Verkehrswirtschaft studiert. Von 2017 bis 2022 arbeitete sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin beim Bauhaus Luftfahrt. [Linkedin](#)<sup>3</sup>[Website](#)<sup>4</sup>



© Anna Straubinger

1. <https://www.airliners.de/serien/umweltfreundliche-luftfahrt-status-quo-klima>
2. <https://gars.science/>
3. <https://www.linkedin.com/in/straubinger-anna>
4. <https://sites.google.com/view/anna-straubinger>

Status quo SAF (2)

# Produktionsverfahren für Sustainable Aviation Fuels – Wo wir aktuell stehen

Exklusiv für airliners+ Abonnenten

Die Luftfahrt braucht schnell viel SAF. Doch wie ist der aktuelle Stand bei den Herstellungsverfahren, wie sieht es mit den Ressourcen aus und was ist mit den Kosten für die Produktion? Stefan Bube von der TU Hamburg berichtet über die verschiedenen Reifegrade in der SAF-Herstellung.

Von Stefan Bube



© Adobe Firefly KI

Die Luftfahrt steht vor einer großen Herausforderung: Sie muss dafür sorgen, dass Fliegen umweltschonender wird. Ein wesentlicher Baustein ist SAF. Um nachhaltiges Kerosin einzuführen, ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten aus verschiedenen Bereichen erforderlich, beispielsweise aus den Bereichen Technologie, Politik und Wirtschaft. Die aktuelle Serie zeigt den Status quo der Maßnahmen auf<sup>1</sup>. In diesem Teil informiert Stefan Bube vom Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft der TU Hamburg über den Reifegrad verschiedener Verfahren zur SAF-Herstellung.

Vor dem Hintergrund der voranschreitenden Erderwärmung hat sich auch die Luftfahrtindustrie verpflichtet, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen in den kommenden Jahren drastisch zu reduzieren und mittelfristig CO<sub>2</sub>-neutral zu werden. Eine Schlüsselrolle spielt hierbei der Einsatz nachhaltiger Luftfahrtkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAFs). Diese werden trotz der großen Dringlichkeit einer Emissionssenkung heute nur in sehr geringem Maße eingesetzt und insbesondere strombasiertes Kerosin ist derzeit noch nicht kommerziell verfügbar.

Wo stehen wir heute, wenn es um die Bereitstellung von SAF geht? Wie ausgereift sind die aktuell diskutierten Produktionstechnologien, welche Ressourcen stehen zur Verfügung und zu welchen Kosten ist die Produktion möglich? In diesem Artikel werden die derzeit meistdiskutierten Produktionsrouten und die dafür notwendigen Ressourcen zur SAF-Produktion techno-ökonomisch diskutiert und die Frage aufgeworfen, ob SAFs rechtzeitig, im benötigten Maße zur Verfügung stehen werden, um die Klimaziele im Luftverkehr erfüllen zu können.

## Einleitung

Die Notwendigkeit, nachhaltige – und das bedeutet im Kontext der Klimakatastrophe vorwiegend klimaneutrale oder zumindest deutlich CO<sub>2</sub>-reduzierte – Alternativen zu herkömmlichen Flugkraftstoffen zu nutzen, ist dringender denn je. Die internationale Luftfahrt ist derzeit für circa drei Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, wobei der tatsächliche Beitrag zum Treibhauseffekt durch sogenannte "nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte" noch deutlich größer ist [1].

Durch die heute fast ausnahmslose Nutzung von fossilem Kerosin aus Erdöl, besteht eine direkte Verbindung zwischen dem Luftverkehrsaufkommen und den hierbei emittierten Treibhausgasen. Aufgrund der hohen Wachstumsprognosen für den weltweiten Luftverkehr kann davon ausgegangen werden, dass die luftfahrtbedingten Emissionen trotz fortlaufender Effizienzmaßnahmen ohne weitreichende zusätzliche Maßnahmen in den nächsten Jahrzehnten weiter ansteigen werden.

Demgegenüber hat sich die internationale Luftfahrt zum Ziel gesetzt, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 auf (netto) Null-Niveau zu reduzieren [2–4]. Um dieses Ziel erreichen zu können, sind verschiedene technische und organisatorische Maßnahmen notwendig, wobei für eine CO<sub>2</sub>- und Klima-

neutralität der Ersatz der heute primär eingesetzten, fossilen Kraftstoffe unverzichtbar ist [5,6]. Bei einer vollständigen Substitution resultiert daraus bis 2050, je nach Wachstum, ein SAF-Bedarf von jährlich 300 bis 500 Mt [7]. Der heutige Bedarf an fossilem Kerosin liegt bei ca. 290 Mt/a.

## **SAF ist nicht gleich SAF**

Im Gegensatz zu herkömmlichem Kerosin werden SAFs mit Hilfe erneuerbarer Energien aus nicht-fossilen Rohstoffen hergestellt und weisen daher im Vergleich zu fossilem Kerosin über den gesamten Lebenszyklus signifikant reduzierte Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) auf.

Der Überbegriff SAF umfasst dabei alle nachhaltigen Kraftstoffe, wobei vor 2040 vermutlich nur kerosinartige Kraftstoffe in signifikanten Mengen einsetzbar sein werden. Diese sogenannten "Drop-in" Kraftstoffe können schon heute in den bestehenden Flugzeugflotten und Flughafeninfrastrukturen genutzt werden, wodurch sie, sofern sie verfügbar sind, zu einer sofortigen THG-Reduktion führen können.

SAFs werden für gewöhnlich in biomasse- und strombasierte Kraftstoffe unterteilt. Ausschlaggebend für die regulatorische Unterscheidung sind dabei weniger die genutzten Herstellungsverfahren, als der Ursprung der eingesetzten Energie, die bei der Produktion im Kraftstoff gebunden wird. Auch die hybride Produktion aus Biomasse unter zusätzlicher Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien ist möglich und in Bezug auf die Ressourceneffizienz auch vorteilhaft. [8]

### **Bio-SAF: Biomasse als Rohstoff für nachhaltige Flugkraftstoffe**

Biomasse deckt ein breites Spektrum an organischen Materialien (das heißt aus kohlenstoffhaltigen chemischen Verbindungen)

ab. Biomasse wird dabei direkt oder indirekt durch Photosynthese gebildet, wobei der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen wird. Daher kann das bei der Verbrennung des Kraftstoffes freiwerdende CO<sub>2</sub> als klimaneutral bilanziert werden, solange im gleichen Maße Biomasse nachgebildet wird.

Die vorrangig für die Produktion von SAF in Frage kommenden Biomassen können stofflich in lipidhaltige, zuckerhaltige, stärkehaltige und lignocellulosehaltige Biomassen unterteilt werden. Zusätzlich ist es auch üblich in Anbaubiomasse – also Mais, Raps und so weiter – oder Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle – das heißt Stroh, Lebensmittelabfälle et cetera – zu unterscheiden.

Letztere sind aus Nachhaltigkeitsaspekten besonders interessant, da ihre Nutzung nicht in direkter Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion steht und keine zusätzlichen Anbauflächen erfordert. Aufgrund der großen Nachfrage an nachhaltiger Biomasse auch außerhalb der Luftfahrtindustrie, und der Teils aufwändigen Bereitstellung und nicht bestehenden Infrastruktur, ist das für den Luftverkehr nutzbare Rohstoffpotenzial jedoch limitiert.

Anbaubiomasse zur Kerosinproduktion steht wiederum oft in direkter Konkurrenz zum Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln und kann insbesondere durch Landnutzungsänderungen zu hohen indirekten THG-Emissionen beim Anbau führen. Auch wenn die Abschätzungen zum verfügbaren Biomassepotenzial weiten Schwankungen unterliegen, deuten diese Faktoren darauf hin, dass nachhaltige Biomasse der Luftfahrt nicht im ausreichenden Maße zur Verfügung steht, um die prognostizierte Gesamtnachfrage an SAF zu decken [7,9].

## **Artikelserie in Kooperation mit GARS**

Diese [airliners.de](https://www.airliners.de)-Fachserie ist in Zusammenarbeit mit der German Aviation Research Society (GARS) entstanden. GARS ist eine gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung der Luftverkehrsforschung. Die Stärkung des Dialogs zwischen der Wissenschaft und den Praktikern in Unternehmen und Behörden sowie die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gehören zu den Hauptzielen der Gesellschaft.

Mehr Informationen: [gars.science](https://www.gars.science)<sup>2</sup>



© GARS

### **E-SAF: Unbegrenzt Ressourcenpotenzial für die SAF-Produktion?**

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse und durch die Transformation hinzu regenerativer, elektrischer Energie als Primärenergie, werden strombasierte

Energieträger in vielen nicht oder nur schwer direkt elektrifizierbaren Sektoren als Defossilierungsoption diskutiert.

Hierbei sind Wasser und Elektrizität die Grundlage für die sogenannten Power-to-X Verfahren. Für kohlenstoffhaltige

Energieträger, also auch bei Drop-in SAF, wird zusätzlich CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle benötigt.

Elektrische Energie ist die bei vielen Verfahren zur Energiegewinnung aus erneuerbaren Energien – hauptsächlich Photovoltaik (PV), Windenergie und Wasserkraft – direkt gewonnene, nutzbare Energieform. PV- und Windenergie wurden in den vergangenen Jahrzehnten massiv ausgebaut und zählen heute zu den günstigsten Stromerzeugungstechnologien überhaupt.

Diese Form der Energiegewinnung hat gegenüber Biomasse den Vorteil, dass diese auch und insbesondere auf Flächen erfolgen kann, die nicht landwirtschaftlich nutzbar sind. Da elektrische Energie eine besonders hochwertige und effizient nutzbare Energieform ist, wird erneuerbarer Strom in nahezu allen Sektoren als Mittel zur Defossilierung gesehen.

Die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom ist daher trotz des aus menschlicher Perspektive unerschöpflichen Potenzials begrenzt und an den Ausbau der Erzeugungsanlagen sowie der zugehörigen Netz- und Speicherinfrastruktur gekoppelt.

Wasser dient bei der strombasierten Kraftstoffproduktion als Wasserstoffquelle. Dieses kann auch in frischwasserarmen Regionen beispielsweise durch Meerwasserentsalzung bereitgestellt werden. Dabei trägt die Wasserbereitstellung in der Regel zu weniger als ein Prozent der Energiebedarfe und Kosten von Elektrolysewasserstoff bei. Der Bedarf an Wasser muss daher zwar mitbetrachtet werden, kann in den meisten Fällen jedoch als unkritisch eingestuft werden.

Kohlenstoffdioxid ist mit einer Konzentration von 0,042 Prozent in der Atmosphäre vorhanden und kann mit sogenannten Direct Air Capture (DAC)-Verfahren in Reinform aus der Luft gewonnen werden. Aufgrund der geringen Konzentration müssen hierzu große Luftmengen gefiltert werden, was wiederum große konstruktive, energetische und damit finanzielle Aufwände erfordert.

Derzeit ist DAC nur mit Abscheidungskosten von über 1000 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> umsetzbar, was zu reinen CO<sub>2</sub>-Kosten von mehr als 3500 Euro pro Tonne e-SAF führen würde. Die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Strömen mit erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (zum Beispiel von Biogasanlagen) ist hingegen deutlich einfacher und kann zu Kosten von unter 100 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> realisiert werden.

Entscheidend für die bilanzielle Klimawirkung des CO<sub>2</sub> ist dabei dessen Ursprung. Als konform im Sinne der angestrebten THG-Neutralität können lediglich Punktquellen gelten, deren CO<sub>2</sub> aus der Verarbeitung oder Verbrennung von nachhaltiger Biomasse stammt. Diese sind, wie Biomasse an sich, wiederum nur begrenzt verfügbar.

Die für SAF zur Verfügung stehenden Rohstoffe können über verschiedene Verfahren in Drop-in Kraftstoffe umgewandelt werden. Die Wahl der Produktionsroute ist im Wesentlichen von den gewählten Einsatzstoffen abhängig, wobei einzelne Technologien in verschiedenen Prozessrouten genutzt werden können. Für die Beschreibung des Entwicklungsstandes einer Produktionsroute oder eines Kraftstoffs können verschiedene Kennzahlen genutzt werden, die zur Bewertung oder zum Vergleich von SAF-Optionen dienen können.

## ***Technologie- und Kraftstoff-Reifegrad***

Die Entwicklung einer Technologie erfolgt über verschiedene Phasen der Forschung, der Erprobung und der Etablierung auf dem Markt. Ein verbreitetes System zur Abbildung des Entwicklungsstandes ist der Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL).

Die ursprüngliche Skala unterteilt neun Phasen, wird aber heute auch als Erweiterung mit elf Unterteilungen angewendet. Nach Abbildung eins umfasst die Technologieentwicklung dabei die Phasen der Grundlagenforschung (TRL 1-2), der angewandten Forschung (TRL 2-5), der technischen Entwicklung (TRL 5-8), der Marktreife (TRL 8-9) und in der erweiterten Skala die Marktintegration (TRL 10) und die Marktstabilität (TRL 11). [10,11]

Zur Bewertung des Entwicklungsstandes neuer Kraftstoffe spielen neben der technischen Entwicklung der Produktion weitere Kriterien wie beispielsweise die Kraftstoffstandardisierung, -erprobung und -zertifizierung eine Rolle. Diese Aspekte wurden im Kraftstoff-Reifegrad (Fuel Readiness Level, FRL) mitberücksichtigt.

Die Skala hat neun Stufen, vom Entwicklungszyklen für die Herstellung des Kraftstoffs (FRL 1-5), über die Kraftstoffzertifizierung (FRL 6-7) bis hin zur Kommerzialisierung des Kraftstoffs (FRL 8-9) [10].

Aufgrund der speziellen Eigenschaften, die Kerosin zur sicheren Nutzung erfüllen muss, bestehen umfangreiche Zertifizierungsverfahren für alternativ hergestellte Drop-in Kraftstoffe. Derzeit sind acht Herstellungsverfahren und zwei Mitraffinationen nach der hierfür anzuwendenden ASTM D7566 zertifiziert.

Während das FRL den Kraftstoff und damit die gesamte Bereitstellung und Nutzung umfasst, kann das TRL auch für die Bewertung einzelner Teiltechnologien genutzt werden. Dabei kann das TRL einer Produktionsroute nicht höher, aber durchaus tiefer, als das TRL der am wenigsten entwickelten Teiltechnologie liegen. Die exakte Bewertung von TRL und FRL kann aufgrund der zumeist nur begrenzt verfügbaren Herstellerdaten und der eher unscharfen Trennung

verschiedener Entwicklungsstufen nicht absolut getroffen werden. In der Literatur sind daher oft unterschiedliche Einstufungen derselben Technologien zu finden.

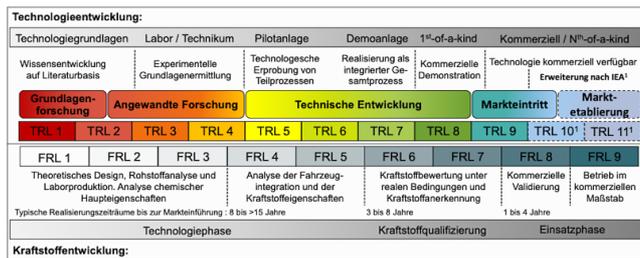


Abbildung 1: TRL und FRL Entwicklungsphasen (Definition und Darstellung nach DBFZ 2022 [9]).

© Stefan Bube

## Technischer Stand der Biokraftstoffproduktion

Zur Umwandlung der vielfältigen biogenen Rohstoffe in spezifikationskonforme SAFs stehen verschiedene Prozessrouten mit unterschiedlichen TRL und FRL zur Verfügung. Nach der Vorbehandlung der Rohstoffe (Pressen, Mahlen, Extrahieren et cetera.) nutzen die Verfahren dabei überwiegend thermochemische und/oder biochemische Konversionsprozesse.

Bisher wird fast ausschließlich das HEFA (Hydroprozessierter Ester und Fettsäuren) -Verfahren zur Herstellung von synthetischem, paraffinischem Kerosin (SPK) im industriellen Großmaßstab eingesetzt. Es nutzt pflanzliche öl- und fetthaltige Rohstoffe und wandelt diese durch Hydrierung in flüssige Kohlenwasserstoffe um, die als nachhaltiger Flugkraftstoff eingesetzt werden können.

Dabei sind die wesentlichen Molekülstrukturen bereits im Rohstoff vorhanden und müssen lediglich durch die Prozessierung aus den Lipidverbindungen (Triglyceriden) abgespalten und mit Wasserstoff gesättigt (hydriert) werden. Der energetische Hauptaufwand liegt dabei vorwiegend in der Wasserstoffproduktion, die heute noch fast ausschließlich über Erdgasreformierung erfolgt.

Das Gesamtverfahren kann mit einem TRL 9 bewertet werden, da es seit Jahren in kommerzieller, großtechnischer Nutzung ist. Ebenso ist das FRL mit neun als vollständig kommerziell etabliert zu bewerten. Aufgrund der technisch einfachen und vergleichsweise günstigen Produktion von HEFA-SPK (gekoppelt an den Biomassepreis) ist zu erwarten, dass dieser Kraftstoff in den nächsten Jahren das dominierend eingesetzte SAF bleibt [12].

Eine weitere Option zur Herstellung von bio-SAF sind AtJ (Alcohol-to-Jet) -Verfahren. AtJ umfasst unterschiedliche Prozessvarianten, in denen Alkohole über mehrere Prozessschritte in ein Gemisch aus langkettigen Kohlenwasserstoffen umgewandelt werden. Die Alkoholbereitstellung erfolgt

üblicherweise biochemisch über die alkoholische Gärung (Fermentation).

Ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) ist der gängigste Alkohol, aber es dürfen nach ASTM alle C<sub>2</sub> bis C<sub>5</sub> Alkohole als Ausgangsstoff für spezifikationskonformes Kerosin genutzt werden. Als Rohstoffbasis wird fast ausschließlich zuckerhaltige oder stärkehaltige Biomasse genutzt, jedoch ist auch die Verarbeitung lignocellulosehaltiger Biomasse (beispielsweise Stroh) durch zusätzliche Vorbehandlungsschritte möglich.

Die Umwandlung des Alkohols in Kerosin erfolgt dann thermochemisch über eine Dehydratisierung, Oligomerisierung und Hydrierung. Neben Kerosin fallen hierbei leichtere und schwerere Kraftstofffraktionen (Naphtha, Diesel) als Nebenprodukte an. Je langkettiger der eingesetzte Alkohol ist, desto geringer ist für gewöhnlich der Aufwand der nachfolgenden Weiterverarbeitung.

Grundsätzlich ist das Verfahren im Vergleich zum HEFA-Prozess aber aufwändiger, da ein umfassender Umbau der Molekülstruktur erfolgt und hierzu mehrere Prozessschritte notwendig sind. Das FRL kann aufgrund der bestehenden ASTM Zertifizierung mit acht bewertet werden, da eine etablierte kommerzielle Nutzung noch aussteht.

Bezüglich des TRL wurde die erste kommerzielle Anlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von circa 36.000 Tonnen SAF Anfang 2024 eröffnet, womit das TRL mit 7-8 bewertet werden kann. Es ist jedoch zu beachten, dass für einige Prozessvarianten beispielsweise unter der Nutzung innovativerer Alkoholproduktion oder der Verarbeitung von Alkoholgemischen geringere Reifegrade vorliegen.

Neben den zuvor beschriebenen Verfahren können auch synthesebasierte Verfahrensrouten genutzt werden, um bio-SAF zu produzieren. Dabei muss zunächst die Biomasse in ein Synthesegas, das vorwiegend aus CO, H<sub>2</sub> und gegebenenfalls CO<sub>2</sub> besteht, umgewandelt werden.

Biochemisch kann dies über die Fermentation zu Biogas (TRL 9) mit anschließender Reformierung (je nach Reformierungsverfahren TRL 7-9) oder thermochemisch über die Gaserzeugung aus fester Biomasse oder aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen (je nach Ausgangsstoff TRL 5-7) erfolgen.

In Verbindung mit der anschließenden Synthese zu langkettigen, flüssigen Kraftstoffen wird dann in Gas-to-Liquids (GtL) und Biomass-to-Liquids (BtL) (oder auch Waste-to-Liquids (WtL)) unterschieden.

Die Synthese und Weiterverarbeitung sind im Wesentlichen von der Synthesegaserzeugung unabhängig. Die Umwandlung über die Fischer-Tropsch (FT)-Synthese und anschlie-

rende Hydroprozessierung ist ASTM zertifiziert (FRL 7-8) und technisch seit Jahrzehnten auf fossiler Ressourcenbasis etabliert (TRL 9).

Darüber hinaus kann das Synthesegas auch über die Methanol-Synthese und das anschließende Methanol-to-Jet (MtJ)-Verfahren – eine Art AtJ über Dehydratisierung (Methanol-to-Olefins), Oligomerisierung und Hydrierung – in Kerosin umgewandelt werden.

Die Methanol-Synthese ist auf dem gleichen TRL wie die Fischer-Tropsch-Synthese; das MtJ-Verfahren hingegen wurde für eine spezifikationskonforme Kerosinproduktion noch nicht kommerziell demonstriert (TRL 6-7). Der Zertifizierungsprozess für den resultierenden Kraftstoff läuft derzeit (FRL 6).

Bei beiden Prozesswegen (FT und MtJ) fallen im Regelfall leichtere und schwerere Fraktionen als Nebenprodukt an. Diese können jedoch durch zusätzliche Prozessschritte und Rückführungen fast vollständig vermieden werden, wodurch sich die Kerosinmenge erhöht.

Das TRL der gesamten Prozesskette inklusive Synthesegas-erzeugung aus Biomasse kann von den TRL der Synthese und Weiterverarbeitungsverfahren abweichen. Insbesondere die thermochemische Gaserzeugung aus komplexen Biomassen ist technisch schwierig und kommerziell bisher häufig gescheitert.

Ein großer Vorteil der synthesebasierten Verfahren ist, dass alle Biomassen als Rohstoffbasis genutzt werden können. Da diese während der Umwandlung molekular jedoch vollständig zerstört und neu aufgebaut (synthetisiert) werden, sind die Verfahren prozesstechnisch und energetisch relativ aufwändig.

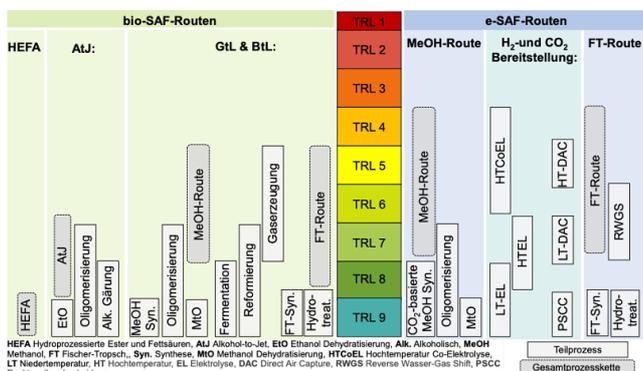


Abbildung 2: Übersicht der technischen Reife verschiedener SAF-Routen.

© Stefan Bube

### Technischer Stand der strombasierten SAF-Produktion

Die Produktion von e-SAF, auch bekannt als Power-to-Liquid (PtL), erfolgt technisch über die synthesebasierte Umwandlung von CO2 und H2. Daher umfasst die Prozess-

kette die Teilschritte der H2-Produktion, der CO2-Bereitstellung, die Synthesegasproduktion sowie die Synthese und Weiterverarbeitung.

Die H2-Produktion über die elektrochemische Wasserspaltung (Elektrolyse) ist der energetisch aufwändigste Schritt der gesamten PtL-Prozesskette (> 90 Prozent des Gesamtenergiebedarfs). Hierbei wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt, wobei ein Teil der Energie (30 bis 40 Prozent auf Basis des Heizwerts) in Form von Wärme als Verlust frei wird.

Kommerziell verfügbare Technologien (TRL 9) sind die Niedertemperatur-Verfahren alkalische Elektrolyse (AEL) und Polymer-Elektrolyt-Membran Elektrolyse (PEMEL). Hochtemperaturverfahren wie die Festoxid-Elektrolyse (SOEL) können durch Abwärmenutzung höhere Effizienzen erreichen, besitzen derzeit aber noch ein TRL von 7-8.

Die CO2-Bereitstellung kann wie oben diskutiert aus der Luft oder aus nachhaltigen biogenen Punktquellen erfolgen. Die Abscheidung aus Punktquellen, vorwiegend über Absorptionsverfahren, ist bspw. zur Synthesegaskonditionierung oder Biomethanproduktion seit Jahrzehnten Stand der Technik. Verfahren sind unter anderem Rectisol, Selexol oder Aminwäschen, die alle mit TRL neun eingestuft werden können.

Direkt Air Capture Technologien wurden relativ neu, basierend auf Absorptions- und Adsorptionsverfahren, entwickelt. Niedertemperatur-Verfahren (LT-DAC) sind technisch mehrfach demonstriert, jedoch für wirtschaftliche Anwendungen noch deutlich zu aufwändig (TRL 7).

Hochtemperatur-Verfahren (HT-DAC) werden derzeit einzeln in Versuchsanlagen demonstriert, sind aber technisch anspruchsvoller als die Niedertemperatur-Verfahren und weisen einen geringeren Reifegrad auf (TRL 5).

Für die Umwandlung der Ausgangsstoffe in e-SAF werden vorwiegend, wie bei BtL und GtL, die Fischer-Tropsch oder die Methanol Route diskutiert [13]. Im Fall der Fischer-Tropsch Route ist zunächst eine Reduzierung des CO2 zu CO notwendig, da herkömmliche FT-Synthesen keine ausreichenden Mengen an CO2 umsetzen.

Die Erzeugung von CO kann entweder gemeinsam mit der H2-Produktion in einer Hochtemperatur-Co-Elektrolyse (TRL 4-6) oder separat unter Nutzung von H2 als Reduktionsmittel in einer umgekehrten Wasser-Gas Shift (RWGS) Reaktion (TRL 6-7) erfolgen. Diese relativ aufwändige und technisch anspruchsvolle CO2-Reduktion kann im Fall der Methanol-Synthese vermieden werden, da das Verfahren auch als direkt, CO2 umsetzende Synthese (TRL 8-9) verfügbar ist.

Die Gesamtprozesse inklusive Rohstoffbereitstellung können sowohl für die Fischer-Tropsch als auch für die Methanol Route, je nach verwendeter Teiltechnologien, mit TRL 4-7 bewertet werden. Das FRL unterscheidet sich nicht zu den BtL und GtL Routen, da in der ASTM nur die direkten Kerosinerzeugungstechnologien (hier Synthese und Weiterverarbeitung) sowie der daraus resultierende Kraftstoff berücksichtigt werden.

## **Nischendasein und mangelnder Hochlauf aufgrund hoher Kosten**

Obwohl bereits mehrere Produktionsrouten für die Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe zugelassen wurden und technisch kaum Hindernisse bestehen, konnte eine breite Markteinführung bisher weder global noch regional umgesetzt werden.

Mit einem Anteil von rund 0,1 Prozent im Jahr 2023 hat SAF bisher ein absolutes Nischendasein auf dem globalen Kerosinmarkt. Zwar stieg die Nutzung im Vergleich zum Vorjahr um circa 120 Prozent auf 310.000 Tonnen [14], jedoch wurde dieses ausschließlich auf Basis von HEFA bereitgestellt, wobei Ressourcen auch aus anderen Sektoren abgezogen wurden.

Die Herstellungskosten von Drop-in SAF liegen deutlich über dem Preisniveau von fossilem Kerosin. HEFA-SPK stellt die derzeit günstigste SAF-Option dar, wobei auch hier die Preise rund doppelt bis viermal so hoch wie die von fossilem Kerosin sind.

Die Preisspannen andere SAF-Optionen sind noch deutlich größer, wobei auch die Kosten höher anzunehmen sind. Dies resultiert vor allem aus den im Vergleich zu Rohöl teureren Rohstoffen (Biomasse, Strom und gegebenenfalls CO<sub>2</sub>) sowie der teils konstruktiv und energetisch sehr aufwändigen Herstellung.

Eine gewisse Kostenreduktion kann mit zunehmender Skalierung im Rahmen eines Markthochlaufs erwartet werden. Der Markthochlauf wird aber eben durch die aktuell hohen Kosten gehemmt und eine Kostenparität mit fossilem Kerosin unter den aktuellen Rahmenbedingungen ist vorerst nicht zu erwarten.

Die biomassebasierte SAF-Produktion kann weitestgehend auf technisch etablierten Verfahren erfolgen, weshalb keine signifikante technologiebedingte Kostendegression zu erwarten ist. Darüber hinaus sind die Kosten für bio-SAF primär rohstoffgetrieben, weshalb zukünftig die Gestehungskosten unter der Nutzung gängiger Biomassen sogar steigen könnten.

Die mit Abstand höchsten Kosten werden heute für die Produktion strombasierter Kraftstoffe erwartet. Primär resultiert dies durch den hohen Strombedarf und die damit verbundenen Stromkosten sowie heute noch hohe Elektrolyseurkosten [15]. Es ist zu erwarten, dass letztere durch die Inbetriebnahme derzeit im Aufbau befindender Elektrolyseur-Fertigungskapazitäten deutlich sinken könnten. Im Bereich der Synthese und Weiterverarbeitung sind aufgrund des hohen technologischen Entwicklungsstandes kaum Kostenreduktionen oder Effizienzgewinne zu erwarten. Zukünftige Kostenreduktionen sind daher an das weitere Sinken der Stromgestehungskosten sowie auch zukünftig günstige CO<sub>2</sub>-Quellen gebunden.

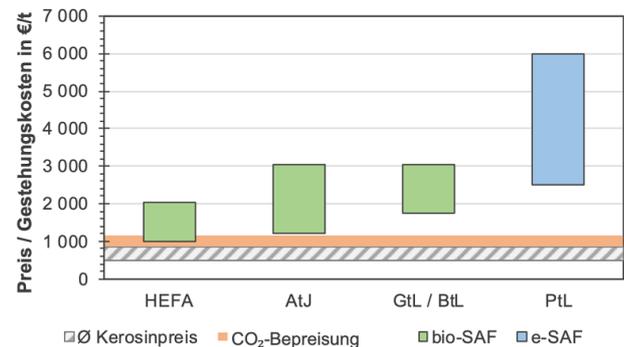


Abbildung 3: Gestehungskosten unterschiedlicher SAF-Optionen (nach [14,15] und eigenen Berechnungen; CO<sub>2</sub>-Preis: 100 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>). © Stefan Bube

Neben den hohen SAF-Gestehungskosten besteht ein weiteres Hemmnis in den zu geringen Preisen für fossiles Kerosin, die dadurch begünstigt werden, dass keine ausreichende Internalisierung der externen Klima- und darüber hinausgehenden Umweltauswirkungen erfolgt.

Abbildung drei zeigt dabei deutlich, dass selbst die Berücksichtigung aktueller CO<sub>2</sub>-Bepreisungsniveaus nur in Ausnahmefällen einen ausreichenden Anreiz zur SAF-Nutzung bieten.

Sowohl innerhalb der aktuellen Ziele der Luftfahrtindustrie, als auch im aktuellen regulatorischen Rahmen werden keine "nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte" berücksichtigt. Da der (gezielte) Einsatz von SAF auch zur Minderung dieser Effekte führen kann [18], könnte eine regulatorische Berücksichtigung von "nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten" die SAF-Nutzung stärker anreizen.

## **Fazit**

Die Entwicklung und großtechnische Produktion von SAF stehen nicht primär vor technischen, sondern vor wirtschaftlichen und infrastrukturellen Herausforderungen. Rohstoffseitig zeigt sich, dass sowohl Biomasse als auch nachhaltiges CO<sub>2</sub> begrenzt verfügbar oder nur sehr aufwändig bereitzustellen sind. Der Aufbau der notwendigen Stromerzeugungskapazitäten auf Basis erneuerbarer Energien für die e-

SAF-Produktion ist zudem eine essenzielle Voraussetzung, die aktuell noch nicht in ausreichendem Maße gegeben ist.

Technologisch ist die Produktion von SAF auch heute schon großtechnisch möglich. Für nahezu jede Biomassequelle existieren technisch weitentwickelte Umwandlungsrouten, die ASTM-konformes Kerosin erzeugen können. Auch strombasiertes Kerosin kann mit weitgehend kommerziell verfügbarer Technik produziert werden.

Jedoch steht die Umsetzung der Gesamtprozesskette sowohl bei der Fischer-Tropsch als auch bei der Methanol Route aus. Während bei der Fischer-Tropsch Route auf Basis von H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> noch die Kombination aus umgekehrter Wasser-Gas Shift Reaktion und nachfolgender Synthese großtechnisch zu demonstrieren ist, bedarf die Methanol Route den Nachweis der spezifikationskonformen Kerosinproduktion mittels des Methanol-to-Jet Verfahrens. Eine anschließende und zeitnahe Realisierung von First-of-a-kind-Anlagen scheint realistisch, zumal verschiedene Technologieanbieter diese bereits kommerziell anbieten.

Hindernisse für einen breiten Markthochlauf liegen primär in den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Besonders die

strombasierte SAF-Produktion ist mittelfristig nur zu deutlich höheren Kosten (Faktor von sechs bis zehn im Vergleich zu fossilem Kerosin) realisierbar. Solche Anlagen sind zudem sehr kapitalintensiv, was Investitionen zusätzlich hemmen kann.

Auch bio-SAF wird zukünftig, aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse und der aufwändigeren Verarbeitung im Vergleich zur erdölbasierten Produktion, zumeist über den derzeitigen Preisen von fossilem Kerosin liegen. Der Einsatz von SAF ist daher letztendlich stark an die Bereitschaft des Luftverkehrs – und damit auch der Passagiere – gebunden, den entsprechenden Preis für einen umfassenden Klimaschutz zu zahlen.

Auch wenn die kommerzielle Nutzung von SAF den zuvor beschriebenen Herausforderungen gegenübersteht und vermutlich nicht als alleinige Maßnahme zur Erfüllung der Klimaziele in der Luftfahrt ausreicht, werden zur Zielerfüllung in den nächsten Jahren große SAF-Mengen benötigt. Um diese bereitzustellen ist ein regulatorisch angereizter, schneller Markthochlauf von zunächst bio-SAF und mittelfristig e-SAF von entscheidender Bedeutung und trotz der erheblichen Herausforderungen weiter zu forcieren.

## Über den Autor

Stefan Bube ist seit 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE) der TU Hamburg<sup>3</sup>. Er hat Verfahrenstechnik (M.Sc.) in Hamburg und Magdeburg studiert. Seine Forschungsbereiche konzentrieren sich auf die prozessseitige und systemische techno-ökonomische und ökologische Analyse erneuerbarer Kraftstoffe und Grundchemikalien. Er hat in renommierten Fachzeitschriften und Lehrbüchern zu Themen wie der nachhaltigen Methanolproduktion und zur strombasierten Kerosinproduktion über die Fischer-Tropsch und die Methanol Route veröffentlicht. LinkedIn<sup>4</sup>



© Stefan Bube

## Literaturverzeichnis

- [1] Lee DS, Fahey DW, Skowron A, Allen MR, Burkhardt U, Chen Q et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmos Environ* (1994) 2021;244:117834. Link<sup>5</sup>
- [2] Air Transport Action Group. Waypoint 2050. Second Edition. Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century. Genf; 2021.
- [3] International Civil Aviation Organization. Resolution A41-21.: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection - Climate change. Montréal; 2022.
- [4] International Air Transport Association. Resolution on the industry's commitment to reach net zero carbon emissions by 2050: Press Release No: 66; 2021.
- [5] International Civil Aviation Organization. Environmental Report 2022. Montréal; 2022.
- [6] International Air Transport Association. An Airline Handbook on CORSIA. Montréal; 2019.
- [7] Bullerdiek N. Kerosinoptionen auf Basis regenerativer Energien im internationalen Luftverkehr: Identifikation, Analyse und Bewertung kosteneffizienter und klimazielkompatibler Integrationspfade [Dissertation]. Hamburg: Technische Universität Hamburg (TUHH); 2024.
- [8] Voß, S.; Bube, S.; Kaltschmitt, M.: Hybrid Biomass- and Electricity-Based Kerosene Production—A Techno-Economic Analysis, *Energy Fuels* 2024, 38, 6, 5263–5278
- [9] Quante G, Bullerdiek N, Bube S, Neuling U, Kaltschmitt M. Renewable fuel options for aviation – A System-Wide comparison of Drop-In and non Drop-In fuel options. *Fuel* 2023;333:126269. Link<sup>6</sup>
- [10] Schröder J, Naumann K. Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH; 2022.
- [11] IEA (2019), Innovation Gaps, IEA, Paris Link<sup>7</sup>, Licence: CC BY 4.0
- [12] CENA Hessen. CENA SAF-Outlook 2024-2030 – Eine Analyse von Mengen, Technologien und Produktionsstandorten für nachhaltige Flugtreibstoffe; 2024.
- [13] Bube S, Bullerdiek N, Voß S, Kaltschmitt M. Kerosene production from power-based syngas – A technical comparison of the Fischer-Tropsch and methanol pathway. *Fuel* 2024;366:131269. Link<sup>8</sup>
- [14] Robinson A. Beitrag publiziert bei LinkedIn: Aaron Robinson, International Airlines Group (IAG).
- [15] Agora Verkehrswende and PtX Hub. Defossilising aviation with e-SAF: An introduction to technologies, policies, and markets for sustainable aviation fuels; 2024.
- [16] Concawe. E-Fuels: A techno-economic assessment of European domestic production and imports towards 2050: Report no. 17/22; 2022.
- [17] Bullerdiek N, Neuling U, Kaltschmitt M. Nachhaltige Flugkraftstoffe Status, Optionen, Handlungsnotwendigkeiten: Roadmap zur Markteinführung von Sustainable Aviation Fuels; 2020.
- [18] Quante G, Voigt C, Kaltschmitt M. Targeted use of paraffinic kerosene: Potentials and implications. *Atmospheric Environment: X* 2024;23:100279. Link<sup>9</sup>

1. <https://www.airliners.de/serien/umweltfreundliche-luftfahrt-status-quo-klima>

2. <https://gars.science/>
3. <https://www.tuhh.de/iue/mitarbeiterinnen/mitarbeiterinnen-iue>
4. <https://www.linkedin.com/in/stefan-bube-31b920197/>
5. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
6. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126269>
7. <https://www.iea.org/reports/innovation-gaps>
8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131269>
9. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100279>

Status quo SAF (3)

# ***Kosteneffiziente Lösungen zur Unterstützung eines grüneren Luftverkehrs***

Exklusiv für airliners+ Abonnenten

Die Herausforderungen bei der Reduzierung von Emissionen im Luftverkehr sind komplex und erfordern langfristige technologische und politische Lösungen. Prof. Stef Proost von der Universität Leuven erläutert, wie die optimale Klimapolitik aussehen sollte.

Von Stef Proost



© Adobe Firefly KI

Die Luftfahrt steht vor einer großen Herausforderung: Sie muss dafür sorgen, dass Fliegen umweltschonender wird. Ein wesentlicher Baustein ist SAF. Um nachhaltiges Kerosin einzuführen, ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten aus verschiedenen Bereichen erforderlich, beispielsweise aus den Bereichen Technologie, Politik und Wirtschaft. Die aktuelle Serie zeigt den Status quo der Maßnahmen auf<sup>1</sup>. In diesem Teil erläutert Prof. Stef Proost, wie kosteneffiziente Lösungen einen umweltschonenderen Luftverkehr fördern können.\_

Die Verwirklichung eines klimaschonenden Luftverkehrs ist aufgrund zweier Hindernisse eine Herausforderung. Erstens gibt es keine Wunderlösung für die Technologie: Alternative Flugkraftstoffe wie Biokraftstoffe, E-Fuels oder Elektrizität sind eine sehr langfristige Option, und auch die Verbesserung der Effizienz von Flugzeugen ist nicht einfach. Zweitens ist die Luftfahrt von Natur aus eine internationale Aktivität, und Emissionsreduktionen erfordern globale Anstrengungen. Die meisten Länder haben ein Interesse daran, die Emissionen zu reduzieren, aber internationale Vereinbarungen zur Emissionsreduzierung können nicht durchgesetzt

werden. Dies führt zu Versprechungen, die nicht immer eingehalten werden.

Was man tun kann, ist, sich für kosteneffiziente Lösungen zur Emissionsminderung einzusetzen, die durch die zu erwartenden Klimaschäden im eigenen Land gerechtfertigt sind. Dies gilt sicherlich für den Verkehrssektor, in dem CO<sub>2</sub>-neutrale Lösungen im Allgemeinen noch sehr teuer sind (Ovaere & Proost, 2022).

In diesem Artikel diskutieren wir, was im Luftfahrtsektor getan werden kann, und stützen uns dabei weitgehend auf unsere jüngsten Forschungsergebnisse. Wir beginnen mit einer Diskussion der Politik für den EU-Luftverkehrsmarkt, wobei wir die Rolle des Emissionshandelssystems (ETS) und der Beimischung von nachhaltigem Flugkraftstoff (SAF) erörtern. Anschließend analysieren wir das Potenzial des Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Corsia), das eine Stabilisierung der Emissionen durch bilaterale Anstrengungen verspricht. Abschließend wird das Potenzial von Treibstoffeffizienzstandards für Flugzeuge diskutiert.

## ***Emissionsminderungen im EU-Luftverkehr***

Die aktuelle EU-Politik setzt auf die Einbeziehung des Luftverkehrs im Europäischen Wirtschaftsraum in das europaweite Emissionshandelssystem (ETS) und auf eine zunehmende Beimischungspflicht für nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF). Das ETS gilt zunächst für alle Emissionen aus der Stromerzeugung und der Industrieproduktion in der EU. Die Einbeziehung der EU-Luftfahrt in dieses Handelssystem ermöglicht es dem Luftfahrtsektor, seine eigenen Emissionsreduktionen mit den Kosten für Emissionsreduktionen im Strom- und Industriesektor zu verrechnen.

Unabhängig davon, ob der Luftverkehrssektor die Emissionszertifikate kostenlos erhält oder diese ersteigern muss, entsprechen die Opportunitätskosten für den Ausstoß einer Tonne für eine Fluggesellschaft dem Preis der Emissionszertifikate. Dies liegt daran, dass auch kostenlos erhaltene Zertifikate auf dem ETS-Markt verkauft werden können. Die Anzahl der jährlich zur Verfügung gestellten Zertifikate sinkt im Laufe der Zeit auf Null, möglicherweise schon vor 2050. Außerdem sind die Zertifikate übertragbar, also sie können auf die nächsten Jahre übertragen werden.

Obwohl die Fluggäste die Kosten des ETS nicht explizit im Ticketpreis sehen, gibt es starke empirische Belege dafür, dass das ETS einen Einfluss auf die Nachfrage im Luftverkehr hat. Fageda & Teseiro (2022) zeigen, dass die Kosten der Emissionszertifikate weitgehend an die Passagiere weitergegeben wurden und dass sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen im EU-Luftverkehr effektiv reduziert haben.

Zweitens legt die "REFuelEU"-Verordnung für den Luftverkehr[1] einen steigenden Mindestanteil von SAF im Luftverkehr fest, der durch eine Beimischungsverpflichtung erreicht werden soll: von zwei Prozent im Zeitraum 2025 bis 2029 über 20 Prozent im Zeitraum 2035 bis 2039 bis zu einem Anteil von 70 Prozent ab 2050. Der Hauptvorteil von SAF ist, dass sie keine andere Antriebstechnologie und keine zusätzliche Betankungsinfrastruktur erfordern, da es sich um "Drop-in-Kraftstoffe" handelt. Laut der Folgenabschätzung der EU-Kommission ist dies notwendig, um bis 2050 einen

CO<sub>2</sub>-neutralen Luftverkehr zu erreichen und sicherzustellen, dass der Luftverkehr seinen fairen Beitrag leistet.

Die derzeitigen Kerosinpreise (einschließlich der Kosten für ETS-Zertifikate) reichen nicht aus, um die Bereitstellungskosten für SAF zu decken. Mayeres et al (2023) verwenden ein Modell der globalen Agrar- und Kraftstoffmärkte und zeigen, dass SAF mit hohen Kosten verbunden sind. Biokraftstoffe könnten zwei- bis dreimal so teuer sein wie Kerosin und trotzdem indirekte Emissionen verursachen. E-Fuels könnten gar sechsmal so teuer sein wie Kerosin.

Große Durchbrüche in der Biokraftstofftechnologie sind zudem kaum zu erwarten, da Biokraftstoffe durch die seit 2005 bestehende Beimischungspflicht zu hoch besteuertem Benzin und Diesel für Pkw und Lkw bereits stark subventioniert werden (Lundberg et al. 2023). Der Preis für E-Fuels hat ein noch größeres Potenzial zu sinken, allerdings ist die Geschwindigkeit, in der das geschehen könnte, völlig unklar. Sie wird vom Strompreis, den Kosten für die Wasserstoffproduktion und den Kosten für die Synthese und Raffination der E-Fuels abhängen.

Die Zusammenführung von SAF-Mandaten mit einem Emissionshandelsystem ist eine seltsame Kombination, da die EU selbst bereits ein System für handelbare Emissionszertifikate eingeführt hat, das die Emissionen möglicherweise vor 2050 auf Netto-Null reduziert. Solange der Preis für SAF höher ist als der Preis für eine Emissionshandelszertifikat, führen Beimischungsmandate zu Wohlfahrtsverlusten in einem wettbewerbsorientierten Luftverkehrsmarkt.

## Artikelserie in Kooperation mit GARS

Diese [airliners.de](https://www.airliners.de)-Fachserie ist in Zusammenarbeit mit der German Aviation Research Society (GARS) entstanden. GARS ist eine gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung der Luftverkehrsforschung. Die Stärkung des Dialogs zwischen der Wissenschaft und den Praktikern in Unternehmen und Behörden sowie die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gehören zu den Hauptzielen der Gesellschaft.

Mehr Informationen: [gars.science](https://gars.science)<sup>2</sup>



© GARS

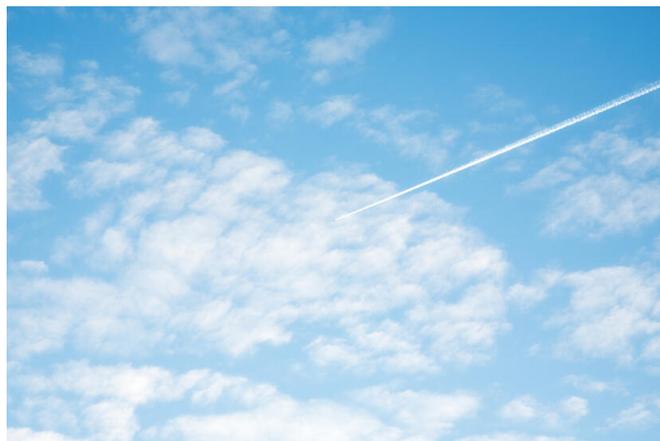
Eine einfache numerische Darstellung (Proost, 2024) zeigt, dass, wenn E-Fuels doppelt so teuer sind wie Kerosin (was sie heute noch nicht sind), die Verpflichtung zur Beimischung von Kraftstoffen ein Instrument zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist, das Prozent mehr soziale Kosten verursacht als das EU-Emissionshandelssystem oder eine CO<sub>2</sub>-Steuer. Der Grund dafür ist, dass ein CO<sub>2</sub>-Preis einen höheren Anreiz zur Reduzierung von Emissionen durch weniger Flüge bietet. Daher bevorzugen Fluggesellschaften und Nutzer den Beimischungsstandard, da er zu einem geringeren Anstieg der Flugpreise führt.

Eine entscheidende Annahme in dieser Argumentation ist, dass der Luftverkehrsmarkt vollständig wettbewerbsorientiert ist. In einem vollständig wettbewerblichen Markt würde die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer oder eines Preises für Emissionszertifikate den Verbraucherpreis an die sozialen Grenzkosten anpassen, was der heilige Gral der Ökonomie ist. Geht man jedoch davon aus, dass der Luftverkehrsmarkt ein uneingeschränktes Duopol oder Monopol darstellt, so liegt der Flugpreis bereits vor Inkrafttreten einer klimapolitischen Maßnahme über den Grenzkosten. In diesem Fall ist die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer oder eines Preises für

Emissionszertifikate in Höhe des Grenzschadens nicht mehr optimal, da sie den Keil zwischen dem Verbraucherpreis (Grenzkosten + Duopol-Marge + CO<sub>2</sub>-Steuer) und den sozialen Grenzkosten (Grenzkosten + CO<sub>2</sub>-Steuer) vergrößert.

Die optimale Umweltpolitik besteht dann darin, eine deutlich niedrigere CO<sub>2</sub>-Steuer zu erheben und auf subventionierte SAF zurückzugreifen. Zu diesem Ergebnis kommen Andreana et al. (2023) und Rausch und Straubinger (2024). Dieses Ergebnis wirft ein schwieriges politisches Problem auf. Da es nicht möglich ist, eine effektive Wettbewerbspolitik umzusetzen, wird auf eine kosteneffiziente Umweltpolitik zurückgegriffen, um die Marktverzerrung im Luftverkehrsmarkt zu korrigieren. Es könnte bessere politische Maßnahmen geben, um die überhöhten Preise auf dem Luftverkehrsmarkt anzugehen.

Eine bessere Lösung wäre es, die Einnahmen aus der CO<sub>2</sub>-Steuer zur Senkung bestehender, nicht treibstoffbezogener Luftverkehrssteuern (Cardoso, 2023) oder zur Subventionierung von Emissionsminderungen zu verwenden. Diese politischen Maßnahmen stellen sicher, dass ein effizienterer Mix zur Emissionsminderung gewählt wird, ohne die Verzerrungen auf dem Luftverkehrsmarkt zu verstärken.



Kondensstreifen vor blauem Himmel.

© Adobe Stock / Hunta

## ***Corsia wird wahrscheinlich nur wenige effektive Teilnehmer haben***

Während die Emissionen des nationalen Luftverkehrs unter das internationale Pariser Abkommen (2015) fallen, ist für internationale Flüge ein separates Abkommen erforderlich: Corsia (2017). Dieses Abkommen, das im Rahmen der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation (Icao) geschlossen wurde, sieht vor, dass jeder Anstieg der Emissionen aus internationalen Flügen zwischen zwei Corsia-Unterzeichnerstaaten durch Maßnahmen wie CO<sub>2</sub>-Kompensation oder die Nutzung von SAF ausgeglichen werden muss.

Die Obergrenze für das Emissionswachstum dieser bilateralen Flüge kann durch verschiedene politische Instrumente erreicht werden, die sich von denen der nationalen Klimapolitik unterscheiden können. Die internationale Luftfahrtgemeinschaft, insbesondere die International Air Transport Association (Iata), setzt in erster Linie auf SAFs, um die Emissionen zu stabilisieren.

Proost & Van der Loo (2024) analysieren die mögliche Beteiligung von Ländern am Corsia-Abkommen, wobei sie die derzeitige Ausgestaltung des Corsia-Abkommens als gegeben annehmen. Das Abkommen sieht vor, dass jedes Unterzeichnerland seine bilateralen Luftverkehrsemissionen bei 85 Prozent des Emissionsniveaus von 2019 stabilisiert und dieses Ziel bis 2035 beibehält. Das Abkommen deckt rund 60 Prozent der weltweiten Luftverkehrsemissionen ab.

Da das Abkommen selbstregulierend sein soll, werden sich die Länder nur dann effektiv beteiligen, wenn der Beitritt zum Abkommen zu einer Reduzierung ihrer eigenen Klimaauswirkungen führt. Im Gegensatz zum Corsia-Abkommen erfordert dies die Berücksichtigung aller Klimaauswirkungen des Luftverkehrs, die über die Kohlenstoffemissionen hinausgehen. Proost & Van der Loo verwenden daher einen Klimaschadensmultiplikator<sup>[2]</sup> für die Nutzung fossiler Brennstoffe im Luftverkehr (Faktor 1,7) sowie die indirekten Emissionen von SAF<sup>[3]</sup>. Für SAF wurde ein Kohlenstoffmultiplikator von 1,2 (statt 1,7 für Kerosin) verwendet.

Unter Verwendung der offenbaren Präferenzen für klimapolitische Anstrengungen (basierend auf der CO<sub>2</sub>-Steuerlücke der OECD (2021)) und deren Anwendung auf die bilateralen Flüge zwischen den zehn größten Ländern bieten sie die folgenden Erkenntnisse.

Erstens werden Länderpaare, deren individuelle Bewertung der Klimaschäden halb so hoch ist wie der Preis für Kompensationszahlungen oder SAFs, von einem Beitritt zum Abkommen profitieren. Der Hauptgrund für diese Zusammenarbeit besteht darin, dass die Gegenseitigkeit der Bemühungen (die Bemühungen für Flug A nach B werden von Land B für die Reise B nach A gespiegelt) dazu führt, dass die Kosten, sowohl in Bezug auf den Verlust der Konsumentenrente als auch in Bezug auf die Kompensationskosten, nur halb so hoch sind wie bei lokalen Bemühungen zur Reduzierung.

Zweitens ist die Umsetzung dieses Abkommens durch Offsets wesentlich kostengünstiger, sofern die Qualität der Offsets garantiert werden kann. Offsets mit Preisen in der Größenordnung von 20 bis 30 Euro/Tonne CO<sub>2</sub>-Vermeidung sind unbedenklich und würden es Ländern beziehungsweise Verbänden wie der EU, den USA, Japan und Kanada ermöglichen, Corsia beizutreten. Damit diese Länder Corsia über SAF-Blending beitreten können, müssten die SAF-Preise bei

0,60 Euro/Liter liegen, verglichen mit Kerosinpreisen von 0,50 Euro/Liter. Diese SAFs gibt es (noch) nicht, da die erwarteten SAF-Preise voraussichtlich 100 Prozent bis 500 Prozent höher sein werden als die von Kerosin.

Drittens: Technologische Fortschritte bei der Treibstoffeffizienz im Luftverkehr verringern sowohl den Nutzen als auch die Kosten der Emissionsstabilisierung und werden die Beteiligung an Corsia nicht erhöhen.

Viertens schreibt das Corsia-Abkommen die gleiche Emissionsstabilisierung für alle bilateralen Flüge vor. Da die Kosten der Teilnahme mit der Wachstumsrate des Luftverkehrs steigen, ist es wahrscheinlich, dass schnell wachsende Volkswirtschaften wie Indien, China und Brasilien von einer Teilnahme abgehalten werden. Ein internationales Abkommen mit Verpflichtungen wie das von Paris 2015 würde dazu beitragen, die Zahl der teilnehmenden Länder zu erhöhen.

## **Mehr kohlenstoffeffiziente Flugzeuge**

Investitionen in Forschung und Entwicklung zur Verbesserung der Kraftstoffeffizienz von Flugzeugen werden durch hohe Treibstoffpreise und Subventionen für Forschung und Entwicklung angetrieben. Flugzeuge sind seit 1960 bereits wesentlich treibstoffeffizienter geworden. Die EU und die USA produzieren mit Airbus und Boeing rund 90 Prozent der großen Verkehrsflugzeuge weltweit. Beide sind immer noch für 50 Prozent der Luftfahrtaktivitäten verantwortlich, aber das Wachstum im Rest der Welt ist viel höher.

Die Flugzeugindustrie dazu zu drängen, treibstoffeffizientere Flugzeuge zu entwickeln, ist daher eine vielversprechende Option für die EU und die USA, da dies indirekt die zukünftigen Luftfahrtemissionen in der ganzen Welt beeinflussen kann. Ovaere & Proost (2024) untersuchen diese Idee anhand eines Modells mit einem Duopol von Flugzeugherstellern, in dem alle Regierungen strategisch handeln. Die EU und die USA legen CO<sub>2</sub>-Steuern und Treibstoffeffizienzstandards fest. Alle anderen Länder können nur CO<sub>2</sub>-Steuern festlegen.



Neues wasserstoffelektrisches Triebwerk von Airbus

© Airbus

Sowohl nicht-kooperative als auch kooperative Lösungen werden untersucht. Bei den nicht-kooperativen Lösungen und einem globalen Klimaschaden von 100 Euro/Tonne CO<sub>2</sub> setzen die EU und die USA höhere Effizienzstandards (elf Prozent Verbesserung gegenüber dem heutigen Gleichgewicht) und die anderen Länder wenden hohe Kraftstoffsteuern an.

Die EU und die USA zögern, hohe Standards zu setzen, weil ein Teil ihrer Anstrengungen durch technologische Spillover-Effekte an die anderen Hersteller verloren geht. Hohe Treibstoffsteuern in anderen Ländern sollen die Flugzeugpreise senken, die von den Duopolisten für ihr Land festgelegt werden. Diese strategische Festlegung der Treibstoffsteuer wird nicht funktionieren, wenn der Flugzeugmarkt ein Leasingmarkt ist.

Wenn die EU und die USA kooperieren, werden sie sich für einen höheren Effizienzstandard entscheiden (14 Prozent Verbesserung der Treibstoffeffizienz), da technologische Spillover-Effekte jetzt vorteilhaft sind. Wenn Flugzeughersteller und -nutzer weltweit zusammenarbeiten, ist der optimale Effizienzstandard höher (20 Prozent), aber die Gesamtemissionsreduktion ist geringer (14 Prozent). Dies ist auf den Rebound-Effekt und eine niedrigere Treibstoffsteuer zum Ausgleich der Duopol-Marge in der Luftfahrtindustrie zurückzuführen. Ein globaler Klimaschaden von 400 Euro/Tonne erhöht den Effizienzstandard lediglich auf 25 Prozent, da das Modell von steigenden Grenzkosten der Treibstoffeffizienz ausgeht. Das bedeutet, dass jeder zusätzliche Prozentpunkt an Treibstoffeffizienz immer teurer zu erreichen ist.

## **Fazit**

Die Reduzierung der Emissionen des Luftverkehrs ist teuer, und Versprechen, die Emissionen des Luftverkehrs bis 2050 auf Null zu reduzieren, sind billig. Es gibt Optionen zur Emissionsminderung, aber sie müssen sorgfältig abgewogen werden. Eine optimale Emissionsreduktion erfordert eine

Verringerung der Flugaktivität, hohe Investitionen in treibstoffeffizientere Flugzeuge, sauberere Treibstoffe, Emissionskompensation durch Kohlenstoffabscheidung und -speicherung und schließlich wirksamere internationale Abkommen.

[1] Tatsächlich ist der Anwendungsbereich der "REFUE-IEU"-Luftfahrtverordnung weiter gefasst: Sie gilt für alle Kraftstoffe, die Flugzeugbetreibern auf EU-Flughäfen zur Verfügung gestellt werden. Also auch für Flüge außerhalb des EWR. (Verordnung (EU) 2023/2405)

[2] Nach Lee et al. (2021) zeigen die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen auf Basis des Global Warming Potential (GWP-Methode), dass die Emissionen des Luftverkehrs das Klima derzeit stärker erwärmen als die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luft-

verkehrs allein. Eine Tonne Kerosin, die im Zeitraum 2000 bis 2018 im internationalen Luftverkehr verbraucht wird, hat im Durchschnitt einen etwa 1,7 mal höheren Treibhauseffekt als eine Tonne Kohlenstoff, die am Boden emittiert wird (Lee et al.2021, Tabelle 5).

[3] Corsia berücksichtigt den Klimamultiplikator des Luftverkehrs nicht und betrachtet SAF als CO<sub>2</sub>-neutral, wenn sie eine Reduktion der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen von mindestens zehn Prozent garantieren. Die Vernachlässigung der indirekten Emissionen von bis zu 90 Prozent ist natürlich keine effektive Politik zur Emissionsreduktion.

*Mitwirkende Autoren und Autorinnen: Inge Mayeres, Marten Ovaere, Saskia Van der Loo*

## Über den Autor

Stef Proost ist emeritierter Professor an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Leuven (Belgien). Seit mehr als 30 Jahren unterrichtet er Wirtschaftswissenschaftler und Ingenieure in den Fächern Verkehrswirtschaft, Umweltökonomie und Energiewirtschaft.

Er ist Mitbegründer von "TML" (40 Mitarbeiter) in dessen sein Interesse für Luftfahrtökonomie geweckt wurde. Proost behandelte mit ehemaligen Doktoranden die Themen SAF (mit I. Mayeres) und Corsia (mit S. Van der Loo). Mit M. Ovaere arbeitete er an der Thematik der Duopole in der Flugzeugproduktion.

Derzeit arbeitet er an am Thema der Dekarbonisierung des Verkehrs (PKW, LKW, Luft- und Seeverkehr) sowie an der Bepreisung der Nutzung von Straßen, öffentlichen Verkehrsmitteln und der Flugsicherung.

E-Mail: [stef.proost@kuleuven.be](mailto:stef.proost@kuleuven.be) Publikationen finden sich unter diesem Link<sup>3</sup>.



© privat

## Literaturverzeichnis

- Andreana G., Adler N. and de Jong G. (2023), Competing on emission charges, Ch 4 of unpublished Phd thesis , University of Bergamo
- Cardoso D. (2023), Second best taxation in a differentiated oligopoly, discussion paper
- EC 2021, Impact Assessment Accompanying the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport, SWD(2021) 633 final
- Fageda, X., Teixid'o, J.J., (2022). Pricing carbon in the aviation sector: evidence from the European emissions trading system. J. Environ. Econ. Manag. 111 Link<sup>4</sup>
- Lee D.S., D.W. Fahey, A. Skowron , M.R. Allen , U. Burkhardt, Q. Chen , S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestvedt , A. Gettelman, R.R. De Leo, L.L. Lim, M. T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen , L.J. Wilcox, (2021), The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, Atmospheric Environment 244 (2021) 117834
- Lundberg L., Cintas Sanchez O., Zetterholm J.,(2023) The impact of blending mandates on biofuel consumption, production, emission reductions and fuel prices, Energy Policy 183, 113835
- Mayeres, I., Proost, S., Delhaye, E., Novelli, P., Conijn, S., Gomez-Jimenez, I., Rivas-Brousse, D., (2023). Climate ambitions for European aviation: where can sustainable aviation fuels bring us? Energy Policy 175 113502
- OECD, 2021. Effective Carbon Rates 2021
- Ovaere M., Proost S., (2024), Strategic climate policy in global aviation: aviation fuel taxes and efficiency standards with duopolistic producers, Working Paper revised and submitted to Economics of Transportation
- Ovaere, M., & Proost, S. (2022). Cost-effective reduction of fossil energy use in the European transport sector : An assessment of the Fit for 55 Package. Energy Policy 168, 113085, doi:10.1016/j.enpol.2022.113085
- Proost, S. (2024). Looking for winning policies to address the climate issue in EU-aviation. Journal Of Air Transport Management, 1-9

- Proost S., Van der Loo S., (2024), The Corsia international climate agreement on aviation as a game, Working Paper
- Rausch S., Straubinger A., (2024), The welfare cost of climate policies for global aviation, Paper presented at ITEA2024 and at EAERE 2024

- 
1. <https://www.airliners.de/serien/umweltfreundliche-luftfahrt-status-quo-klima>
  2. <https://gars.science/>
  3. <https://lirias.kuleuven.be/cv?Username=U0003510>
  4. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102591>

Status quo SAF (4)

## Herausforderungen und Chancen von "Book & Claim" für nachhaltiges Fliegen

Angesichts der Einführung von SAF-Quoten durch die EU könnte der "Book & Claim"-Ansatz eine mögliche Lösung zur Verbesserung der SAF-Distribution und -Nachverfolgung bieten. Wie dieser SAF-Zertifikatehandel ausgestaltet werden sollte, erläutert Sören Schwuchow vom PtX Lab Lausitz.

Von Sören Schwuchow



© Adobe Firefly KI

*Die Luftfahrt steht vor einer großen Herausforderung: Sie muss dafür sorgen, dass Fliegen umweltschonender wird. Ein wesentlicher Baustein ist SAF. Um nachhaltiges Kerosin einzuführen, ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten aus verschiedenen Bereichen erforderlich, beispielsweise aus den Bereichen Technologie, Politik und Wirtschaft. Die aktuelle Serie zeigt den Status quo der Maßnahmen auf. Im neuesten Teil schreibt Sören Schwuchow vom PtX Lab Lausitz über die Möglichkeiten vom Book & Claim-Ansatz zur Unterstützung einer nachhaltigen Luftfahrt.*

Die Europäische Union hat sich anspruchsvolle Klimaschutzziele gesetzt und möchte spätestens bis 2050 im Saldo klimaneutral sein ("Netto-Null"). Für den Luftverkehrssektor setzt sie zum größten Teil auf nachhaltige Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels – SAF), um die Emission von Treibhausgasen (THG) zu reduzieren. Aufgrund der komplexen Produktion von SAF und den dafür benötigten nachhaltigen Rohstoffen (insbesondere nachhaltige Biomasse, grüner Wasserstoff, nachhaltiges CO<sub>2</sub>, erneuerbare Energie) ist deren Produktion jedoch deutlich teurer als die von fossilen Kraftstoffen.

Dies gilt insbesondere für strombasierte Kraftstoffe (auch PtL-Kerosin, eKerosin oder eSAF). Dessen Herstellungsprozess benötigt große Mengen an erneuerbarer Energie für die Produktion von grünem Wasserstoff und der Abscheidung von (atmosphärischen) Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>). Ein ausreichendes Angebot an SAF, das mit fossilen Alternativen konkurrieren könnte, ist daher bis 2050 wohl nicht zu erwarten.

Um trotzdem die benötigte SAF-Nachfrage zu generieren, hat die EU Mindestquoten für die Beimischung von SAF allgemein sowie für PtL-Kerosin ab 2025 beziehungsweise 2030 erlassen. Entsprechend der aktuellen Planung müssen diese Quoten nach einer Übergangsphase ab 2035 an den meisten der europäischen Flughäfen erfüllt sein. Der SAF-Markthochlauf steht so vor mindestens zwei großen Herausforderungen:

1. Die Produktionskosten von SAF so weit wie möglich zu senken, um die Kostenlücke zu fossilem Kerosin zu minimieren.
2. Kleine Mengen SAF ab 2035 an eine Vielzahl von Flughäfen zu liefern.

Bei beiden Herausforderungen könnte eine Reorganisation der Herstellungs- und Lieferketten (englisch: Chain of Custody – CoC) nach einem Book & Claim-Ansatz eine wichtige Rolle spielen. Book & Claim-Ansätze sind nicht neu und finden sich zurzeit bereits beispielsweise im Handel mit erneuerbarer elektrischer Energie oder nachhaltigem Palmöl.

Die Organisation der Herstellungs- und Lieferketten hat gerade für nachhaltige Produkte eine besondere Relevanz. Hinsichtlich der physischen Eigenschaften sind diese in aller Regel vollkommen identisch zu ihren konventionellen (beispielsweise fossilen) Pendanten. Ihre Nachhaltigkeit resultiert aus den nachträglich, wenn überhaupt, nur sehr schwer nachvollziehbaren Produktionsbedingungen.



Die BP-Anlage in Lingen, die nachhaltigen Flugtreibstoff (Sustainable Aviation Fuel, SAF) aus alten Speisefetten herstellt.

© BP

Eine Unterscheidung zwischen nachhaltigen und konventionellen Produkten ist daher ohne eine Rückverfolgung über die CoC oftmals nicht möglich oder setzt technisch anspruchsvolle Verfahren voraus. Gleichzeitig stellt ihre Nachhaltigkeit einen zentralen Wertfaktor dieser Produkte dar. CoC-Systeme haben daher unter anderem die Aufgabe sicherzustellen, dass die Nachhaltigkeit eines Produkts lückenlos über alle Stufen der Herstellungs- und Lieferkette, von den Rohstoffen über die Produktion bis hin zur Nutzung, transparent nachvollzogen werden kann.

Damit sollen nicht nur fehlerhafte Klassifizierungen, sondern ebenso Betrug verhindert werden. Dass alle Vorgaben eingehalten wurden und somit ein nachhaltiges Produkt vorliegt, wird dabei normalerweise durch eine spezialisierte Agentur zertifiziert. Diese überprüft sowohl das CoC-System als Ganzes wie auch die einzelnen Stufen.

## Artikelserie in Kooperation mit GARS

Diese *airliners.de*-Fachserie ist in Zusammenarbeit mit der German Aviation Research Society (GARS) entstanden. GARS ist eine gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung der Luftverkehrsforschung. Die Stärkung des Dialogs zwischen der Wissenschaft und den Praktikern in Unternehmen und Behörden sowie die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gehören zu den Hauptzielen der Gesellschaft.

Mehr Informationen: [gars.science](https://gars.science)<sup>2</sup>



© GARS

## Organisation einer Chain of Custody für SAF

Für die Organisation einer CoC für SAF stehen verschiedenen Ansätze zur Verfügung. Eine CoC für SAF weist dabei die Besonderheit auf, dass aufgrund der aktuellen Vorgaben das SAF spätestens zur Nutzung mit fossilem Kerosin vermischt werden muss. Bei der Betrachtung ist daher relevant, bis zu welchem Punkt der Herstellungs- und Nutzungskette SAF und fossiles Kerosin nicht vermischt werden.

Die am wenigsten komplexe Form einer CoC stellt dabei die physische Segregation bis zum Flughafen dar. Die Herstellungs- und Lieferketten von SAF und fossilem Kerosin werden physisch vollständig getrennt gehalten, so dass an jedem Punkt der Herstellungs- und Lieferkette das SAF eindeutig identifiziert werden kann. Diese Form der Transparenz und eindeutigen Zuordenbarkeit führt zu einem geringen Missbrauchsrisiko. Ebenfalls kann auf diese Weise SAF gezielt in einzelnen Flugzeugen oder für spezielle Flüge genutzt werden.

Allerdings wird für die Distribution von der Herstellung über die Raffinerie bis zur Vertankung am Flughafen eine separate Infrastruktur benötigt. Anderenfalls würde das SAF

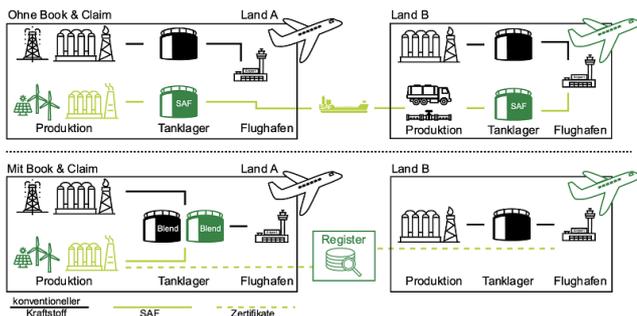
mit der Vermischung aus rechtlicher Sicht zu konventionellem Kerosin werden und damit seine Nachhaltigkeit verlieren. In diesem Fall könnte es nicht mehr mit einem Preisaufschlag verkauft werden, da mit dem Kraftstoffgemisch keine bilanzielle Senkung der Emissionen möglich wäre.

Allerdings existieren auch CoC-Ansätze, die eine Vermischung von nachhaltigem und fossilem Kerosin zulassen, ohne dass die Nachhaltigkeit aus rechtlicher Sicht verloren geht. Ein Beispiel hierfür stellt die Massenbilanzierung dar. Bei diesem Ansatz wird nach der Vermischung das nachhaltige Kerosin in der Mischung nur noch bilanziell als Anteil ausgewiesen. Auf diese Weise kann nachhaltiges und fossiles Kerosin gemeinsam transportiert und verteilt werden.

Gleichzeitig wäre es ebenso denkbar, den nachhaltigen Anteil bilanziell wieder zu separieren und das abgetrennte physische Produkt als nachhaltig zu klassifizieren. Eine Klassifizierung als SAF wäre unabhängig davon möglich, ob der separierte Anteil tatsächlich SAF oder doch fossilen Ursprungs ist. Es müsste nur sichergestellt werden, dass über alle Stufen der CoC hinweg am Ende des betrachteten Zeitraums nur so viel SAF dem System entnommen wie zuvor hineingegeben wurde. Die Massenbilanzierung ermöglicht

so zumindest eine teilweise Trennung des physischen Produkts von dessen Nachhaltigkeit.

Im Vergleich zur physischen Segregation erlaubt die Massenbilanz so eine flexiblere Distribution, da nicht durchgängig ein (konstanter) Anteil des nachhaltigen Produkts in der Mischung sichergestellt werden muss. Der Anteil muss lediglich über einen definierten Zeitraum eingehalten werden, im Zeitablauf kann der Anteil schwanken. Ebenso könnte eine Massenbilanz auch so abgegrenzt werden, dass das CoC-System mehrere Flughäfen oder Länder umfasst. Dann könnten schwankende Anteile an SAF auch zwischen Flughäfen oder Ländern ausgeglichen werden.



Quelle: Eigene Darstellung

© PtX Lab Lausitz

Book & Claim geht noch über diese Flexibilität hinaus, wie in Abbildung 1 verdeutlicht wird. Bei dieser CoC wird der nachhaltige Kraftstoff rechtlich vollständig in das physische Produkt und dessen Nachhaltigkeit getrennt. Letzteres wird durch die Ausgabe eines Zertifikats, das die nachhaltigen Eigenschaften verbrieft, rechtlich verselbstständigt und auf diese Weise separat handelbar. Das Zertifikat wird in einem zentralen Register angelegt, so dass die Eigentumsverhältnisse transparent nachvollziehbar sind. Das physische Produkt wird wiederum aus rechtlicher Perspektive mit konventionellen Kraftstoffen gleichgestellt.

Ein nachhaltiges Produkt entsteht aus der Kombination eines produktspezifischen Nachhaltigkeitszertifikats mit einem Flugkraftstoff beliebigen Ursprungs. Da das Zertifikat ein immaterielles Gut ist, das beispielsweise in elektronischer Form analog zu Wertpapieren gehandelt werden könnte, erleichtert sich die Distribution von SAF ungemein. Unter Zuhilfenahme eines Book & Claim-Systems könnte so SAF überall dort genutzt werden, wo irgendein zugelassenes Kerosin verfügbar ist (das heißt an allen Flughäfen weltweit). Nur die Book & Claim-Nachhaltigkeitszertifikate müssten (elektronisch) dazugekauft und deren Nutzung im System angezeigt werden.

## Verbesserter Handel und leichtere Distribution durch Standardisierung

Ein Book & Claim-Ansatz kann aufgrund der leichteren Distribution die Transaktionskosten für den Handel mit SAF verringern. Dadurch werden die Bezugskosten der Airlines am Verbrauchsort direkt gesenkt. Grundlage hierfür ist eine bis zu dreifache Standardisierung im SAF-Handel. Zunächst wird das physische Produkt standardisiert. Aus rechtlicher Sicht wird das SAF zu konventionellem Kerosin und kann daher beliebig mit fossilem Kerosin vermischt werden. Eine separate Infrastruktur für die Distribution von SAF wird nicht benötigt.

Gleichzeitig ist es ebenfalls nicht mehr notwendig, das SAF bis zum Verbrauchsort zu liefern. Lediglich die (elektronischen) Nachhaltigkeitszertifikate brauchen direkt zwischen Produzentin und Airline ausgetauscht werden. Das SAF muss nur noch bis zum nächsten möglichen Verbrauchsort transportiert und kann dort als konventionelles Kerosin verkauft werden. Die Airline hingegen kann beliebiges Kerosin vom lokalen Flughafen beziehen, das durch die zuvor erworbenen Zertifikate als SAF klassifiziert werden kann.

Die zweite Standardisierung betrifft die Nachhaltigkeit des Produkts. Hier ist in erster Linie der Umfang der durch den Einsatz von SAF vermiedenen Treibhausgase (THG) relevant. Allerdings könnten weitere Dimensionen von Nachhaltigkeit, wie soziale Aspekte oder Umweltschutz, mit betrachtet werden.

Eine Standardisierung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass unterschiedliche Ausprägungen an Nachhaltigkeit vereinheitlicht werden. Die EU regelt so beispielsweise in der Renewable Energy Directive (RED), dass alle biogenen oder strombasierten Kraftstoffe als SAF gelten, sofern sie 65 Prozent beziehungsweise 70 Prozent der THG-Emissionen im Vergleich zu einem fossilen Flugkraftstoff einsparen. Gleichzeitig regeln die Vorgaben zum EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS), dass dort alle SAF mit einem Emissionsfaktor von Null berücksichtigt werden.

Mit anderen Worten, spielt hier die individuelle THG-Einsparung des SAF keine Rolle für den Umfang der Anrechnung im EU-ETS, sofern der THG-Grenzwert eingehalten. Alle SAF werden gleichbehandelt und bilanziell mit Null Emissionen belegt. Eine solche Vereinheitlichung vereinfacht den Handel mit Zertifikaten. Da alle SAF hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit durch die Standardisierung als gleich angesehen werden können, sind für die Nutzer alle SAF-Zertifikate gegeneinander austauschbar, unabhängig von den ursprünglich individuell vermiedenen THG-Emissionen. Ihr Handel wird dadurch leichter, weil die Marktteilnehmerinnen so beispielsweise weniger Preise ken-

nen müssten oder schneller passende Handelspartnerinnen finden könnten.

Darüber hinaus werden die Zertifikate auf diese Weise einer dritten Standardisierung zugänglich. So könnten diese nun gegebenenfalls nach standardisierten Handelsprozessen ausgetauscht werden, wie es sie beispielsweise auch für Wertpapiere gibt. Dabei müssen die Angebots- und Nachfrageseite gar nicht mehr persönlich miteinander interagieren, was die Transaktionskosten (insbesondere Anbahnungs- und Vereinbarungskosten) weiter senkt.

Aufgrund der hohen Fixkosten eines solchen standardisierten Handels setzt dieser jedoch eine hohe Zahl von gehandelten Zertifikaten und damit eine weitgehende Standardisierung von diesen voraus. Individuelle Zertifikate würden daher eher nicht auf diese Weise gehandelt werden. Natürlich weist ein solches Vorgehen jedoch Nachteile aus Sicht des Klimaschutzes beziehungsweise der Nachhaltigkeit auf.

Durch die Standardisierung wird der Beitrag der SAF zum Klimaschutz systematisch höher angegeben, als er es bei individueller Anrechnung wäre. Um das auszugleichen, wären weitere Klimaschutzmaßnahmen notwendig, deren Kosten wiederum verteilt werden müssten. Es existiert somit ein Trade off zwischen Kosten des Handels und Klimaschutz, der bei Einführung eines solchen Systems berücksichtigt werden muss. Welches System aus einer Gesamtsicht vorteilhaft ist, muss dabei unter Berücksichtigung aller Faktoren analysiert werden. Dabei kann durchaus auch ein geringerer Grad an Standardisierung oder auch ein individueller Ausweis der Nachhaltigkeit optimal sein.

Die geringeren Transaktionskosten eines Book & Claim-Ansatzes, selbst bei individueller Anrechnung der vermiedenen THG-Emissionen, haben darüber hinaus weitere positive Effekte. Wie bereits erwähnt, muss der nachhaltige Kraftstoff nicht mehr vom Produktionsort bis zu dem Flughafen transportiert werden, an dem ein SAF benötigt wird. Eine Lieferung bis zum vom Produktionsort nächsten Flughafen ist ausreichend.



Flugzeuge auf der EBACE 2023 tanken SAF.

© EBACE

Dadurch werden die Transaktionskosten zu einem gewissen Grad unabhängig von der räumlichen Distanz zwischen Verbrauchs- und Produktionsort. Letztere könnten dann eher an Orten angesiedelt werden, die bei physischer Lieferung aufgrund der räumlichen Distanz weniger profitabel wären, jedoch ein besseres Potenzial für die SAF-Produktion aufweisen. Produktionsorte in Äquatornähe mit günstigeren Bedingungen für die Erzeugung erneuerbarer Energie und eine Nutzung der Kraftstoffe im Globalen Norden wäre unter diesen Bedingungen leichter möglich. Ebenso ermöglicht dieser Effekt eine stärkere Zentralisierung der Produktion und damit die Realisierung von Größen-, Verbund- oder Spezialisierungsvorteilen.

Die Folge beider Entwicklungen wären geringere Produktionskosten und damit ein kostengünstigerer Bezug an den Flughäfen. Auch die Länder des Globalen Südens könnten von einem solchen System Vorteile haben. Ein Book & Claim-Ansatz würde die Marktzutrittsschranken senken und es ihnen so erleichtern, als SAF-Produktionsländer von der klimaneutralen Transformation in den Industrieländern auch monetär zu profitieren.

## ***Herausforderungen für Book & Claim***

Allerdings bringt ein Book & Claim-System auch große Herausforderungen mit sich. Das gravierendste Problem ist dessen höhere Betrugs- und Fehleranfälligkeit. Durch die Trennung in physisches Produkt und Zertifikat kann einzig auf Grundlage des Zertifikats nicht mehr zweifelsfrei nachvollzogen werden, ob dahinter wirklich ein nachhaltiges, physisches Produkt steht, ob dieses Produkt tatsächlich anschließend nur als konventionelles Kerosin weiterverkauft oder dass auch nur ein Zertifikat pro Einheit physisches Produkt ausgegeben wurde. Hierfür bürgt lediglich die Zertifizierungsagentur, die daher eine Reputation für die Verlässlichkeit des Systems benötigt.

Ein zentrales Problem für Book & Claim ist dabei das sogenannte Double Counting, das heißt die mehrfache Anrech-

nung der verringerten THG-Emissionen aufgrund einer einzelnen Einheit physischen SAF. Dabei kann in drei unterschiedliche Formen unterschieden werden:

1. Double Issuance: Die mehrfache Ausgabe von Zertifikaten für eine einzelne Einheit SAF.
2. Double Claiming: Die mehrfache Anrechnung einer Einheit SAF (beispielsweise in mehreren Systemen).
3. Double Use: Die mehrfache Anrechnung eines Zertifikats zur Reduktion von THG-Emissionen.

Solche Fehlanrechnungen müssen bereits im Vorfeld vermieden werden, unabhängig davon, ob sie auf Fehlern oder Betrug basieren. Es ist zwar grundsätzlich auch möglich, fehlerhafte oder falsche Zertifikate im Nachhinein zu löschen. Die Kosten hierfür müssten jedoch wohl die Airlines tragen. Ein solcher Ansatz würde daher die Kosten für die Nutzerinnen erhöhen, aber auch die Reputation des Systems schädigen und damit dessen Funktionsfähigkeit gefährden.

Die Zertifizierungsagenturen setzten daher auf komplexe Monitoring-Prozesse und transparentes Reporting, um Double Counting bereits im Vorfeld zu verhindern. Dies umfasst nicht nur ein umfangreiches, lückenloses Audit der Herstellungs- und Lieferketten, wodurch die doppelte Ausgabe von Zertifikaten verhindert werden soll.

Ebenso wird oftmals über die Eigentumsverhältnisse sowie die Nutzung der Zertifikate transparent und öffentlich berichtet. Dies soll die doppelte Anrechnung verhindern, da eine etwaige vorherige Nutzung über das Register nachvollzogen werden könnte. Dieser Aufwand zum Aufbau und zur Pflege eines verlässlichen Registers ist aber natürlich mit zusätzlichen Kosten verbunden.

## ***Design und institutioneller Rahmen eines Book & Claim-Systems***

Die Funktionsfähigkeit und die positiven Auswirkungen eines Book & Claim-Systems hängen, wie im Vorangegangenen deutlich wurde, zu einem großen Teil von dessen Design ab und in welchem institutionellen Rahmen es eingebettet ist. Dabei gehen die Designentscheidungen über wirksame Mittel gegen Double Counting hinaus. Das Zusammenspiel von Design und Funktionsfähigkeit wird maßgeblich vom institutionellen Rahmen beeinflusst, in den das System eingebettet werden soll.

Grundsätzlich kann in diesem Zusammenhang zwischen der geographischen Ausdehnung (global, regional, lokal) sowie der Regulierung des Systems (freiwilliger, ko-regulierter oder regulierter Markt) differenziert werden. Die Regulierung des Systems unterscheidet dabei, ob die Zertifizierung

durch eine nichtstaatliche Organisation, ein staatliches Regulierungsorgan oder in einer Mischform geregelt und überwacht wird. Für den freiwilligen Markt, das heißt für SAF, mit dem keine staatlichen Vorgaben erfüllt werden sollen, bieten bereits mehrere private Organisationen Book & Claim-Systeme an.

Dadurch können sich unter anderem Unternehmen im Rahmen ihrer Klimaschutzbilanzierung SAF anrechnen lassen. Auf diese Weise kann die Emissionsintensität von Geschäftsreisen oder Logistik verringert werden, obwohl SAF an den meisten Flughäfen gar nicht verfügbar ist. Book & Claim spielt daher insbesondere im Bereich der Geschäftsfliegerei eine durchaus wahrnehmbare Rolle.

Staatliche Klimaschutzvorgaben im Flugwesen, wie beispielsweise im Rahmen der europäischen Beimischquote, des EU-ETS oder des Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Corsia) der Icao, können Fluggesellschaften oder Mineralölkonzerne hingegen bisher nicht mit B&C-Zertifikaten für SAF erfüllen. Ein solcher Ansatz würde immer eine Beteiligung staatlicher Akteure, die staatliche Anerkennung der (privaten) Zertifizierer oder staatlich definierte (Mindest-) Anforderungen an die Zertifizierung voraussetzen. Hierfür wurden die rechtlichen Voraussetzungen bisher noch nirgends geschaffen.

Allerdings wird zurzeit in der EU darüber diskutiert, ob Book & Claim nicht zukünftig zugelassen werden sollte, um die Distribution von SAF und die Erfüllung der Mindestquoten zu vereinfachen. Die EU-Kommission wird hierzu noch in 2024 einen Bericht vorlegen.

Die Öffnung regulierter oder mandatierter SAF-Märkte für Book & Claim-Ansätze erhöht noch einmal die Anforderungen an deren Design. Durch die Ko-Existenz freiwilliger und regulierter Märkte, muss im Register der Zertifikate gegebenenfalls auch die sogenannte Zusätzlichkeit (englisch: Additionality) berücksichtigt werden. Dieses Konzept betrifft das Verhältnis von freiwilligen und mandatierten Verringerungen von THG-Emissionen beziehungsweise freiwilliger und mandatierter Nutzung von SAF. Zusätzlich wären demnach eine Nutzung von SAF nur, wenn diese über ein etwaiges Mandat oder eine Vorgabe hinausginge.

Verschiedene Akteure wie das Smart Freight Center oder der Roundtable on Sustainable Biomass (RSB) vertreten in diesem Zusammenhang die Ansicht, dass nur zusätzliche Mengen an SAF über Zertifikaten auf freiwilligen Märkten genutzt werden sollten. Eine Anrechnung der mandatierten SAF-Mengen in der Klimabilanz von Unternehmen oder für eine freiwillige Verringerung der Emissionen wäre dann nicht möglich. Auf diese Weise soll erreicht werden, dass bilanziell freiwillige Verringerungen der Emissionen tatsäch-

lich auch immer einen Mehrwert gegenüber einem Mandat aufweisen.

Gleichzeitig stellt sich auch die Frage, ob eine Verteilung der mandatierten Mengen auf zahlende Geschäftskunden nicht die politisch gewünschte Wirkung der Mandate hintertreiben würde. Ebenso muss aber berücksichtigt werden, welche Möglichkeiten Unternehmen zur Verringerung der THG-Emissionen durch Geschäftsflüge bei steigenden Beimischquoten noch haben. Diese Diskussion wird derzeit noch geführt, müsste jedoch spätestens im Rahmen einer EU Regulierung zu Book & Claim entschieden werden.

Auch die geographische Ausdehnung eines Book & Claim-Systems und deren Auswirkungen müssen beim Design, insbesondere bei regulierten Märkten, berücksichtigt werden. Auf der einen Seite verbessert sich der Klimaschutz durch eine Ausdehnung des Systems. Klimaschutzmaßnahmen durch einzelne Staaten haben oftmals nur eine begrenzte Wirkung oder können sogar klimaschädliches Verhalten für andere Staaten attraktiver machen (sogenannte Trittbrettfahrerverhalten). Verpflichten sich nun mehr Staaten zu Klimaschutzmaßnahmen steigt die gemeinsame Wirkung und die Zahl der potenziellen Trittbrettfahrer sinkt.

Im Fall eines Book & Claim-gestützten Marktes für SAF kommt noch hinzu, dass zusätzliche Produktionsländer und eine höhere SAF-Nachfrage auch die Kosten weiter senken könnten. Auf der anderen Seite kann eine steigende Zahl an beteiligten Staaten auch gemeinsame Klimaschutzanstrengungen verringern und die Kosten eines Systems erhöhen. So können zusätzliche Staaten für Klimaschutzmaßnahmen oftmals nur gewonnen werden, wenn die Maßnahmen weniger ambitioniert werden.

Je größer die Staatengruppe wird, desto größer wird somit die Gefahr eines Minimalkonsenses. Dieses Problem wird offensichtlich, wenn man die EU-Vorgaben zur Nutzung von SAF mit jenen der Icao im Rahmen von Corsia vergleicht. Hier sind die EU-Vorgaben deutlich ambitionierter und eine Übernahme der Corsia-Regeln hätte zu einem deutlich geringeren Klimaschutzniveau in der EU geführt. Darüber hinaus erhöht sich bei einer größeren Staatengruppen ebenso der Kontroll- und Monitoringaufwand, mit dem die Einhaltung der gemeinsamen Vorgaben sichergestellt werden soll. Die Folge wäre nicht nur eine größere Gefahr von Double Counting, sondern ebenso von gefälschten Book & Claim-Zertifikaten.

Die bestehenden, freiwilligen Klimareportingsysteme (beispielsweise Greenhouse Gas Protocol, Science Based Targets), die voraussichtlich zukünftig Book & Claim zulassen, sind weniger von dieser Problematik betroffen. Aufgrund ihrer Freiwilligkeit und der Zielgruppe (einzelne Unterneh-

men, nicht Staaten) besteht für alle Beteiligten immer die Möglichkeit, nicht an einem System teilzunehmen oder das System zu wechseln. Dies verringert die Gefahr eines Minimalkonsenses und sollte eher zu einer Differenzierung der Angebote hinsichtlich der Ambition führen.

Tatsächlich sind viele dieser Systeme auch global aufgestellt und haben teils unterschiedliche Anforderungen. Bei Systemen für den regulierten Markt kann hingegen eine klar abgegrenzte, kleine Gruppe gegebenenfalls einen effektiveren Ansatz implementieren. Vergleichbare Überlegungen gibt es in der deutschen Politik mit einem "Klimaclub" für die allgemeine Klimaschutzpolitik. Ein solcher Ansatz, im Sinne eines Book & Claim-basierten SAF-Clubs, wäre auch speziell für die Luftfahrt möglich. Gleichzeitig würde es ein Book & Claim-System ermöglichen, diesen Club sukzessive auf weitere Staaten auszuweiten.

## ***Book & Claim zur Unterstützung der europäischen Anstrengungen***

Aus europäischer Perspektive kann ein Book & Claim-System ein wichtiger Teilaspekt der gemeinsamen Klimaschutzanstrengungen sein und den Markthochlauf von SAF entscheidend unterstützen. Dies wird besonders deutlich auf dem freiwilligen Markt. Hier erleichtert Book & Claim dessen weitere Ausdehnung und macht Angebote auf globaler Ebene überhaupt erst möglich.

Privat- und Unternehmenskunden, die SAF freiwillig nutzen wollen, sind darauf angewiesen, dass SAF möglichst dezentral an vielen Flughäfen verfügbar ist und individuell auf Flüge und Passagiere verteilt werden kann. Dies kann ohne Book & Claim lediglich an großen Drehkreuzen und zentralen Flughäfen garantiert werden. Gerade Geschäftsflieger nutzen aber häufig kleine, regionale Flughäfen. Ein wirtschaftliches SAF-Angebot sollte hier ohne Book & Claim nur schwer möglich sein. Daher überrascht es nicht, dass mittlerweile mehrere freiwillige Book & Claim-Systeme etabliert wurden.

Aber auch auf einem regulierten Markt, wie er in Europa ab 2025 in einem großen Maßstab mit den Beimischquoten eingeführt wird, kann ein Book & Claim-Ansatz Vorteile mit sich bringen. Book & Claim ermöglicht hier eine Diversifizierung von Bezugsquellen. Dadurch können Produktionsorte genutzt werden, die vorher aus logistischen Gründen unwirtschaftlich waren, jedoch die besten natürlichen Voraussetzungen für die Produktion von SAF aufweisen.

Mit Hilfe eines Book & Claim-Systems könnten somit faktisch diese optimalen Produktionsbedingungen ohne Friktionen für die europäische Luftfahrt nutzbar gemacht werden. Die Folge sollten spürbare Verringerungen der Produktions-

kosten von SAF sein, die insbesondere von den Gesteungskosten erneuerbarer Energien und damit von den nutzbaren Mengen an Sonnenschein und Wind abhängen.

Gerade vor dem Hintergrund knapper öffentlicher Kassen könnten dadurch Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden, die anderenfalls einem Sparzwang zum Opfer fallen würden. Gleichzeitig würde ein Book & Claim-Ansatz die aktuell geführten Diskussionen, ob überhaupt ausreichend SAF für die Erfüllung der Quoten verfügbar ist, zumindest teilweise abschwächen. In der Folge wäre es wahrscheinlicher, dass die europäischen Mindestquoten für die Beimischung von SAF und PtL auch tatsächlich eingehalten werden können.

Damit ein Book & Claim-Ansatz seine volle Wirkung entfalten kann, muss jedoch Fehlern, Betrug oder Missbrauch vorgebeugt werden. Vorbild für wirksame Mechanismen könnten hier die freiwilligen Systeme sein, die ebenfalls mit diesen Herausforderungen konfrontiert sind. Eingebettet in einen verlässlichen, wirksamen Rahmen, sollte ein Book & Claim-Ansatz so entscheidende Impulse für einen erfolgreichen Markthochlauf für SAF und möglichst weitgehende Verringerungen der Emissionen der Luftfahrt setzen können.

*Mitwirkende Autorinnen und Autoren: Felix Schmermer, Anita Demuth, Harry Lehmann, Sebastian Voswinckel*

## Über den Autor

Sören Schwuchow ist seit Ende 2022 als Referent im PtX Lab Lausitz tätig. Dort arbeitet er hauptsächlich an wirtschaftspolitischen und regulatorischen Fragestellungen zum Thema nachhaltige Luftfahrt. Sein Fokus liegt dabei auf der Analyse von Instrumenten, die den Markthochlauf von "eSAF" unterstützen. Zudem lehrt er als Lehrbeauftragter an der BTU Cottbus-Senftenberg und bietet dort Kurse zur Wettbewerbsökonomik an. Er wurde an der Universität Hildesheim mit einer Arbeit über die ökonomische Analyse des internationalen öffentlichen Luftrechts promoviert.



© privat

1. <https://www.airliners.de/serien/umweltfreundliche-luftfahrt-status-quo-klima>
2. <https://gars.science/>

Status quo SAF (5)

# Die internationalen SAF-Ansätze zwischen "Zuckerbrot und Peitsche"

Exklusiv für airliners+ Abonnenten

Die USA und die EU verfolgen unterschiedliche Strategien zur Förderung von SAF. Der US-Ansatz bietet finanzielle Anreize, während die EU auf verpflichtende Quoten und ein Emissionshandelssystem setzt. Professor Achim Czerny erläutert die jeweiligen Vor- und Nachteile.

Von Prof. Achim I. Czerny



© Adobe Firefly KI

*Die Luftfahrt steht vor einer großen Herausforderung: Sie muss dafür sorgen, dass Fliegen umweltschonender wird. Ein wesentlicher Baustein ist SAF. Um nachhaltiges Kerosin einzuführen, ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten aus verschiedenen Bereichen erforderlich, beispielsweise aus den Bereichen Technologie, Politik und Wirtschaft. Die aktuelle Serie zeigt den Status quo der Maßnahmen auf<sup>1</sup>. Im neusten Teil schreibt Prof. Achim I. Czerny von der Hong Kong Polytechnic University über die verschiedenen Ansätze der USA und EU zur SAF-Förderung.*

Seen in der Sahara, Orkane von selten gesehener Größe, schmelzende Polkappen, Überschwemmungen, und Artensterben erscheinen Folgen des Klimawandels. Es ist allge-

mein bekannt, dass auch der Luftverkehr zum Klimawandel beiträgt. Diese geschieht auf zweierlei Weisen. Zum einen durch die Nutzung fossiler Treibstoffe. Circa vier Prozent der EU-Treibhausgasemissionen ließen sich in 2022 auf den Luftverkehr zurückführen.

Luftverkehr trägt aber auch durch Wolkenbildung aufgrund von Kondensstreifen am Himmel zum Klimawandel bei (sogenannte Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte). Wie stark sich diese auf den Klimawandel auswirken, ist schwer abschätzbar. Es gibt aber Hinweise, die darauf hindeuten, dass dieser Beitrag möglicherweise grösser ist als derjenige durch die Nutzung von fossilen Treibstoffen. [1]<sup>2</sup>, [2]<sup>3</sup>

Ich habe im vorangegangenen Abschnitt zweimal den Begriff der "fossilen Treibstoffe" verwendet. Der Grund ist, dass die Verwendung nicht-fossiler Treibstoffe allgemein als das Hauptmittel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs angesehen wird. Die Idee von nicht-fossilen Treibstoffen ist es, die Treibstoffe auf eine Art zu erzeugen, die im Idealfall ein Gleichgewicht zwischen der Entnahme und dem Ausstoß von Treibhausgasen bewirkt so dass insgesamt eine Zunahme der Treibhausgasemissionen durch den Luftverkehr verhindert wird. Im Englischen werden diese Treibstoffe als Sustainable Aviation Fuel (SAF) bezeichnet. Im Folgenden werde ich auch ausschließlich die Abkürzung SAF verwenden, wenn es um nicht-fossile Treibstoffe geht.

## Artikelserie in Kooperation mit GARS

Diese [airliners.de](https://www.airliners.de)-Fachserie ist in Zusammenarbeit mit der German Aviation Research Society (GARS) entstanden. GARS ist eine gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung der Luftverkehrsforschung. Die Stärkung des Dialogs zwischen der Wissenschaft und den Praktikern in Unternehmen und Behörden sowie die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gehören zu den Hauptzielen der Gesellschaft.

Mehr Informationen: [gars.science](https://gars.science)<sup>4</sup>



© GARS

Stefan Bube hat in dieser Serie ausführlich über die unterschiedlichen Verfahren zur Produktion von SAF geschrieben. Die Nutzung von SAF hat, wie erwähnt, den Vorteil, dass Flugverkehr theoretisch klimaneutral stattfinden kann. Aktuelle Studien, zum Beispiel des DLR, legen zudem nahe, dass SAF auch die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Luftverkehrs um bis zu 26 Prozent reduzieren kann.

Wie gehen unterschiedliche Regionen mit dieser Situation um? Darum soll es in diesem Beitrag gehen. Zwei Regionen stehen dabei im Mittelpunkt.

Die Vereinigten Staaten (USA) und die Länder der Europäischen Union (EU). Die öffentliche Wahrnehmung über die Vorgehensweise in diesen beiden Regionen ist unterschiedlich. Der USA-Ansatz wird häufig mit dem Begriff "Zuckerbrot" (im Englischen "Carrots") bezeichnet, während der europäische Ansatz als "Peitsche" (im Englischen "Sticks") umschrieben wird. Augenscheinlich handelt es sich um unterschiedliche Vorgehensweisen. Es macht daher Sinn zu prüfen wie sich diese auf die zukünftige Nutzung von SAF auswirken könnten.

### **Die EACI/GARS-Reihe von monatlichen Webinaren**

In diesem Beitrag fasse ich im Wesentlichen die Beiträge von internationalen Experten zusammen, die an zwei Webinaren in der Reihe von monatlichen EACI/GARS-Webinaren zum Thema SAF in den USA und der EU teilgenommen haben. Dabei handelt es sich in alphabetischer Reihenfolge um Laurent Donceel (A4E), Stephen Holland (University of North Carolina Greensboro), Damien Meadows (DG Climate Action), and Nikita Pavlenko (ICCT). Die Aufnahmen sind in englischer Sprache auf YouTube verfügbar. Die Links sind unten angefügt.

Es handelt sich hierbei um eine ausgezeichnete Auswahl von Experten. Laurent Donceel vertritt die Position der europäischen Fluggesellschaften und Damien Meadows die Position der europäischen Politik. Nikita Pavlenko vom ICCT diskutiert kritisch den Ansatz der USA. "ICCT" steht für International Council on Clean Transportation. Hierbei handelt es

sich um eine Organisation, die maßgeblich zur Aufdeckung des VW-Dieselskandals beigetragen hat.

ICCT hat im November letzten Jahres einen Bericht zum Thema US SAF Grand Challenge veröffentlicht. Stephen Holland hat über viele Jahre den kalifornischen Ansatz der sogenannten "Low Carbon Fuel Standards" erforscht. Bei diesen "Standards" handelt es sich um Umweltvorgaben für die Nutzer von Treibstoffen im Straßenverkehr. Ein entscheidender Aspekt dieses Systems ist, dass die Nutzung von Treibstoffen, die die vorgegebenen Umweltstandards nicht erfüllen zur Kompensation Zahlungen an zum Beispiel Anbieter von Ladeinfrastruktur für batterieangetriebene Fahrzeuge leisten müssen. Ein System von dem Tesla und andere Elektroautohersteller bislang stark profitierte.

### ***"Zuckerbrot und Peitsche"***

Warum "Zuckerbrot" für die USA und "Peitsche" für die EU? Erklärtes Ziel der US-Politik ist es, dass bis zum Jahr 2030 jährlich über elf Milliarden Liter (3bn gallon) SAF produziert werden. Bis zum Jahr 2050 soll die jährliche Produktionsmenge um über das zehnfache auf über 130 Milliarden Liter (35bn gallon) SAF erhöht werden. Diese jährlichen Produktionsmengen sollen dann dafür reichen, den US-Luftverkehr im Jahr 2050 klimaneutral betreiben zu können. Zur Erreichung dieser Ziele bietet die US-Regierung Steuervorteile von bis zu 1,75 US-Dollar pro gallon bis zum Ende des Jahres 2027. Aufgrund dieser Steuervorteile wird der US-Ansatz oft als "Zuckerbrot" charakterisiert.



SAF-Produktion.

© DLR

Auch die EU strebt einen klimaneutralen Luftverkehr bis zum Jahr 2050 an. Die Vorgehensweise ist im Vergleich zu den USA eine andere. Anna Straubinger hat in dieser Reihe bereits ausführlich über den EU-Ansatz geschrieben. Ihre Ausführungen verdeutlichen, dass die EU im Wesentlichen auf zwei Mechanismen setzt. Erstens auf das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS), und zweitens auf SAF-Quoten.

Das EU-ETS ist ein industrieübergreifendes System. Der Luftverkehr ist Teil des Systems, aber auch der Schienen- und Straßenverkehr sowie der Energiesektor und andere Wirtschaftssektoren. Es beinhaltet den Handel mit Emissionszertifikaten deren Gesamtsumme von der EU fest vorge-schrieben ist.

Unternehmen haben zwei Möglichkeiten, um Zertifikate zu bekommen. Erstens können Sie von einer kostenlosen Anfangsverteilung begünstigt werden. Anna Straubinger berichtet von rund 500 Fluggesellschaften, die diesen Vorteil für sich nutzen können. Zweitens können sie Zertifikate auf dem Zertifikatsmarkt kaufen. Dazu sind Unternehmen sogar verpflichtet, wenn deren Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht durch den eigenen Besitz von Zertifikaten gedeckt ist. Derartige Verpflichtungen sind von entscheidender Bedeutung, denn sie sind es die garantieren, dass die Gesamtemissionsmenge nicht die Zertifikatsmenge übersteigt.

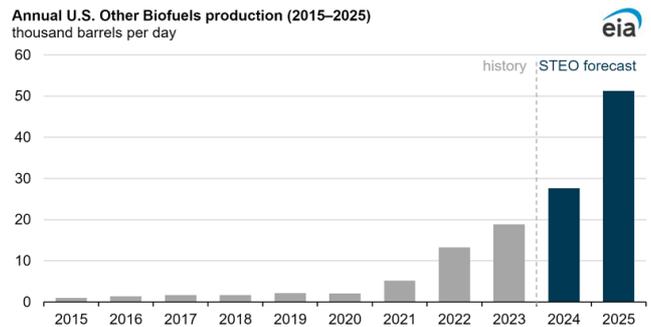
Kommen wir zur europäischen SAF-Quote. Für Flüge, die in der EU starten gilt ab 2025 eine SAF-Quote von zwei Prozent, ab 2035 eine SAF-Quote von 20 Prozent und ab 2050 eine SAF-Quote von 70 Prozent. Außerdem gibt es spezielle Quoten für den Anteil von "eSAF". Bei "eSAF" handelt es sich um ein synthetisches SAF-Produkt, das mit Hilfe von erneuerbarer Energie erstellt wird und Treibhausgasemission um bis zu 99 Prozent reduzieren kann.

Sowohl EU-ETS als auch die SAF-Quoten beinhalten Vorgaben deren Umsetzung grundsätzlich keine finanziellen Anreize erfordert. Aufgrund der Bedeutung von Vorgaben in

Form von Zertifikatsmengen und Quoten wird der EU-Ansatz gerne als "Peitsche" charakterisiert.

## "Peitsche"?

Den US-Ansatz als "Zuckerbrot" zu charakterisieren scheint nahe liegend. Unternehmen freuen sich natürlich über finanzielle Anreize in Form von Steuervorteilen. Die "eia" (U.S. Energy Information Administration) berichtet einen starken Anstieg der erwarteten Produktionsmengen von Biotreibstoffen zu denen SAF zählt (siehe Abbildung).



Jährliche Produktion anderer Biokraftstoffe in den USA (2015-2025).

© U.S. Energy Information Administration

Den EU-Ansatz als "Peitsche" zu charakterisieren, scheint weniger eindeutig. Dies ist aus zwei Gründen der Fall. Erstens sei hier die kostenlose Anfangsverteilung der Zertifikate an die Fluggesellschaften genannt. Seit 2012 ist der Luftverkehr Teil des EU-ETS. Seither hat sich der Preis für Emissionszertifikate von circa acht Euro auf bis zu 100 Euro gesteigert (siehe Abbildung). Die finanzielle Bedeutung der Anfangsverteilung hat sich daher über die Zeit um ein Vielfaches gesteigert. Es handelt sich hierbei daher um einen bedeutenden finanziellen Vorteil für die Fluggesellschaften.

Hervorzuheben ist, dass die Erreichung des Umweltziels nicht von der Form der Anfangsverteilung (kostenlos oder nicht kostenlos) abhängig ist. Stephen Holland hat diesen Aspekt in seinen Ausführungen deutlich hervorgehoben. Die Erreichung des Umweltziels hängt von der Gesamtzahl der Zertifikate und nicht(!) von der Form der Anfangsverteilung ab. Eine Klarstellung, die auch Stef Proost Ökonom von der KU Leuven nicht müde wird hervorzuheben.



Co2 Emissionsrechte  
© boerse.de

Ein zweiter Aspekt, der scheinbar wenig öffentliche Beachtung findet, wird von Damien Meadows stark hervorgehoben. Hierbei handelt es sich um finanzielle Mittel in Höhe von 1,6 Milliarden Euro, die von der EU zur Deckung der Preisdifferenz zwischen SAF und fossilen Treibstoffen bereitgestellt werden. Singapur gilt hier als Vorreiter.

Die Mittel werden an Fluggesellschaften, die Teil des EU-ETS sind, nach dem "Wer zuerst kommt, mahlt zuerst"-Prinzip vergeben. Nach Berechnungen des ICCT werden Fluggesellschaften in der EU bis zu 80 Prozent der Zusatzkosten, die sich durch die Nutzung von teurem SAF ergeben, durch entsprechende EU Mittel abgedeckt<sup>5</sup>. Sollten diese Mittel schnell erschöpft werden, dann gäbe es laut Damien Meadows gute Chancen, Aufstockungen zu erreichen.

Damien Meadows gibt zum Thema Aufstockungen noch einen weiteren nützlichen Hinweis. Seiner Meinung nach wäre es möglich, auch die Vermeidung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten durch ein ähnliches System zu begünstigen. Die Bildung von Kondensstreifen hängt stark von Wetterbedingungen ab.

Diese lassen sich voraussehen, so dass es theoretisch möglich wäre, Wetterzonen zu umfliegen, welche die Bildung von Kondensstreifen begünstigen würden. Damien Meadows betont, dass es denkbar ist, die Zusatzkosten, die sich durch die Abweichung von geplanten Flugrouten ergeben, würden auf ähnliche Weise abgedeckt werden. Würde ein solches System die breite Unterstützung durch die Interessenvertreter erfahren, ergäben sich nach Damien Meadows Ansicht gute Chancen für die Umsetzung.

### **Berechenbarkeit: Vorteil EU!**

Kurzfristig erscheint der US-Ansatz die Produktion von SAF deutlich "anzukurbeln". Die mittel- bis langfristige Wirkung der Vorgehensweise in den USA ist aus zwei Gründen unberechenbar.

Erstens werden die finanziellen Anreize für die Produktion von SAF aus dem allgemeinen Steuertopf finanziert. Somit ist der Ansatz von der öffentlichen Unterstützung abhängig. Sollte sich die öffentliche Meinung ändern, dann könnten sich leicht Kürzungen oder sogar Streichungen der finanziellen Anreize ergeben. Zweitens gibt es für die Nutzung von SAF keine politischen Vorgaben oder sonstige Verpflichtungen. Stephen Holland hebt hervor, dass "throwing money at stuff" (frei übersetzt: "einfach mit Geld um sich werfen") kein Garant für Erfolg ist.

Ein Beispiel hierfür hat mit der Produktion von SAF zu tun. Produzenten stehen üblicherweise vor der Frage, ob sie mehr SAF oder mehr Biodiesel produzieren. Die Verteilung hängt dann von Gewinnmöglichkeiten ab. Ein Anstieg der SAF-Produktionsmengen kann entsprechend durch eine Reduzierung der Produktionsmengen von Biodiesel erzielt werden. Der Klimaeffekt ergibt sich aus den Gesamtemissionen. Die Quellen, Luft- oder Straßenverkehr, sind irrelevant für den Klimaeffekt. Eine Politik, die einzig auf SAF zielt, ist daher nicht zielführend wie Nikita Pavlenko in seinen Ausführungen hervorhebt.

Dieser letzte Punkt spricht übrigens eindeutig für EU-ETS, da es sektorübergreifend ist. Vorgaben für die Nutzung von SAF hingegen lösen dieses Problem nicht. Außerdem beinhaltet eine Festlegung auf SAF als Technologie. Auch wenn es allgemein anerkannt ist, dass SAF für grünen Luftverkehr von entscheidender Bedeutung ist, beinhaltet diese Vorgehensweise eine Festlegung, die es alternativen Ansätzen erschweren könnte, sich durchzusetzen.

Stephen Holland betont, dass die Technologieoffenheit sich als entscheidender Vorteil des oben erwähnten kalifornischen Ansatzes erwiesen hat. Der Vorteil von SAF-Vorgaben liegt hingegen in der Berechenbarkeit. Investitionen in Anlagen zur Produktion von SAF sind kapitalintensiv. Sie werden sich in vielen Fällen nur lohnen, wenn deren Nutzen langfristig kalkulierbar ist. Die langfristigen EU-Vorgaben für die verbindliche Nutzung von SAF leisten hier einen entscheidenden Beitrag. Ein anerkannter Vorteil des EU-Ansatzes.

### **Schlussbemerkungen**

"Zuckerbrot und Peitsche" klingt spannend, ist aber eine starke Vereinfachung, wenn es um die Charakterisierung der US- und EU-Ansätze zur Förderung von SAF geht. Der US-Ansatz ist nicht sektorübergreifend und enthält keine verbindlichen Vorgaben für die Nutzung von SAF. Das macht den Ansatz flexibler, aber auch weniger berechenbar. Berechenbarkeit ist aber eine wichtige Bedingung für Investoren. Der EU-Ansatz scheint berechenbarer und enthält zudem viele Elemente, die geeignet sind, finanzielle Belastungen

der Luftfahrt abzufedern. Die mögliche Einbeziehung von Nicht-CO2-Effekten des Luftverkehrs könnte zukünftig einen wichtigen Beitrag zum Schutz des Weltklimas leisten.

## Über den Autor

Prof. Achim I. Czerny lehrt und forscht seit 2015 an der Hong Kong Polytechnic University<sup>6</sup>. Dort forscht er zu den Themen Luftverkehrsmanagement, Logistik und Finanzierung. Er ist Chairman der German Aviation Research Society (GARS), Vize-Präsident der International Transportation Economics Association (ITEA), und in den Vorständen des European Aviation Conference Institutes (EACI) und der Air Transport Research Society (ATRS) tätig. Desweiteren ist er aktiv an der Gestaltung der diesjährigen European Aviation Conference<sup>7</sup> (European Aviation Conference (EAC) Institute) beteiligt und produziert (zusammen mit Andrew Charlton) den YouTube-Channel 3A<sup>8</sup>.



© Czerny

## Links zum Thema

- YouTube-Kanal von Prof. Achim I. Czerny<sup>8</sup>
- "boerse.de" CO2-Emissionsrecht preis<sup>9</sup>
- ICCT-Beitrag zum EU-SAF-Ansatz<sup>5</sup>
- DLR-Beitrag und -Studie zur SAF-Nutzung<sup>10</sup>

1. <https://www.airliners.de/serien/umweltfreundliche-luftfahrt-status-quo-klima>
2. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01423-6>
3. [https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/updated-analysis-non-co2-effects-aviation-2020-11-24\\_en](https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/updated-analysis-non-co2-effects-aviation-2020-11-24_en)
4. <https://gars.science/>
5. <https://theicct.org/revisions-to-the-eu-ets-set-a-global-model-for-saf-investment-apr24/>
6. <https://www.polyu.edu.hk/>
7. <https://www.eaci.science/>
8. <http://www.youtube.com/@achimczerny>
9. <https://www.boerse.de/rohstoffe/Co2-Emissionsrecht/preis/XC000A0C4KJ2>
10. <https://www.dlr.de/en/latest/news/2024/flying-using-100-percent-sustainable-aviation-fuel-significantly-reduces-non-carbon-dioxide-emissions>

Status quo SAF (6)

## Wofür der "Sustainable Aviation Fuels Monitor" gut ist

Exklusiv für airliners+ Abonnenten

Mit der "ReFuelEU Aviation"-Verordnung setzt die EU ab 2025 verbindliche Quoten für nachhaltige Treibstoffe. Dennoch stehen die Branchenakteure vor Herausforderungen, insbesondere bezüglich der Verfügbarkeit und Produktion synthetischer Kraftstoffe. Der neue SAF-Monitor bietet eine umfassende Visualisierung globaler Projekte zur SAF-Produktion.

Von Sophie Jürgens, Marvin Wenzel



© Adobe Firefly KI

Die Luftfahrt steht vor einer großen Herausforderung: Sie muss dafür sorgen, dass Fliegen umweltschonender wird. Ein wesentlicher Baustein ist SAF. Um nachhaltiges Kerosin einzuführen, ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten aus verschiedenen Bereichen erforderlich, beispielsweise aus den Bereichen Technologie, Politik und Wirtschaft. Die aktuelle Serie zeigt den Status quo der Maßnahmen auf<sup>1</sup>. Im neuesten Teil schreiben Dr. Sophie Jürgens und Marvin Wenzel über den neuen SAF-Monitor, der einen weltweiten Überblick über die SAF-Produktion verschafft.

Die Luftfahrt steht vor der dringenden Notwendigkeit, ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren. Um die Klimaziele zu erreichen, sind Sustainable Aviation Fuels (SAF) unverzichtbar. Doch wie lässt sich der aktuelle Stand der SAF-Produktion bewerten? Welche Projekte gibt es weltweit, und wie sieht deren Potenzial für die Zukunft aus? Der SAF-Monitor<sup>2</sup>, entwickelt von "CENA Hessen" und der "NOW GmbH", bietet wertvolle Einblicke in die bestehenden Produktionsmöglichkeiten und ermöglicht eine datenbasierte Analyse der Entwicklungen in diesem Bereich.

Nachhaltige Flugkraftstoffe sind ein entscheidendes Element, um CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Luftfahrt zu reduzieren

und tragen somit maßgeblich zur Energiewende im Verkehr bei. Sie umfassen sowohl biogene Kraftstoffe wie Biokerosin als auch strombasiertes e-SAF (e-Kerosin).

Mit der "ReFuelEU Aviation"-Verordnung hat die Europäische Union (EU) klare Vorgaben für die Förderung von SAF festgelegt. Ab 2025 gelten verbindliche SAF-Quoten in Europa, die im Rahmen dieser Verordnung geregelt sind. Gemäß dieser müssen ab 2025 mindestens zwei Prozent der an EU-Flughäfen getankten Treibstoffe aus nachhaltigen Quellen stammen.

Trotz dieser regulatorischen Fortschritte sind SAF bisher nur in geringen Mengen verfügbar, insbesondere im Bereich der strombasierten Kraftstoffe. Zudem existieren bisher kaum marktrelevante Produktionskapazitäten. Eine ausreichende Versorgung mit SAF ist jedoch von entscheidender Bedeutung, um die Luftfahrt nachhaltiger zu gestalten und die Klimaziele zu erreichen.

### Ein innovatives Werkzeug für die Luftfahrtindustrie

Auf der Internationalen Luftfahrtausstellung (ILA) in Berlin 2024 haben "CENA Hessen" (Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr) und die "NOW GmbH" ihren neu entwickelten SAF-Monitor vorgestellt. Der SAF-Monitor basiert auf den Daten von "CENA Hessen" und wird vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW) gefördert.



SAF-Testflaschen.  
© Honeywell

Der Monitor ist eine interaktive, englischsprachige Datenvisualisierung, die alle angekündigten oder bereits laufenden Projekte im Bereich der SAF-Produktion weltweit darstellt. Die angezeigten Projekte können nach verschiedenen Kategorien gefiltert werden, wie etwa Kraftstoffart, Produktionsverfahren, Produktionsvolumen oder Projektstatus. So können sich Akteurinnen und Akteure aus der Branche erstmals einen Überblick über alle global angekündigten Projekte zur

Herstellung nachhaltiger Flugkraftstoffe in den nächsten Jahren verschaffen. Aktuell umfasst der SAF-Monitor 197 Projekte.

Ein zentrales Ziel des SAF-Monitors ist es, die Produktionsmöglichkeiten von SAF umfassend darzustellen und geeignete Bezugsquellen zu identifizieren. Zusätzlich ermöglicht der Monitor, globale Forschungs- und Produktionsvorhaben zu erkennen und die technologische Entwicklung im Bereich der nachhaltigen Flugkraftstoffe besser einzuschätzen. Hinsichtlich der oben beschriebenen aktuellen regulatorischen Entwicklungen ist dies von entscheidender Bedeutung.

Im Rahmen des SAF-Monitors wird noch bis Mitte November 2024 eine Projektanfrage durchgeführt, die sowohl eine Aktualisierung der momentanen Datenpunkte als auch die Erweiterung um weitere Datenpunkte zu neuen SAF-Projekten beinhalten soll. Der SAF-Monitor wird unabhängig davon von der Unternehmensabfrage zu Beginn des Jahres aktualisiert: Eine neue Version ist für das erste Quartal 2025 geplant, um den dynamischen Entwicklungen auf dem Markt Rechnung zu tragen.

### Artikelserie in Kooperation mit GARS

Diese *airliners.de*-Fachserie ist in Zusammenarbeit mit der German Aviation Research Society (GARS) entstanden. GARS ist eine gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung der Luftverkehrsforschung. Die Stärkung des Dialogs zwischen der Wissenschaft und den Praktikern in Unternehmen und Behörden sowie die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gehören zu den Hauptzielen der Gesellschaft.

Mehr Informationen: [gars.science](https://gars.science)<sup>3</sup>



© GARS

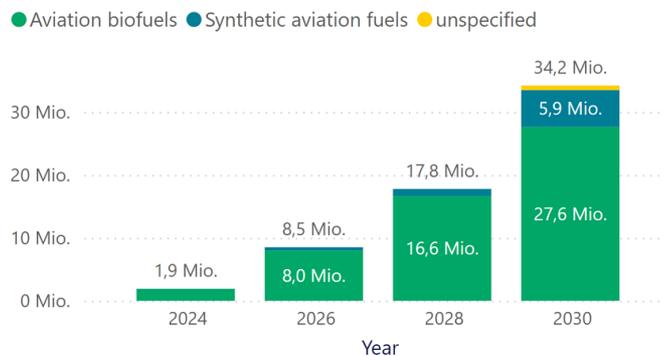
### Einblicke in die SAF-Produktion: Marktentwicklung und Produktionsprognosen

Der SAF-Monitor prognostiziert, dass der Markt für SAF in den kommenden Jahren stark expandieren könnte. Bis 2030 wird ein Anteil von über 15 Prozent an synthetischen Kraftstoffen in der Luftfahrt erwartet, wobei HEFA-Treibstoffe (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) voraussichtlich den größten Teil der angekündigten Produktionskapazitäten ausmachen werden und im Jahr 2030 damit die Rolle der dominierenden Technologie einnehmen.

Im Jahr 2024 liegt der Schwerpunkt der geplanten Produktion auf biogenem SAF, mit den größten Produktionskapazitäten in Singapur (1 Millionen t/a), den Niederlanden (500.000 t/a), Finnland (100.000 t/a) und den USA (100.000 t/a). Derzeit summieren sich die globalen HEFA-Produktionskapazitäten auf über 1,83 Millionen Tonnen pro Jahr. Anlagen zur Produktion von synthetischem SAF aus er-

neuerbarem Wasserstoff und nachhaltigem Kohlenstoff existieren bisher nur auf Demonstrationsniveau.

SAF Production (t/y)



© Jürgens/Wenzel

## Regulatorische Rahmenbedingungen: "ReFuelEU Aviation"

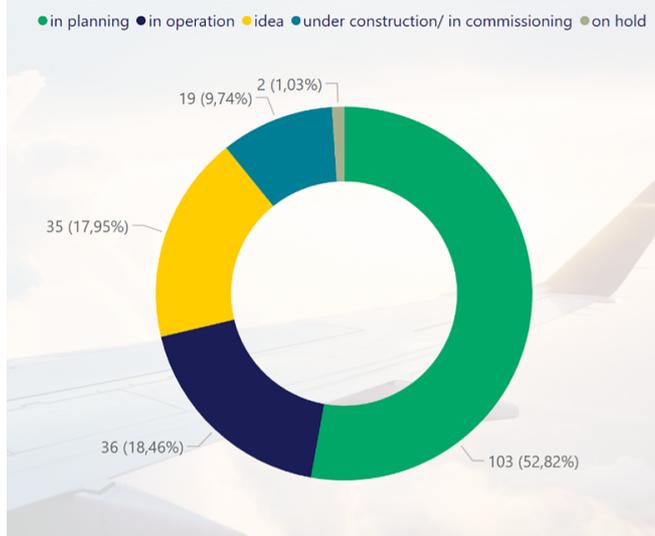
Die Projektankündigungen des Monitors deuten darauf hin, dass bis 2030 weltweit bis zu 34 Millionen Tonnen SAF produziert werden könnten. Hierdurch könnten die Anforderungen der "ReFuelEU Aviation" theoretisch erreicht werden, wenn diese Mengen in der EU eingesetzt würden (Die Verordnung sieht dabei vor, dass bis 2030 sechs Prozent des in der EU verbrauchten Flugkraftstoffs SAF sein müssen, davon 1,2 Prozent synthetisch). Umgerechnet entspricht dies für die EU-Mitgliedstaaten etwa 3,1 Millionen Tonnen SAF, darunter 0,6 Millionen Tonnen synthetischer Kraftstoff.

Auch der direkte Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt, ob mit Brennstoffzellen oder Turbinen, ist auf die Erfüllung der SAF-Quote im Rahmen der "ReFuelEU Aviation" anrechenbar.

### Umsetzungsgrad: Status der Projekte

Von den weltweit 197 angekündigten SAF-Projekten sind derzeit nur 55 bereits in Betrieb (36) oder im Bau (19), was einem Anteil von 28,2 Prozent entspricht. Mehr als die Hälfte der Projekte (103; 52,8 Prozent) befindet sich noch in der Planungsphase, während 35 Projekte (ca. 18 Prozent) lediglich Projektideen sind. Besonders im Bereich synthetischer Kraftstoffe gibt es nur wenig Projekte, innerhalb derer bereits eine Investitionsentscheidung getroffen wurde.

Number of SAF Projects by Current Degree of Implementation



© Jürgens/Wenzel

Diese Daten verdeutlichen die Herausforderung, bestehende Hemmnisse zu überwinden, um Investitionsentscheidungen zu fördern und den Bau von Produktionsstätten für synthetisches SAF voranzutreiben. Angesichts der Bauzeiten von mindestens drei Jahren und der Möglichkeit erheblicher Verzögerungen bei der Inbetriebnahme bleibt nicht viel Zeit, um

bis 2030 ausreichend Produktionskapazitäten für synthetisches SAF bereitzustellen.

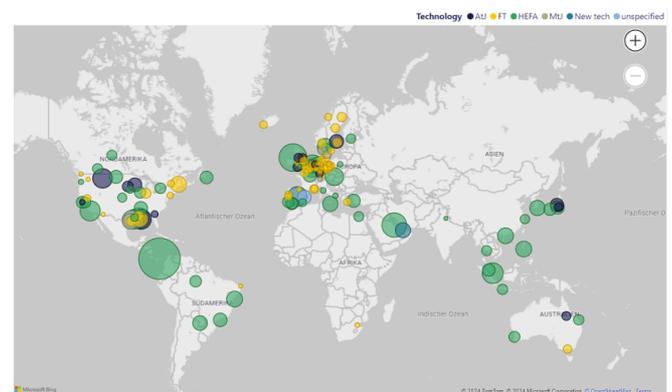
### Marktchancen und Herausforderungen

Der SAF-Monitor bietet eine differenzierte Perspektive, um Marktchancen und Herausforderungen erfassen und analysieren zu können. Zwar zeigt sich ein Anstieg der Produktionskapazitäten für biogene Kraftstoffe, doch der Markthochlauf von synthetischem SAF bleibt herausfordernd. Der Umsetzungsgrad (Degree of Implementation) der Projekte verdeutlicht, dass hier noch erhebliche Entwicklungsschritte notwendig sind.

Gleichzeitig ermöglicht der SAF-Monitor durch seine detaillierte Darstellung eine realistische Einschätzung des aktuellen Stands und der möglichen Hürden. So kann nicht nur das Potenzial des Marktes sichtbar gemacht werden, sondern es besteht auch die Chance, rechtzeitig auf Herausforderungen zu reagieren und den Markthochlauf erfolgreich zu gestalten.

### Geographische Verteilung der globalen Produktionskapazitäten

Ein Blick auf die geographische Verteilung der SAF-Produktion zeigt, dass die meisten Projekte in Europa und Nordamerika konzentriert sind. Die unten dargestellte Karte verdeutlicht die Vielfalt der Technologien, die für die Herstellung nachhaltiger Flugkraftstoffe eingesetzt werden, von Alcohol-to-Jet (AtJ) über Fischer-Tropsch (FT) bis hin zu HEFA-Verfahren. Die im Monitor dargestellten Daten zeigen dabei deutlich, dass ein weltweiter Anstieg der Produktionskapazitäten von biogenen und synthetischen Flugkraftstoffen zu erwarten ist.



© Jürgens/Wenzel

Ein vergleichender Blick auf die aufgeführten Länder zeigt, dass die USA, Deutschland und die Niederlande eine führende Rolle einnehmen und den Ausbau maßgeblich vorantreiben (siehe Tabelle unten). Besonders auffällig ist die Vielzahl an Initiativen in Deutschland, die dem Land eine Vor-

reiterrolle im Bereich der synthetischen Flugkraftstoffe sichern.

Um diese Führungsposition langfristig zu behaupten, bedarf es jedoch eines kontinuierlichen Ausbaus der Produktionskapazitäten, klarer Marktanreize und Abnahmesicherheit, sowie der gezielten Förderung innovativer Technologien. Die Vielzahl der im SAF-Monitor aufgeführten Länder verdeutlicht in Summe die globalen Bemühungen zur Skalierung von SAF-Technologien.

**Top 10 Countries by Project Count**

Country	Projects	Projects on Synthetic Aviation Fuels
USA	43	14
Germany	28	24
UK	16	9
Netherlands	12	6
France	9	7
Canada	8	3
Sweden	8	4
Japan	7	1
Spain	7	3
Denmark	6	6

© Jürgens/Wenzel

Für das Jahr 2030 sind in Europa und Nordamerika etwa 77 Prozent der angekündigten globalen Produktionskapazitäten mit rund 26 Millionen Tonnen SAF geplant. Diese Entwicklungen unterstreichen die Bedeutung von strategischen Investitionen und politischer Unterstützung, um die angestrebten Ziele im Bereich nachhaltiger Luftfahrt zu erreichen.

**Fazit: Herausforderungen und Chancen auf dem Weg zur nachhaltigen Luftfahrt**

Trotz der vielversprechenden Prognosen bleibt die tatsächliche Verfügbarkeit von SAF eine Herausforderung, was die

Notwendigkeit betont, den Markt für nachhaltige Flugkraftstoffe aktiv weiterzuentwickeln. Hierbei kann der SAF-Monitor von "CENA Hessen" und der "NOW GmbH" als zentrales Werkzeug für die Luftfahrtbranche dienen, indem er wichtige Informationen bereitstellt und Erwartungen mit dem Status der Marktentwicklung abgleicht.



Produktion von SAF.  
© Honeywell

So wird Transparenz für alle Akteurinnen und Akteure der Branche geschaffen. Auf dieser Grundlage werden fundierte Entscheidungen und mehr Sicherheit für strategische Planungen, sowie effektive Rahmenbedingungen ermöglicht.

Die Verbindung von klaren, regulatorischen Vorgaben und innovativen Ansätzen zur Entwicklung von SAF eröffnet dabei vielversprechende Perspektiven. Der erwartete globale Fortschritt in der SAF-Produktion kann somit nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit der Luftfahrtbranche erhöhen, sondern auch einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten.

## Über die Autorin

Dr. Sophie Jürgens ist seit Mai 2021 Programm-Managerin bei der NOW GmbH und verantwortlich für klimafreundliche Luftfahrt. Sie hat an der TU München Chemie studiert und ihren Postdoc am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) absolviert. Mit einem Fokus auf nachhaltige Luftfahrtstechnologien arbeitet sie an der Schnittstelle von Forschung und Praxis, um umweltfreundliche Lösungen für die Luftfahrtbranche voranzutreiben.

Kontakt<sup>4</sup>, LinkedIn<sup>5</sup>



© privat

## Über den Autor

Marvin Wenzel ist seit Februar 2023 Programm-Manager im Team Erneuerbare Kraftstoffe bei der "NOW GmbH". Er leitet die Projektentwicklung des SAF-Monitors und ist für dessen regelmäßige Aktualisierung verantwortlich. Außerdem hat er die Umsetzung der Fördermaßnahme zur Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe begleitet. In Zusammenarbeit mit der Dornier Group führte er eine Modellierung und Optimierung für ein Projekt zur Erzeugung erneuerbarer Kraftstoffe durch.

Kontakt über LinkedIn<sup>6</sup>



© Wenzel

## Links zum Thema

1. NOW GmbH: "ReFuelEU Aviation Regulation – How does it affect the aviation sector?" Factsheet 2024. Zugriff am 6. Oktober 2024. (<https://www.now-gmbh.de/en/publications/revenue-aviation-regulation-how-does-it-affect-the-aviation-sector/><sup>7</sup>)
2. Europäische Kommission: "ReFuelEU Aviation: Proposal for a Regulation." Zugriff am 6. Oktober 2024. ([https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12940-ReFuelEU-Aviation\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12940-ReFuelEU-Aviation_en)<sup>8</sup>)
3. Europäisches Parlament: "Regulation of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of sustainable aviation fuels." Zugriff am 6. Oktober 2024. ([https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0311\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0311_EN.html)<sup>9</sup>)
4. NOW GmbH: "Sustainable Aviation Fuels: SAF Monitor published." Zugriff am 6. Oktober 2024. (<https://www.now-gmbh.de/en/news/press-releases/sustainable-aviation-fuels-saf-monitor-published/><sup>10</sup>)
5. CENA Hessen: "SAF Monitor." Zugriff am 6. Oktober 2024. (<https://www.cena-hessen.de/en/projects/saf-monitor/><sup>11</sup>)
6. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV): "German innovations for sustainable aviation." Zugriff am 6. Oktober 2024. (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/EN/PressRelease/2024/041-german-innovations-for-sustainable-aviation.html><sup>12</sup>)
7. CENA: "SAF-Outlook 2024-2030. Eine Analyse von Mengen, Technologien und Produktionsstandorten für nachhaltige Flugtreibstoffe."
8. Eurostat Datenbank (2024); jährliche Wachstumsrate des Flugsektors wird mit 1,5 % angenommen, entsprechend des mittleren Szenarios der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization, ICAO).

1. <https://www.airliners.de/serien/umweltfreundliche-luftfahrt-status-quo-klima>
2. <https://erneuerbarekraftstoffe.de/saf-monitor/>
3. <https://gars.science/>
4. [sophie.juergens@now-gmbh.de](mailto:sophie.juergens@now-gmbh.de)
5. <https://www.linkedin.com/in/dr-sophie-j%C3%BCrgens/>
6. [linkedin.com/in/marvin-wenzel-981051135](https://www.linkedin.com/in/marvin-wenzel-981051135)
7. <https://www.now-gmbh.de/en/publications/revenueu-aviation-regulation-how-does-it-affect-the-aviation-sector/>
8. [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12940-ReFuelEU-Aviation\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12940-ReFuelEU-Aviation_en)
9. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0311\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0311_EN.html)
10. <https://www.now-gmbh.de/en/news/pressreleases/sustainable-aviation-fuels-saf-monitor-published/>
11. <https://www.cena-hessen.de/en/projects/saf-monitor/>
12. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/EN/PressRelease/2024/041-german-innovations-for-sustainable-aviation.html>

Status quo SAF (7)

# "An der Technologie liegt es nicht – es fehlen die SAF-Produktionskapazitäten"

Exklusiv für airliners+ Abonnenten

Im Interview mit airliners.de beleuchtet Aireg-Vorstandsmitglied Siegfried Knecht die Herausforderungen rund um Sustainable Aviation Fuels (SAF). Trotz wachsender Bemühungen gibt es immer noch begrenzte Produktionskapazitäten, insbesondere in Deutschland – doch es gibt neue Ideen.

Von David Haße



© airliners.de / Adobe Firefly

Die Luftfahrt steht vor einer großen Herausforderung: Sie muss dafür sorgen, dass Fliegen umweltschonender wird. Ein wesentlicher Baustein ist SAF. Um nachhaltiges Kerosin einzuführen, ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten aus verschiedenen Bereichen erforderlich, beispielsweise aus den Bereichen Technologie, Politik und Wirtschaft. Die aktuelle Serie zeigt den Status quo der Maßnahmen auf<sup>1</sup>. In diesem Teil spricht Aireg-Vorstandsmitglied Siegfried Knecht im airliners.de-Interview darüber, warum die SAF-Ziele bis-

lang weit verfehlt werden – und nennt neue Ideen zur Förderung der Produktion.

**airliners.de:** Sustainable Aviation Fuels sind mittlerweile ein großes Thema in der Branche. Sie verfolgen die Entwicklung von SAF schon seit vielen Jahren, was ist bereits erreicht?

**Siegfried Knecht:** Nachdem Lufthansa in Deutschland vor fast 15 Jahren erfolgreich die ersten SAF-Flüge zwischen Hamburg und Frankfurt durchgeführt hat, haben viele gefragt, warum man nicht einfach sofort mit SAF weiterfliegen kann. Die lapidare Antwort war, dass es nicht genug SAF gab. Und das SAF, das es gab, war sehr, sehr teuer.

Wie Sie richtigerweise sagen, es ist SAF mittlerweile ein prominentes Thema. Doch obwohl das Thema über die Jahre immer wichtiger geworden ist – und es heute bei allen Airlines, bei den Flugzeugherstellern und den Triebwerksherstellern ganz oben in den Nachhaltigkeitsbestrebungen steht – mangelt es leider Gottes immer noch an den Produktionskapazitäten.

## Über den Interview-Partner

Siegfried Knecht (65) ist Vice President und Leiter F&T-Angelegenheiten Deutschland im Bereich Public Affairs des Airbus-Konzerns. Zuvor war er zudem bereits in anderen Abteilungen und Positionen bei Airbus und EADS tätig. 2011 wurde Siegfried Knecht von den Mitgliedern von Aireg zum Vorstandsvorsitzenden des Vereins gewählt.



© Aireg

**Es liegt also nach wie vor bei der Herstellung?**

An den Herstellungsverfahren liegt es nicht. Das ist erforscht und vielfach technologiereif. Aber es mangelt nach

wie vor insbesondere in Deutschland an der Produktion.

Schon damals bei den Lufthansa-Flügen wurde ein "HEFA"-Kraftstoff getankt. Das ist genau der Kraftstoff, der auch heute am meisten produziert wird. Aber Sie wissen vermutlich, dass es in Deutschland noch immer – und ich sage das jetzt mal zugespitzt – null Produktion gibt.

Als Aireg vor 13 Jahren gegründet wurde, haben wir das Ziel von "zehn Prozent SAF bis 2025" vorgegeben. Die zehn Prozent bezogen sich auf die in Deutschland vertankte Kerosinmenge, also Pi mal Daumen eine Million Tonnen. Von diesem Ziel sind wir weit entfernt.

Wir haben das Ziel jetzt auf 2030 angepasst. Ob es gelingt, dieses Ziel dann zu erreichen, muss man sehen. Ich bin immer Berufsoptimist, und insofern werden wir bei Aireg und bei unseren Mitglieder alles tun, damit dieses Ziel erreicht werden kann.

### Wie sieht es weltweit aus?

Das Gleiche gilt auch für die Welt. Aktuell sind nur circa 0,5 Prozent des weltweit verbrauchten Kerosins SAF. Daran sieht man, dass noch viel zu wenig produziert wird. Die Firma Neste ist heute der größte Produzent. Mit Singapur, mit Finnland, mit Rotterdam und in den USA gibt es ein paar vielversprechende Projekte. Frankreich will ich nicht vergessen, auch nicht die Niederlande. BP, OMV, Total Energies etc. haben global schon einiges vor.

Wenn ich jetzt einmal kurz den Schwenk auf die europäischen Quoten machen darf, die zwei Prozent im nächsten Jahr und die sechs Prozent in 2030. Ich glaube schon, dass man die sechs Prozent für die EU insgesamt im Jahr 2030 erreichen kann. Das sind dann ungefähr drei Millionen Tonnen.

### Wie sieht es mit PTL aus, also "eSAF", wofür es ja entsprechende Subquoten gibt?

PTL oder "eSAF", da bin ich eher pessimistisch oder skeptisch. Es gibt zwar viele Ideen und Projektankündigungen, aber keines dieser Projekte ist nahe an einer FID, also "Final Investment Decision". Deswegen bin ich eher skeptisch, was die 1,2 Prozent bis 2030 angeht. Das wären dann irgendwas um die 600.000 Tonnen.

Aber es dauert allemal vier, fünf Jahre, bis eine solche Anlage geplant und gebaut ist und dann stabil und verlässlich läuft. Doch vorher müssen auch noch die Milliarden an Capital Expenditures gefunden werden.

So eine Anlage kostet relativ viel Geld. Eine 200.000-Tonnen-Anlage verschlingt locker in der Größenordnung

von ein bis zwei Milliarden, wenn nicht sogar mehr. Je nachdem, wie man sie auslegt, welche Technologie man verfolgt, ob man möglicherweise in der Raffinerie bestehende Anlagenteile weiter nutzen kann. Daher gibt es an der Stelle viele ungelöste Probleme.

### Wie stehen Sie zur speziellen deutschen PTL-Quote? Die ist ja nochmal ambitionierter als die EU-Quote...

Meine Position an der Stelle ist, die deutsche Quote abzuschaffen. Wir haben die europäische Quote.

Wenn ich an der Stelle auf meine Mitglieder schaue, schlagen dennoch zwei Herzen in meiner Brust. Viele glauben ja, dass wenigstens die Quoten eine Art von Garantie oder Sicherheit für einen Investor sind, in die deutschen Anlagen Mittel zu schießen.

Es gibt Vertreter der Luftverkehrswirtschaft, die bezeichnen die deutsche Quote sogar als gesetzwidrig. Die EU-Quote ist eine Regulierung und keine Direktive. Sie gilt damit einfach auch für Deutschland.

Wenn man das aber Thema nüchtern und realistisch betrachtet, macht die deutsche PTL-Quote in der Tat keinen Sinn. Denn weder die 0,5 Prozent 2026 noch die zwei Prozent in 2030, bezogen auf den deutschen Verbrauch, sind erreichbar.



Atmosfair-PTL-Anlage  
© Lufthansa Cargo

### Was passiert eigentlich, wenn die Quoten nicht erreicht werden?

Ich vermute, dass sich bislang nur wenige, auch bei den Herstellern, wirklich mit der Konsequenz beschäftigt, nämlich mit der Pönale. Wenn die deutsche Quote bleibt, und nicht produziert wird, müssen die Hersteller Strafen zahlen. Die werden das umlegen. Damit wird dann Kerosin noch teurer.

### Blieben wir nochmal bei den EU-Quoten. Wie viel teurer wird Fliegen durch die Zumischung?

Grundsätzlich trete ich dafür ein, dass Wettbewerbsverzerrungen, soweit es geht, zu vermeiden sind. Leider tun europäische Airlines aber so, als würde die Welt zusammenbrechen, wenn sie ihrem Kerosin SAF beimischen müssten. Wenn eine Airline zwei Prozent beimischen muss, dann liegen die Mehrkosten für einen innereuropäischen Flug pro Passagier bei ein paar wenigen Euro. Wenn ich einen Langstreckenflug nehme, ist es zugegebenermaßen mehr. Dann sind es wahrscheinlich um die 60, 70 Euro mehr pro Passagier.

Wenn die Airlines aber gewillt wären, diese Mehrkosten auf die Passagiere umzulegen, etwa über SAF-Zuschläge, dann halten sich die Belastungen in Grenzen. Wenn SAF tatsächlich über die Zeit in der Produktion günstiger wird, wovon viele ausgehen, dann wird das für Airlines und Passagiere erträglich bleiben.

### Wie steht die Luftfahrtbranche im Vergleich zu anderen Branchen da?

Die Luftfahrt gehört wie die Schifffahrt und vielleicht noch die Stahl- und Chemieindustrie zu den "Hard-to-Abate"-Sektoren. Die Schifffahrt kann vielleicht demnächst auch mit Ammoniak oder Methanol über die Weltmeere fahren. Das kann die Luftfahrt mit Sicherheit nicht. Deswegen haben wir die Bestrebung, dass der Luftfahrt eine Priorität eingeräumt wird, wenn es um die Verfügbarmachung von nachhaltigen Flugkraftstoffen und insbesondere "eSAF" geht.

Auf der anderen Seite ist es richtig, dass die Hebel, die man mit grünem Wasserstoff in anderen Sektoren erzeugen kann, viel größer sind, einfach weil in anderen Sektoren viel mehr CO<sub>2</sub> ausgestoßen wird.

Dennoch: Wir haben in der Luftfahrt keine Alternative. Wir brauchen einen flüssigen Kraftstoff, während gerade der bodengebundene Verkehr schon Alternativen hat: Batterieelektrisch oder meinetwegen auch Wasserstoff.



Ein Flugzeug rollt von der Landebahn Nordwest am Flughafen Frankfurt über die Autobahn 3 hinweg zum Terminal.

© dpa / Boris Roessler

### Warum sprechen Sie sich dennoch nicht gegen "eFuels" für Autos und LKW aus?

Es soll gerne "eFuels" für den Bodenverkehr geben. Wenn dafür das bislang einzige für die Luftfahrt zugelassene technische Verfahren, die Fischer-Tropsch-Synthese, zur Anwendung kommt, würde dabei auch SAF als Koppelprodukt anfallen.

Der Bundesfinanzminister kommt nur plötzlich auf die Idee, Steuererleichterungen für "eFuels"-Fahrzeuge anzugehen, während die Luftverkehrssteuer deutlich erhöht wurde und die zwei Milliarden Euro, die bislang im Bundeshaushalt an Budget für den PTL-Hochlauf vorgesehen waren, quasi auf null zusammengestrichen werden. Es ist nur noch ein bisschen übrig geblieben für eine DLR-Anlage in Leuna.

Diese Entwicklung haben wir bei Aireg kritisiert. Wir kritisieren nicht, dass es "eFuels" für den bodengebundenen Verkehr geben soll.

### Das ist ja super interessant. Heißt es also, je mehr "eFuels" für Autos, desto mehr SAF fällt dabei für den Luftverkehr ab?

Man könnte dabei über eine Symbiose nachdenken. Aber die Hersteller können das Verfahren auch so einstellen, dass möglichst wenig "synthetisches Kerosin" produziert wird – und entsprechend mehr "synthetisches Benzin oder Diesel".

Hinzu kommt noch eine weitere Technologieroute, die Methanolroute. Die ist heute für die Luftfahrt noch nicht zugelassen. Für den Straßenverkehr ist diese Route bereits etabliert. Deswegen ist meine Sorge, wenn jetzt einer: "'eFuels' für den Straßenverkehr" ruft, und man dann über die Methanolroute geht, würde über diesen Weg für die Luftfahrt nur noch vergleichsweise wenig übrig bleiben.

In der Politik hat die Luftfahrt aber leider keinen großen Stellenwert. Einfach und aus meiner Sicht, weil die Luftfahrt

in Deutschland bezogen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen lediglich ein Prozent ausmacht. Es gibt darum viele Leute in der Ministerialbürokratie, die erst einmal etwas für die anderen Sektoren tun wollen – und nicht für die Luftfahrt. Das ist schade.



Flugzeuge am Frankfurter Flughafen.

© Fraport AG

**Die Branche hat die Bundesregierung zuletzt dazu aufgerufen, die Luftverkehrsteuer abzuschaffen beziehungsweise die Mittel zumindest dafür zu verwenden, die Forschung für eine klimaneutrale Luftfahrt zu reinvestieren. Wie sehen Sie das als Aireg?**

Gegen die Umwandlung in eine Abgabe sperren sich mindestens zwei oder drei Ressorts. Leider wird das also wohl nie geschehen.

Aber es gibt durchaus zwei weitere Möglichkeiten. Die eine Möglichkeit steht eigentlich sogar schon im Koalitionsvertrag. Da steht, dass die Einnahmen aus der Steuer für strombasierte Kraftstoffe und für Forschung und Technologie in der Luftfahrt genutzt werden sollen. Das ist der erste Punkt.

Zweitens wäre es natürlich auch möglich, zumindest einen Teil der Einnahmen aus der Luftverkehrsteuer – immerhin mittlerweile 2,3 Milliarden Euro pro Jahr – als Steuergutschrift für SAF-Produzenten oder auch für Airlines zu nutzen. Robert Habeck hat interessanterweise bei seiner Einlassung auf dem jüngsten Arbeitgebertag das Thema "Tax Credits" und "Incentives" als sinnvoll dargestellt.

**Ist der Aufbau von SAF-Anlagen nicht im eigenen Interesse der Energieriesen? Immerhin sind das multinationale Billionen-Dollar-Unternehmen...**

An der Stelle kommen wir zurück zum Henne-Ei-Problem. Wenn die Nachfrage von den Airlines nicht da ist, scheint das auch auf der anderen Seite, also bei den Produzenten, nicht gewollt zu sein, entsprechend in Produktionsanlagen

zu investieren. Die gewichtigen Vertreter von "Big Oil and Gas" haben zuletzt teilweise oft wieder einen Schritt zurück gemacht, was ihre SAF-Pläne angeht.

Ich kann es ehrlich gesagt nicht ganz nachvollziehen. Vermutlich schauen sie sich erst an, was möglicherweise andere, wie Neste und ein paar kleinere Produzenten, machen.

Auf der anderen Seite haben mir dann auch Vertreter der Mineralölwirtschaft gesagt, dass es derzeit nicht genug Nachfrage gibt. Deswegen haben sie erst einmal entschieden, nicht zu investieren. Abnahmeverträge sind auch immer noch ein schwieriges Thema. Sie hängen immer ein Stück weit von der Regulierung ab. Ich kann durchaus nachvollziehen, dass eine Airline keinen verlässlichen, langfristigen SAF-Abnahmevertrag über 15, 20 Jahre schließen will. Alle gehen schließlich davon aus, dass die Kosten für die Produktion sinken. Und was ist, wenn sich möglicherweise auch die Regulierung noch einmal ändert?

**Könnte es sich für Airlines vielleicht lohnen, selbst in SAF-Anlagen zu investieren? Dann hat man schließlich sein eigenes Kerosin und verkauft die Beiprodukte noch dazu weiter...**

Die eine oder andere Airline engagiert sich durchaus im kleineren Maßstab bei entsprechenden Fonds. Aber das sind Fonds, die insgesamt eine Größenordnung von 200 bis 300 Millionen Euro haben. Wir haben ja schon darüber gesprochen, wie viele Milliarden die Investitionen in solche Anlagen betragen können. Kurze Antwort auf Ihre Frage: Es wäre sinnvoll, wenn sich die Airlines diesem Thema einmal ganz allgemein gesagt stärker nähern würden. Aber das ist schwierig bei den geringen Gewinnmargen in dem Geschäft.

Aber vielleicht noch eine persönliche Bemerkung zum Thema: Auch Flugzeughersteller könnten sich durchaus überlegen, in Zukunft Flugzeuge mit SAF zu verkaufen. Ob es eine Boeing, ein Airbus, Embraer, Bombardier oder meinetwegen in Zukunft auch eine Comac aus China ist. Denn auch die Luftfahrtindustrie muss über Scope-3-Emissionen nachdenken. Die fallen für deren Produkte im Betrieb bei den Airlines an. Wenn ein Hersteller mit seinem Flieger SAF gleich mitverkaufen würde, implizierte das gleichzeitig die Reduktion der Scope-3-Emissionen.

**Herr Knecht, vielen Dank für das Gespräch.**

Links zum Thema

- [Webseite von Aireg<sup>2</sup>](#)

1. <https://www.airliners.de/serien/umweltfreundliche-luftfahrt-status-quo-klima>
2. <https://aereg.de/de/>