



Sustainable Aviation Fuels (SAF) als Option zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs

SYSTÖK – Policy Brief

Policy Brief

Sustainable Aviation Fuels (SAF) als Option zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Luftverkehr
Wolfgang Grimme, Kartin Oesingmann

Erstellt im Rahmen des Impulsprojektes:
Strategische Optionen für Energieträger im Verkehr (SYSTÖK)

Die Transformation der Antriebstechnologie leistet einen integralen Beitrag für eine zukunftssichere und klimaverträgliche Wirtschaft. Das DLR-Projekt SYSTÖK analysiert diese Transformation aus techno-ökonomischer Sicht. Das DLR gibt in acht Policy Briefs einen kompakten Überblick über die aktuelle und zukünftige Rolle von wasserstoffbasierten Antrieben und geeigneter Substitute im Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr. Die

Policy Briefs führen die Erkenntnisse aus zahlreichen DLR-Forschungsprojekten und weiteren wissenschaftlichen Quellen zusammen. Die Policy Briefs richten sich an die Politik, Verbände und Unternehmen. Auch der interessierten Öffentlichkeit geben sie in aller Kürze Orientierung zu aktuellen techno-ökonomischen Fragen der klimaverträglichen Mobilität von morgen.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	3
1. Rahmenbedingungen und Herausforderungen	4
2. Techno-ökonomische Aspekte der Bereitstellung von SAF	5
3. Rechtlicher Rahmen und Anreizsysteme	11
4. Handlungsempfehlungen	12
Literaturverzeichnis	15

Management Summary

Herausforderungen der Dekarbonisierung des Luftverkehrs: Die Dekarbonisierung des Luftverkehrs stellt in technologischer und regulatorischer Hinsicht eine Herausforderung dar. Fossiles Kerosin ist aufgrund seiner Energiedichte und Lagerfähigkeit ideal. Allerdings verursacht es bei der Verbrennung Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen und Nicht-CO₂-Effekte, wie etwa Kondensstreifen. Alternative Energieträger im Luftverkehr wie die Direktverbrennung von Wasserstoff, Brennstoffzellen oder Batterien befinden sich in frühen Entwicklungsstadien. Sie tragen daher kurzfristig nicht zur Emissionsminderung bei. Zudem ist die internationale Regulierung der Emissionen des Luftverkehrs schwierig. Während die Europäische Union (EU) strenge Maßnahmen wie das Emissionshandelssystem (EU-ETS) umsetzt, sind globale Maßnahmen wie das Kompensations- und Reduktionsprogramm CORSIA weniger ambitioniert.

Bedeutung und Potenziale von Sustainable Aviation Fuels (SAF): Nachhaltige Flugtreibstoffe können einen erheblichen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Luftverkehr leisten. SAF können aus biogenen Ausgangsstoffen oder synthetisch unter Einsatz erneuerbarer Energien aus CO₂ und Wasser hergestellt werden. Sie haben das Potenzial, über ihren Lebenszyklus (Produktion und Verwendung) geringere Emissionen als fossile Treibstoffe zu verursachen. Emissionsminderungen von bis zu 100 Prozent sind bei mit grünem Wasserstoff synthetisch hergestelltem SAF möglich. Ein weiterer großer Vorteil von SAF ist ihre Drop-In-Fähigkeit. Das heißt, sie können ohne Änderungen an der bestehenden Flugzeugtechnik verwendet werden. Darüber hinaus verursacht der Einsatz von SAF weniger Nicht-CO₂-Effekte. Speziell auf Flügen, die zur Bildung wärmender Kondensstreifen neigen, könnten SAF die Klimawirkung des Luftverkehrs effektiver reduzieren.

Techno-ökonomische Aspekte der Bereitstellung von SAF: Es gibt mehrere Produktions- und Umwandlungswege zur Herstellung von SAF. Bislang wurden sieben Herstellungsverfahren zertifiziert. Zu den ausgereiftesten Verfahren gehören die

Fischer-Tropsch-Synthese (FT) und die hydroprozessierten Ester und Fettsäuren (HEFA). Um die Treibstoff-Eigenschaften bei der Nutzung von SAF zu gewährleisten, beträgt der maximal zulässige Beimischungsanteil derzeit 50 Prozent.

Nachhaltigkeitskriterien und Emissionsreduktionspotenziale: Die EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (RED III) verlangt eine Lebenszyklus-Reduktion der Treibhausgasemissionen von 50 bis 70 Prozent gegenüber fossilem Kerosin. Nach Vorgaben der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) können in CORSIA bereits SAF angerechnet werden, die die Lebenszyklusemissionen nur um 10 Prozent senken.

Markthochlauf, Kosten und Preise: Die ReFuel-Initiative der EU sieht vor, dass bis zum Jahr 2050 bei Abflügen aus dem Europäischen Wirtschaftsraum eine SAF-Quote von 70 Prozent erreicht wird. Die Internationale Lufttransport-Vereinigung (IATA) geht davon aus, dass SAF im Jahr 2050 weltweit bis zu 65 Prozent zur Erreichung des Netto-Null-Ziels beitragen wird. Die Produktionskosten für SAF liegen derzeit um den Faktor zwei bis fünf über denen von fossilem Kerosin, die Produktionskapazitäten sind begrenzt. Kurz- bis mittelfristig werden die Kosten durch den Einsatz von SAF steigen und voraussichtlich an die Reisenden weitergegeben. Der Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten beträgt je nach Geschäftsmodell zwischen 20 und 50 Prozent. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und der umfassenden regulatorischen Rahmenbedingungen im Luftfahrtbereich wird der Einsatz nur sehr langsam steigen. Einen Teil der Mehrkosten wird durch immer effizientere Flugzeuge ausgeglichen werden.

Schlussfolgerung: SAF können trotz der aktuellen technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion der (Lebenszyklus-)CO₂-Emissionen und der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs leisten. Für den Erfolg von SAF und das Erreichen der Klimaziele im Luftverkehr sind daher umfassende und

verbindliche regulatorische Maßnahmen der nationalen und internationalen Politik notwendig.

Handlungsempfehlungen

- Staatliche Förderung und Unterstützung (Besteuerung, Forschung, Technologietransfer, Marktdesign) für Luftverkehrswirtschaft und Treibstoffproduktion: Kosten für SAF-Produktion senken, technologische Verfahren schnell marktreif machen, um SAF in industriellem Maßstab zu produzieren. Sicherung der Technologieführerschaft für Deutschland und Europa gibt neue wirtschaftliche Impulse und verhindert, dass Kosten der Dekarbonisierung des Luftverkehrs langfristig durch Steuerzahlende getragen werden.
- Sicherheit und Rahmenbedingungen für den sich entwickelnden SAF-Markt schaffen: Staatliche Abnahme- und Preisgarantieren und intelligentes Marktdesign bringen mehr Privatkapital in den SAF-Markt.
- Emissionsverlagerung („Carbon Leakage“) vermeiden: Beimischung von SAF möglichst international umfassend einführen. Einhalten der freiwilligen Selbstverpflichtung der IATA-Fluggesellschaften zur SAF-Beimischung. Monitoring und wirtschaftliche Auswertung von möglichen Wettbewerbsnachteilen durch Carbon Leakage.
- Kooperation mit Staaten, die ähnliche Zielsetzungen in der internationalen Luftverkehrspolitik verfolgen: Gemeinsam Wettbewerbsbedingungen harmonisieren hinsichtlich Beimischungsquoten, Subventionen und Kriterien für Nachhaltigkeit.
- SAF zuerst gezielt auf Flügen mit hohen Nicht-CO₂-Effekten einsetzen: regulatorische Rahmenbedingungen und Anreize für Fluggesellschaften schaffen.
- Konsequente CO₂-Bepreisung auf möglichst breiter internationaler Basis weiterentwickeln und durchsetzen: Das gibt Marktakteuren Sicherheit und verringert den Preisabstand zwischen SAF und fossilem Kerosin.

1. Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Es besteht ein breiter gesellschaftlicher Konsens, dass alle Sektoren einen Beitrag zur Begrenzung des Klimawandels leisten müssen. Dabei sind die zum Teil sehr unterschiedlichen regulatorischen, technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der einzelnen Sektoren zu berücksichtigen.

Der globale Luftverkehr hatte im Jahr 2018 einen Anteil von 2,4 Prozent an den anthropogenen CO₂-Emissionen. Hinzu kommen die Nicht-CO₂-Effekte durch Kondensstreifen, Wolken- und Ozonbildung, so dass der Gesamteffekt bis zu dreimal höher sein kann (Lee et al. 2021). Es wird davon ausgegangen, dass der Luftverkehr langfristig wachsen wird, während andere Sektoren ihre Treibhausgasemissionen weiter verringern. Daher ist zu erwarten, dass nicht nur der absolute, sondern auch der relative Beitrag des Luftverkehrs zum Klimawandel in Zukunft zunehmen wird.

Zwei weitere Faktoren tragen zur Herausforderung der Dekarbonisierung des Luftverkehrs bei: Zum einen ist es technologisch schwierig, CO₂-Emissionen im Luftverkehr zu reduzieren. Fossile Kraftstoffe haben für die Luftfahrt ideale Eigenschaften, zum Beispiel in Bezug auf Energiedichte, Lagerfähigkeit und Produktionskosten. Alternative Antriebe mit Wasserstoff oder Batterien als Energieträger mit deutlich geringeren Klimaeffekten befinden sich in einem frühen Entwicklungsstadium. Es wird noch Jahrzehnte dauern, bis sie einen nennenswerten Beitrag zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs leisten. Zum anderen können die Emissionen des internationalen Luftverkehrs und deren Reduktion nur im Konsens der internationalen Staatengemeinschaft umfassend reguliert werden. Da eine Reihe von Staaten, insbesondere aus Südamerika und Asien, einer Regulierung der Emissionen des Luftverkehrs kritisch gegenübersteht, sind die bisherigen Maßnahmen auf globaler Ebene deutlich schwächer ausgeprägt als beispielsweise in der Europäischen Union (EU). Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) sowie von dort in die Schweiz und in

das Vereinigte Königreich unterliegen dem EU-Emissionshandelssystem, das bei CO₂-Kosten von derzeit über 60 Euro je Tonne CO₂ einen vergleichsweise höheren Anreiz zur CO₂-Vermeidung bietet. Auf internationaler Ebene haben sich die Mitgliedsstaaten der internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO durch die marktbasierende Maßnahme CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) hingegen lediglich auf eine Stabilisierung der CO₂-Emissionen auf 85 Prozent des Niveaus von 2019 verbindlich geeinigt. Das darüber hinausgehende Netto-Null-Ziel für CO₂-Emissionen im Jahr 2050 (Long Term Aspirational Goal, LTAG) wird zwar angestrebt, die Zielerreichung ist aber derzeit nicht durch regulatorische Maßnahmen international geregelt. Es ist absehbar, dass nachhaltige Flugtreibstoffe (sustainable aviation fuels, SAF) einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung des Netto-Null-Ziels für 2050 leisten werden. Die Industrieorganisation International Air Transport Association (IATA), die sich im Jahr 2021 ebenfalls das freiwillige Ziel von Netto-Null-Emissionen bis 2050 gesetzt hat (IATA 2021), geht davon aus, dass SAF einen Beitrag von 65 Prozent zur Erreichung des Netto-Null-Ziels leisten wird. Auch die Politik- und Technologieszenarien der Studie „Waypoint 2050“ gehen davon aus, dass SAF zwischen 53 und 71 Prozent zur Erreichung des Netto-Null-Ziels im Jahr 2050 beitragen wird (ATAG 2021). Die Bedeutung von SAF für die Dekarbonisierung des Luftverkehrs wird auch dadurch deutlich, dass sich die Vertragsstaaten der ICAO in 2023 darauf geeinigt haben, die CO₂-Emissionen des internationalen Luftverkehrs durch SAF bis zum Jahr 2030 um fünf Prozent gegenüber einem Szenario ohne SAF-Nutzung zu senken (ICAO 2023). Allerdings ist auch dieses Ziel nicht durch verbindliche regulatorische Maßnahmen unterlegt. Damit werden im internationalen Kontext die beiden größten Herausforderungen im Zusammenhang mit der Nutzung von SAF nur unzureichend adressiert. Dies sind zum einen die Verfügbarkeit alternativer Kraftstoffe und zum anderen der Preisunterschied im Vergleich zu fossilem Kerosin.

Der vorliegende Policy Brief gibt einen Überblick über potenzielle Herstellungspfade, die zu erwar-

tenden Produktionskosten und Reduktionspotenziale der CO₂-Lebenszyklusemissionen. Danach wird der aktuelle Stand des regulatorischen Rahmens der SAF-Nutzung in Europa, den USA und einigen weiteren Ländern kurz zusammengefasst. Abschließend werden Handlungsempfehlungen abgeleitet.

2. Techno-ökonomische Aspekte der Bereitstellung von SAF

2.1. Herstellung, Produktionsverfahren und verwendete Rohstoffe

Die Herstellungsprozesse für SAF werden von der American Society for Testing Materials (ASTM), vergleichbar mit dem Deutschen Institut für Normung e.V., welches die DIN-Normen festlegt) zertifiziert, um sicherzustellen, dass SAF mit der bestehenden Infrastruktur und den aktuellen Flugzeugtriebwerken kompatibel sind (IATA 2022; EASA 2022). Insgesamt gibt es mehrere Produktions- und Umwandlungswege zur Herstellung von SAF sowie eine große Anzahl möglicher Rohstoffe für Biokraftstoffe (Zhang et al. 2020; Karim et al. 2022; Vela-García et al. 2022; Pasa et al. 2022). Die ASTM hat bisher sieben Konversionspfade zertifiziert (IATA 2022; García-Contreras et al. 2022). Zu den ausgereiftesten Produktionsverfahren für nachhaltige Flugkraftstoffe gehören die Fischer-Tropsch-Synthese (FT oder FT-SPK) und das Verfahren der hydroprozessierten Ester und Fettsäuren (HEFA), die 2009 beziehungsweise 2011 als erste Umwandlungstechnologien zugelassen wurden. SAF können aus biologischen oder abfallbasierten Rohstoffen hergestellt werden, aber auch in synthetischer Form, bekannt als E-Fuels oder Power-to-Liquid (PtL)-Kraftstoffe (siehe Tabelle 1). Bei synthetischen Kraftstoffen dient gasförmiger Wasserstoff (H₂) als Ausgangsstoff und wird mit CO₂ in der FT- oder Methanol-Synthese zu synthetischem Kerosin verarbeitet (Meurer et al. 2024). Die dazu notwendige direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft befindet sich jedoch in einem frühen Entwicklungsstadium. Die nachhaltige Bereitstellung von Kohlenstoff ist bei der SAF-Produktion eine besondere Herausforder-

Tabelle 1: Beispiele für SAF-Rohstoffe und Umwandlungsprozesse

SAF-Klassifizierung	Ausgangsstoff	Umwandlungsprozess
Bio- oder abfallbasierte SAF	pflanzliche Öle, Rückstandsfette, feste Siedlungsabfälle, zellulosehaltige Deckfrüchte, land- und forstwirtschaftliche Reste usw.	Fischer-Tropsch-Synthese (FT/FT-SPK/A), Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), Hydroprocessing von fermentierten Zuckern zu synthetischen Isoparaffinen (DSHC/HFS-SIP), Alkohol-zu-Jet (ATJ), Katalytische Hydrothermolysen Jet Fuel (CHJ), Reformierung in wässriger Phase (APR), Pyrolyse (PYR)
Synthetische SAF (Power-to-Liquid, E-Fuels, Solar-to-Liquid)	Wasserstoff (H ₂) und CO ₂	Fischer-Tropsch-Synthese (FT), Methanol-Synthese (MeOH), Solar-to-Jet (STJ)

Quelle: Eigene Tabelle basierend auf Netherlands Aerospace Centre (NLR) (2022) und IEA (2021).

ung. Ausgangsstoffe zur Herstellung von biobasierten SAF sind beispielsweise Chinaschilf (*Miscanthus*), Rutenhirse, Zuckerrohr, unterschiedliche Fette und Öle oder landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Reststoffe.

Die so erzeugten Treibstoffe sind drop-in-fähig, das heißt ohne Änderung der Treibstoffsysteme oder der Flugzeugtechnik können mit zunehmender Verfügbarkeit von SAF immer größere Anteile fossilen Kerosins ersetzt werden. Das maximal zulässige Beimischungsverhältnis hängt vom Konversionsverfahren ab und liegt derzeit bei 50 Prozent.

2.2. Nachhaltigkeitskriterien und Emissionsreduktionspotenziale

Bei der Verbrennung von SAF entsteht die gleiche Menge CO₂ wie bei der Nutzung von herkömmlichem fossilem Kerosin. Das CO₂-Einsparpotenzial durch die Nutzung von SAF wird durch eine Lebenszyklusanalyse der verwendeten Rohstoffe und der erforderlichen Produktions- und Umwandlungsprozesse ermittelt. Rohstoffe biologischen Ursprungs entziehen der Atmosphäre während ihres Wachstums CO₂. Für die Herstellung von PtL-Kraftstoffen wird CO₂ entweder aus der Atmosphäre oder aus konzentrierten Quellen isoliert und dann dem SAF-Produktionsprozess zugeführt (EASA 2022; García-Contreras et al. 2022).

SAF müssen bestimmte Nachhaltigkeitskriterien erfüllen, um den europäischen Regularien zu entsprechen. Dazu gehören eine Mindesteinsparung von Treibhausgasemissionen im Vergleich zu konventionellem Kerosin, die Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen beim Anbau der Rohstoffe sowie die Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion. Gemäß der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (RED III) müssen die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen im Vergleich zu herkömmlichem Kerosin zwischen 50 bis 70 Prozent niedriger sein (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2023). Der EU-Ansatz zielt darauf ab, die Nachhaltigkeit und den Umweltnutzen der Biokraftstoffproduktion zu gewährleisten. SAF, die im Rahmen des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS) und der ReFuel Aviation Regulation verwendet werden sollen, müssen die Kriterien der RED III erfüllen.

Auch die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) hat Nachhaltigkeitskriterien für SAF festgelegt, die für CORSIA angerechnet werden können (Efthymiou und Ryley 2022; ICAO 2022b, 2022a). Die Reduktion der Treibhausgasemissionen auf Lebenszyklusbasis gegenüber konventionellem Kerosin (einschließlich direkter und indirekter Landnutzungsänderungen) muss mindestens 10 Prozent betragen, und es gelten ähnliche Kriterien wie in der EU-Energierichtlinie in Bezug auf die

biologische Vielfalt und Veränderung der Landnutzung (ICAO 2022b). Anbaubiomasse einschließlich landwirtschaftlicher Produkte, die als Nahrungs- und Futtermittel verwendet werden können (zum Beispiel Mais oder Zucker), ist jedoch im Gegensatz zu den Regelungen in der EU erlaubt.

Abbildung 1 zeigt die Potenziale zur Einsparung von Treibhausgasemissionen nach SAF-Produktionspfad auf Lebenszyklusbasis (ICAO 2022a). Während einige Produktionsprozesse sogar zu höheren Emissionen als der fossile Referenzwert führen können (zum Beispiel HEFA), zeigt die Abbildung, dass ein breites Spektrum an Umwandlungsprozessen durch die Nutzung unterschiedlicher Rohstoffe die Treibhausgasemissionen reduzieren kann. Die 0-Prozent-Linie in der Abbildung entspricht dem fossilen Referenzwert.

SAF, die mit dem Fischer-Tropsch-Verfahren und aus Chinaschilf, forst- und landwirtschaftlichen Reststoffen sowie aus festen Siedlungsabfällen

hergestellt werden, bieten das größte Potenzial zur Verringerung der Treibhausgasemissionen von mehr als 90 bis zu über 100 Prozent, bezogen auf die Lebenszyklusemissionen. Die Emissionseinsparungen können sogar bis zu 125 Prozent betragen, wenn die Effekte indirekter Landnutzungsänderung berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass zum Beispiel durch die Nutzung von Reststoffen die Abholzung oder Trockenlegung von Feuchtgebieten für den Anbau von Biomasse und damit die zusätzliche Freisetzung von gebundenem CO₂ vermieden werden kann. Durch den Anbau bestimmter Pflanzen wird die CO₂-Bindung im Boden verbessert, was ebenfalls zu einer CO₂-Reduktion von mehr als 100 Prozent führen kann.

Die mittleren Reduktionspotenziale von Alkohol-zu-Jet-Umwandlungsverfahren (AtJ) liegen bei gut 60 Prozent, während die THG-Reduktionspotenziale von HEFA-Verfahren bei unter 60 Prozent liegen. Bei den Rohstoffen, die zur Herstellung von Biokraftstoffen verwendet werden, weisen China-

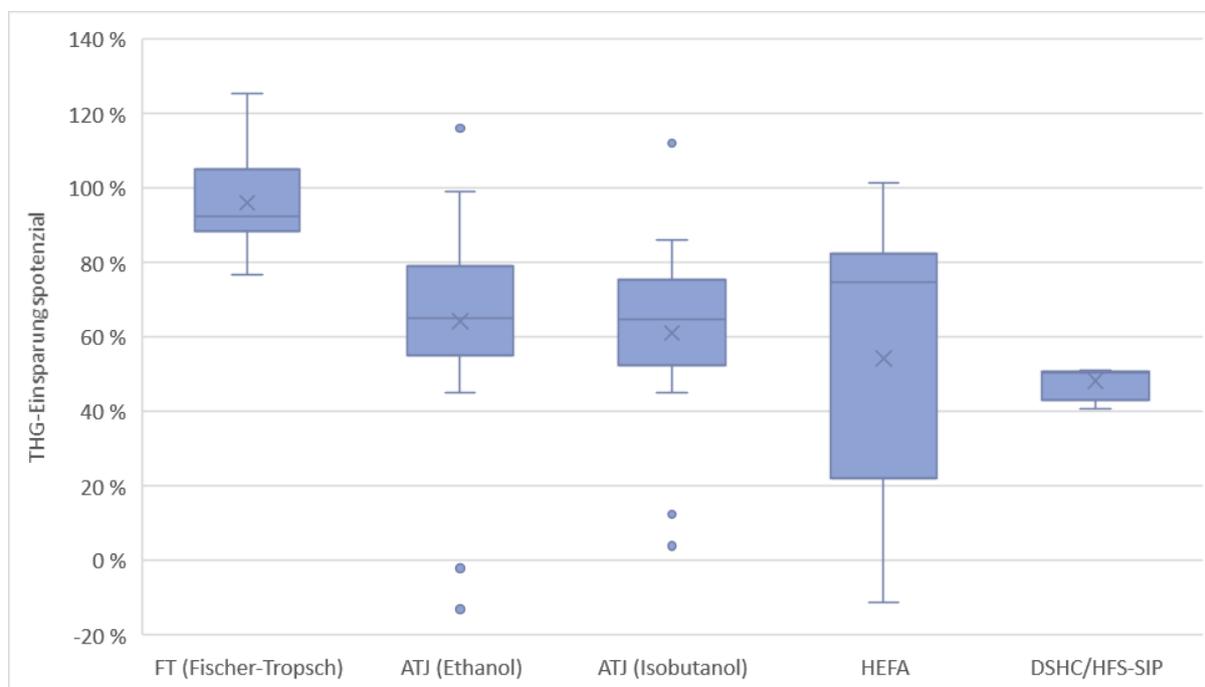


Abbildung 1: Treibhausgas (THG)-Einsparungspotenzial von Biokraftstoffen nach Umwandlungsverfahren im Vergleich zur Kerosinbasis (0-Prozent-Linie). Quelle: Braun, Grimme und Oesingmann (2024).

Anmerkung: Die Einsparungen an Treibhausgasemissionen basieren auf den Lebenszyklusemissionen einschließlich Landnutzungsänderungen. ATJ = Alcohol-to-Jet, HEFA = hydroprocessed esters and fatty acids, DSHC/ HFS-SIP = hydroprocessed fermented sugars to synthetic Isoparaffins.

schilf, Jatrophaöl und feste Siedlungsabfälle im Allgemeinen das höchste THG-Reduktionspotenzial auf. Die Nutzung von Palmöl und Maiskörnern als Grundstoff für SAF weist im Vergleich zu fossilem Kerosin praktisch kein Reduktionspotenzial auf, und es sind sogar negative Nettoemissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen möglich.

Im Gegensatz zu bio-basierten SAF können nicht-biologische, synthetische Kraftstoffe (renewable fuels of non-biological origin, RFNBO) die direkten Emissionen um bis zu 100 Prozent senken und damit Kohlenstoffneutralität erreichen. Voraussetzung ist, dass der Strom für die Aufspaltung von Wasser in (grünen) Wasserstoff und die Umwandlung in Treibstoff aus regenerativen Quellen stammt und das benötigte CO₂ direkt aus der Luft gewonnen wird. Abbildung 2 stellt den Lebenszyklus von synthetischen Kraftstoffen von der Herstellung bis zur Verbrennung im Flugzeug dar. Neben der Verringerung der Lebenszyklus-THG-Emissionen kann der Einsatz von SAF auch andere

direkte Klimaauswirkungen des Luftverkehrs verringern. Neben Kohlendioxid (CO₂) stoßen Flugzeuge Wasserdampf (H₂O) und Aerosolpartikel (Feinstaub) wie Ruß aus. Unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen werden diese Wasserdampfemissionen der Flugzeugtriebwerke als Kondensstreifen und Zirruswolken sichtbar. Die Rußpartikel fördern die Wolkenbildung und führen damit ebenfalls zu einem erhöhten Klimaeffekt.¹ Aktuelle Untersuchungen des DLR haben gezeigt, dass SAF die Intensität und Lebensdauer von Kondensstreifen und somit deren Strahlungsantrieb verringern können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nachhaltige Flugkraftstoffe in der Regel einen geringen Anteil an Aromaten und Schwefel aufweisen und daher weniger Partikel ausstoßen (Voigt et al. 2021; Märkl et al. 2024). Da die Wolkenbildung stark von der jeweiligen Flugroute und den Wetterbedingungen abhängt, schlagen (DLR-) Klimaforscher vor, SAF vor allem für Flüge einzusetzen, die besonders zur Bildung wärmender Kondensstreifen neigen, um die

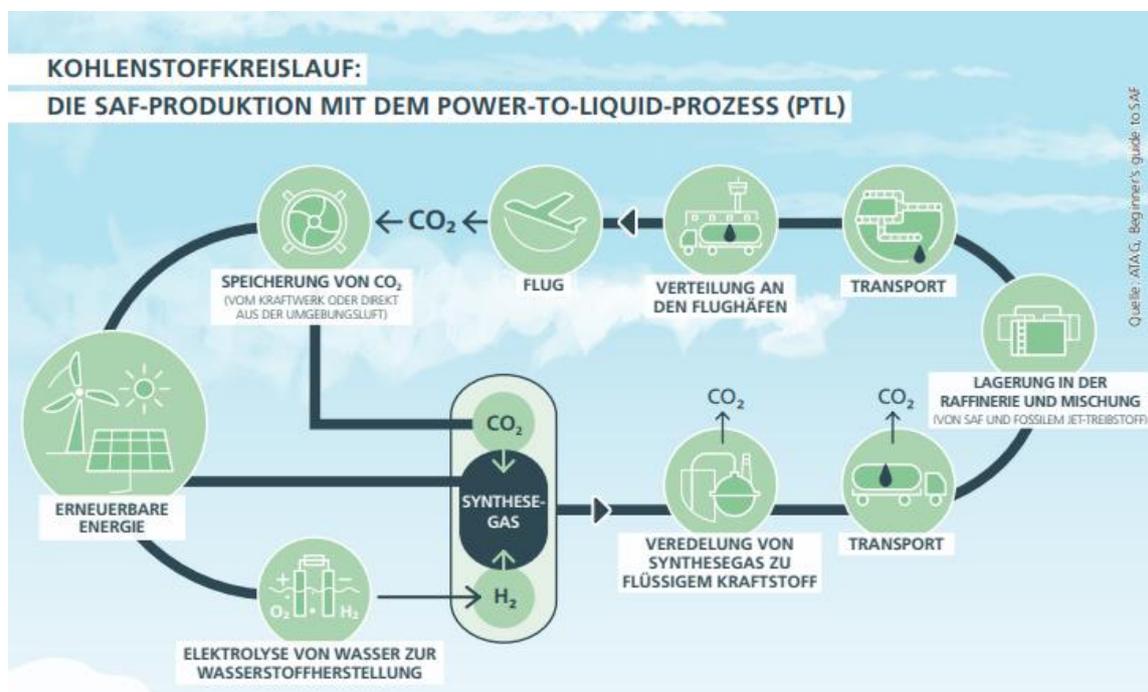


Abbildung 2: Lebenszyklus synthetische Kraftstoffe. Quelle: Tröster (2024)

¹ Der Klimaeffekt wird mit dem Konzept des Strahlungsantriebs gemessen. Ein positiver Strahlungsantrieb bedeutet, dass weniger Sonnenstrahlung von der Erdatmosphäre in

den Weltraum zurückgeworfen wird, was zu einer Erwärmung der Erde führt (Lee et al., 2021).

Klimawirkung des Flugverkehrs effektiver zu reduzieren (Teoh et al. 2022). Hierzu tragen auch weitere Forschungen des DLR bei, um Flugkraftstoffe über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg zu verfolgen und die Entscheidungsfindung zum gezielten Einsatz von SAF anhand der gesammelten Daten und Informationen zu unterstützen (Enderle et al. 2022).

Neben Drop-in-Kraftstoffen forscht das DLR auch an synthetischen Kraftstoffen mit verbesserten Verbrennungseigenschaften, die nicht den heutigen Standards für Kerosin („Jet A“ / „Jet A1“) entsprechen. Ziel der gezielten Optimierung von Kraftstoffen („Fuel Design“) ist die vollständige Vermeidung von Schadstoffen beziehungsweise Emissionen mit Ausnahme von Kohlendioxid und Wasser. Durch den Einsatz dieser auch „JetX“ genannten Kraftstoffe wird eine weitere Verbesserung der lokalen Luftqualität in Flughafennähe und eine Verringerung der Kondensstreifenbildung erwartet. Zusätzlich können durch gezielte Optimierung der Energiegehalt und die Lagerstabilität gegenüber fossilem Kerosin verbessert werden. Allerdings muss sichergestellt werden, dass heutige und zukünftige Flugzeuge und Triebwerke mit den neuen Kraftstoffen kompatibel sind. Für eine Übergangsphase kann daher eine parallele Treibstoffinfrastruktur an den Flughäfen in Betracht gezogen werden, die sowohl Kraftstoff nach dem derzeit geltenden Standard für Kerosin zur Verfügung stellt als auch neue Kraftstoffe.

2.3. Nachhaltigkeitskriterien und Emissionsreduktionspotenziale

Die Austausch- und Mischbarkeit von nachhaltigen Treibstoffen und fossilem Kerosin macht SAF zu einer technologisch effizienten Lösung zur Reduzierung von CO₂-Emissionen. Allerdings ist die Herstellung von SAF derzeit deutlich teurer als die von fossilem Kerosin, und die Produktionskapazitäten und -mengen von SAF sind begrenzt. Unter-

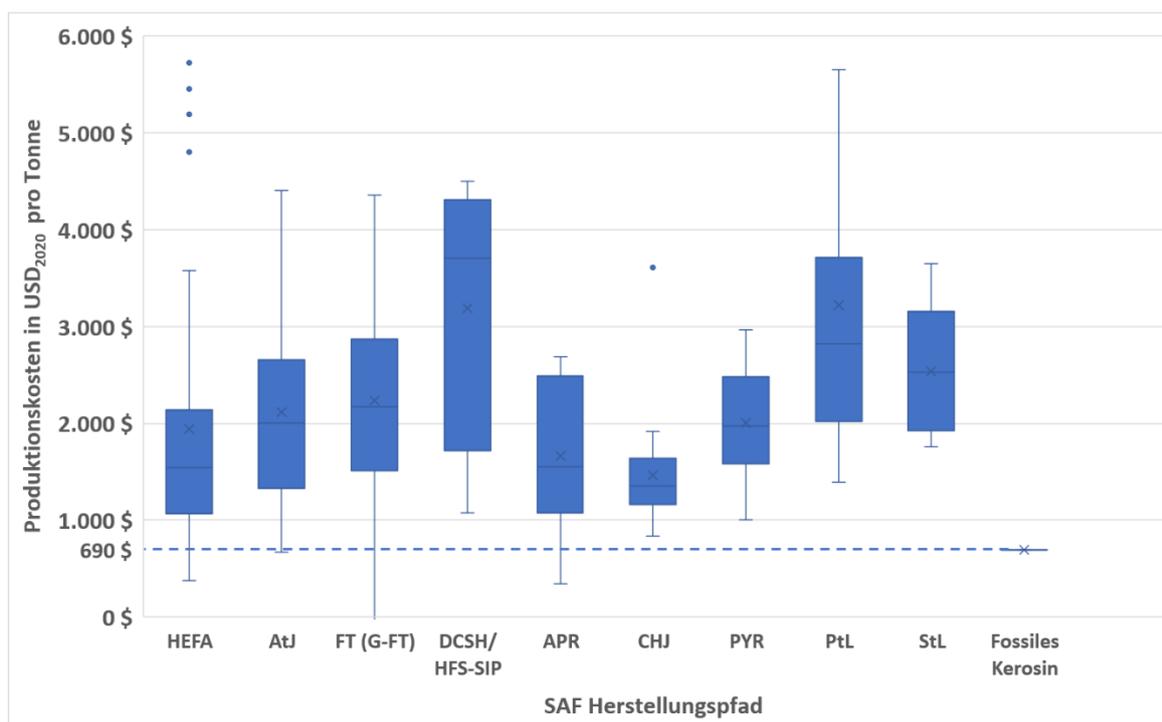
suchungen des DLR zeigen, dass insbesondere mittelfristig mit Kostensteigerungen durch den Einsatz von SAF im Vergleich zur aktuellen Verwendung von fossilem Kerosin zu rechnen ist (Ehlers et al. 2022; Oesingmann 2023). Die zusätzlichen Kosten für den Einsatz von SAF führen zu Gewinneinbußen bei den Akteuren der Luftverkehrswirtschaft. Werden die Mehrkosten an die Kunden weitergegeben, kann dies zu einem Rückgang der Nachfrage oder zu einem geringeren Luftverkehrswachstum führen. Daher sind die Erwartungen bezüglich der zukünftigen SAF-Preise sowohl für die Luftverkehrswirtschaft als auch für Regulierungsbehörden von großem Interesse.

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an techno-ökonomischen Studien zur SAF-Produktion durchgeführt, in denen Einsatzstoffe, Umwandlungsprozesse und die damit verbundenen Produktionskosten beschrieben wurden. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der SAF-Produktionskosten basierend auf einer aktuellen Meta-Analyse des DLR von Braun et al. (2024).² Es werden die jeweiligen Produktionskosten nach SAF-Herstellungswegen aufgeführt.

Die Unterschiede in den Produktionskosten von SAF lassen sich auf mehrere Faktoren zurückführen. Techno-ökonomische Studien konzentrieren sich in der Regel auf die technische Dimension der SAF-Produktion und treffen dabei Annahmen über Rohstoffpreise, Kapitalkosten und Prozesseffizienz, um Produktionskosten zu ermitteln. Bei relativ weit fortgeschrittenen Herstellungspfaden ist die technologische Unsicherheit hinsichtlich der Prozesseffizienz (zum Beispiel die Menge an Endprodukten im Verhältnis zu eingesetzten Rohstoffen) gering. Die Annahmen zu den Rohstoffpreisen spielen jedoch eine wesentliche Rolle bei der Preisgestaltung von SAF. Bei PtL-Kraftstoffen bestimmen die Strompreise maßgeblich die Produktionskosten (Meurer et al. 2024). Die Annahmen zu den Strompreisen variieren jedoch in den verschiedenen Studien und beeinflussen somit die

² Insgesamt wurden bei der Meta-Analyse 230 Beobachtungen zu Produktionskosten einbezogen. Um die Vergleichbarkeit zu verbessern, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Jahre und Währungen auf USD₂₀₂₀ normalisiert, wo-

bei der durchschnittliche Wechselkurs des Basisjahres jeder Studie und der Erzeugerpreisindex der OECD verwendet wurden. Siehe Braun et al. 2024.



Anmerkung: Zum Vergleich wird ein durchschnittlicher Preis für eine Tonne fossiles Kerosin (Durchschnitt 2010 – 2021) von 690 USD₂₀₂₀ angenommen. **HEFA**: hydro-processed esters and fatty acids, **AtJ**: Alcohol-to-Jet, **FT**: Fischer-Tropsch, **DCSH/ HFS-SIP**: hydroprocessed fermented sugars to synthetic Isoparaffin, **APR**: Aqueous phase reforming, **CHJ**: catalytic hydrothermolysis, **PYR**: Pyrolysis, **PtL**: Power-to-liquid, **StL**: Sun/Solar-to-liquid.

Abbildung 3: Box-Plot mit Spannen der SAF-Produktionskosten. Quelle: Braun, Grimme und Oesingmann (2024).

Modellergebnisse erheblich. Die angenommenen Anlagengrößen und Kapazitäten wirken sich aufgrund von Skaleneffekten ebenfalls direkt auf die Produktionskosten aus. Die untersuchten Studien zeigen deutlich, dass mit Steigerung der Produktionskapazitäten der Bioraffinerien die Kosten pro Produktionseinheit sinken.

Angesichts der Vielzahl unterschiedlicher Ausgangsstoffe und Produktionswege ist mit einer größeren Zahl von SAF-Anbietern zu rechnen, was zu einem Preiswettbewerb auf dem SAF-Markt führen dürfte. Ein globaler Markt für Ausgangsstoffe, Zwischenprodukte und SAF wäre aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhaft. Allerdings könnten unterschiedliche Nachhaltigkeitskriterien den globalen Handel behindern. Beispielsweise sind SAF, die in Nordamerika aus Mais oder Zucker hergestellt werden, nach der EU-ReFuel-Verordnung beziehungsweise der RED III nicht zugelassen, da landwirtschaftliche Produkte für Lebens- und Fut-

termittel nicht akzeptiert werden. Verpflichtende Beimischungsquoten werden dazu führen, dass die Nachfrage nach SAF unabhängig von den SAF-Produktionskosten steigt. Wenn die Hersteller nicht in der Lage sind, das SAF-Angebot in ausreichendem Maße zu erhöhen, könnte dies die SAF-Preise deutlich über die Produktionskosten treiben. Darüber hinaus ist die Bereitstellung einer ausreichenden Menge an Strom aus erneuerbaren Quellen eine große Herausforderung bei der Skalierung der PtL-Produktion. Die für die PtL-Produktion genutzte Stromkapazität sollte zusätzlich zur bestehenden Kapazität zur Verfügung stehen, um nicht in Konkurrenz zu anderen Sektoren zu treten. Zudem sollten Standorte zur Strom- oder sogar SAF-Produktion bevorzugt werden, an denen eine effiziente Kombination verschiedener erneuerbarer Energiequellen (wie Photovoltaik und Wind) möglich ist, um die schwankende Stromerzeugung auszugleichen.

3. Rechtlicher Rahmen und Anreizsysteme

Aufgrund der hohen Produktionskosten für SAF und der Wettbewerbsintensität im Luftverkehr ist nicht zu erwarten, dass die Luftfahrzeugbetreiber aus rein ökologischen Gründen den Anteil der SAF-Nutzung signifikant erhöhen werden. Aus diesem Grund haben sowohl einzelne Staaten als auch die EU eine regulatorische Notwendigkeit gesehen, den Einsatz von SAF mittels einer Quotenlösung vorzuschreiben.

Um Wettbewerbsverzerrungen und Nachteile für europäische Fluggesellschaften im internationalen Wettbewerb zu verhindern, haben die Europäische Kommission, das Europäische Parlament und der Rat im Jahr 2023 eine verbindliche Beimischungsquote für nahezu alle von der EU abgehenden Flüge eingeführt (European Parliament and Council of the European Union 18.10.2023).

Die Verordnung 2023/2405 enthält dabei die folgenden Kernelemente:

Die **Flugkraftstoffanbieter** müssen den Luftfahrzeugbetreibern an allen EU-Flughäfen mit mehr als 800.000 Passagieren oder 100.000 Tonnen Fracht Flugkraftstoffe mit einem über die Zeit steigenden Anteil von SAF zur Verfügung stellen. Ab 2025 müssen zwei Prozent des Flugkraftstoffs aus SAF bestehen. Dieser Anteil steigt auf 20 Prozent im Jahr 2035 und auf 70 Prozent im Jahr 2050. Die Beimischungsquote enthält eine Unterquote für SAF aus nicht-biogenen Ausgangsstoffen (offizielle Bezeichnung „RFNBO“ – renewable fuels of non-biological origin, im Wesentlichen PtL-Kraftstoffe), da diese Produktionsverfahren aufgrund der höheren Kosten und des vergleichsweise geringen Entwicklungsstandes einen zusätzlichen Anreiz zur Weiterentwicklung benötigen. Die vorgeschriebene zeitliche Entwicklung der Beimischungsquoten für biogene und nicht-biogene SAF ist in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

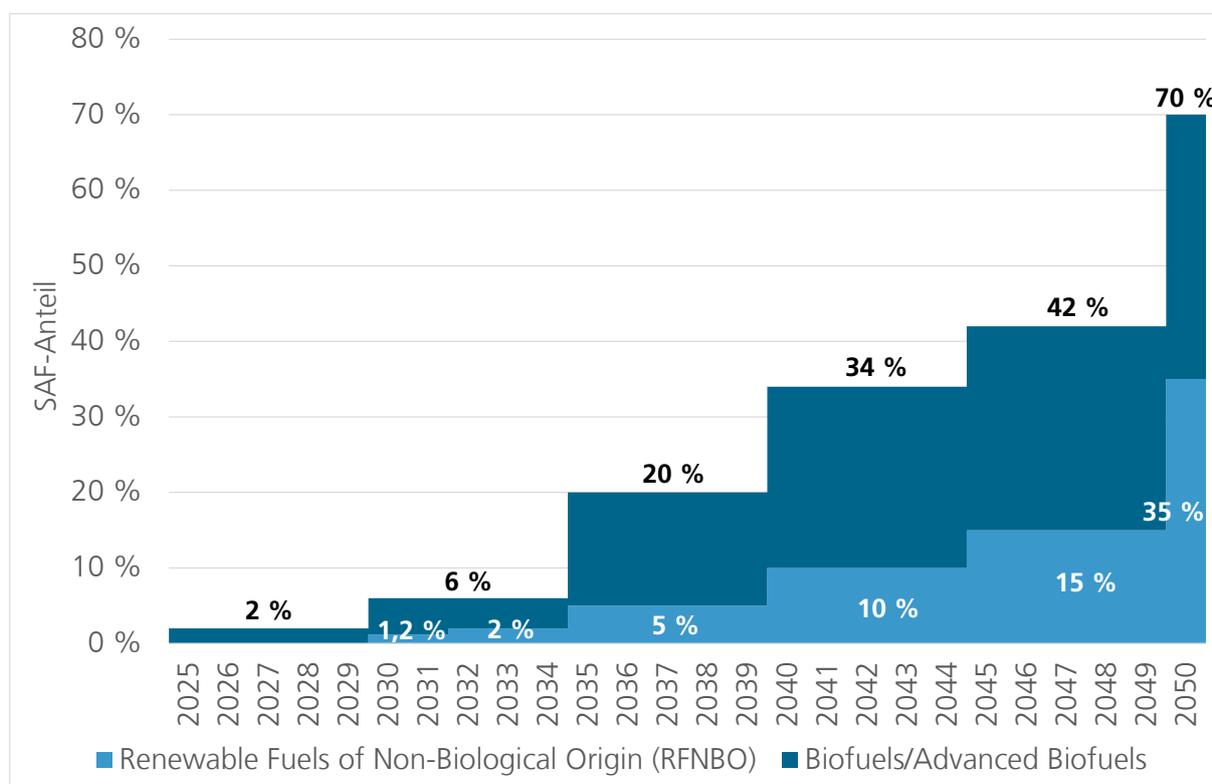


Abbildung 4: SAF-Quote der EU-Verordnung 2024/2405 im Zeitablauf von 2025 bis 2050. Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der EU-Verordnung 2024/2405 (European Parliament and Council of the European Union 18.10.2023)

Die **Luftfahrzeugbetreiber** sind verpflichtet, mindestens 90 Prozent des benötigten Jahresbedarfs an Flugkraftstoff am jeweiligen Startflughafen in der EU zu tanken. Damit soll die Umgehung der Beimischungsverpflichtung durch „Tankering“ verhindert werden. Beim Tankering nehmen die Flugzeugbetreiber mehr Treibstoff an Bord als für den unmittelbar folgenden Flug benötigt wird, um zum Beispiel einen Preisvorteil für Kerosin am Startflughafen auszunutzen und den zu viel getankten Treibstoff auf den nachfolgenden Flügen zu verwenden. Diese Praxis ist bereits heute aufgrund von Treibstoffpreisunterschieden weit verbreitet (EUROCONTROL 2019) und würde durch den höheren Preis von SAF aufgrund der Beimischungspflicht deutlich gefördert. Tankering führt zu höheren Emissionen (aufgrund der höheren Startmasse durch den zusätzlich an Bord genommenen Treibstoff) und zu Wettbewerbsnachteilen für Fluggesellschaften, die überwiegend oder ausschließlich in der EU operieren gegenüber solchen, die außerhalb der EU Tankering betreiben können. Zur Umsetzung der Betankungsverpflichtung werden den Luftfahrzeugbetreibern eine Reihe von Monitoring- und Reportingverpflichtungen auferlegt.

Im Gegensatz zur EU wird in den USA ein anderer regulatorischer Ansatz verfolgt. Anstelle einer Beimischungsverpflichtung wurde mit dem Inflation Reduction Act ein Anreizsystem in Form von Steuergutschriften für die Kraftstoffhersteller eingeführt. Die Hersteller erhalten bis zu 1,25 US-Dollar Steuergutschrift pro Gallone (3,79 Liter) SAF, sofern der alternative Flugtreibstoff eine Reduktion der Lebenszyklusemissionen von mindestens 50 Prozent gegenüber fossilem Kerosin erreicht (Internal Revenue Service 2023). Eine Verpflichtung zur Nutzung von SAF besteht nicht. Jedoch wird durch die steuerliche Förderung versucht, die produzierte SAF-Menge bis zum Jahr 2030 auf 3 Milliarden Gallonen (11,4 Milliarden Liter) und bis zum Jahr 2050 auf 35 Milliarden Gallonen (132,5 Milliarden Liter) zu steigern (U.S. Department of Energy 2022). Ähnlich würde eine Erhöhung der CO₂-Preise auf die Marktchancen von SAF wirken (vgl. Deng et al. 2023). Bei CO₂-Preisen von über 200 Euro pro Tonne CO₂ könnten sich in

Abhängigkeit vom Kerosinpreis bereits realistische Marktchancen für SAF ergeben.

Andere Staaten weltweit folgen eher dem Beispiel der EU und setzen auf verbindliche Beimischungsquoten. Japan plant für Mitte 2024 die Verabschiedung einer SAF-Quote von zehn Prozent für das Jahr 2030 (ICF 2024). Ein ähnlicher Plan wird in Singapur verfolgt. Dort soll die SAF-Quote auf ein Prozent im Jahr 2026 und auf drei bis fünf Prozent im Jahr 2030 festgelegt werden. Zur Finanzierung soll eine Ticketsteuer eingeführt werden (Barrington und Go 2024). Auch in Indien ist eine SAF-Quote von einem Prozent in 2027 und zwei Prozent in 2028 geplant (S&P Global 2023).

4. Handlungsempfehlungen

Der Einsatz von SAF ist eine wirksame Maßnahme, um den Dekarbonisierungsprozess in der Luftfahrt voranzutreiben. Aufgrund der erheblichen Herausforderungen aus technologischer und ökonomischer Sicht ergeben sich im aktuellen umwelt- und luftverkehrspolitischen Kontext die folgenden Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Nutzung von SAF:

Handlungsempfehlung 1: Die Luftverkehrswirtschaft und die Treibstoffhersteller sind bei der Senkung der hohen Kosten der SAF-Produktion und deren großtechnischen Skalierung zu unterstützen

Die bisher hohen Produktionskosten stellen ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz von SAF dar. Forschungsanstrengungen zur großtechnischen Skalierung von Produktionsverfahren für SAF erscheinen daher dringend erforderlich. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen, die in der EU für die SAF-Produktion zugelassen sind, ist die Förderung alternativer Verfahren mit einer breiten Palette unterschiedlicher Ausgangsstoffe für die SAF-Produktion unerlässlich. Deutschland ist mit der Förderung der Technologie-Plattform PtL (TPP) des DLR in Leuna mit einem Fördervolumen von 130 Millionen Euro auf einem guten Weg, erheb-

liche Fortschritte bei der Skalierung der PtL-Produktion zu erzielen. Obwohl die Erzeugung von SAF in der Zukunft aufgrund der im Vergleich zu anderen Standorten (wie beispielsweise Australien, Chile, Nordafrika und dem Mittleren Osten) höheren Preise für Elektrizität aus erneuerbaren Quellen voraussichtlich nicht in Deutschland stattfinden wird, ist es dennoch von entscheidender Bedeutung, die Technologieführerschaft bei Patenten, Prozessdesign und Anlagenbau anzustreben.

Langfristig sollte jedoch im Sektor der SAF-Produktion und -Nutzung das Verursacherprinzip umgesetzt werden. Die Dekarbonisierung des Luftverkehrs sollte mittel- und langfristig durch den Sektor selbst beziehungsweise durch dessen Nutzer und nicht durch den Steuerzahler getragen werden.

Handlungsempfehlung 2: Unsicherheiten bei der Entwicklung von SAF-Märkten sind zu verringern

Unsicherheiten hinsichtlich des regulatorischen Rahmens und der technologischen Weiterentwicklung haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass private Investitionen in SAF-Produktionsanlagen nicht oder nur in sehr geringem Umfang getätigt wurden. Dies gilt insbesondere für noch nicht vollständig ausgereifte Konversionspfade. Selbst bei den langfristigen Abnahmeverpflichtungen durch die Beimischungsquote der Verordnung 2023/2405 der Europäischen Union (EU) besteht die Unsicherheit, dass frühe Produktionsanlagen langfristig nicht zu wettbewerbsfähigen Preisen produzieren können. Investoren sehen darin einen First-Mover-Nachteil und investieren nicht in die SAF-Produktion. Staatliche Garantien im Rahmen von festen Abnahmepreisen oder Contracts for Difference, bei denen Verluste getragen, aber auch Gewinne abgeschöpft werden, könnten dazu beitragen, mehr Privatkapital in den SAF-Markt zu bringen. Auch ein festgelegter Preispfad für eine CO₂-Bepreisung kann die Marktunsicherheiten für SAF vermindern.

Handlungsempfehlung 3: Wettbewerbsnachteile durch Carbon Leakage sind zu vermeiden

Insbesondere europäische Fluggesellschaften und ihre Branchenverbände sehen die Gefahr von Carbon Leakage durch die Beimischungspflichten der EU-Verordnung 2023/2405. Befürchtet werden Kostennachteile für Langstreckenflüge von EU-Flughäfen gegenüber solchen Verbindungen mit Anschlussflügen von Drehkreuzen (Hubs) außerhalb der EU, die keiner Beimischungspflicht unterliegen. Zwar sind auch andere Staaten im Prozess, Beimischungsverpflichtungen für SAF einzuführen und auch die Luftverkehrswirtschaft hat sich im Rahmen der IATA zur freiwilligen Nutzung von SAF verpflichtet, um das Ziel der Netto-Null-CO₂-Emissionen zu erreichen. Langfristig erscheint jedoch ein Monitoring und eine ökonomische Bewertung der Auswirkungen möglicher Wettbewerbsnachteile durch Carbon Leakage notwendig, um die Einhaltung dieser Verpflichtungen zu überwachen. Gegebenenfalls sind Maßnahmen zu entwickeln, um Wettbewerbsnachteile für europäische Fluggesellschaften auszugleichen.

Handlungsempfehlung 4: Internationale Kooperationen zu Nachhaltigkeitskriterien, Produktion und Einsatz von SAF fördern

Internationale Kooperationen sind anzustreben, um möglichst harmonisierte Wettbewerbsbedingungen für Beimischungsquoten, Subventionen und Nachhaltigkeitskriterien für SAF zu schaffen. Aus heutiger Sicht erscheint es eindeutig, dass die EU ihren zukünftigen Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten für die Herstellung von SAF (zum Beispiel Wasserstoff) nicht allein decken kann. Ein großer Teil wird voraussichtlich importiert werden. Damit die Rohstoffe/Zwischenprodukte den Nachhaltigkeitskriterien der EU entsprechen, ist eine Harmonisierung der Regelungen auf möglichst globaler Ebene anzustreben. Dies ermöglicht langfristig die Nutzung besonders kostengünstiger Standorte zur SAF-Produktion und kann wesentlich dazu beitragen, die Kosten für SAF zu senken.

Handlungsempfehlung 5: Die Vermeidung von Nicht-CO₂-Effekten durch den Einsatz von SAF ist zu optimieren

Insbesondere die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs sind in den letzten Jahren in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Der derzeitige regulatorische Rahmen eines ungerichteten Einsatzes von SAF auf allen Flügen ist aus Sicht der Vermeidung von Nicht-CO₂-Effekten keine optimale Lösung. Ein deutlich größerer positiver Klimaeffekt würde durch den gezielten Einsatz von SAF auf Flügen mit besonders großen Nicht-CO₂-Effekten erzielt. Dies sind im Wesentlichen Langstreckenflüge, die nachts stattfinden (Teoh et al. 2022). Eine Anpassung des regulatorischen Rahmens könnte dazu beitragen, auch diese Potenziale zur Minderung der Klimawirkung zu realisieren. Aktuell wird hierzu unter Beteiligung des DLR im EU-Projekt ALIGHT (<https://alight-aviation.eu/>) am Beispiel des Flughafens Kopenhagen eine detaillierte Studie zu den Kosten und Nutzen eines gezielten Einsatzes von SAF auf Flügen mit besonders hohen Nicht-CO₂-Effekten durchgeführt.

die eine möglichst breite internationale Anwendung finden sollten.

Handlungsempfehlung 6: Marktbasierte Maßnahmen und konsequente CO₂-Bepreisung sind weiterzuentwickeln

Aufgrund der potenziell hohen Investitions- und Produktionskosten für SAF ist eine kritische, wohlfahrtsorientierte volkswirtschaftliche Analyse der SAF-Regularien unerlässlich. Dazu gehört auch das Aufzeigen möglicher Alternativen mit geringeren volkswirtschaftlichen Kosten, einschließlich einer einheitlichen und umfassenden Bepreisung der CO₂-Emissionen. Derzeit ist unklar, ob Kostendegressionseffekte zum Beispiel bei der Abscheidung von CO₂ aus der Umgebungsluft als Ausgangsstoff für die PtL-Produktion zu einer kosteneffizienten Vermeidung von Klimaeffekten des Luftverkehrs durch SAF-Nutzung führen werden. Die Stakeholder sollten daher kontinuierlich an der Identifizierung und Umsetzung volkswirtschaftlich effizienter Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung arbeiten. Hierzu zählen insbesondere sektorübergreifende marktbasierende Maßnahmen,

Literaturverzeichnis

ATAG (2021): Waypoint 2050. Air Transport Action Group. Geneva. Online verfügbar unter https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf, zuletzt geprüft am 10.07.2024.

Barrington, Lisa; Go, Brenda (2024): Singapore to impose green fuel levy on flights from 2026. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/sustainability/singapore-green-jet-fuel-levy-travellers-ignites-funding-debate-2024-02-19/>, zuletzt aktualisiert am 19.02.2024, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

Braun, Matthias; Grimme, Wolfgang; Oesingmann, Katrin (2024): Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. In: Journal of Air Transport Management 117, S. 102580. DOI: [10.1016/j.jairtraman.2024.102580](https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102580).

Deng, Ying; Cao, Karl-Kiên; Wetzel, Manuel; Hu, Wenxuan; Jochem, Patrick (2023): Carbon-neutral power system enabled e-kerosene production in Brazil in 2050. In: Sci Rep 13 (1), S. 21348. DOI: [10.1038/s41598-023-48559-7](https://doi.org/10.1038/s41598-023-48559-7).

EASA (2022): European Aviation Environmental Report 2022.

Efthymiou, Marina; Ryley, Tim (2022): Governance and policy developments for sustainable aviation fuels. In: Sustainable Alternatives for Aviation Fuels: Elsevier, S. 201–214.

Ehlers, Thorsten; Kölker, Katrin; Lütjens, Klaus (2022): Auswirkungen der Fit-for-55-Instrumente auf die Preise in der Luftfahrt. In: Wirtschaftsdienst 102 (10), S. 801–880.

Enderle, Benedict; Rauch, Bastian; Hall, Clemens; Bauder, Uwe (2022): A proposed Digital Twin concept for the smart utilization of Sustainable Aviation Fuels. In: AIAA SCITECH 2022 Forum. AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego, CA &

Virtual. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

EUROCONTROL (2019): Fuel Tankering: Economic benefits and environmental impact (Aviation Intelligence Unit - Think Paper, 1). Online verfügbar unter <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-01/eurocontrol-think-paper-1-fuel-tankering.pdf>, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union (2023): Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates. Hg. v. Europäische Union.

European Parliament and Council of the European Union (18.10.2023): Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport. ReFuelEU Aviation. In: Official Journal of the European Union. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302405&qid=1704711516091, zuletzt geprüft am 8. Januar 2024.

García-Contreras, Reyes; Soriano, José A.; Gómez, Arántzazu; Fernández-Yáñez, Pablo (2022): Biojet fuels and emissions. In: Sustainable Alternatives for Aviation Fuels: Elsevier, S. 177–199.

IATA (2021): 2050: Net-zero carbon emissions. Online verfügbar unter <https://airlines.iata.org/analysis/2050-net-zero-carbon-emissions>, zuletzt aktualisiert am 01.12.2021, zuletzt geprüft am 24.02.2023.

IATA (2022): Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification (Fact Sheet 2).

ICAO (2022a): CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels (ICAO document).

ICAO (2022b): CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels (ICAO document).

ICAO (2023): ICAO Global Framework for SAF, LCAF and other Aviation Cleaner Energies. Dubai. Online verfügbar unter https://www.icao.int/Meetings/CAAF3/Documents/ICAO%20Global%20Framework%20on%20Aviation%20Cleaner%20Energies_24Nov2023.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

ICF (2024): Charting the path: SAF Ecosystem in Japan. Online verfügbar unter https://www.icf.com/-/media/files/icf/insight-download/aviation/japan_saf_ecosystem_es_web.pdf?rev=c91cdcc1a424001a7d0bf5bdb1ac136, zuletzt aktualisiert am 09.04.2024, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

IEA (2021): Progress in Commercialization of Biojet/Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges.

Internal Revenue Service (2023): Sustainable Aviation Fuel Credit. Online verfügbar unter <https://www.irs.gov/credits-deductions/businesses/sustainable-aviation-fuel-credit>, zuletzt aktualisiert am 15.12.2023, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

Karim, Ahasanul; Islam, M. Amirul; Nayeem, Abdullah; Yousuf, Abu (2022): Conversion pathways for biomass-derived aviation fuels. In: Sustainable Alternatives for Aviation Fuels: Elsevier, S. 1–25.

Lee, D. S.; Fahey, D. W.; Skowron, A.; Allen, M. R.; Burkhardt, U.; Chen, Q. et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: Atmospheric environment 244, S. 117834. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2020.117834](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834).

Märkl, Raphael Satoru; Voigt, Christiane; Sauer, Daniel; Dischl, Rebecca Katharina; Kaufmann, Stefan; Harlaß, Theresa et al. (2024): Powering aircraft with 100 % sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails. In: Atmos. Chem. Phys. 24 (6), S. 3813–3837. DOI: [10.5194/acp-24-3813-2024](https://doi.org/10.5194/acp-24-3813-2024).

Meurer, Andreas; Jochem, Patrick; Kern, Jürgen (2024): Decentralised production of e-fuels for aviation: implications and trade-offs of a targeted small-scale production of sustainable aviation fuel based on Fischer–Tropsch synthesis. In: Sustainable Energy Fuels 8 (4), S. 752–765. DOI: [10.1039/d3se01156a](https://doi.org/10.1039/d3se01156a).

Netherlands Aerospace Centre (NLR) (2022): Novel propulsion and alternative fuels for aviation towards 2050.

Oesingmann, Katrin (2023): The Economic Impacts of EU Climate Policies on Intra-European Aviation. In: Ender Demir, Mehmet Hüseyin Bilgin, Hakan Danis und Fabrizio D'Ascenzo (Hg.): Eurasian Business and Economics Perspectives, Bd. 26. Cham: Springer Nature Switzerland (Eurasian Studies in Business and Economics), S. 433–452.

Pasa, Vânia Marcia Duarte; Scaldadaferri, Cristiane Almeida; dos Santos Oliveira, Henrique (2022): Main feedstock for sustainable alternative fuels for aviation. In: Sustainable Alternatives for Aviation Fuels: Elsevier, S. 69–102.

S&P Global (2023): India announces SAF targets, biogas blending mandates. Online verfügbar unter <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/112723-india-announces-saf-targets-biogas-blending-mandates#:~:text=India%20has%20feedstock%20for%20potential,at%20%241545.07%2Fmt%20on%20Nov.>, zuletzt aktualisiert am 20.11.2023, zuletzt geprüft am 09.07.2024.

Teoh, Roger; Schumann, Ulrich; Voigt, Christiane; Schripp, Tobias; Shapiro, Marc; Engberg, Zebediah et al. (2022): Targeted Use of Sustainable Aviation Fuel to Maximize Climate Benefits. In: Environmental science & technology 56 (23), S. 17246–17255. DOI: [10.1021/acs.est.2c05781](https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05781).

Tröster, Anja (2024): Vielfalt im Tank - Sustainable Aviation Fuels (SAF) als Alternative zu fossilen Flugkraftstoffen. Hg. v. DLR (DLRmagazin, 175).

U.S. Department of Energy (2022): SAF Grand Challenge Roadmap. Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel. Online verfügbar unter <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/beto-saf-gc-roadmap-report-sept-2022.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2024.

Vela-García, Nicolas; Bolonio, David; García-Martínez, María-Jesús; Ortega, Marcelo F.; Canoira, Laureano (2022): Thermochemical conversion of agricultural waste to biojet fuel. In: Sustainable Alternatives for Aviation Fuels: Elsevier, S. 27–48.

Voigt, Christiane; Kleine, Jonas; Sauer, Daniel; Moore, Richard H.; Bräuer, Tiziana; Le Clercq, Patrick et al. (2021): Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness. In: Commun Earth Environ 2 (1). DOI: [10.1038/s43247-021-00174-y](https://doi.org/10.1038/s43247-021-00174-y).

Zhang, Libing; Butler, Terri L.; Yang*, Bin (2020): Recent trends, opportunities and challenges of sustainable aviation fuel. In: Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries, S. 85–110.

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das deutsche Forschungs- und Technologiezentrum für Luft- und Raumfahrt. In seinen Kerngebieten entwickelt das DLR Technologien für Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr, sowie Sicherheits- und Verteidigungsforschung. Ein breites Spektrum an Ergebnissen und Innovationen bringen Nutzen für Industrie und Wirtschaft, Behörden und Verwaltung sowie für öffentliche Stakeholder. Durch einen intensiven Wissensaustausch und gezielten Technologietransfer stellt sich das DLR seiner Verantwortung gegenüber der Gesellschaft. Dazu wird es mit Mitteln des Bundes gefördert. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger arbeiten als Managementeinrichtungen für Forschungs- und Industrieförderung.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 51 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für die daraus resultierenden Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 11.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall. Wir entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft und tragen durch den Technologietransfer dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

Impressum

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Verkehrsforschung
Rudower Chaussee 2, 12489 Berlin
www.dlr.de/vf

Autoren:

Wolfgang Grimme
Katrin Oesingmann
Institut für Luftverkehr
Linder Höhe, 51147 Köln

Stand: Januar 2025

DLR.de

Bilder DLR (CC-BY 3.0),
sofern nicht anders angegeben

<https://elib.dlr.de/215867/>



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt