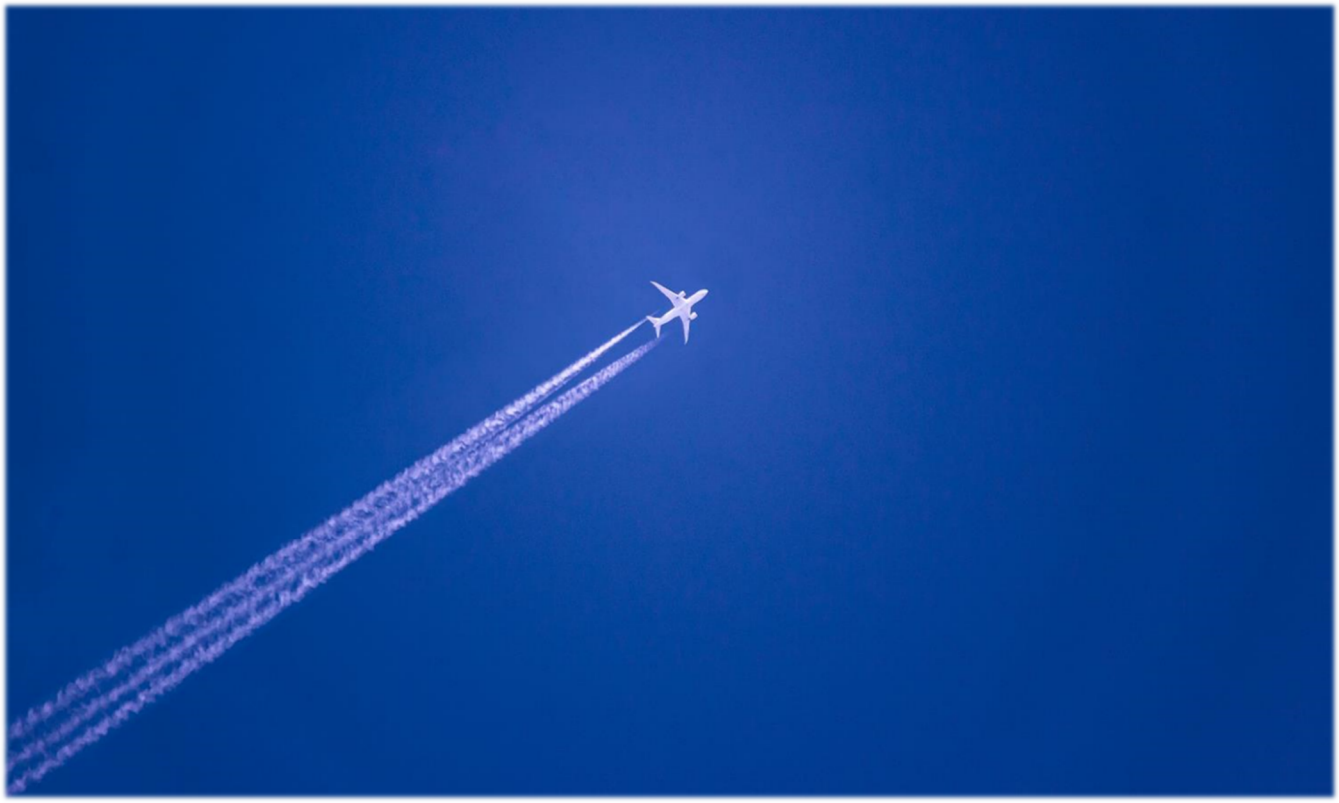
aireg Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.



Nachhaltige Flugkraftstoffe

Status, Optionen, Handlungsnotwendigkeiten

aireg Roadmap zur Markteinführung von Sustainable Aviation Fuels

Impressum

Nachhaltige Flugkraftstoffe. Status, Optionen, Handlungsnotwendigkeiten
aireg Roadmap zur Markteinführung von Sustainable Aviation Fuels

aireg – Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.
Bundesratufer 10
10555 Berlin
Telefon: +49 (0) 178 184 30 41
E-Mail: kontakt@aireg.de
Website: www.aireg.de

ERSTELLT IN ZUSAMMENARBEIT MIT DER

Technischen Universität Hamburg (TUHH)
Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE)
Eißendorfer Str. 40
21073 Hamburg
www.tuhh.de/iue

Autoren: Nils Bullerdiek, Ulf Neuling, Martin Kaltschmitt

Stand: Dezember 2020

HERAUSGEBER

aireg e. V.; Melanie Form, Mitglied des Vorstands und Leiterin der Geschäftsstelle (verantwortlich im Sinne des Presserechts).

© 2020, aireg e. V.

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die Luftfahrt steht mit Blick auf Klima- und Umweltschutz vor gewaltigen Herausforderungen. Insbesondere nachhaltige Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) haben großes Potenzial, zum Haupttreiber für die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Luftverkehr zu werden. Dazu bedarf es gemeinsamer Anstrengungen, um geeignete Fördermaßnahmen, eingebettet in langfristig verlässliche Rahmenbedingungen, zu entwickeln und zu implementieren. Die Entwicklung industrieller Produktionsanlagen für SAF zu unterstützen und die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit von SAF anzustreben ist dafür wesentlich.

SAF auf Basis biogener Quellen (z. B. Pflanzenöle, Altöle und -fette, Siedlungs-/Industrieabfälle) sind heute nur in geringen Mengen verfügbar: lediglich 0,1 % des globalen jährlichen Kerosinbedarfs wird daraus gedeckt. Mit einem erwarteten substanziellen Produktionsanstieg auf globaler Ebene in 2 bis 3 Jahren geht die Erwartung einher, dass sich der Preis für SAF bei einem Faktor 2 über dem fossilen Kerosins einpendeln könnte. Jüngst haben führende Luftfahrtkonzerne und ATAG nach ausführlicher Diskussion mit Mineralölkonzernen gegenüber der ICAO zu erkennen gegeben, dass das in 2050 weltweit benötigte Kerosin zu 100 % aus SAF gedeckt werden könnte.

Limitierte Potenziale biogener Rohstoffe werden die Bedeutung biogener SAF vermutlich langfristig begrenzen. Deshalb müssen heute auch Produktionsverfahren gefördert werden, mit denen SAF etwa auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energien, Wasser und CO_2 über die sogenannte Power-to-Liquid (PtL) Route hergestellt werden können. Dieser Technologiepfad, der die größten Klimagas-Emissionseinsparungen verspricht, befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium und muss – parallel zur Markteinführung biogener SAF – zu einer großtechnisch und industriell verfügbaren und damit kostengünstigen Technologie auf- und ausgebaut werden. Mitglieder von aireg haben Vorschläge erarbeitet, um beim Aufbau semi-industrieller Demonstrationsanlagen sowie industrieller Produktionsanlagen in Deutschland, aber auch an ausländischen Standorten, wo günstigere Bedingungen für die Erzeugung grünen Wasserstoffs vorliegen, mitzuwirken. Nicht zuletzt ist mit der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung der notwendige Förderrahmen geschaffen. Es bedarf nun der zügigen Umsetzung durch die entsprechenden Ressorts.

Mein großer Dank für die Erstellung dieser Roadmap, die eine Gesamtschau heutiger und zukünftiger Rohstoff- und Technologieoptionen sowie Hemmnisse und Möglichkeiten für die SAF-Markteinführung bietet, gilt insbesondere den Autoren und allen aireg-Mitgliedern, die daran mitgewirkt haben.

Siegfried Knecht
Vorsitzender des Vorstands, aireg

Grußwort

Liebe Leserinnen und Leser!

Nachhaltige Energieträger aus erneuerbaren Energiequellen und Rohstoffen sind Eckpfeiler der Energiewende in Deutschland, Europa und weltweit. Sie sind Voraussetzung für Transformationen in vielen Industrie- und Wirtschaftszweigen. Grüner Wasserstoff nimmt hierbei eine Schlüsselrolle ein, da wir klimaneutrale Alternativen zu unseren derzeit eingesetzten fossilen Energieträgern brauchen.

Mit der Nationalen Wasserstoffstrategie hat die Bundesregierung einen Aktionsplan verabschiedet, mit dem die Erzeugung und der Einsatz von nachhaltigem Wasserstoff und seiner Folgeprodukte (Power-to-X) verbessert, neue Wertschöpfungsketten für die deutsche Wirtschaft geschaffen, die notwendige Transportinfrastruktur auf- und ausgebaut, die Forschungsförderung fokussiert und die internationale energiepolitische Zusammenarbeit gestärkt werden sollen. Diese Strategie gilt es nun mit Leben zu füllen.

Wasserstofftechnologien und darauf aufbauende alternative Energieträger sind integraler Bestandteil der Energiewende. Einige Anwendungsbereiche, zum Beispiel der Luft- und Seeverkehr, die weltweit existierenden Bestandsflotten sowie ausgewählte Industrien mit prozessbedingten Emissionen mit hohem Energiebedarf, werden sich auch langfristig nicht ausschließlich oder nur mit großem Aufwand direkt mit Strom versorgen lassen. Insbesondere in der Luftfahrt, bei mobilen Systemen für die Landes- und Bündnisverteidigung und in der Seeschifffahrt sind viele Routen und Anwendungen nicht rein elektrisch darstellbar. Deshalb müssen die derzeit eingesetzten fossilen Einsatzstoffe und Energieträger schnellstmöglich durch Alternativen ersetzt werden, die auf erneuerbarem Strom basieren, wie z. B. durch PtX-Verfahren hergestelltes nachhaltiges Kerosin.

Als Mitglied im Beirat von aireg unterstütze ich die engagierte Arbeit der aireg-Mitglieder auf dem Weg hin zu einer klimaneutralen Luftfahrt. Dabei freue ich mich gerade auch über die mutigen Ansätze hin zu Wasserstoff- und vollelektrischen Flugzeugen.

Diese Roadmap ist ein wichtiger Wegweiser auf dem Weg zu diesem Ziel und eine Einladung an alle Stakeholder zur nachhaltigen Zusammenarbeit.

Norbert Barthle, MdB

Parlamentarischer Staatssekretär
beim Bundesminister für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

Inhalt

Vorwort ii

Grußwort iii

Inhalt iv

Klimaschutz im Luftverkehr 1

Luftverkehrsentwicklung 1

Internationale Klimaschutzstrategie 3

Technische Innovationen und nachhaltige Flugkraftstoffe 6

SAF – Nachhaltige Flugkraftstoffe 11

SAF-Herstellungsverfahren 15

Klimagas- und Schadstoffemissionen 19

Hemmnisse der SAF-Markteinführung 23

Hohe SAF-Herstellungskosten 23

Fehlende Förderbedingungen für SAF 25

aireg-Roadmap zur Einführung nachhaltiger Flugkraftstoffe 30

Hintergrund und Zielsetzung 30

Forschung und Entwicklung (F&E) 34

Technologische Entwicklung und Umsetzung 38

Regulatorische Maßnahmen 41

Unterstützende Maßnahmen 45

Literatur 50

aireg Mitglieder 53

Klimaschutz im Luftverkehr

Luftverkehrsentwicklung

Mit dem in den letzten Jahren kontinuierlich global gestiegenen durchschnittlichen Lebensstandard hat auch das weltweite Mobilitätsniveau stark zugenommen. Lieferketten und Warenströme wurden zunehmend globalisiert und erstrecken sich heute oftmals über mehrere Länder und Kontinente. Der Luftverkehr ist dabei das Rückgrat für eine funktionierende und immer weitergehend verflochtene Weltwirtschaft, einen zunehmenden internationalen Handel und einen intensivierten kulturellen Austausch geworden. Gleichzeitig hatte der globale Wettbewerb innerhalb der liberalisierten Luftverkehrsmärkte zur Folge, dass die relativ gesehen immer niedrigeren Ticketpreise die Nachfrage nach Flugreisen und Lufttransporten weiter erhöhte. In der Summe dieser und weiterer Einflussgrößen ist der Luftverkehr in der Vergangenheit rapide und deutlich stärker als andere Verkehrsträger gestiegen; dies gilt sowohl im Hinblick auf die beförderten Personen als auch die transportierten Güter. Beispielsweise hat sich zwischen 1980 und 2019 die Zahl der jährlich beförderten Passagiere etwa versiebenfacht (Abb. 1).

Im Vergleich zu diesem beachtlichen Wachstum der Branche ist die entsprechende Kerosinnachfrage allerdings weniger stark angestiegen. Da die Kraftstoffkosten einer Fluggesellschaft maßgeblich über ihre Wettbewerbsfähigkeit entscheiden, haben die im globalen Wettbewerb stehenden kommerziellen Fluggesellschaften daher einen permanenten Anreiz, den Kraftstoffbedarf ihrer Flugzeugflotte immer weiter zu reduzieren.

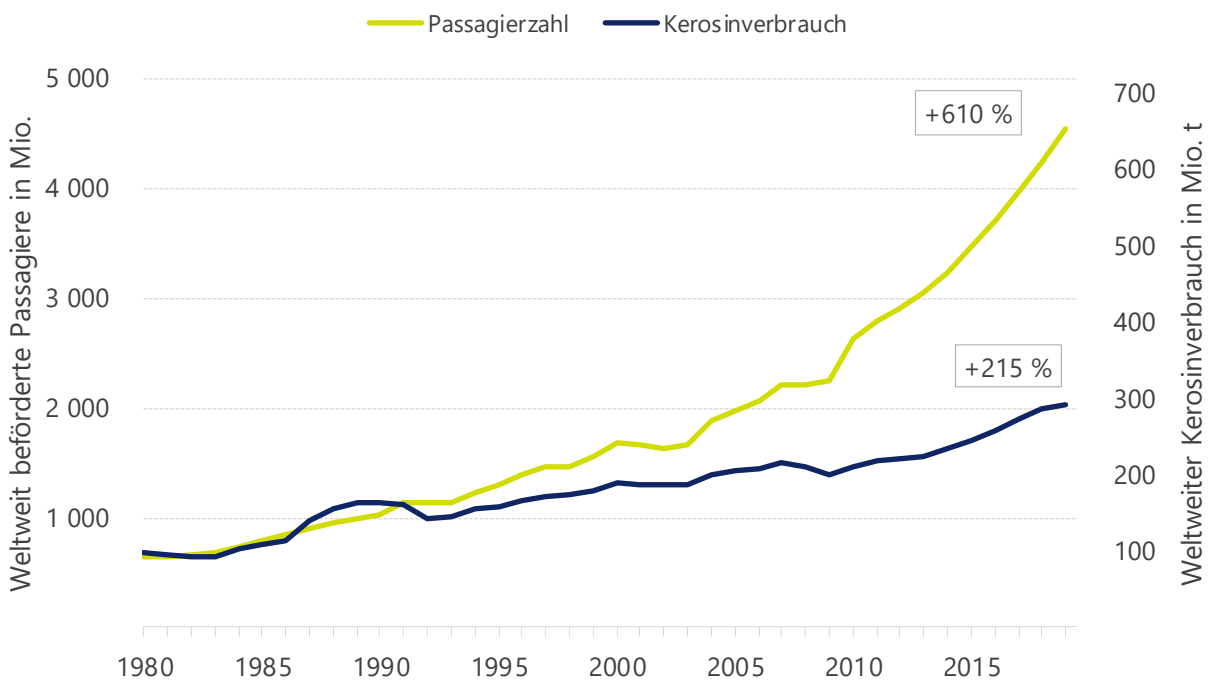


Abb. 1 Luftverkehrsentwicklung von 1980 bis 2019 (Passagierzahl und Kerosinverbrauch)
[IATA 2020b, 2020c; World Bank 2020; EIA 2020]

Dies wurde in der Vergangenheit vor allem durch technische und betriebliche Verbesserungen, wie u. a. verbrauchsärmere Triebwerke, Leichtbauoptionen und -materialien im Flugzeugbau, optimierte Flugrouten oder höhere Sitzplatzauslastungen erreicht. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch eines Flugzeuges wurde durch derartige Maßnahmen kontinuierlich reduziert und der Kerosinverbrauch vom allgemeinen Wachstum der Luftfahrtbranche entkoppelt.

Trotz der erreichten z. T. beachtlichen Effizienzsteigerungen hat sich der Kerosinverbrauch im kommerziellen Luftverkehr seit Beginn der 1990er Jahre nahezu verdreifacht. Grund dafür ist das allgemein hohe Wachstum der Branche; d. h. die erreichten spezifischen Kraftstoffreduktionen wurden durch eine deutliche wachstumsbedingte zusätzliche Kerosinnachfrage mehr als überkompensiert. Mit dem damit permanent ausgeweiteten Luftverkehrsangebot ging somit auch ein starker Anstieg der luftverkehrsbedingten Klimagasemissionen einher.

Durch die Auswirkungen der Covid-19-Pandemie erlitt der Luftverkehr seit Anfang 2020 weltweit einen unvorhersehbar drastischen Einbruch (Abb. 2). Die Folgen der Covid-19-Pandemie werden aus heutiger Sicht noch lange nachwirken und vor allem das kurz- und mittelfristige Wachstum der Branche signifikant beeinflussen. Eine Reihe an bisher kaum verlässlich quantifizierbaren Faktoren – etwa die Risikowahrnehmung von Regierungen oder Passagieren, die Quarantäneregelungen oder die Hygienevorgaben – entscheiden darüber, ob und wann der Luftverkehr sein Vorkrisenniveau potenziell erneut erreichen könnte.

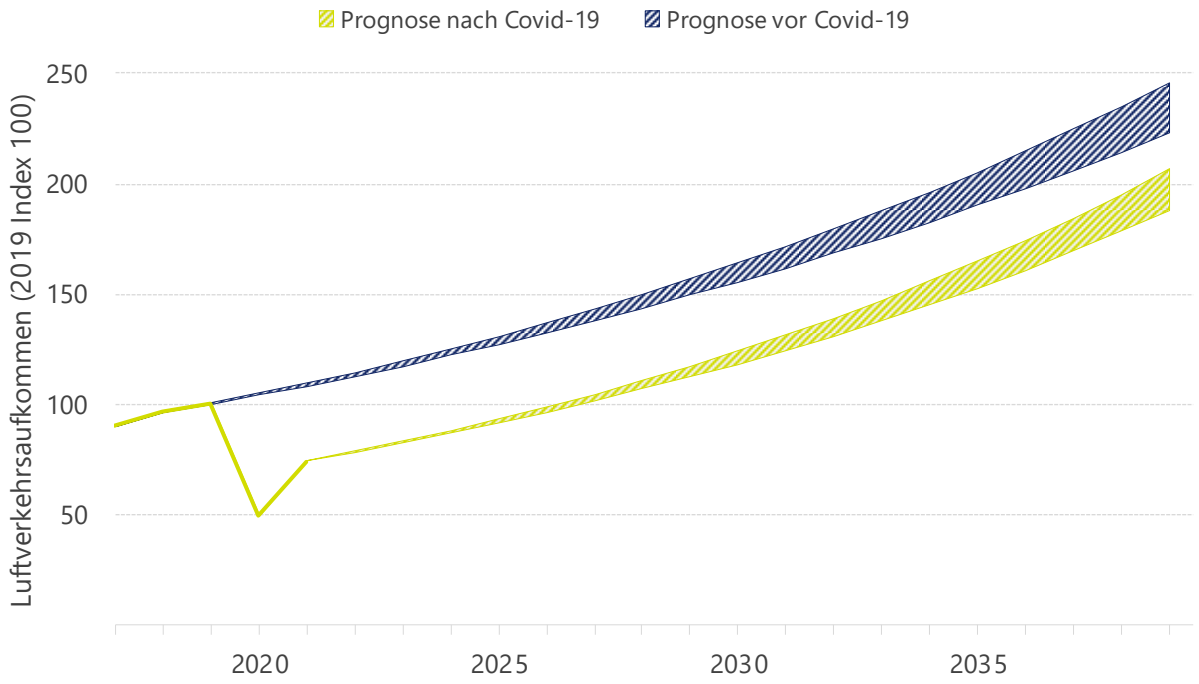


Abb. 2 Entwicklungsprognosen Luftverkehrsaufkommen 2021 bis 2039
[IATA 2020b, 2020a; ICAO 2018; Airbus 2019; Boeing 2019]

Vor allem die Zahl der Geschäftsreisenden könnte zukünftig merklich geringer ausfallen, wenn Unternehmen Bildtelefonie und Videokonferenzen zunehmend als Ersatz für persönliche Zusammenkünfte einsetzen [IEA 2020].

Auch wenn bisher die kurz- und mittelfristigen Auswirkungen der Covid-19-Pandemie auf das Luftverkehrswachstum nicht belastbar abgeschätzt werden können, gehen die nationalen und internationalen Luftverkehrsverbände weiterhin von einem langfristig ansteigenden Luftverkehrsaufkommen aus. Der Dachverband der Fluggesellschaften (International Air Transport Association, IATA) prognostiziert ein jährliches Luftverkehrswachstum von rund 3,7 % zwischen 2019 und 2039; dies entspricht in etwa einer Verdopplung in den kommenden beiden Jahrzehnten (Abb. 2) – mit dem damit verbundenen Anstieg der energiebedingten Klimagasemissionen.

Viele Optionen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und damit der Treibhausgasemissionen von Flugzeugen – vor allem wirtschaftlich umsetzbare technische Möglichkeiten – wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich ausgeschöpft. Marginale weitere Energie- und damit auch Klimagasreduktionseffizienzgewinne sind heute oftmals nur mit einem entsprechend hohen ökonomischen und zeitlichen Aufwand erreichbar. Auch wenn Fluggesellschaften durch die Covid-19-Pandemie noch stärker gefordert sind, ihre operativen Kosten zu minimieren und die vorhandenen Flotten zu modernisieren (d. h. ältere Flugzeuge ausmustern), wird ein global weiterhin deutlich ansteigendes Luftverkehrsaufkommen – und das gilt für Personen und für Fracht – zwangsläufig auch zu einem kontinuierlichen Anstieg luftverkehrsbedingter Klimagasemissionen führen, wenn nicht adäquate Gegenmaßnahmen identifiziert und in der Branche auch konsequent umgesetzt werden.

Eine klima- und umweltgerechte Ausgestaltung des Luftverkehrs ist daher unerlässlich, wenn die Möglichkeiten eines modernen Luftverkehrsangebots in einer globalisierten Gesellschaft auch weiterhin in einem zunehmenden Umfang zur Verfügung stehen sollen.

Internationale Klimaschutzstrategie

Das zwingende Erfordernis, die Klimabelastung des Luftverkehrs zu reduzieren, wurde von der Luftfahrtindustrie bereits vor vielen Jahren erkannt. Internationale Luftfahrtvertreter haben bereits 2009 eine langfristige, überstaatliche Strategie verabschiedet, mit der die CO_2-Emissionen des globalen kommerziellen Luftverkehrs bis 2050 um 50 % gegenüber 2005 reduziert werden sollen. Dieses Maßnahmenpaket – die sogenannte 4-Säulen-Strategie – umfasst ein Bündel aus technischen, operativen und infrastrukturellen Maßnahmen sowie einem marktbasierten Instrument zur Kompensation von Luftverkehrsemissionen [aireg 2012; IATA 2018]:

- **Technische Maßnahmen.** Hierunter fallen z. B. die Entwicklung von verbrauchsarmen Triebwerken, die Nutzung von Leichtbaumaterialien oder aerodynamisch verbes-

serte Flügel. Auch die Entwicklung innovativer Flugzeugtechnologien und der Einsatz nachhaltiger Flugkraftstoffe sind Teil dieser Maßnahmenkategorie.

- **Operative Maßnahmen.** Darunter werden in diesem Zusammenhang Effizienzsteigerungen im Betrieb von Flugzeugen, z. B. durch höhere (Sitzplatz-)Auslastungen, optimierte Flugzeuggrößen, kraftstoffsparende Anflugverfahren oder verbesserte Betriebsabläufe am Boden – und damit im Wesentlichen betriebliche Verbesserungsmaßnahmen – verstanden.
- **Infrastrukturelle Maßnahmen.** Hierunter fallen Verbesserungen der Luftverkehrsinfrastruktur, wie die Entwicklung bedarfsgerechter Flughäfen ohne (vermeidbare) Warteschleifen am Boden und in der Luft, modernisierte Flugverkehrsmanagement-Systeme oder fortschrittliche Luftraumkonzepte.
- **Emissionskompensation (CORSIA).** Diese Maßnahmengruppe umfasst primär das marktbasierte Klimakompensationsinstrument „CORSIA". Damit sollen CO_2-Emissionen des internationalen Luftverkehrs durch Emissionseinsparungen kompensiert werden, die außerhalb des eigentlichen Luftverkehrssektors realisiert werden (d. h. Out-of-Sector-Maßnahmen). Damit soll ab 2021 – bilanziell – ein CO_2-neutrales Wachstum des internationalen Luftverkehrs ermöglicht werden.

Da bisher kein „Königsweg" einer weitergehenden Defossilierung des Luftverkehrs erkennbar ist, sollten möglichst sämtliche Optionen dieser 4-Säulen-Strategie – und folglich die damit verbundenen Potenziale für eine klimagerechtere Ausrichtung des internationalen Luftverkehrs – sukzessive erschlossen werden. Dabei weisen aber bestimmte Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenbündel allerdings enge Grenzen und damit a priori begrenzte Potenziale auf; d. h. sie können auf absehbare Zeit nur teilweise zu weitergehenden Klimagasreduktionen im globalen Luftverkehr beitragen. Auch wurden – aufgrund des genannten ökonomischen Drucks – in der Vergangenheit technische Verbesserungen und systemische Möglichkeiten zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs in einem erheblichen Maße bereits ausgeschöpft. Die Entwicklungen weitergehender und damit mehr grundlegender technischer Verbesserungen dauern heute oft mehrere Jahre und bedingen hohe Entwicklungskosten für oftmals nur relativ geringe Effizienzgewinne. Darüber hinaus ist die Modernisierungsrate der vorhandenen Flugzugflotten eher gering; Flugzeuge weisen (sehr) lange Nutzungszeiten von 20 bis 30 Jahren auf – und z. T. noch mehr. Auch die Implementierung bestimmter technischer Verbesserungen, die im Rahmen von Umrüstungsmaßnahmen in die jeweiligen Flugzeugflotten integriert werden, erfordern teilweise entsprechend lange Zeiträume, bis sie vollumfänglich umgesetzt wurden. Die bisher am Markt verfügbaren und in den kommenden Jahren zu erwartenden (in-

krementellen) technischen Verbesserungsmaßnahmen leisten daher nur einen zeitlich stark verzögerten Beitrag zum Klimaschutz des kommerziellen Luftverkehrs – und das häufig nur in einem teils begrenztem Umfang.

Analog zu derartigen technischen Verbesserungen erfordern auch operative und infrastrukturelle Maßnahmen oft hohe Entwicklungsaufwände bei vergleichsweise geringen Klimagaseinsparungen (d. h. hohe spezifische Klimagasreduktionskosten bei gleichzeitig herausfordernder Umsetzung). Hier werden zwar vielfältige und z. T. auch sehr innovative Ansätze verfolgt, insgesamt aber ist ihr Beitrag zur Reduktion von Klimagasemissionen aus heutiger Sicht begrenzt; daran dürfte sich entsprechend des derzeitigen Kenntnisstandes auch in den kommenden Jahren kaum etwas ändern. Operative und infrastrukturelle Maßnahmen tragen daher auch im Rahmen der 4-Säulen-Strategie nur in einem (sehr) begrenzten Umfang zur Zielerreichung bei.

Im Rahmen von CORSIA können kommerzielle Fluggesellschaften die Klimagasemissionen, die eine definierte Obergrenze überschreiten, kompensieren. Diese Obergrenze sollte ursprünglich dem durchschnittlichen Emissionsniveau der Jahre 2019 und 2020 entsprechen; derzeit bezieht sie sich aufgrund des Einflusses der Covid-19-Pandemie zunächst aber nur auf das Jahr 2019 [ICAO 2020]. Im Rahmen dieses Kompensationsinstruments werden die Klimagasemissionen durch den Zukauf von Zertifikaten (sogenannte Offsets) kompensiert. Derartige Offsets sind verbriefte Klimagaseinsparungen aus Klimaschutzprojekten außerhalb des Luftverkehrs, die allein und ausschließlich dem Luftverkehr angerechnet werden dürfen. Mit dem Ziel, derartige Klimagaseinsparungen außerhalb des eigentlichen Luftverkehrs möglichst zu geringeren Kosten zu realisieren im Vergleich zu intra-sektoralen Maßnahmen (d. h. Klimaschutzmaßnahmen im Luftverkehrssektor), sollen die zu erwartenden wachstumsbedingten CO_2-Emissionen mit CORSIA möglichst kostengünstig kompensiert werden. Der Luftverkehr selbst wird dadurch allerdings nicht wirklich klimagerecht ausgerichtet; dies wäre primär nur durch intra-sektorale Maßnahmen möglich, wie es auch in anderen Sektoren unserer Volkswirtschaft angestrebt wird und bisher gängige Politik ist. Können Klimagasemissionen kostengünstig und in großen Mengen außerhalb des eigentlichen Luftverkehrs eingespart bzw. kompensiert werden und ist damit das Instrument CORSIA erfolgreich, gibt es darüber hinaus keine zusätzlichen (finanziellen) Anreize dafür, Klimagasreduktion innerhalb des Luftfahrsektors – und damit in der kommerziellen Luftverkehrswirtschaft – zu reduzieren (z. B. durch Effizienzsteigerungen oder die Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe). CORSIA adressiert zudem nur den internationalen Luftverkehr, während der nationale Luftverkehr von CORSIA ausgenommen ist; dies gilt auch für Staaten mit einem hohen inländischen Luftverkehrsanteil (z. B. USA, China, Russland, Indien). Werden die Klimagasreduktionsbemühungen global ernst genommen und sollen damit die völkerrechtlich

verbindlich verabschiedeten Klimaschutzziele eingehalten werden, wird es unabhängig von CORSIA daher mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit erforderlich sein, intra-sektorale Möglichkeiten zur Reduktion von Klimagasemissionen in der Branche weiter umfassend zu forcieren.

Technische Innovationen und nachhaltige Flugkraftstoffe

Die skizzierten technischen, operationellen, infrastrukturellen Optionen sowie CORSIA werden für eine klimagerechte Ausgestaltung des Luftverkehrs auf längere Sicht aller Wahrscheinlichkeit nach nicht genügen. Aus diesem Grund sind weitergehende technische Innovationen und insbesondere nachhaltige Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) zwei weitere zentrale Bestandteile der 4-Säulen-Strategie, mit denen langfristig ein Großteil der Klimagasminderung geleistet werden soll.

Technische Innovationen

Derzeit wird die Entwicklung zweier (innovativer) Technologien in der Luftfahrtindustrie verfolgt – Wasserstoff-Flugzeuge und vollelektrische Flugzeuge. Beiden Ansätzen wird großes Potenzial zugesprochen, luftverkehrsbedingte Klimagasemissionen – und dabei vor allem auch sogenannte Nicht-CO_2-Effekte[1] – in Zukunft deutlich zu reduzieren. Auf dem Weg zu einer ausgereiften und marktfähigen Technologie bedingen beide Optionen allerdings noch hoher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am eigentlichen Flugzeug, die aus heutiger Sicht noch mehr als ein Jahrzehnt in Anspruch nehmen werden. Darüber hinaus erfordern sie den Aufbau einer separaten Bereitstellungsinfrastruktur für den Energieträger (z. B. flüssiger Wasserstoff) sowie den Aufbau von entsprechenden Herstellungs- und Speichermöglichkeiten im gesamten Energiesystem, um Wasserstoff bzw. elektrische Energie aus regenerativen Energien großtechnisch zu erzeugen, zu speichern und am entsprechenden Flughafen verfügbar zu machen.

Wasserstoff-Flugzeuge. Eine Nutzung von Wasserstoff in Flugzeugen – vor allem wenn sie über den Einsatz in Hilfsgasturbinen (APU) oder für die Bordstromversorgung hinausgehen soll – erfordert diverse deutlich über den heutigen Stand der Technik hinausgehende technische, infrastrukturelle und operationelle Entwicklungen. Um (flüssigen) Wasserstoff in kommerziell genutzten Verkehrsflugzeugen einzusetzen, müssen die heutigen Flugzeuge bzw. wesentliche Komponenten, wie u. a. das Tank- und wesentliche Teile des Antriebssystems, völlig neu konstruiert werden.

---

[1] Neben verbrennungsbedingten Klimagasemissionen kommt es durch die Nutzung von Kerosin zu sogenannten Nicht-CO_2-Effekten, z. B. Partikelemission oder Wasserdampf, die zu Wolkenbildung führen und ebenfalls klimarelevant sind. Nach heutigem Wissensstand ist nur etwa ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs auf CO_2-Emissionen zurückzuführen, während zwei Drittel auf Nicht-CO_2-Effekten beruhen (z. B. Kondensstreifen-Zirren).

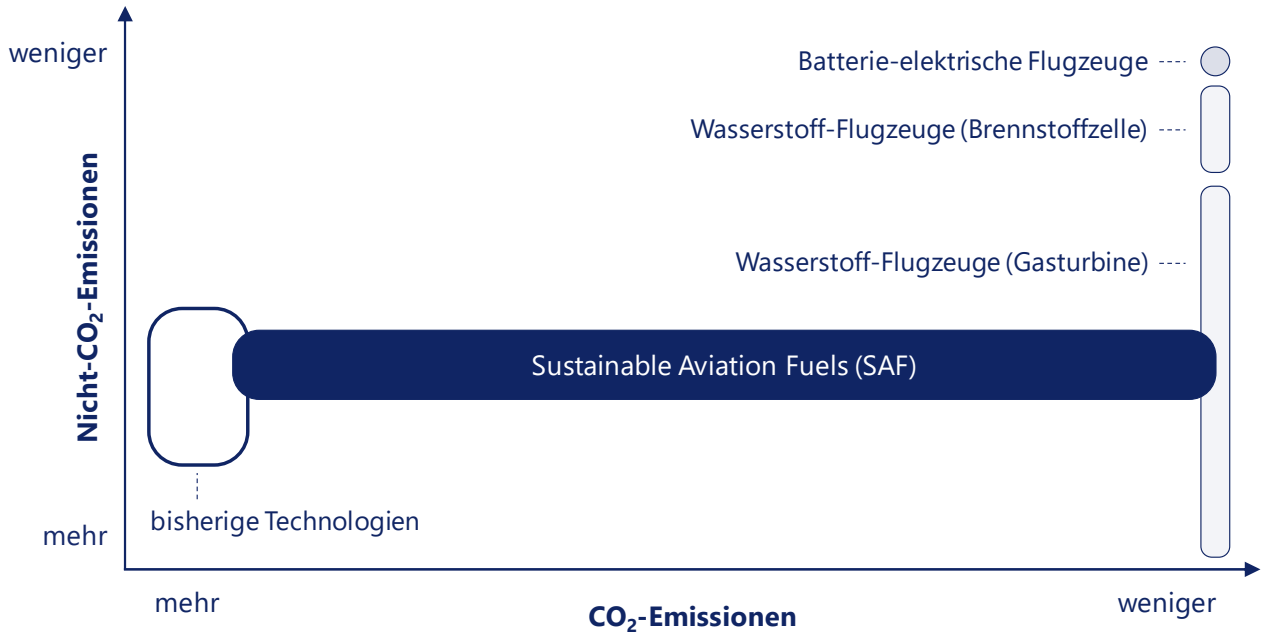


Abb. 3 Vergleich von Emissionen verschiedener Technologien
(In Anlehnung an Thomson et al. 2020b)

Antriebsseitig werden für Wasserstoff-Flugzeuge u. a. zwei wesentliche Ansätze verfolgt; die Nutzung von Wasserstoff in modifizierten Gasturbinen und in Brennstoffzellen. Der Einsatz in Gasturbinen ist potenziell mit weniger Entwicklungsarbeit verbunden als eine Nutzung in Brennstoffzellen, was eine potenziell zeitnähere Nutzung von Wasserstoff in der Luftfahrt begünstigen könnte. Allerdings können durch den Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen die Gesamtemissionen potenziell weiter verringert werden (Abb. 3) – dies bedarf aber vor allem noch eine Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie.

Neben antriebsseitigen Fragestellungen stellt vor allem die Wasserstoff-Speicherung an Bord der Flugzeuge heute eine wesentliche Herausforderung dar. Während Wasserstoff pro Energieeinheit leichter ist als herkömmliches (fossiles) Kerosin, erfordert er ein deutlich größeres Speichervolumen. Die Speicherung von Wasserstoff an Bord eines Flugzeuges bedingt damit merklich größere Tanksysteme, die in die Flugzeugstruktur integriert werden müssen und teilweise eine völlig neue Flugzeug- und Flügelarchitektur erfordern. Neben einer derartigen Integration größerer Tankvolumina in das Flugzeug müssen auch die Tanksysteme selbst angepasst werden; während herkömmliches Kerosin über den gesamten Flug in einem flüssigen Zustand an Bord gespeichert wird, erfordert Wasserstoff eine gesonderte Speicherung, da dieser bei Standard- bzw. bei Umgebungsbedingungen gasförmig vorliegt. Bisher werden für Flugzeuge deshalb vorwiegend kryogene Speichermöglichkeiten betrachtet, d. h. eine Speicherung bei sehr tiefen Temperaturen von mindestens ca. -253 °C.

Für diese Art von tiefkalter Speicherung dieses Brenngases sind neue kryogene Tanksysteme und Isolierungsoptionen notwendig, die zusätzlich innerhalb zu definierender Grenzen druckstabil sein sollten.

Neben flugzeugseitigen Entwicklungen ist parallel dazu der Aufbau einer entsprechenden Wasserstoff-Infrastruktur erforderlich, um eine Wasserstoff-Bereitstellung zu den Flughäfen und auf dem Flughafengelände zu ermöglichen. Diese Energiebereitstellungs-Infrastruktur muss parallel zur bestehenden Kerosin-Infrastruktur aufgebaut und betrieben werden. Damit Wasserstoff möglichst flexibel eingesetzt werden kann, wird sich ein derartiger Infrastrukturaufbau auf längere Sicht nicht auf einzelne Länder und Flughäfen beziehen dürfen, sondern sollte an den zentralen Knotenpunkten im internationalen Streckennetz (d. h. an den größeren Flughäfen) verfügbar sein. Andernfalls wären Fluggesellschaften beim Einsatz ihrer Wasserstoff-Flotte stark eingeschränkt und auf das infrastrukturelle Angebot angewiesen. Deshalb muss auch angestrebt werden, einen entsprechenden effizienten Übergang von dem heutigen System in ein derartiges zukünftiges Versorgungssystem zu gestalten.

Damit Wasserstoff im Luftverkehr zu Klimagasreduktionen führt, ist darüber hinaus eine nachhaltige Herstellung und Bereitstellung dieses Brenngases erforderlich. Das bedingt vor allem ein ausreichendes Angebot an erneuerbaren Energien – hier: primär elektrische Energie aus erneuerbaren Energien wie z. B. Windkraft und Solarstrahlung – im Energiesystem. Der Weg für einen entsprechenden Ausbau wird derzeit auf politischer und regulatorischer Ebene in Deutschland und auch in Europa geebnet bzw. ist auf einem guten Entwicklungspfad. Gerade zu Beginn einer großtechnischen Wasserstoffnutzung wird das verfügbare Angebot an (nachhaltigem) Wasserstoff wahrscheinlich begrenzt sein und unterschiedliche Anwendungsbereiche einer Konkurrenzsituation um die Wasserstoffnutzung ausgesetzt sein. Im Zuge eines Ausbaus von Wasserstoffherstellungsmöglichkeiten muss somit sichergestellt werden, dass Wasserstoff auch für den Luftverkehr zur Verfügung steht, wenn eine großtechnische Nutzung vorgesehen ist.

Batterie-elektrische Flugzeuge. Bei batterie-elektrischen Flugzeugen sollen die heutigen Antriebskomponenten und Energieträger, d. h. die Gasturbine und Kerosin, vollständig durch einen Elektromotor in Verbindung mit einer Batterie als Energiespeicher ersetzt werden. Der Vorteil dieser Konfiguration aus Antrieb und Energiespeicher sind eine hohe Gesamteffizienz des Antriebs, der etwa doppelt so hoch ist wie von konventionellen Flugzeugantrieben [DLR und BDLI 2020, 27].

Analog zu Wasserstoff-Flugzeugen bestehen für batterie-elektrische Flugzeuge im Luftverkehr noch diverse technische Herausforderungen. Vor allem Batterien mit ausreichend hohen Energiedichten und einem entsprechend geringen Gewicht spielen eine Schlüsselrolle, um den Einsatz vollelektrischer Flugzeuge zu

realisieren. Die heute verfügbaren Batterien haben eine (noch) deutlich zu geringe Energiedichte; im Vergleich zu herkömmlichen (fossilen) Flugkraftstoffen ist diese etwa um den Faktor 25 geringer. Damit ist es heute noch sehr schwierig, genügend Energie zur Flugdurchführung an Bord der Flugzeuge mitzuführen; d. h. die mögliche Reichweite wird sehr stark reduziert. Aus heutiger Sicht beschränkt sich der Einsatz elektrischer Flugzeuge daher zunächst vor allem auf Kurzstreckenflüge bzw. auf Anwendungsbereiche der Urban Air Mobility [DLR und BDLI 2020].

Auch für die Nutzung von batterieelektrischen Flugzeugen ist eine geeignete Infrastruktur an Flughäfen zum Laden und/oder für einen schnellen Austausch von Batterien erforderlich. Analog zu Wasserstoff muss diese Infrastruktur (zumindest) an den zentralen Knotenpunkten im jeweiligen Streckennetz der einzelnen Fluggesellschaften zur Verfügung stehen, damit elektrische Flugzeuge möglichst flexibel und umfassend eingesetzt werden können.

Je nachdem, wie sich die Nutzung von Wasserstoff-Flugzeugen entwickelt, würde – zumindest in einer Übergangszeit – die Infrastruktur für batterieelektrische Flugzeuge mit einer Wasserstoff-Infrastruktur und mit der bisherigen Kerosin-Infrastruktur koexistieren. Eine derartige ternäre Kraftstoffinfrastruktur bzw. die Ko-Existenz dreier Energiebereitstellungsinfrastrukturen würde sich wesentlich von der heutigen, weltweit einheitlich vorhandenen Kraftstoffinfrastruktur unterscheiden.

Soll der Einsatz vollelektrischer Flugzeuge auch zu Klimagasreduktionen führen, muss die elektrische Energie aus regenerativen Energien, wie u. a. Windkraft oder Sonnenenergie, gewonnen werden. Analog zu Wasserstoff ist dafür ein ausreichendes Angebot an elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen erforderlich, das vor allem in Markthochlaufphasen potenziell einer starken Nutzungskonkurrenz unterliegt und ggf. Herausforderungen beim weiteren Aufbau entsprechender Konversionsanlagen (z. B. Windkraftanlagen) bedingt.

Fazit Technische Innovationen

Technische Innovationen bieten die Möglichkeit, Klimagasemissionen des Luftverkehrs wesentlich zu reduzieren. Es sind aber noch Jahre an intensiver Entwicklungsarbeit erforderlich, bis erste kommerzielle Erfahrungen mit diesen Technologien im Luftverkehr vorliegen und sie auf ersten Fluglinien (z. B. Kurzstrecken) kommerziell eingesetzt werden können. Anschließend wird es weitere Jahre bis Jahrzehnte dauern, bis diese neuen Technologien ausreichend in die dann vorhandenen Flugzeugflotten diffundieren und die Klimagasreduktionen durch diese Technologien in einer „spürbaren" Größenordnung reduziert werden können – Grund dafür sind lange technische Nutzungsdauern von Flugzeugen bzw. geringe Modernisierungszyklen der Flotten zusammen mit einer Art Kaskadennutzung der Flugzeuge.

Obgleich Flugzeuge mit alternativen Energieträgern langfristig für einen klimagerechten Luftverkehr aus heutiger Sicht erforderlich sind, werden die Technologien aufgrund der

genannten Einschränkungen kurz- und mittelfristig nicht in einem großen Umfang verfügbar sein. Bei einem – nach einer Überwindung der Covid-19-Pandemie – erneut weiterhin steigenden Luftverkehrsaufkommen und damit zusätzlich ansteigenden Klimagasemissionen sollten daher parallel zur Entwicklung und Verfügbarmachung dieser neuen Technologien Optionen verfolgt werden, die in naher Zukunft („unmittelbar") verfügbar sind und die eine Reduktion von Klimagasemissionen im kommerziellen Luftverkehr in einem signifikanten Umfang innerhalb der heute schon vorhandenen Flugzeugflotte erlauben.

Nachhaltige Flugkraftstoffe

Anders als innovative Technologien können nachhaltige Flugkraftstoffe in naher Zukunft – und damit auch kurzfristig – verfügbar gemacht und vergleichsweise einfach hochskaliert werden. Gegenüber Wasserstoff oder vollelektrischen Ansätzen können sie als sogenannter „drop-in" Kraftstoff in bestehenden Flugzeugen und der bestehenden Kraftstoffbereitstellungsinfrastruktur problemlos eingesetzt werden; dies gilt auch aus rechtlich/administrativer Sicht in einer sehr weitgehend sicherheitstechnisch regulierten Luftfahrtbranche. Die erreichbaren Klimagasreduktionen sind damit weder von Flottenmodernisierungsraten noch von vergleichbaren Faktoren zeitlich abhängig. Für eine zeitnahe Klimagasreduktion in merklichen Größenordnungen sind nachhaltige Flugkraftstoffe daher essenziell. Neben langfristig notwendigen strombasierten Flugkraftstoffen ist ein großtechnischer SAF-Markthochlauf in naher Zukunft nur mit biogenen Flugkraftstoffen umsetzbar [WEF 2020; CST 2020]. Dabei ist entscheidend, dass ausschließlich nachhaltige Rohstoffe zur Kraftstoffherstellung eingesetzt werden. Insgesamt blieb das Potenzial der nachhaltigen Kraftstoffoptionen in der Luftfahrtbranche bisher jedoch weitgehend ungenutzt. Um nachhaltige Flugkraftstoffe großtechnisch für den Luftverkehr verfügbar zu machen, müssen sämtliche biogene und nicht-biogene nachhaltige Rohstoffpotenziale genutzt und gefördert werden – dafür ist ein effektiver Markthochlauf mit einer zielgerichteten und ganzheitlichen Strategie erforderlich.

Für eine zeitnahe Reduktion luftverkehrsbedingter Klimagasreduktionen in merklichen Größen sind nachhaltige Flugkraftstoffe essenziell.

Ein effektiver Markthochlauf biogener und nicht-biogener nachhaltiger Flugkraftstoffe bedarf einer zielgerichteten und ganzheitlichen Strategie.

SAF – Nachhaltige Flugkraftstoffe

Im Luftverkehr wird heute nahezu ausschließlich fossiles Kerosin eingesetzt, das aus Erdöl gewonnen wird. Dieser Kraftstoff weist für den Einsatz in Flugzeugen sehr günstige Eigenschaften auf. Im Gegensatz zu Dieselkraftstoff gefriert es beispielsweise erst bei Temperaturen von unter -47 °C. Auch ist Kerosin weniger flüchtig und brennbar als z. B. Benzin; dies ermöglicht einen sichereren Umgang. Dies sind einige Gründe dafür, warum Kerosin zum dominierenden Kraftstoff der zivilen Luftfahrtindustrie geworden ist und hier praktisch weltweit eine Monopolstellung hat.

Je nach Einsatzgebiet und den entsprechenden Anforderungen können unterschiedliche Kerosinsorten eingesetzt werden. Im zivilen Luftverkehr kommen im Wesentlichen zwei Kerosinsorten bzw. Flugturbinenkraftstoffe zur Verwendung; dies ist der Flugturbinenkraftstoff JET A und JET A-1.

Der Hauptunterscheid dieser beiden Flugkraftstoffe liegt im Gefrierpunkt. JET A, das hauptsächlich in Nordamerika zum Einsatz kommt, muss einen Gefrierpunkt von mindestens -40 °C aufweisen, während dieser für JET A-1 bei mindestens -47 °C liegt.

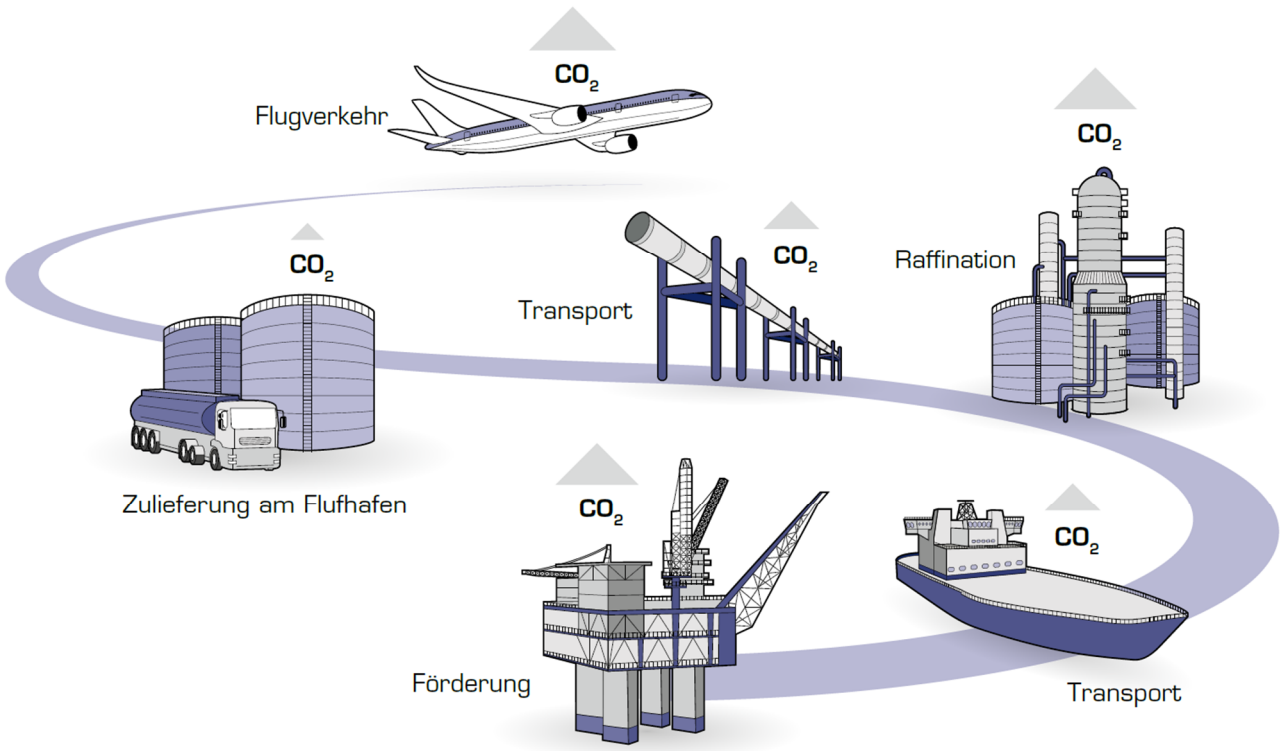


Abb. 4 CO_2-Lebenszyklus fossiler Flugkraftstoffe
(aireg 2012)

Nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF)

Die heute dominierenden fossilen Flugkraftstoffe sind nicht die einzigen zugelassenen Kraftstoffoptionen für den zivilen Luftverkehr. Auf der Basis von z. T. sehr unterschiedlichen biogenen und nicht-biogenen regenerativen Rohstoffen (Feedstock) sowie verschiedener Herstellungsverfahren können auch nicht-fossile Kraftstoffe mit teilweise sehr verschiedenartigen Produktionsverfahren hergestellt werden. Diese Flugkraftstoffe, die auch als erneuerbare, regenerative, alternative oder klimagasarme Flugkraftstoffe bezeichnet werden, werden derzeit vor allem unter dem „neu"-deutschen Begriff „Sustainable Aviation Fuels" (SAF) subsumiert; dies kann am ehesten mit dem Begriff „nachhaltiger Flugkraftstoff" übersetz werden. Aus Klimaschutzsicht besteht der Vorteil ihrer Nutzung darin, dass damit geringe Klimagasemissionen im Vergleich zu einer Nutzung fossiler Flugkraftstoffen verbunden sind.

Der Oberbegriff „SAF" deckt dabei ein breites Spektrum an Kombinationen aus nicht-fossilen Rohstoffen und chemischen, biochemischen und/oder thermochemischen Umwandlungsprozessen ab, die zur Erzeugung von Kerosin, aber in Koppelproduktion auch weiteren Kraftstoffen (z. B. Diesel) und/oder anderen Produkten (z. B. Chemikalien) dienen.

Derartige nachhaltige Flugkraftstoffe können in die folgenden drei Kategorien klassifiziert werden.

- **Biogene SAF.** Unter biogenen bzw. Biomasse-basierten SAF (auch Biokerosin) wird ein breites Spektrum an unterschiedlichen SAF-Spezifikationen zusammengefasst, die aus öl- und fetthaltiger, stärkehaltiger, zuckerhaltiger und/oder lignocellulosehaltiger (holz- und halmgutartig) Biomasse erzeugt werden. Darunter fallen Rohstoffe wie Pflanzenöle, Algen, bestimmte Komponenten von Energiepflanzen, organische Siedlungs- und Industrieabfälle oder Rückstände aus der Land- und Forstwirtschaft.
- **Strombasierte SAF.** Unter strombasierten SAF oder Power-to-Liquid (PtL) SAF sind nachhaltige Flugkraftstoffe zu verstehen, die nicht auf Basis von Biomasse, sondern ausschließlich auf der Basis von Wasser, CO_2 und Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt werden.
- **Hybride SAF.** Hybride SAF (auch PBtL SAF) stammen aus hybriden Herstellungsverfahren; darunter sind hier biomasse- und strombasierte Verfahren zu verstehen. Anders als bei ausschließlich strombasierten Ansätzen kommen nicht nur Wasser, CO_2 und Strom als Haupteingangsstoffe (Edukte) in Frage. Stattdessen wird in diesen Prozessen neben Strom eine weitere Kohlenstoffquelle eingesetzt (z. B. Biomethan), die bereits einen Teil der Energie enthält, die sich im produzierten Flugkraftstoff wiederfindet.

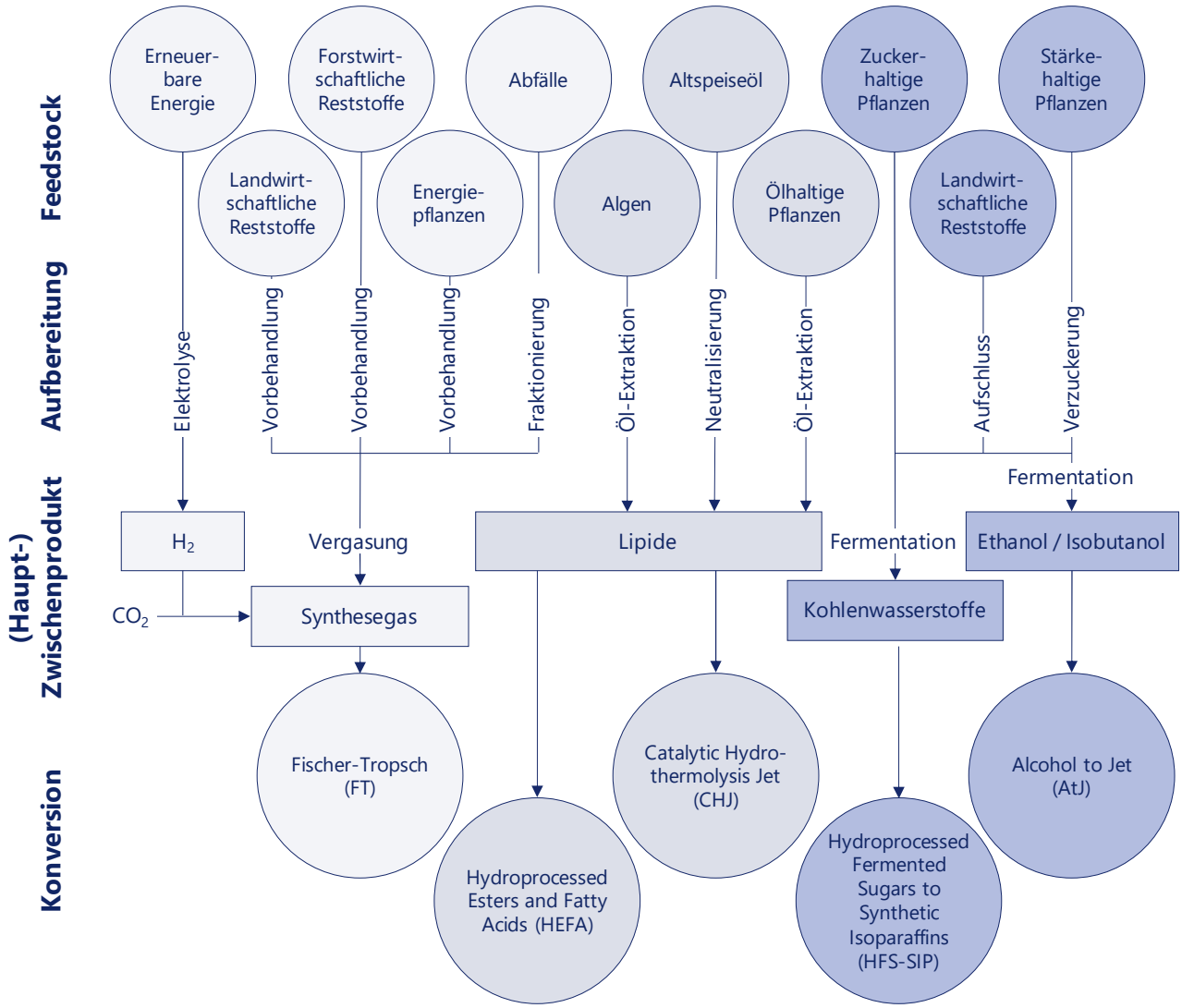


Abb. 5 Allgemeine Übersicht wesentlicher SAF-Herstellungspfade
(In Anlehnung an Thomson et al. 2020a)

Eine allgemeine Übersicht wesentlicher Herstellungspfade für SAF bzw. möglicher Kombinationen aus Rohstoff und Konversionsverfahren zeigt Abbildung 5.

Für die Herstellung von biogenen SAF sind in Abhängigkeit der eingesetzten Biomasse unterschiedliche Vorbehandlungsschritte nötig, um die Biomasse-Rohstoffe zu einem flüssigen, normenkonformen Kraftstoff weiterzuverarbeiten. Dabei werden die Rohstoffe, typischerweise nach einer Vorbehandlung, über einen ersten Umwandlungsschritt zu einem Zwischenprodukt umgewandelt, beispielsweise Alkohol (z. B. Isobutanol oder Ethanol), Synthesegas, sogenanntes „Bio-Rohöl" oder andere Kohlenwasserstoffgemische. Diese Zwischenprodukte werden dann über einen zweiten Hauptumwandlungsschritt in normenkonformes Biokerosin umgewandelt.

Die Herstellung von PtL SAF wird vom Grundsatz her ausschließlich aus Wasser, CO_2 und

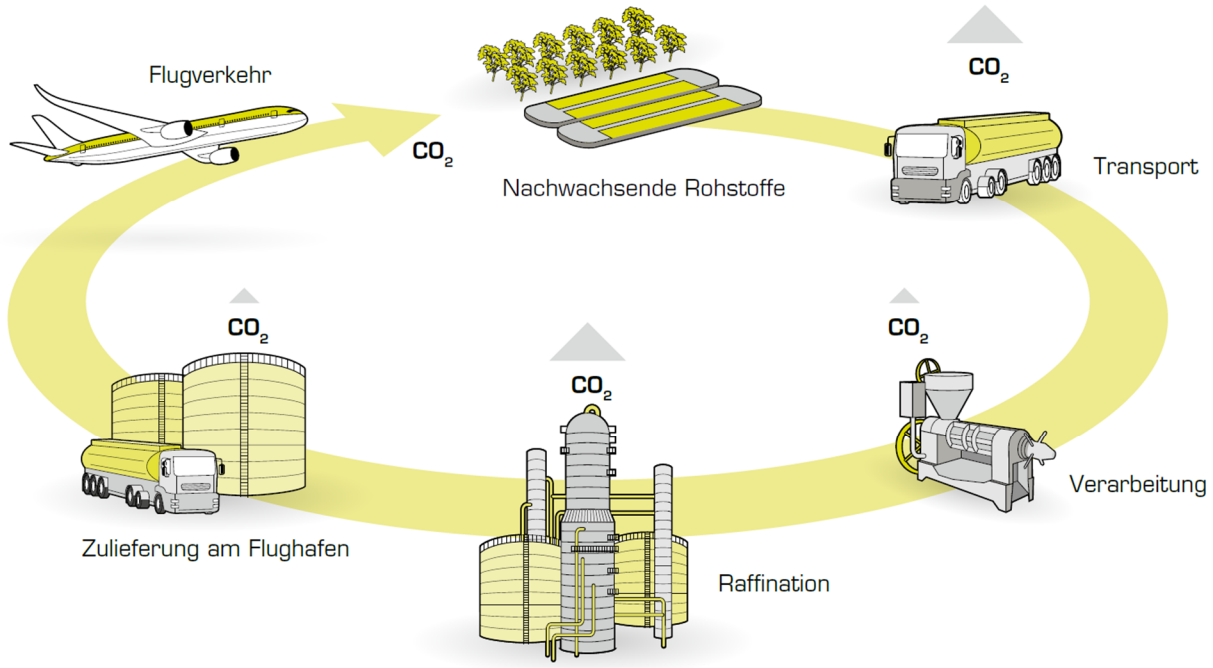


Abb. 6 CO_2-Lebenszyklus biogener Flugkraftstoffe
(aireg 2012)

Strom realisiert. Dabei wird zunächst über einen Elektrolyse-Prozess Wasser unter Zufuhr von elektrischer Energie (aus erneuerbaren Energien) in Wasserstoff umgewandelt, der zusammen mit CO_2 in ein Synthesegas (d. h. ein Gasgemisch aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2)) umgewandelt wird

Voraussetzungen für die Nutzung von SAF

An Flugkraftstoffe werden besondere Anforderungen gestellt, wie u. a. eine möglichst hohe Energiedichte, gute Verbrennungseigenschaften und eine Vielzahl weiterer (Sicherheits-)Kriterien (z. B. das Verhalten bei tiefen Temperaturen). Sie müssen außerdem einfach zu handhaben sein (d. h. einfach transportiert, gelagert und/oder gepumpt werden können), da sie weltweit verfügbar sein und dabei in gleicher Qualität vorliegen müssen.

Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit, dass die unterschiedlichen nachhaltigen Flugkraftstoffoptionen bzw. das zugrundeliegende Herstellungsverfahren (teilweise in Kombination mit eingesetzten Rohstoffen) eigens für den Luftverkehr zugelassen werden müssen. Diese Zulassung wird maßgeblich von der internationalen Standardisierungsorganisation ASTM International realisiert. Durchläuft eine SAF-Option das entsprechende Zulassungsverfahren erfolgreich, wird sie der sogenannten ASTM D7566 Spezifikation (für Jet A-1 mit Anteilen synthetischer Kohlenwasserstoffe) bzw. der ASTM D1655 hinzugefügt. Die zugelassenen SAF werden dann regelhaft in der für Europa relevanten Spezifikation DEF Stan 91-091 übernommen.

Ein Flugkraftstoff darf darüber hinaus nur im kommerziellen Luftverkehr eingesetzt werden,

wenn alle Anforderungen der ASTM D1655 Spezifikation erfüllt werden. Die darin vorgeschriebenen Eigenschaften werden von (reinen) nachhaltigen Flugkraftstoffen nicht zwangsweise erfüllt, auch wenn sie nach ASTM D7566 hergestellt wurden. Vor ihrer Nutzung im Luftverkehr müssen sie daher mit herkömmlichem bzw. normenkonformem Flugkraftstoffstoff so gemischt werden, dass sie die Anforderungen der ASTM D1655 sicher und jederzeit erfüllen. Dazu sind für verschiedene SAF Optionen bestimmte Beimischungsgrenzen festgelegt.

Die maximale Beimischungsgrenze beträgt bisher 50 Vol.-%. In der Praxis hängt das maximal erreichbare Mischungsverhältnis, bis zu dem ein Gemisch noch alle Eigenschaften der ASTM D1655 erfüllt, aber auch von den Eigenschaften der fossilen Beimischungskomponente ab. Wenn diese „ungünstige" Eigenschaften aufweist – was auch bei einem normenkonformen Kraftstoff der Fall sein kann, können die maximal zulässigen Beimischungsgrenzen ggf. nicht erreicht werden bzw. ist nur eine geringere Zumischung möglich. Weist die fossile Komponente dagegen sehr „günstige" Eigenschaften auf, wären potenziell auch Gemische mit Mischungsverhältnissen jenseits der vorgegebenen Beimischungsgrenzen erreichbar, unter denen die Anforderungen der ASTM D1655 sicher erfüllt werden können.

Nachdem die SAF Komponente spezifikationsgemäß mit herkömmlichem normenkonformen Flugkraftstoff gemischt wurde, kann sie in allen vorhandenen Verkehrsflugzeugen sowie der existierenden Kraftstoffversorgungsinfrastruktur – auch aus legaler Sicht – vollumfänglich eingesetzt werden (drop-in Eigenschaft).

Derzeit arbeiten Flugzeug-, Triebwerks- und Kraftstoffhersteller auch an der Zulassung von SAF-Optionen, die keine Mischung mit fossilem Kerosin erfordern und damit zu 100 % eingesetzt werden können. Heute erfordern diese SAF-Optionen dafür teilweise kleinere Modifikationen bestimmter Flugzeugkomponenten (u. a. Dichtungen im Treibstoffsystem). Da sie daher nicht per se drop-in fähig sind, werden sie auch als near drop-in Kraftstoff bezeichnet.

SAF-Herstellungsverfahren

Nach ASTM D7566 sind bisher sieben Verfahren für die Herstellung von SAF zugelassen. Das sogenannte Co-Processing stellt eine weitere Option nach ASTM D1655 dar, um z. B. Pflanzenöle oder tierische Fette zur SAF Herstellung zu verwenden. Weitere Herstellungsverfahren befinden sich in der ASTM Zulassung.

Tabelle 1 zeigt die bisher zugelassenen Herstellungsverfahren sowie die einzuhaltenden Beimischungsgrenzen chronologisch nach ihrer Zulassung.

Tab. 1 Übersicht aller nach ASTM D7566 und ASTM D1655 zugelassener SAF-Optionen (November 2020)

ASTM	Anhang	Zulassung	Verfahren	Beimischungs-grenze	Mögliche Rohstoffe
D7566	1	2009	FT-SPK	50 Vol.-%	Flexibel (biogen, fossil, synthetisch, z. B. PtL oder BtL)
D7566	2	2011	HEFA-SPK	50 Vol.-%	Fette/Öle (z. B. Pflanzenöle, Altspeiseöl)
D7566	3	2014	HFS-SIP	10 Vol.-%	Zucker, Stärke, Lignocellulose
D7566	4	2015	FT-SPK/A	50 Vol.-%	Flexibel (biogen, fossil, synthetisch, z. B. PtL oder BtL)
D7566	5	2016	ATJ-SPK	50 Vol.-%	Zucker, Stärke, Lignocellulose
D7566	6	2020	CH-SK	50 Vol.-%	Fette/Öle (z. B. Pflanzenöle, Altspeiseöl)
D7566	7	2020	HC-HEFA-SPK	10 Vol.-%	Fette/Öle (Algenöl)
D1655	1	2018	Co-Processing	5 Vol.-%	Fette/Öle (z. B. Pflanzenöle, Altspeiseöl)
D1655	1	2020	Co-Processing	5 Vol.-%	FT-Biocrude (primäre Rohstoffe siehe FT-SPK, FT-SPK/A)

ATJ-SPK (Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene), **BtL** (Biomass-to-Liquid), **CH-SK** (Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene), **FT** (Fischer-Tropsch), **HC** (Hydrocarbons), **HEFA** (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids), **HFS-SIP** (Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins), **PtL** (Power-to-Liquid), **SPK** (Synthetisch-Paraffinisches Kerosin), **SPK/A** (Synthetisches paraffinisches Kerosin mit Aromaten)

ASTM D7566 Anhang 1 – FT-SPK

Prozessbeschreibung. Im Fischer-Tropsch (FT) Verfahren wird ein Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid in einem Reaktor in ein synthetisches Rohöl („Syncrude") umgewandelt. Syncrude ist ein Gemisch unterschiedlicher Kohlenwasserstoffe (u. a. Diesel-, Kerosin- und Wachskomponenten), das nach der FT-Synthese über etablierte Raffinerieprozesse weiter zu normenkonformen Kraftstoffen weiterverarbeitet werden kann; darunter sind dann auch Flugkraftstoffe.

Mögliche Rohstoffe. Für die FT-Synthese dient Synthesegas stets als Ausgangsstoff. Das Synthesegas kann auf Basis unterschiedlicher Rohstoffe und unterschiedlichen Prozessrouten bereitgestellt werden, die vor der eigentlichen FT-Synthese realisiert werden müssen. Für biogene SAF sind hierbei die Biomass-to-Liquid (BtL) und Biogas-to-Liquid (Bio-GtL) Prozessrouten zu unterscheiden.

- Im BtL-Verfahren wird Synthesegas vorwiegend aus der Vergasung von fester Biomasse (Lignocellulose) hergestellt; dafür kommen beispielsweise feste organische Siedlungsabfälle, land- und forstwirtschaftliche Abfälle (z. B. Stroh und Restholz) oder Energiepflanzen (speziell für eine energetische Nutzung angebaute Pflanzen, z. B. Holz aus Kurzumtriebsplantagen) in Frage. Das bei der Vergasung entstehende Gasgemisch wird entsprechend aufgereinigt, um reines Synthesegas zu erhalten.

- Beim Bio-GtL Verfahren wird das Synthesegas durch eine sogenannte Reformierung von Biomethan, eine der Hauptkomponenten von Biogas, erzeugt. Bei der Reformierung wird das Biomethan in einem thermochemischen Prozess z. B. unter Zufuhr von Dampf in ein Gasgemisch umgewandelt, das anschließend zu dem benötigten Synthesegas aufgereinigt wird.

Im Rahmen der FT-Prozessroute können auch PtL SAF aus Wasser, CO_2 und Strom hergestellt werden. Dabei wird über Elektrolyse-Prozesse Wasser unter Zufuhr von Strom (aus erneuerbaren Energien) in reinen Wasserstoff umgewandelt, der zusammen mit CO_2 (z. B. aus der Umgebungsluft oder aus biogenen Quellen wie beispielsweise aus Biogasanlagen oder der alkoholischen Fermentation während der Bioethanolherstellung) in Synthesegas umgewandelt wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Synthesegasbereitstellung sind bio- und strombasierte Hybridansätze. In einer möglichen Herstellungsvariante werden, anders als bei PtL-Verfahren, nicht ausschließlich Wasser, CO_2 und Strom als Hauptausgangsstoffe eingesetzt, sondern ein Teil des benötigten Kohlenstoffs sowie der Energie zur Synthesegasherstellung über eine alternative Kohlenstoffquelle (z. B. Biomethan) bereitgestellt. Dabei kann das Biogas z. B. direkt in einem mehrstufigen Plasmaverfahren unter Zufuhr von elektrischer Energie und Wasser in ein Synthesegas umgewandelt werden.

ASTM D7566 Anhang 2 – HEFA-SPK

Prozessbeschreibung. Bei dem HEFA Verfahren handelt es sich im Wesentlichen um eine Hydrierung und ein Hydrocracking von pflanzlichen oder tierischen Ölen und Fetten und damit um ihre Umwandlung in Gemische aus langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen, die die entsprechenden Kraftstoffspezifikationen erfüllen. Bei der Hydrierung werden in den Ölen enthaltene Ester- und Doppelbindungen abgesättigt und der in Pflanzenölmolekül enthaltene Sauerstoff unter Zufuhr von Wasserstoff in Form von Wasser abgetrennt. Anschließend erfolgt zur Verbesserung der Eignung als Kraftstoff ein Katalysator-gestützter Isomerisierungsschritt.

Mögliche Rohstoffe. Für das HEFA Verfahren kommen pflanzliche und tierische Fette und Öle in Frage (z. B. Sojaöl oder Rapsöl) sowie öl- und fetthaltige Rückstände, Nebenprodukte und Abfallstoffe, beispielsweise gebrauchtes Speiseöl (Used Cooking Oil).

ASTM D7566 Anhang 3 – HFS-SIP

Prozessbeschreibung. Im HFS-SIP Verfahren wird SAF durch eine Fermentation hergestellt; d. h. zuckerhaltige Rohstoffe werden durch spezielle gentechnisch veränderte Hefe-Mikroorganismen vergoren und dabei ein langkettiger Kohlenwasserstoff hergestellt. Bei den konkret hier zugelassenen Biokatalysatoren werden unter aeroben Bedingungen u. a. ein ungesättigtes Kohlenwasserstoffmolekül namens Farnesen erzeugt. Dieser Kohlenwasserstoff wird anschließend von weiteren Fermen-

tationsprodukten abgetrennt und danach unter Wasserstoffzufuhr zu Farnesan hydriert wird. Letzteres ist ein reines Kohlenwasserstoffmolekül mit 15 Kohlenstoffatomen.

Mögliche Rohstoffe. Für das HFS-SIP Verfahren kommen als biogene Ausgangsstoffe zuckerhaltige Pflanzen(Komponenten), wie Zuckerrohr oder Zuckerrübe, in Frage. Darüber hinaus kommen sind auch stärkehaltige Pflanzenbestandteile, wie sie u. a. in Mais oder Getreide enthalten sind, in Frage, die dann in verschiedenen Verfahrensschritten zu Zucker umgewandelt werden können. Ferner können auch lignocellulosehaltige Ausgangsstoffe, wie z. B. Stroh oder Weichholz, aufgeschlossen werden mit dem Ziel, die darin erhaltenen Zucker für das HFS-SIP Verfahren zugänglich zu machen.

ASTM D7566 Anhang 4 – FT-SPK/A

Prozessbeschreibung. Im FT-SPK/A Verfahren wird analog zum FT-SPK Verfahren eine FT-Synthese durchgeführt. In einem zusätzlichen Prozessschritt (sogenannte Alkylierung) werden allerdings auch aromatische Verbindungen erzeugt. Derartige Aromaten sind z. B. erforderlich, um das Aufquellen von Dichtungen in der Kraftstoffzuführung zwischen dem Kerosintank und dem Triebwerk zu gewährleisten.

Mögliche Rohstoffe. Für das FT-SPK/A Verfahren kommen die Ausgangsstoffe analog zum FT-SPK Verfahren (ASTM D7566 Anhang 1 – FT-SPK) in Frage.

ASTM D7566 Anhang 5 – ATJ-SPK

Prozessbeschreibung. Im Alcohol-to-Jet (ATJ) Verfahren findet eine Weiterverarbeitung von Alkoholen in Flugkraftstoffe statt. Dazu wird in einem ersten Prozessschritt der chemisch gebundene Sauerstoff vom Alkoholmolekül abgespalten. Die so entstandenen sogenannten Alkene (ungesättigte Kohlenwasserstoffe) werden in einem zweiten Prozessschritt zu langkettigen Kohlenwasserstoffen zusammengefügt und in einem abschließenden Schritt unter Zusatz von Wasserstoff zu gesättigten Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Anschließend werden diese Kohlenwasserstoffe in einzelnen Kraftstofffraktionen, primär Benzin und Kerosin, aufgeteilt, damit die Kraftstoffspezifikationen sicher eingehalten werden können.

Mögliche Rohstoffe. Als Ausgangsstoffe sind im ATJ-Prozess derzeit ausschließlich die Alkohole Ethanol und Iso-Butanol zugelassen. Es wird allerdings daran gearbeitet, diese Begrenzung aufzuheben und alle Alkohole biogenen Ursprungs aus Feedstock zuzulassen. Die Alkohole selbst werden in der Regel aus der Fermentation von stärke- und/oder zuckerhaltiger Biomasse (z. B. Mais, Zuckerrohr, Zuckerrüben) gewonnen.

ASTM D7566 Anhang 6 – CH-SK

Prozessbeschreibung. Der CH-SK SAF wird mithilfe des sogenannten Biokraftstoff-Iso-Konvertierungsprozesses (Biofuels Isoconversion, BIC) hergestellt. Analog zum HEFA Verfahren erfolgt die Umwandlung der biogenen Rohstoffe über mehrere Prozessschritte. Der

entscheidende Schritt ist die sogenannte katalytische Hydrothermolyse (Catalytic Hydrothermolsysis, CH), bei der die eingesetzten pflanzlichen und/oder tierischen Öle und/oder Fette in einer Wasser-Atmosphäre unter überkritischen Bedingungen in ungesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkene) umgewandelt werden. Die Alkene werden anschließend – analog zum ATJ Verfahren – unter Zusatz von Wasserstoff in gesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkane) und anschließend in einzelne Kraftstofffraktionen umgewandelt.

Mögliche Rohstoffe. Für das CH-SK Verfahren kommen die Ausgangsstoffe analog zum HEFA Verfahren in Frage. Durch den BIC Prozess können zusätzlich auch stärker verschmutzte Abfallfette und -öle genutzt werden.

ASTM D7566 Anhang 7 – HC-HEFA-SPK

Prozessbeschreibung. Das HC-HEFA-SPK Verfahren ist aus verfahrenstechnischer Sicht (nahezu) identisch mit dem HEFA Verfahren (Anhang 2). Der Unterschied liegt in den dafür zugelassenen Rohstoffen.

Mögliche Rohstoffe. Anders als beim HEFA Verfahren kommen für das HC-HEFA-SPK Verfahren (nur) biologisch gewonnene Kohlenwasserstoffe und Fette als Ausgangsstoffe in Frage. Derzeit sind dafür nur Komponenten, die von einer bestimmten Algenart (Botryococcus Braunii) stammen, zugelassen.

ASTM D1655 Anhang 1 – Co-Processing

Prozessbeschreibung. In der gemeinsamen Raffination mit fossilem Rohöl können SAF aus Pflanzenölen, tierischen Fetten sowie Fischer-Tropsch Zwischenprodukten (Syncrude oder Biocrude) in einer "klassischen" Rohölraffinerie hergestellt werden (Co-Processing). Da sich diese Ausgangsstoffe von Rohöl unterscheiden, ergeben sich besondere Anforderungen an die Raffinerieprozesse; deshalb beträgt die Beimischungsgrenze 5 Vol.-%.

Mögliche Rohstoffe. Für das Co-Processing kommen Pflanzenöle und tierische Fette sowie ein sogenanntes Fischer-Tropsch „Syncrude“ oder „Biocrude“ in Frage.

Klimagas- und Schadstoffemissionen

CO_2-Emissionen

Aus Klimaschutzperspektive liegt der entscheidende Unterschied von SAF zu herkömmlichem (fossilen) Kerosin in einem geschlossenen CO_2-Kreislauf: Fossiles Kerosin belastet die Atmosphäre mit zusätzlichem CO_2, da der Kohlenstoff zuvor im Rohöl unter der Erdoberfläche – und damit abgetrennt von der Biosphäre – gebunden und folglich nicht klimawirksam in geologischen Formationen gelagert war. Die CO_2-Menge hingegen, die beim Einsatz von SAF in die Atmosphäre freigesetzt wird, wurde der Atmosphäre zuvor entzogen. Für biogene SAF geschieht dies z. B. während des Anbaus von Biomasse durch die beim Pflanzenwachstum ablaufenden Photosyntheseprozesse. Für strombasierte SAF (PtL-SAF) wird das für die Herstellung benötigte CO_2 beispielsweise aus biogenen Quellen bereitgestellt (z. B. aus Biogas- oder aus Bioethanolanlagen) oder über technische Verfahren direkt

aus der Atmosphäre abgetrennt (Direct-Air-Capture, DAC). Dadurch ergibt sich ein geschlossener Kohlenstoff- bzw. CO_2-Kreislauf, durch den das Kohlenstoffinventar in der Atmosphäre nicht weiter erhöht wird.

Ein derart geschlossener CO_2-Kreislauf bezieht sich allerdings zunächst nur auf die CO_2-Emissionen, die durch die Nutzung/Verbrennung der Kraftstoffe im Triebwerk freigesetzt werden. Neben diesen Klimagasemissionen der letzten Umwandlung entstehen entlang der gesamten Produktions- und Bereitstellungskette durch Rohstoffumwandlung, Verarbeitung und/oder Transport auch klimawirksame Emissionen. Ein SAF ist daher nicht per se vollständig CO_2-neutral, auch wenn gegenüber fossilen Flugkraftstoffen (deutliche) Emissionsminderungen an Klimagasen – und hier insbesondere CO_2 – erreicht werden können.

Das Spektrum von SAF weist – aufgrund einer verschiedenartigen CO_2-Intensität der Ausgangsprodukte (z. B. Pflanzenöl, Holz) und der entsprechenden Umwandlungsprozesse – eine sehr große Bandbreite erreichbarer und auch bei der praktischen Produktion umgesetzter Emissionseinsparungen auf (Abb. 7). Diese Klimagasemissionen sind dabei häufig nicht primär vom jeweiligen Herstellungspfad (d. h. der Rohstoffumwandlung) abhängig, sondern werden oft im Wesentlichen von dem eingesetzten Rohstoff selbst bestimmt. Die freigesetzten Treibhausgasemissionen verschiedener SAF müssen daher sowohl in Abhängigkeit des eingesetzten Rohstoffs als auch abhängig vom Herstellungspfad betrachtet werden.

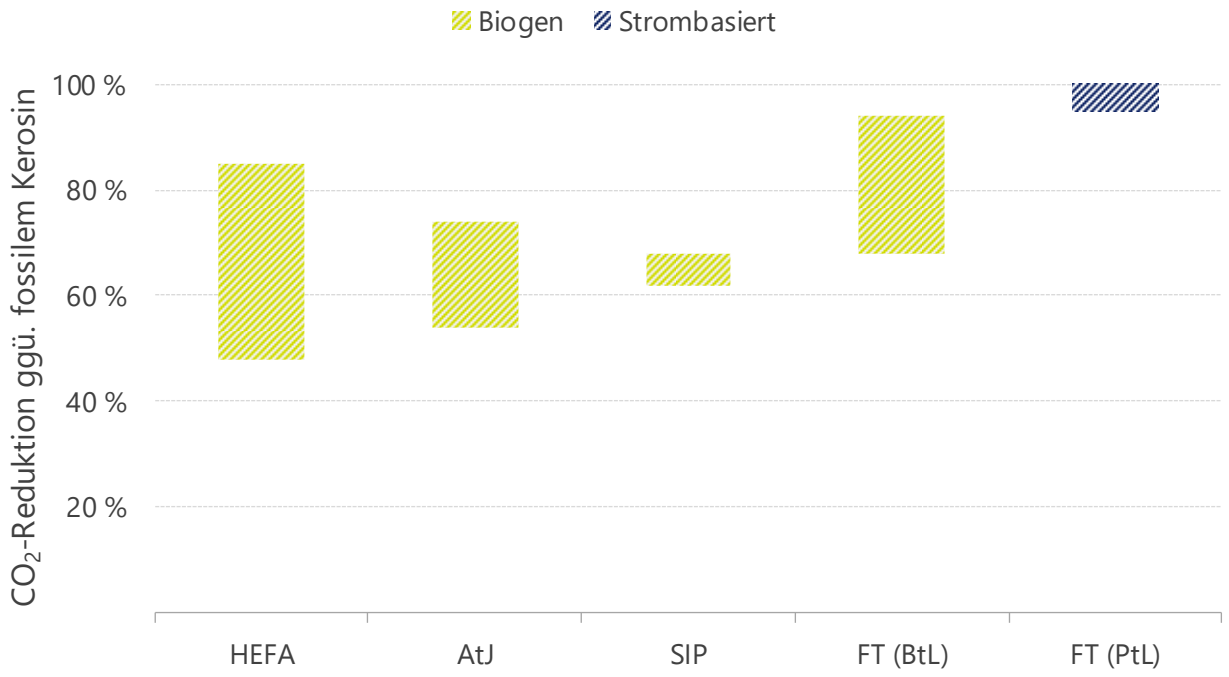


Abb. 7 Bandbreite von CO_2-Emissionseinsparungen unterschiedlicher SAF-Optionen
[EASA 2020; ICAO 2019; Bullerdiek et al. 2019a; Schmidt et al. 2016]

Für Flugkraftstoffe biogener Herkunft sind (typischerweise) Klimagas-Einsparungen von 60 bis 80 % und mehr gegenüber konventionellen (fossilen) Flugkraftstoffen gut möglich; dies gilt vor allem dann, wenn die eingesetzte Biomasse aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen stammt. Bei PtL-Flugkraftstoffen bestimmen die Herkunft des eingesetzten Stroms und die Kohlenstoff- bzw. CO_2-Quelle maßgeblich die erzielbaren Emissionseinsparungen. Unter den richtigen Rand- und Rahmenbedingungen können (nahezu) Klimagas-freie Kraftstoffe hergestellt werden; dies gilt aber nur dann, wenn die erforderliche elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen stammt und das CO_2 aus der Luft oder aus nachhaltigen biogenen Quellen gewonnen wird. PtL-Kraftstoffe sind daher auch aus Klimaschutz-Sicht langfristig eine essenzielle nachhaltige Kraftstoffoption für den Luftverkehr.

Gesetzlich vorgeschriebene Mindest-THG-Einsparungen

Um sicherzustellen, dass die Produktion und Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe tatsächlich zu einer reduzierten Klimabelastung führen und nicht andere Umweltkompartimente überproportional in Anspruch nehmen, müssen sie – zumindest in einigen Staaten bzw. Staatenverbünden – verschiedene Nachhaltigkeitskriterien erfüllen, die z. T. in nationalen und teilweise in internationalen Regelwerken definiert sind. Dabei gelten häufig gesetzlich vorgeschriebene Anforderungen an THG-Mindesteinsparungen, die einen Einsatz von SAF aus Klimaschutzsicht auch rechtfertigen.

Der wesentliche europäische Rahmen, der Nachhaltigkeitsanforderungen an nachhaltige Flugkraftstoffe in der EU definiert, ist die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive, RED) bzw. ihre novellierte Fassung (RED II). Gemäß der RED II müssen beispielsweise Biokraftstoffe – je nach Datum der Inbetriebnahme der Herstellungsanlage – eine Mindest-Klimagasemissionsreduktion gegenüber fossilen Kraftstoffen von bis zu 65 % aufweisen. Für PtL-Kraftstoffe ist eine Treibhausgaseinsparung von mindestens 70 % vorgegeben.

Nicht-CO_2-Effekte

Neben CO_2-Emissionen kommt es bei der Nutzung von Flugkraftstoffen – das gilt sowohl für fossile als auch für nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF) – zusätzlich zu sogenannten Nicht-CO_2-Effekten, die ebenfalls eine klimaerwärmende Wirkung haben. Dabei handelt es sich vor allem um Partikelemissionen, Wasserdampf, Schwefel- und Stickstoffoxide, die in Reiseflughöhe auf die Bildung von Aerosolen und Wolken sowie auf die Konzentrationen einiger atmosphärischer Gase Einfluss nehmen und so in der Summe klimawirksam agieren.

Eine umfangreiche internationale Studie zeigt, dass nur rund ein Drittel der Klimawirkung des Luftverkehrs auf CO_2-Emissionen entfällt und zwei Drittel auf Nicht-CO_2-Effekte. Im Rahmen der letztgenannten Effekte sind Kondensstreifen und daraus resultierende Kondensstreifen-Zirren ein wesentlicher, das Klimageschehen beeinflussender Faktor. Deshalb führt aufgrund derartiger Nicht-CO_2-Effekte auch die

Verwendung von emissionsarmen oder potenziell „emissionsfreien" Flugkraftstoffen (z. B. PtL SAF) auch zu einer klimaerwärmenden bzw. strahlungsverstärkenden Wirkung, wenn auch in einem begrenzteren Ausmaß im Vergleich zum Einsatz von Kerosin aus fossilem Rohöl [aireg 2020].

Schadstoffemissionen

Neben der globalen Wirkung von Klimagasemissionen sind im Rahmen der Nutzung von SAF auch lokale Emissionen bzw. lokale Effekte auf die Luftqualität relevant. Insbesondere die Partikelemissionen stehen hierbei im Fokus, da die Freisetzung von Ruß, der in der Atmosphäre klimawirksam ist, am Boden zu negativen Gesundheitseffekten führen kann.

Die von einem Flugzeugtriebwerk freigesetzten Rußpartikel haben einen Durchmesser, der kleiner ist als 100 Nanometer; sie gehören daher zu den ultrafeinen Partikeln. Diese können beim Einatmen tief in die menschliche Lunge eindringen (Alveolen) und sich dort ablagern. Zusätzlich können sie aufgrund ihrer Mobilität ins Umland von Flughäfen eingetragen werden; sie sind noch in mehreren Kilometern Entfernung nachweisbar. Die Einflussgrößen auf die Rußemissionen sind vielfältig. So können fortgeschrittene Triebwerke durch einen geringeren Treibstoffverbrauch bzw. durch ein weiterentwickeltes Brennkammerdesign (z. B. Magerverbrennungstriebwerke) zu geringeren Partikelemissionen beitragen. Eine weitere wesentliche Einflussgröße ist auch der verwendete Treibstoff bzw. seine molekulare Zusammensetzung.

Studien haben gezeigt, dass die von Flugzeugtriebwerken freigesetzte Rußmasse mit dem Wasserstoffgehalt des Treibstoffs näherungsweise korreliert. Die meisten SAF-Prozesse erzeugen synthetische Kraftstoffe mit einem geringen Aromatengehalt und einem entsprechend hohen Wasserstoffgehalt. So hat u. a. die Demonstration eines Einsatz von erneuerbarem Kerosin am Flughafen Leipzig / Halle (DEMO-SPK) experimentell nachgewiesen, dass durch den Wechsel von einem fossilen Kerosin zu einer Mischung aus SAF eine Reduzierung von ca. 70 % bei der Rußmasse und ca. 60 % bei der Partikelanzahl erreicht werden konnte – und das bei Nutzung vorhandener Infrastrukturen und derzeit verfügbarer Triebwerkstechnologien.

Ein weiterer Zusatznutzen des Einsatzes von SAF ist die Verringerung des Anteils flüchtiger Partikel, da reine SAF keinen Schwefel beinhalten. Der SAF-Einsatz führt dabei aber nicht zu einer signifikanten Veränderung der gasförmigen Emissionen wie Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxiden; diese Luftschadstoffe entstehen bei der Verbrennung des Kraftstoffs und können nur durch Maßnahmen am Triebwerk bzw. an der Brennkammer vermieden oder zumindest reduziert werden.

Außerdem ist durch die geeignete Auswahl von Treibstoffkomponenten aus fossilen und alternativen Quellen eine Optimierung der Treibstoffeigenschaften möglich, um eine möglichst effiziente Nutzung der vorhandenen Treibstoffkapazitäten zu erreichen („Fuel design"). Der Einsatz von SAF liefert daher die

Möglichkeit, Treibstoffe mit optimierten Eigenschaften zu erzeugen. Dieses Potenzial wird derzeit aus Gründen der Produktionskapazität und Logistik – und natürlich der noch höheren Kosten für SAF – bisher nicht ausgeschöpft [aireg 2020].

Hemmnisse der SAF-Markteinführung

Obwohl bereits acht Optionen zur Herstellung und Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe von der ASTM zugelassen sind und diverse Kraftstoffoptionen technisch erprobt und ihre Praxistauglichkeit vielfach demonstriert wurde, konnte ihre breite Markteinführung bisher weder global noch regional umgesetzt werden. Nach wie vor beschränkt sich die Herstellung nachhaltiger Flugkraftstoffe auf sehr wenige Produzenten und extrem geringe Mengen. Weltweit beträgt ihr Nutzungsanteil deutlich unter 0,1 % und in der EU lag er im Jahr 2017 bei etwa 0,05 %. Insgesamt hat damit SAF bisher ein absolutes Nischendasein auf dem globalen Kerosinmarkt.

Ein umfassender Markthochlauf nachhaltiger Flugkraftstoffe wird durch unterschiedliche technische, ökonomische, operative und akzeptanzbezogene Faktoren gehemmt. Diese bisher praktisch kaum existente Marktentwicklung ist primär auf die Kombination zweier wesentlicher Faktoren zurückzuführen; eine fehlende ökonomische Marktfähigkeit nachhaltiger Flugkraftstoffe aufgrund (zu) hoher Herstellungskosten im Vergleich zu herkömmlichem (fossilem) Kerosin in Kombination mit einem ungeeigneten bzw. fehlenden regulatorischen Förderrahmen (d.h. eine nicht vorhandene Internalisierung der externen Klimawirkungen des kommerziellen Luftverkehrs in das wirtschaftliche Handeln der Branche).

Hohe SAF-Herstellungskosten

Die Herstellungskosten nachhaltiger Flugkraftstoffe lagen in der Vergangenheit deutlich über dem Preisniveau von fossilem Kerosin – und das bei quasi identischen technischen (Nutzungs-)Eigenschaften. Die nachhaltigen Flugkraftstoffe sind heute noch ca. um den Faktor 2 bis 5 (z. T. auch wesentlich mehr) und damit deutlich teurer als fossiles Kerosin (Abb. 8). Während der Preis für nachhaltige HEFA Flugkraftstoffe, insbesondere aus Abfallölen und -fetten, derzeit noch mindestens doppelt so teuer wie fossiles Kerosin ist – aber teilweise schon am Markt auch in relevanten Mengen verfügbar ist, liegt die Preisspanne für andere SAF-Optionen noch weiter auseinander und vom Niveau noch merklich höher.

Die höheren Herstellungskosten und damit die Marktpreise nachhaltiger Flugkraftstoffe resultieren vor allem aus teuren (Biomasse-)Rohstoffen, aufwändigen Produktionsanlagen und der geringen Produktionsmengen, da es bisher keinen Massenmarkt für derartige Kraftstoffe gibt. Um weitere Kostenreduktionen auf Seiten der Herstellung und im Verlauf der gesamten Bereitstellungskette zu erreichen und damit die Marktfähigkeit nachhaltiger Flug-

kraftstoffe zu erhöhen, müssen Kostenreduktionen durch technisches Lernen und eine großtechnische Produktion (Skaleneffekte) genutzt werden. Dies ist nur durch einen entsprechenden Markthochlauf mit entsprechenden Marktvolumina möglich.

Darüber hinaus befinden sich einige Technologien zur Herstellung nachhaltiger Flugkraftstoffe in einem technischen Entwicklungsstand zwischen Pilot-/Demonstrationsanlagen und ersten (klein-)industriellen Anwendungen. Der weitere Anlagenaufbau im groß-industriellen Maßstab erfordert aber (sehr) hohe Investitionen (oft im dreistelligen Millionenbereich), während die Nachfrage für diese im Vergleich zu fossilem Kerosin nachhaltigeren Kraftstoffe ohne passende regulatorische Vorgaben nur schwer abgeschätzt werden kann. Derartige Rahmenbedingungen und damit eine solche Gesamtsituation sind auch für potenzielle Investoren sehr unattraktiv; d. h. ein Mangel an Investitionskapital für den Aufbau von entsprechenden Herstellungsanlagen ist die Folge und diese Technologieoptionen können – wenn überhaupt – nur sehr verlangsamt eine Marktfähigkeit erreichen.

Insgesamt besteht damit die (klassische) Henne-Ei-Problematik. Die hohen Kosten sind teilweise Resultat einer mangelnden Nachfrage nach nachhaltigen Flugkraftstoffe seitens der Fluggesellschaften. Diese werden wiederum keine flächendeckende Nachfrage

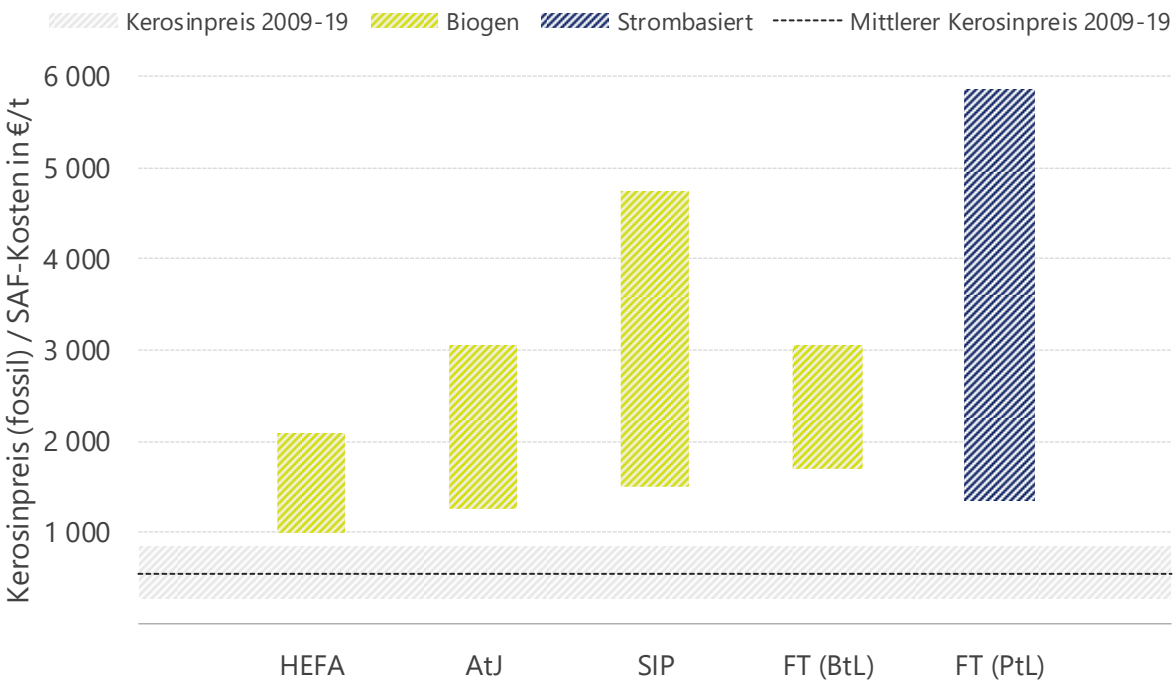


Abb. 8 **Bandbreite von Kraftstoffpreisen/-kosten fossiler Flugkraftstoffe und verschiedener SAF-Optionen** [Neuling 2019; ICAO 2017; Bullerdiek et al. 2019a; Timmerberg et al. 2019; Pavlenko et al. 2019; Dietrich et al. 2017; Jong et al. 2015; Agora und Frontier Economics Ltd. 2018; Brynolf et al. 2018; Hobohm et al. 2018; Schmidt et al. 2016]

induzieren, solange keine Kostenparität zu fossilen Flugkraftstoffen gegeben ist und solange sie in einem globalen Wettbewerb sind (und andere Länder keine entsprechenden Klimaschutzvorgaben machen). Dies wiederum würde den Aufbau von Produktionskapazitäten und damit die Erschließung von Kostenreduktionspotenzialen verzögern und damit die gegenwärtige Situation zementieren.

Allerdings ist eine Wettbewerbsfähigkeit nachhaltiger Flugkraftstoffe gegenüber fossilem Kerosin aber auch durch die Erschließung möglicher Kostenreduktionen nicht zwingend für sämtliche SAF-Optionen gegeben. Dies gilt insbesondere dann nicht, wenn zukünftige Kerosinpreise dem Preisniveau der Vergangenheit entsprechen. Aus diesem Grund sind für eine breite Markteinführung zwingend zielführende angebotsseitige ökonomische (Subventionen / Mindestpreissysteme) und/oder nachfrageseitige Förderinstrumente erforderlich. Diese Henne-Ei-Problematik kann nur durch eine entsprechende legale Rahmensetzung überwunden werden.

Fehlende Förderbedingungen für SAF

Die „Spielregeln" im globalen Luftverkehr werden durch verschiedene nationale und internationale regulatorische Rahmenwerke und Lenkungsinstrumente definiert, bei denen auch nachhaltige Flugkraftstoffe teilweise berücksichtigt werden. Allerdings kommt infolge dieser legalen Rahmensetzung der ökologische Vorteil von SAF im ökonomischen Kalkül einer kommerziellen Fluggesellschaft dabei nur unwesentlich oder überhaupt nicht zum Tragen. Fluggesellschaften haben bisher keine wirklichen Anreize für einen umfassenden Einsatz nachhaltiger Flugkraftstoffe im regulären Betrieb, da der mit der Verbrennung fossilen Kerosins verbundene Klimaeffekt bisher nicht eingepreist werden muss.

Wesentliche Instrumente und Rahmenwerke, die das wirtschaftliche Handeln des kommerziellen Luftverkehrs in Deutschland (mit-)bestimmen, werden im Folgenden näher dargestellt.

Luftverkehrsteuer. In Deutschland wurde die Luftverkehrsteuer 2011 eingeführt, um Anreize für ein umweltgerechteres Mobilitätsverhalten zu geben und parallel dazu zur Konsolidierung des Bundeshaushalts beizutragen. Die Luftverkehrsteuer hängt nicht von der eigentlichen Flugdistanz ab. Sie wird für drei unterschiedliche Flugdistanzklassen pro Abflug eines Fluggastes in Deutschland erhoben. Theoretisch erzeugt die Luftverkehrssteuer dadurch einen Anreiz zur Verkehrsvermeidung (verringertes Flugverkehrsaufkommen) oder zur Verkehrsverlagerung (Verlagerung auf kostengünstigere Verkehrsmittel). Durch beide Effekte kann sich eine klimaschonende Wirkung ergeben. Da die Höhe der Steuer aber insgesamt nicht von den freigesetzten Klimagasemissionen abhängt, sondern pro Passagier erhoben wird, erzeugt sie keine wirklichen Anreize, klimaschonende Maßnahmen im Luftverkehr zu ergreifen; d. h. die Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe, aber auch andere klimagasreduzie-

rende Maßnahmen (z. B. eine verbesserte Sitzplatzauslastung oder effizientere Fluggeräte) werden dadurch nicht gefördert.

Europäischer Emissionshandel (EU ETS). Mit der Integration in den Europäischen Emissionshandel (EU Emissions Trading System, EU ETS) müssen Fluggesellschaften für Emissionen von Flügen innerhalb des europäischen Wirtschaftsraumes seit 2012 Emissionsberechtigungen (European Union Aviation Allowance, EUAA) erwerben. Diese werden Fluggesellschaften teilweise kostenlos zugeteilt. Dieser kostenlose Anteil deckt aber nur einen Teil der freigesetzten Emissionsmenge ab und weitere Emissionsberechtigungen müssen über Auktionen oder einen bilateralen Handel erworben werden.

Im Gegensatz zu fossilem Kerosin werden nachhaltige Flugkraftstoffe im EU ETS mit einem Emissionsfaktor von Null angerechnet, sofern sie die Nachhaltigkeitskriterien der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) erfüllen. Damit werden de facto die ökologischen Eigenschaften nachhaltiger Flugkraftstoffe ins ökonomische / unternehmerische Kalkül einer Fluggesellschaft integriert und prinzipiell ein (ökonomischer) Anreiz geschaffen, Klimagasemissionen durch die Verwendung nachhaltiger Flugkraftstoffe zu reduzieren. Für Fluggesellschaften besteht dafür allerdings nur dann ein wirklicher (ökonomischer) Anreiz, wenn die gesamten Kosten der Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe geringer sind als die

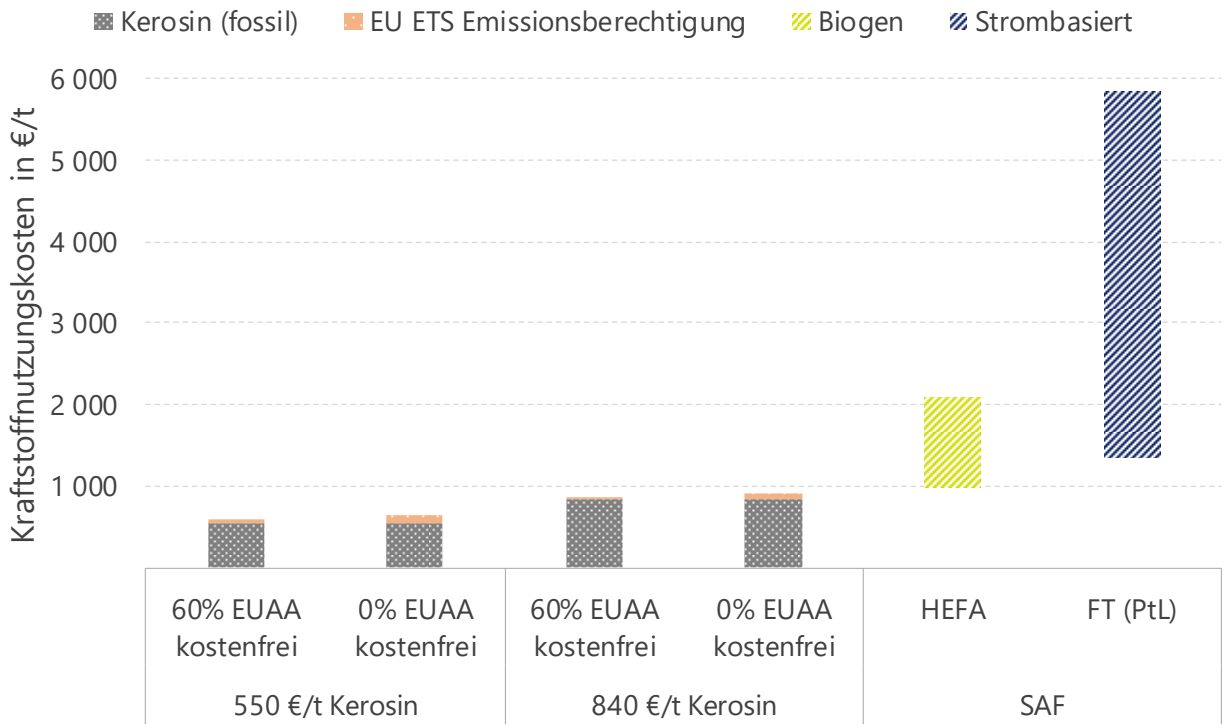


Abb. 9 EU ETS Nutzungskosten von fossilem Kerosin, HEFA- und PtL-Flugkraftstoffen
(Neuling 2019; Pavlenko et al. 2019; Jong et al. 2015; EEX 2019; Agora und Frontier Economics Ltd. 2018; Brynolf et al. 2018; Timmerberg et al. 2019; Schmidt et al. 2016, eigene Berechnungen)

Nutzung von fossilem Kerosin; d. h. der zu entrichtende Kraftstoffpreis für erneuerbare Kraftstoffoptionen muss geringer sein als der Preis für fossiles Kerosin zuzüglich der Kosten für EU ETS Emissionsberechtigungen (Abb. 9).

Abbildung 9 zeigt, dass eine Kostenparität zwischen fossilem Kerosin und nachhaltigen Flugkraftstoffen im Rahmen des EU ETS (bei bisherigen Kraftstoff- und CO_2-Preisen) nicht gegeben ist, da die Kraftstoffkosten von fossilem Kerosin durch den Zukauf von EU ETS Emissionsberechtigungen für eine Fluggesellschaft nur vergleichsweise marginal erhöht werden. Selbst wenn eine Fluggesellschaft alle EU ETS Emissionsberechtigungen zukaufen müsste (d. h. ihr keine Emissionsberechtigungen kostenlos zugeteilt würden, 0 % kostenfrei), wird damit eine Wettbewerbsfähigkeit für nachhaltige Flugkraftstoffe nicht erreicht. Deshalb wird ohne ein deutlich höheres Preisniveau der Emissionsberechtigungen mit dem EU ETS kein Anreiz zur Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe in Deutschland bzw. in der EU geschaffen.

CORSIA. Das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) ist ein marktbasiertes Klimakompensationsinstrument (Offsetting-Instrument) und soll ab 2020 ein bilanziell CO_2-neutrales Wachstum für den internationalen Luftverkehr ermöglichen. Durch CORSIA müssen Fluggesellschaften einen Teil ihrer Klimagasemissionen durch verbriefte Emissionseinsparungen (sogenannte CORSIA-Offsets) kompensieren. Bei den CORSIA-Offsets handelt es sich um verbriefte / zertifizierte Emissionseinsparungen, die außerhalb des Luftverkehrs in klar definierten Klimaschutzprojekten realisiert wurden. Sie müssen für diejenigen Emissionen von einer Fluggesellschaft erworben werden, die eine bestimmte Emissionsobergrenze (Baseline) überschreiten (Emissionsniveau des Jahres 2019). CORSIA gilt jedoch nur für internationale Flüge (d. h. Inlandsflüge sind von diesem Instrument ausgenommen).

Analog zum EU ETS können nachhaltige Flugkraftstoffe auch in CORSIA eingesetzt und angerechnet werden, um die freigesetzten Klimagasemissionen und damit den Zukauf von CORSIA-Offsets zu reduzieren. Dazu müssen nachhaltige Flugkraftstoffe mindestens eine Klimagasemissionseinsparung von 10 % über den gesamten Lebenszyklus gegenüber fossilem Kerosin aufweisen.

Analog zum EU ETS besteht auch in CORSIA nur dann ein Anreiz zur Nutzung der erneuerbaren Optionen und damit von SAF, wenn der Einsatz eines nachhaltigen Flugkraftstoffes gegenüber fossilem Kerosin geringere Kosten verursacht. Neben den Kraftstoffkosten bzw. Preisen muss dabei auch die jeweilige Anzahl an CORSIA-Offsets für die Kraftstoffoptionen berücksichtigt werden.

Potenziell dürfte das Preisniveau der CORSIA-Offsets (CO_2-Preise), insbesondere zu Beginn, etwa dem Niveau der EU ETS Emissionsberechtigungen entsprechen oder sogar noch niedriger ausfallen. Damit wäre es auch im Rahmen von CORSIA sehr unwahrscheinlich, dass der großtechnische Einsatz nachhaltiger

Flugkraftstoffe signifikant gefördert werden würde. Zusätzlich müssen lediglich Offsets für Treibhausgasemissionen oberhalb der jeweiligen Baseline von den Fluggesellschaften erworben werden.

Europäische Richtlinien. In der EU wird die Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektors primär über die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive, RED) bzw. ihre Neufassung (RED II) und die EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (Fuel Quality Directive, FQD) reguliert.

RED (II). Durch die RED II werden die EU-Mitgliedstaaten u. a. dazu verpflichtet, bis 2030 einen Mindestanteil erneuerbarer Energie im Verkehrssektor von 14 % zu erreichen.

Nachhaltige Kraftstoffe, die in der Luft- und Seefahrt verwendet werden, können von den Mitgliedstaaten auf die Erreichung des 14 %-Zieles und mit dem 1,2-fachen ihres Energiegehalts angerechnet werden, sofern die Kraftstoffe nicht aus Nahrungs- oder Futtermittelpflanzen hergestellt wurden. Werden erneuerbare Kraftstoffe aus biogenen Abfällen und Rückständen (z. B. Mist und Gülle, tierische Fette, Altspeiseöl) erzeugt, können sie mit dem 2-fachen ihres Energiegehalts angerechnet werden. Werden diese Rohstoffe zur Herstellung nachhaltiger Flugkraftstoffe verwendet, ergibt sich für sie im Rahmen der RED II ein Anrechnungsfaktor von 2,4 und damit ein gewisser Nutzungsanreiz bzw. ein Anreiz dafür, nachhaltige Flugkraftstoffe gegenüber anderen (Kraftstoff-)Optionen zur RED II Zielerreichung zu verwenden. Neben dieser Anreizfunktion ist in der RED II jedoch keine verbindliche Vorgabe zur Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe verankert.

Die RED II muss bis Mitte 2021 in deutsches Recht umgesetzt werden. Das entsprechende Gesetzgebungsverfahren wurde initiiert. Bisherigen Überlegungen zufolge könnte eine sehr begrenzte Quote für strombasierte SAF für den Einsatz im Flugverkehr gesetzlich verankert werden. Zusätzlich sollte die Marktdurchdringung mit heute verfügbaren nachhaltigen Flugkraftstoffen durch einen „opt-in" Mechanismus incentiviert werden, ähnlich wie beispielsweise in den Niederlanden.

FQD. Die EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (Fuel, Quality Directive, FQD) schreibt vor, die Klimagasbilanz der in Verkehr gebrachten fossilen Otto- und Dieselkraftstoffe bis 2020 um mindestens 6 % gegenüber dem EU-Durchschnittswert des Jahres 2010 zu verringern. Analog zur RED II beziehen sich diese Vorgaben aber nicht auf Flugkraftstoffe, sodass auch durch die FQD kein Anreiz bzw. keine verbindliche Vorgabe zur Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe geschaffen wird.

Fazit. Insgesamt haben Fluggesellschaften bisher – abgesehen von Reputations- und Marketinggründen – keine Anreize zur Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe. In Deutschland, in der EU oder international bereits implementierte Mechanismen, wie die Luftverkehrsteuer, der EU ETS und/oder CORSIA, schaffen keinen ausreichenden Impuls zur

großtechnischen Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe. Im Rahmen des EU ETS und von CORSIA wird der ökologische Vorteil nachhaltiger Flugkraftstoffe (geringere Klimagasemissionen im Vergleich zu fossilem Kerosin) zwar ökonomisch eingepreist; der dadurch entstehende (monetäre) Anreiz reicht allerdings bei weitem nicht aus, um nachhaltige Flugkraftstoffe ökonomisch wettbewerbsfähig zu machen. Die Wettbewerbsfähigkeit und dadurch potenzielle flächendeckende SAF-Nutzung ist daher aufgrund der deutlichen Unterschiede zwischen den Marktpreisen für fossiles Kerosin und den Herstellungskosten nachhaltiger Flugkraftstoffe ohne geeignete regulatorischen Anreizmechanismen oder gesetzlich verpflichtenden Nutzungsvorschriften (Quoten) – wie etwa im Straßenverkehr – bisher ausgeschlossen.

Nationale RED II Umsetzung. Im Rahmen der Umsetzung der RED II werden erste verbindliche Vorgaben zur Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe sowie angebotsseitige Fördermechanismen in einigen Ländern diskutiert und auch im vorliegenden Referentenentwurf der RED II in nationales Recht vorgeschlagen. Darüber hinaus haben einzelne europäische Staaten die Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe gesetzlich in Form von Quotenmodellen vorgeschrieben, die sich in ihrer jeweiligen konkreten Ausgestaltungsform und damit auch Marktverbreitung allerdings teilweise stark unterscheiden. Während damit einzelne Maßnahmen allenfalls auf nationaler Ebene ergriffen und – zumindest in der EU – ein inhomogener regulatorischer Förderrahmen geschaffen wird, schreiben die grundlegenden europäischen Richtlinien zum Klimaschutz im Verkehrssektor eine verbindliche Vorschrift zur Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe im Luftverkehr bisher nicht zwingend vor – anders als es etwa für den straßengebundenen Verkehr schon lange der Fall ist.

Insgesamt ist damit bisher keine ausreichende Planungssicherheit für einen Marktentwicklung für SAF – mit dem damit verbundenen Anlagenhochlauf – gegeben; dies könnte sich ggf. mit der Umsetzung der RED II in nationales Recht aber beispielsweise für Deutschland ändern, wenn biogene und strombasierte SAF ganzheitlich berücksichtigt werden. Bestehende und zukünftige Hersteller nachhaltiger Flugkraftstoffe benötigen zwingend einen langfristig glaubhaften Markt, um Kapital zu akquirieren und Investitionen in den Anlagenaufbau zu tätigen – und dadurch auch die vorhandenen Kostenreduktionspotenziale durch ein forciertes Durchlaufen der Lernkurve zu erschließen. Andernfalls besteht das Risiko, dass sie ihre Rohstoffe zur Produktion von Kraftstoffen oder anderen Produkten für anderen Sektoren (z. B. chemische Industrie; Stichwort: Green Chemistry) verwenden, was i. Allg. mit nur geringen Modifikationen umgesetzt werden kann.

ReFuelEU Aviation. Auf europäischer Ebene wird die Förderung und Nutzung von SAF derzeit intensiv im Rahmen der „ReFuelEU Aviation“ Initiative vorangetrieben. Sie ist ein wichtiges Element des „EU Green Deals“ und der

„Sustainable and Smart Mobility Strategy", um den Markthochlauf nachhaltiger Flugkraftstoffe intensiv zu beschleunigen. Im Rahmen der ReFuelEU Aviation Initiative wurden mehrere Roundtable-Veranstaltungen durchgeführt und durch eine öffentliche Konsultation verschiedene regulatorische Maßnahmenpakete zur Förderung nachhaltiger Flugkraftstoffe für die EU entwickelt. Dabei wurden vor allem verschiedene SAF-Quotenmodelle als mögliche Lenkungsinstrumente diskutiert. Die einzelnen Maßnahmenentwürfe weisen dabei verschiedene technische, ökologische, ökonomische und regulatorische Herausforderungen, Chancen und Risiken auf. Die Finalisierung und Umsetzung eines ausgewählten Ansatzes und verschiedener Quotenbestandteile, z. B. der Geltungsrahmen, die Art der Quote (volumenbasiert oder Treibhausgas-Minderungsquote), die Quotenverpflichteten (Inverkehrbringer oder Abnehmer) oder die genauen Erfüllungsmechanismen, stehen allerdings noch aus [EC 2020b, 2020a]. In allen Ansätzen soll die Nutzung von Anbaubiomasse zur Quotenerfüllung ausgeschlossen werden, um damit den Aufbau tatsächlich nachhaltiger SAF-Lieferketten zu incentivieren und eine möglichst hohe und breite Befürwortung in der Gesellschaft zu erreichen.

Handlungsnotwendigkeit. Im Ergebnis sind ein ganzheitliches Vorgehen und zielführende Fördermechanismen erforderlich, die Planungssicherheit, geeignete Nutzungsbedingungen und eine ökonomische Wettbewerbsfähigkeit für biogene und strombasierte nachhaltiger Flugkraftstoffe herbeiführen können, soll ein wirksamer Klimaschutz im kommerziellen Luftverkehr schnell und erfolgreich umgesetzt werden. Dazu ist eine Vielzahl verschiedener Schritte in einer effektiven zeitlichen Abfolge erforderlich.

Das eröffnet die große Chance, dass der Industriestandort Deutschland bei einem derartigen Markthochlauf nachhaltiger Flugkraftstoffe eine Vorreiterrolle einnimmt und sich damit mittelfristig zum Technologieanbieter entwickelt, der wesentliche Komponenten der für eine globale Defossilierung des kommerziellen Luftverkehrs benötigten Anlagentechnik liefern kann.

aireg-Roadmap zur Einführung nachhaltiger Flugkraftstoffe

Hintergrund und Zielsetzung

Nachhaltige Flugkraftstoffe bieten großes Potenzial, zum Haupttreiber für die Reduktion von Klimagasemissionen im Luftverkehrssektor zu werden. Das gilt für heutige sowie zukünftige Flotten, die sehr wahrscheinlich – zumindest in einer längeren Übergangszeit – weiterhin auf flüssiges Kerosin angewiesen sein werden. Um davon ausgehend das Potenzial von SAF zu nutzen, den Aufbau von Produktionsanlagen voranzutreiben und geeignete (ökonomische) Bedingungen für die SAF-Nutzung herzustellen, bedarf es sehr großer und in sich abgestimmter Anstrengungen.

Während SAF heute nur in sehr geringen Mengen und nur auf Biomassebasis am Markt verfügbar sind, wird deren Produktionskapazität in den 2020er Jahren voraussichtlich auf über 10 Millionen Jahrestonnen ansteigen. Aktuelle Prognosen aus den USA und aus Asien legen sogar den Schluss nahe, dass die jährliche Kapazität ggf. auf 30 bis 40 Millionen Tonnen im Jahr 2030 steigen könnte. Im Zuge dieses Produktionsanstiegs wird aus heutiger Sicht erwartet, dass sich ein Preis für SAF einpendeln wird, der etwa doppelt so hoch sein wird, wie der Kerosins fossiler Herkunft; dies wird aber auch maßgeblich von der weiteren Entwicklung der fossilen Rohölpreise abhängen.

Die Treibhausgasemissions-Reduktionen von biomassebasierten SAF, insbesondere aus Abfällen, Rückständen und Nebenprodukten, sind beachtlich. Durch ihren Einsatz können bis zu 80 % weniger CO_2-Emissionen (CO_2 fossiler Herkunft) und bis zu 70 % weniger Partikelemissionen freigesetzt werden.

Anders als in Europa – mit einigen wenigen Ausnahmen – setzen Fluggesellschaften in den USA die geringen bisher am Markt verfügbaren SAF bereits im Regelbetrieb ein; dies gilt nicht zuletzt aufgrund einer vorteilhaften Regulierung zur Absenkung der hohen Preise. Demgegenüber halten sich europäische Fluggesellschaften aufgrund fehlender regulatorischer Anreize mit der Nutzung von SAF stark zurück. Ohne größere, einfach am Markt verfügbare Produktionsvolumina, zumindest näherungsweise wettbewerbliche Nutzungskosten (im Vergleich zu fossilem Kerosin) und vor allem einem geeigneten Ordnungsrahmen, der den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe im Luftverkehr legal regelt, ist in Europa und auch in Deutschland nicht zu erwarten, dass sich ein signifikanter Markt für SAF entwickeln wird.

Will die deutsche und europäische Luftfahrt einen wesentlichen Beitrag zu den Klimaschutzzielen des Luftverkehrs und des Verkehrssektors leisten, ist der Einsatz großer Mengen nachhaltiger Flugkraftstoffe unter Berücksichtigung aller nachhaltigen Rohstoffoptionen erforderlich.

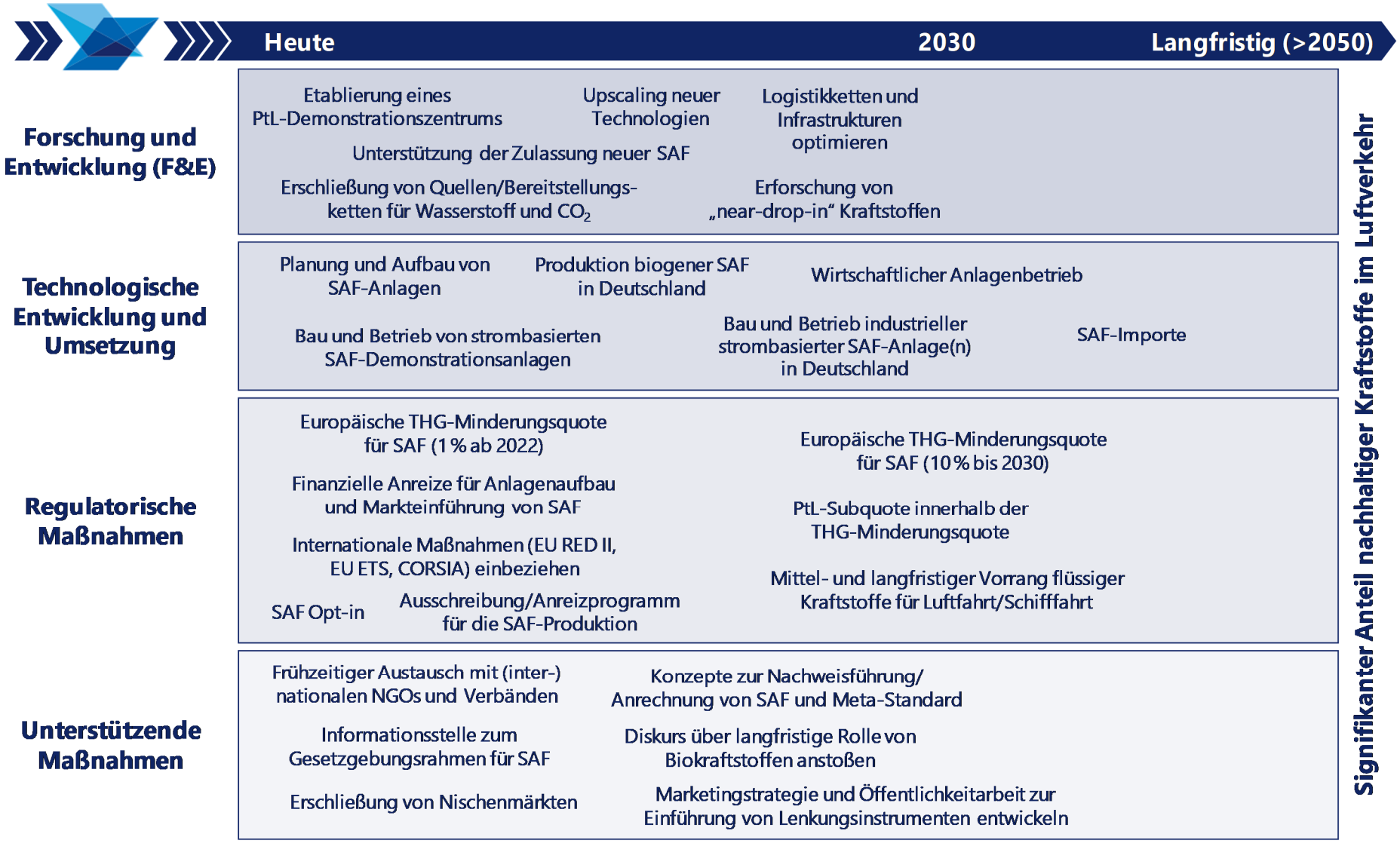
Für diesen Handlungsbedarf zeigt die aireg Roadmap einen möglichen Entwicklungspfad auf.

Will die deutsche (und europäische) Luftfahrt einen signifikanten Beitrag zu den global völkerrechtlich verbindlich gesteckten Klimaschutzzielen des Luftverkehrs sowie den europäischen und deutschen Klimazielen des Verkehrssektors leisten, ist die Herstellung signifikanter SAF-Mengen für einen Einsatz im kommerziellen Luftverkehr unerlässlich. Dazu müssen die entsprechenden SAF Produktionskapazitäten aufgebaut werden.

Für diesen Handlungsbedarf zeigt die von den aireg Mitgliedern entwickelte Roadmap einen möglichen Entwicklungspfad unter Berücksichtigung technologischer, ökologischer, ökonomischer und regulatorischer Rahmenbedingungen und Erfordernissen. Diese Roadmap dient als Zielvorgabe, um die Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe in Deutschland und vor allem auch insgesamt in Europa strategisch, systematisch und ganzheitlich voranzutreiben und den Entwicklungsverlauf kontinuierlich zu diskutieren und zu bewerten. Die darin enthaltenen Maßnahmen umfassen die Forschung und Entwicklung (F&E) von SAF-Herstellungstechnologien, die (industrielle) technologische Entwicklung und Umsetzung von SAF, die Schaffung geeigneter regulatorischer Rahmenbedingungen sowie flankierende Maßnahmen. Diese Roadmap beinhaltet damit konkrete Umsetzungsvorschläge bis zum Jahr 2030 sowie Empfehlungen, die über 2030 hinausgehen und potenziell bis 2050 wirken.

Zur Umsetzung der nachfolgenden Maßnahmen bieten die aireg Mitglieder der Politik auf Bundes- und Länderebene sowie weiteren Stakeholdern aus Industrie, Wirtschaft und Wissenschaft die Zusammenarbeit an, um den dringend erforderlichen Markthochlauf von nachhaltigen Flugkraftstoffen gemeinsam voranzubringen und möglichst zeitnah umzusetzen.

Abb. 10 aireg Roadmap zur Einführung nachhaltiger Flugkraftstoffe



Forschung und Entwicklung (F&E)

Mit diesen Maßnahmen sollen SAF-Technologien für einen Hochlauf vorbereitet werden, die noch weit von einer kommerziellen Anwendung entfernt sind. Dafür ist es u. a. erforderlich, erste semi-industrielle Anlagen zu errichten, mit denen erste Erfahrungen für einen anschließenden kommerziellen Betrieb gesammelt werden können. Dies sollte in enger Begleitung und Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie geschehen. Mit den Maßnahmen dieser Kategorie gilt es darüber hinaus auch, weitere Potenziale für die Rohstoffbereitstellung einer großtechnischen SAF-Herstellung zu identifizieren und verfügbar zu machen (z. B. Wasserstoff und CO_2 für strombasierte Kraftstoffe).

Etablierung eines PtL-Demonstrations- und Forschungszentrums in Deutschland

Limitierte Potenziale biogener Rohstoffe werden die Bedeutung biogener SAF im Luftverkehr langfristig vermutlich begrenzen, auch wenn sie insbesondere für einen kurz- und mittelfristigen SAF-Hochlauf zwangsläufig gefordert sind. Daher werden nicht-biogene Flugkraftstoffe, vor allem PtL-Kraftstoffe, mittel- und langfristig eine zentrale Rolle zur Defossilierung des Luftverkehrs einnehmen müssen. Um diese Optionen – die heute aus technologischer Sicht noch weit von groß-industriellen Anwendungen entfernt sind – frühzeitig und in ausreichender Menge verfügbar zu machen, müssen die erforderlichen Produktionsverfahren bzw. die jeweilige Verfahrenstechnik schon heute entwickelt und zur Marktreife gebracht werden. Dazu ist eine merkliche öffentliche Unterstützung notwendig, damit die Lernkurve forciert durchlaufen und die Anlagentechnik schnell marktverfügbar ist.

In diesem Sinne soll der Aufbau eines Forschungs- und Demonstrationszentrums (im Sinne eines Technikums) für PtL-Kraftstoffe möglichst unter dem Dach einer vorhandenen (Bundes-)Forschungsorganisation mit dem Ziel eingerichtet werden, ein Scale-Up bzw. die Marktvorbereitung von PtL-Kraftstoffen voranzutreiben und zu begleiten. In diesem Zuge soll auch eine Vernetzung und Bündelung der in Deutschland vorhandenen Kompetenzen aus Forschung und Industrie realisiert werden, d. h. eine enge Zusammenarbeit von Forschung und Industrie soll und muss gefördert werden.

Das Forschungs- und Demonstrationszentrum sollte den Aufbau einer semi-industriellen Produktionsanlage mit einer Jahresproduktion von etwa 10.000 Tonnen an nachhaltigem synthetischem PtL-Kerosin beinhalten. Während dafür anfangs wahrscheinlich – auch wegen der schon vorhandenen Erfahrungen mit dieser Anlagentechnik – nur die Fischer-Tropsch-Technologie zum Einsatz kommen kann, da nur diese Technologie-Route bislang für die Luftfahrt nach ASTM zugelassen ist, müssen im weiteren Verlauf auch andere Technologie-Routen (z. B. Methanolsynthese) auf ihre industrielle Tauglichkeit überprüft und in diese überführt werden. Insofern kann diesem Zentrum auch eine koordinierende und integrative

Rolle für Aktivitäten an anderen Standorten in Deutschland zukommen.

Erschließung möglicher Quellen und Bereitstellungsketten für Wasserstoff und CO_2

Eine wesentliche Herausforderung bei der industriell-relevanten Herstellung von synthetischen, strombasierten Kraftstoffen ist eine gesicherte, effiziente und nachhaltige Bereitstellung der Ausgangsstoffe Wasserstoff (H_2) und (nachhaltigem) Kohlenstoffdioxid (CO_2) in ausreichender Größenordnung.

Die Wasserstofferzeugung kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Eine vielversprechende und skalierbare Erzeugungsoption von sogenanntem „grünem" Wasserstoff ist die Wasserelektrolyse, bei der Wasser unter Einsatz von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien in seine Elemente Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird. Aufgrund des hohen Energiebedarfes – und dem damit verbundenen hohen Anteil an den Gesamtkosten der Kraftstoffsynthese – sind Regionen und Standorte mit besonders hohem erneuerbaren Energiepotential entscheidend für eine kostengünstige Wasserstofferzeugung. Die Bundesregierung hat im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie dazu verstärkt Standorte in der MENA-Region, in Süd-Afrika und in Süd-Amerika in den Blick genommen. Um die Fluktuationen der erneuerbaren Energien zu reduzieren, ist eine Kombination aus Windkraft und Photovoltaik prädestiniert. Die notwendigen Speicherkapazitäten, um eine konstante Wasserstoffbereitstellung zu gewährleisten, können anschließend deutlich geringer dimensioniert werden. Mögliche Speicheroptionen bilden Wasserstoffspeicher in Form von Drucktanks und perspektivisch Salzkavernen, aber auch Pumpwasserkraftspeicher sowie zukünftig Batterien als Ergänzung zur Speicherung der elektrischen Energie.

Als Bereitstellungsmöglichkeit von CO_2 aus nachhaltigen Quellen kommt z. B. die Nutzung von Biogas in Frage, in dem CO_2 als Gas-Komponente enthalten ist. CO_2 fällt hier u. a. als Nebenprodukt an, wenn das Biogas aus einer Biogasanlage aufbereitet wird, um beispielsweise das darin enthaltene Biomethan ins Erdgasnetz als „grünes" Gas einzuspeisen. Aber auch bei der Bioethanolherstellung fällt CO_2 als Nebenprodukt an. In diesen und weiteren Fällen wäre auch der Aufbau einer entsprechenden Bereitstellungsinfrastruktur erforderlich, um CO_2 aus unterschiedlichen Quellen und/oder Standorten möglichst flexibel an ggf. verschiedene PtL-Herstellungsstandorte zu distribuieren.

Wird CO_2 durch eine atmosphärische Abscheidung (d. h. aus Umgebungsluft) gewonnen (Direct-Air-Capture), könnte es am Ort der PtL-Anlage bereitgestellt werden. Die Herausforderung dieser Möglichkeit zur CO_2-Bereitstellung liegt in der geringen Konzentration von CO_2 in der Umgebungsluft, sodass die Bereitstellung einer bestimmten CO_2-Menge mit einem hohen Energiebedarf und einer entsprechend aufwändigen Anlagentechnik einhergeht.

Insgesamt ist es für eine industrielle PtL-Herstellung daher erforderlich, sowohl die Potenziale der Wasserstoffbereitstellung per Wasser-Elektrolyse als auch die Verfügbarkeit und Erschließung von nachhaltigen CO_2-Quellen sowie den jeweiligen Möglichkeiten zur Bereitstellung zu untersuchen.

Unterstützung der Zulassung neuer SAF

Für die Nutzung von SAF wird bisher in erster Linie der drop-in Ansatz verfolgt; d. h. die jeweils zugelassenen SAF-Optionen sollen in kommerziellen Triebwerken und der bestehenden Kraftstoffinfrastruktur (u. a. Pipelinesysteme, Flughafentanklager oder die Flugzeugbetankungsinfrastruktur am Flughafen) ohne technische Modifikationen und zusammen mit herkömmlichem (fossilen) Kerosin eingesetzt werden können. Um diese Anforderung zu erfüllen, bestehen im Rahmen der Zulassung strenge und detaillierte Testanforderungen, die sicherstellen, dass das wesentliche Eigenschaftsspektrum einer SAF-Option mit den Eigenschaften von herkömmlichem (fossilen) Kerosin übereinstimmt.

Im Luftverkehr bestehen aus sicherheitstechnischen Gründen ohnehin sehr hohe Anforderungen an die Eigenschaften von Flugkraftstoffen, die in verschiedenen Spezifikationen und Standards definiert werden (z. B. ASTM D1655, ASTM D7566, DEF STAN 91-91). Die Zertifizierung neuer SAF im Rahmen dieser Vorgaben, aber auch die mögliche Zulassung von SAF-Optionen, die ohne Mischung mit normenkonformen Flugkraftstoffe verwendet werden können (100 % SAF), ist in der Regel ein mehrjähriger und kostenintensiver Prozess, bei dem verschiedene Behörden und Industrieakteure beteiligt sind.

Um ein breites Spektrum an nutzbaren SAF-Optionen zu fördern, sollte die Zulassung zukünftiger SAF-Optionen daher weitgehend unterstützt werden. Support kann hier geleistet werden, indem die Kommunikation zu Zulassungsbehörden und der Informations- und Datenaustausch begleitet und bei der Erstellung erforderlicher Dokumentationen für den Zulassungsprozess sowie beim Austausch mit Flugzeug- und Triebwerksherstellern unterstützt wird. Auch die bisherigen Erfahrungen mit bereits zugelassenen alternativen Kraftstoffen sowie die Einbringung aktueller international erworbener Forschungsergebnisse können bei den Optimierungsbestrebungen der ASTM sinnvoll ergänzen.

Upscaling neuer Technologien

Um neue Technologien entlang der gesamten Herstellungskette strombasierter Verfahren zur Herstellung von SAF (z. B. neue Elektrolyse-Verfahren, neue Synthesereaktoren) wirtschaftlich sinnvoll einsetzen zu können, ist ein Upscaling der heutigen Anlagenmaßstäbe zwingend erforderlich. Hierzu muss das Upscaling dieser Technologien aus dem Labor- bzw. Versuchsmaßstab in eine industrielle Größenordnung unterstützt werden; dies schließt die Einbindung in die schon vorhandenen industriellen Produktionsstrukturen mit ein.

Im Rahmen eines solchen Hochlaufs sollten zunächst kleinere PtL-Anlagen gebaut werden, anhand derer Lern- und Erfahrungskurven

durchlaufen werden und Erfahrungswerte für die spätere kommerzielle Herstellung von PtL aufgebaut werden können. Ein derartiger Anlagenaufbau sollte möglichst frühzeitig initiiert werden, da auch für den Aufbau kleinerer Anlagen gewisse (längere) Vorlaufzeiten berücksichtigt werden müssen (z. B. für Planungs- und Genehmigungsprozesse).

Logistikketten und Infrastrukturen optimieren

Auch wenn ein Großteil der vorhandenen Flugkraftstoffinfrastruktur auch für nachhaltige Flugkraftstoffe nahezu uneingeschränkt genutzt werden kann, werden gewisse Anpassungen und Erweiterungen dieser Infrastruktur erforderlich sein; dies gilt beispielsweise für neue SAF-Anlagen an eher dezentralen Standorten zur Anbindung an die bestehenden Infrastruktur, da das Rohstoffangebot potenziell eine höhere Priorität für die Errichtung und Standortauswahl von PtL-Anlagen aufweist als die Nähe zu zentralen Verkehrsflughäfen. Vor allem für die PtL-Herstellung müssen vorgelagerte Rohstoffbereitstellungsketten (z. B. für den Wasserstoff- und CO_2-Transport) sowie Teile der Verarbeitungsinfrastruktur (z. B. bestehende Raffinerieanlagen) auf die Anforderungen für den großflächigen Einsatz von SAF hin angepasst und optimiert werden.

Neben der großtechnischen Nutzung von SAF an (internationalen) Verkehrsflughäfen kommt die Nutzung auch im General Aviation Segment in Frage. Gerade in Markhochlaufphasen kann der SAF-Einsatz in diesen Nischen-Segmenten hilfreich sein. Da dieses Segment nicht ausschließlich an großen (internationalen) Verkehrsflughäfen operiert, muss eine Aufnahme von SAF potenziell auch an kleineren Flughäfen ermöglicht werden.

Erforschung von „near-drop-in" Kraftstoffen

Drop-in Kraftstoffe erfüllen alle technischen Spezifikationsanforderungen fossil-basierter JET A- und JET A1-Kraftstoffe; d. h. sie sind mit der heute vorhandenen Infrastruktur und den existierenden Flugzeugflotten kompatibel. Diese Kompatibilität erstreckt sich dabei von älteren Flugzeugmustern und Triebwerkstypen bis hin zu modernen Flugzeugkonzepten und Triebwerkstechnologien. Drop-in Kraftstoffe können heute jedoch nur bis zu einem maximalen Anteil von 50 % zu konventionellem Flugkraftstoff (Kerosin) beigemischt werden. Dies reduziert beispielsweise die erreichbaren Klimagasreduktionen und die aus Klimaschutzüberlegungen anzustrebende gänzliche Substitution fossiler Flugkraftstoffe.

Neben drop-in Kraftstoffen gibt es auch sogenannte „,near-drop-in" Kraftstoffe. Sie ermöglichen vom Grundsatz her höhere Beimischungsgrenzen, erfordern dafür aber teilweise kleinere Modifikationen an bestimmten Flugzeugkomponenten (u. a. Dichtungen im Treibstoffsystem). Diese near-drop-in Kraftstoffe sind bis zu 100 % in modernen Triebwerkstechnologien einsetzbar, was u. a. die erreichbaren Emissionsreduktionen gegenüber drop-in Kraftstoffen deutlich erhöht, aber auch Schadstoffemissionen und Instandhaltungskosten reduzieren kann.

Vor diesem Hintergrund muss neben der Weiterentwicklung und Zulassung von drop-in Kraftstoffen die ASTM Qualifizierung und auch der Einsatz von near-drop-in Kraftstoffen forciert werden.

Technologische Entwicklung und Umsetzung

Mit den nachfolgenden Maßnahmen sollen verschiedene SAF-Technologien in einen kommerziellen, groß-industriellen Maßstab überführt werden. Aufgrund der Marktgegebenheiten von SAF – ihre fehlende ökonomische Wettbewerbsfähigkeit – erfordert dieses Upscaling u. a. einen hohen Kapitalbedarf für den Anlagenaufbau und lange Vorlaufzeiten. Durch die nachfolgenden Maßnahmen soll auch die Bereitstellung ausreichender SAF-Mengen an deutschen Flughäfen gesichert werden, wenngleich die Herstellungspotenziale in anderen Ländern, Regionen oder Kontinenten z. T. deutlich größer sein können.

Planung und Aufbau von Anlagen zur SAF-Herstellung

Der Weg der von der Verfahrensentwicklung bis zum Betreiben einer kommerziellen Anlage zur Herstellung von SAF erfolgt über mehrere, langjährige Entwicklungsschritte.

Im Anschluss an die Grundlagenuntersuchungen (Scale-up von der Synthese im Labormaßstab zur Technikumsanlage) erfolgen Planung und Aufbau der technischen Großanlage. Dazu wird für eine bestimmte industrielle Produktionskapazität ein Process Design Package (PDP) erstellt, welches relativ standortunabhängig die Verfahrenstechnologie beschreibt. Es enthält den grundsätzlichen Aufbau der Anlage mit den Verfahrensstufen, die mit der passenden Massen- und Energiebilanz hinterlegt sind. Hierdurch werden Anforderungen an die Infrastruktur am Standort definiert (wie z. B. Einsatzstoffe, Energien und Betriebsmittel, Arbeitskräfte und Flächenbedarf).

Im nächsten wesentlichen Schritt geht es um die Standortwahl. Idealerweise wird die Anlage an einem bereits existierenden Chemie- oder Raffineriestandort errichtet; dann kann u. a. bereits bestehende Infrastruktur genutzt, schon vorhandenes Fachpersonal eingesetzt, eine Akzeptanz in der Bevölkerung unterstellt sowie eine vereinfachte und damit deutlich kürzere Umweltverträglichkeitsprüfung realisiert werden. Außerdem ist für eine Anlage zur Herstellung strombasierter SAF auch die Verfügbarkeit einer regenerativen Kohlenstoff- bzw. CO_2-Quelle und von erneuerbar erzeugtem Strom wesentlich.

Auf dieser Standortanalyse setzt nun das Erstellen einer Machbarkeitsstudie unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten auf. Hierbei werden Varianten zum Anlagenlayout und der Einbindung in die Infrastruktur untersucht und mit einer entsprechenden Kostenschätzung und Terminplanung hinterlegt. Dies kann z. T. bereits parallel zur Standortanalyse realisiert werden.

Auf dieser Grundlage folgt die Phase des Basic Engineerings. Hier werden u. a. wesentliche

Auslegungsparameter, eine Energie- und Massenbilanz, die einzusetzenden Maschinen und Apparate sowie die benötigte Automatisierungstechnik bestimmt. Weiterhin erfolgen in dieser Phase die Planung von Aufstellung, Bau, Stahlbau und Rohrleitungstechnik sowie Sicherheitsbetrachtungen.

Die Ergebnisse des Basic Engineerings fließen in das Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) einschließlich notwendiger Anhörungen und Öffentlichkeitsbeteiligung unter Berücksichtigung von Baurecht, BetrSichV und WHG ein („Behördenengineering").

In der Regel erfolgt nach erteilter Genehmigung die Phase des Detail Engineerings. Hier findet eine detaillierte Auslegung von Maschinen, Apparaten, Mess- und Regeltechnik sowie die Detailplanung von Rohrleitungen, Bau und Stahlbau statt.

Bereits während des Detail Engineerings beginnen die notwendigen Beschaffungsaktivitäten. Dabei ist ein besonderes Augenmerk auf die Bestimmung von Ausrüstungen mit langen Lieferzeiten zu richten.

Mit den Bau- und Montage-Arbeiten wird ebenfalls parallel zum Detail Engineering begonnen. Spätestens jetzt muss auch mit der Rekrutierung und Schulung des Betreiberpersonals begonnen werden.

Nach Fertigstellung der Anlage beginnen die Inbetriebnahmeaktivitäten, die mit erfolgreicher Leistungsfahrt und Übergabe der Anlage einschließlich As-built-Dokumentation an den Betreiber enden. Insgesamt ist für Engineering, Montage und Inbetriebnahme – abhängig von vielleicht schon im Vorfeld erfolgten Planungsleistungen – mit einem notwendigen Zeitvorlauf von mindestens 3,5 bis 5 Jahren zu rechnen. Damit ist die Bereitstellung von SAF erst mehrere Jahre nach dem Entschluss eines Anlagenaufbaus möglich. Ein Anlagenaufbau zur Herstellung von SAF muss daher frühzeitig angestoßen werden.

Produktion biogener SAF in Deutschland

Vorhandene Anlagenkapazitäten zur Herstellung von nachhaltigen, biogenen Kraftstoffen können nur begrenzt auch SAF für die Luftfahrt bereitstellen. Außerdem befinden sie sich fast ausschließlich außerhalb Deutschlands. Um ein entsprechendes Know-How in Deutschland zu halten und Anlagenkapazitäten für eine nationale Versorgung mit biogenen SAF (Bio-Rohstoffe und Abfälle) aufzubauen, sollte überlegt werden, vorhandene Biokraftstoffanlagen auch für die Bereitstellung von SAF zu ertüchtigen. Damit würden (i) eine weitere Marktverfügbarkeit entsprechenden synthetischen Kerosins erreicht,

Abb. 11 Ablaufschema der Planung und des Aufbaus von SAF-Anlagen

(ii) zusätzliche Erfahrungen mit einem industriellen Anlagenbetrieb auch in Deutschland gesammelt, die dann ggf. auf weitere Projekte übertragen werden können und (iii) signifikante SAF-Mengen für den deutschen und europäischen Luftverkehr bereitgestellt werden.

In diesem Zuge müssen auch geeignete Defossilierungsoptionen für diejenigen Anwendungsbereiche bereitgestellt werden können, die von umgerüsteten/umgewidmeten Biokraftstoffanlagen nicht mehr versorgt werden, aber weiterhin einen Bedarf an nicht-fossilen Energieträgeroptionen aufweisen – beispielsweise der straßengebundene Verkehrssektor.

Bau und Betrieb von strombasierten SAF-Demonstrationsanlagen

PtL-Kraftstoffe sowie Hybridverfahren auf Basis von Feedstock-Kombinationen haben das Potenzial, einen entscheidenden Beitrag für einen umweltfreundlichen und klimaneutralen Luftverkehr zu leisten. Allerdings sind bisher – außer in einigen wenigen Labor- bzw. Kleinstanlagen (d. h. Produktionsausbringungsmengen im Liter- bzw. Kilogramm-Maßstab) – keine größeren Anlagen im Bau oder in Betrieb. Diese werden jedoch zwingend benötigt, um die Lernkurve bei der Produktion solcher Kraftstoffe zu durchlaufen und damit Kostensenkungen bei der Herstellung zu realisieren, was für einen (zeitnahen) Markteintritt nachhaltiger Flugkraftstoffe zwingend erforderlich ist.

Durch den Bau und Betrieb einer bzw. mehrerer PtL-Demonstrationsanlage(n) zur Produktion von PtL-Kraftstoffmengen in industriellem (Demonstrations-)Maßstab (mindestens 10.000 bis 15.000 Tonnen pro Jahr), die mit Kosten von jeweils ca. 150 bis 200 Millionen Euro verbunden sind, kann in Deutschland eine industriepolitisch wichtige Technologie-Vorreiterrolle aufgebaut werden, welche die Grundlage für eine nachhaltige Wertschöpfung bilden wird.

Bau und Betrieb industrieller strombasierter SAF-Anlage(n) in Deutschland

Nach einem erfolgreichen Demobetrieb muss die Technologie in einen (groß-)industriellen Maßstab überführt werden, um (i) ein Upscaling der Technologie zu erreichen, (ii) Erfahrungen mit einem industriellen Anlagenbetrieb zu sammeln, um diese auf weitere Projekte übertragen zu können, und (iii) erste signifikante Nutzungsangebote für den deutschen und europäischen Luftverkehr zu realisieren.

Wirtschaftlicher Anlagenbetrieb

Unter anderem aufgrund des fehlenden regulatorischen Rahmens ist derzeit noch nicht klar, wie die flächendeckende Markteinführung und der Markthochlauf strombasierten synthetischen Kerosins gelingen können. Zum einen sind strombasierte Kraftstoffe aufwändig in der Herstellung und werden deshalb auf absehbare Zeit teurer als fossile Flugkraftstoffe bleiben. Zum anderen muss zuerst die Lernkurve bei der Produktion solcher Kraftstoffe durchlaufen werden, um einen (begrenzten) Markteintritt zu realisieren; letzteres muss legal flankiert werden, damit überhaupt ein

Markt geschaffen werden kann. Ab einem gewissen Zeitpunkt muss dann ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb – unter den gegebenen Rahmenbedingungen – möglich sein.

SAF-Import

Langfristig ist das Produktionspotenzial für nachhaltige und kosteneffiziente Flugkraftstoffe in Deutschland bzw. der EU im Vergleich zur deutschen bzw. EU-Nachfrage beschränkt. Unabhängig davon werden insbesondere in Nord-Amerika und in einzelnen asiatischen Staaten derzeit hohe Kapazitäten zur Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe aufgebaut; dies inkludiert auch die Produktion von Kerosin. Zur Bereitstellung großer Mengen nachhaltiger Flugkraftstoffe in Deutschland bzw. in der EU ist daher auch ein Import biogener bzw. strombasierter Roh- und Kraftstoffe aus Regionen mit einem entsprechend hohen Vorkommen erneuerbarer Energien anzustreben; dies kann auch mit ökonomischen Vorteilen verbunden sein. Ein derartiger Import erfordert aber eine transparente und nachvollziehbare Überprüfung der Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien in den Herkunftsländern bis zum Einsatz im Flugzeug beispielsweise in Deutschland. Hier spielt der frühzeitige Austausch mit nationalen und internationalen NGOs und Verbänden eine wichtige Rolle; dies beinhaltet auch die unterschiedlichen staatlichen Organisationen, die für den globalen Luftverkehr zuständig sind.

Regulatorische Maßnahmen

Durch regulatorische Maßnahmen muss ein Rahmenwerk geschaffen und dadurch Rahmenbedingungen implementiert werden, mit denen das wesentliche Hemmnis zur Nutzung von SAF abgebaut werden kann – eine mangelnde ökonomische Wettbewerbsfähigkeit. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass ein ausreichendes SAF-Angebot zur Verfügung gestellt werden kann. Damit müssen derartige regulatorische Maßnahmen sowohl angebotsseitige als auch die Nachfrageseite betreffende Maßnahmen umfassen. Dabei sollte SAF möglichst ganzheitlich gefördert werden; d. h. sowohl nachhaltige biogene als auch nachhaltige strombasierte Optionen müssen gleichermaßen im Fokus stehen.

Finanzielle Anreize für Anlagenaufbau und Markteinführung von SAF

Da in Deutschland bisher keine (größeren) Anlagen zur Herstellung von SAF errichtet wurden bzw. betrieben werden, konnten erforderliche Lern- und Erfahrungskurven zur Verringerung der Herstellungskosten noch nicht durchlaufen werden. Dementsprechend sind (innovative) SAF nach dem derzeitigen Stand im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen nicht wettbewerbsfähig.

Um ausgehend davon den dringend erforderlichen Markthochlauf zu realisieren, müssen deshalb von Seiten des Staates entsprechende finanzielle Unterstützungsmaßnahmen implementiert werden, die einen grundlegenden Aufbau von SAF-Produktionskapazitäten begünstigen und im Idealfall sicherstellen, wenn

die globalen Klimaschutzziele erreicht werden sollen. Hierfür können beispielsweise günstige Kreditvergabemodelle, Ausschreibungsmodelle und/oder Steuervergünstigungsmodelle für Hersteller und Inverkehrbringer in Frage kommen und potenziell auch auf europäischer Ebene implementiert werden. Für die konkrete Entwicklung und Ausgestaltung angebotsseitiger Mechanismen sollte die enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industrie und Administration angestrebt werden, um Informationslücken und -asymmetrien möglichst früh und zielgerichtet zu eliminieren.

Internationale Maßnahmen einbeziehen (EU RED II, EU ETS, CORSIA, etc.)

Der Luftverkehr ist ein international ausgerichteter Wirtschaftszweig; deshalb gibt es neben einzelnen nationalen Lenkungsmaßnahmen auch inter- und transnationale Maßnahmen bzw. Abkommen zur Reduktion von Luftverkehrsemissionen. Um die in dieser Roadmap vorgeschlagenen Maßnahmen umzusetzen, ist es dringend erforderlich, ihre regulatorische Kompatibilität hinsichtlich der bereits bestehenden Maßnahmen, wie dem EU ETS oder CORSIA, zu überprüfen bzw. sie entsprechend regulatorisch kompatibel auszulegen.

Ausschreibung / Anreizprogramm für die SAF-Produktion

Um einen Markthochlauf für fortschrittliche SAF umzusetzen, erscheint nach Durchlaufen einer Demonstrationsphase die internationale Ausschreibung von Produktionskapazitäten, in Kombination mit einer entsprechenden Förderung – vergleichbar zum Ausbau der erneuerbaren Energien über die EEG-Umlage – vielversprechend. Im Rahmen eines solchen Ausschreibungsmodells sollten vor allem erforderliche PtL-Produktionskapazitäten in mehreren Runden ausgeschrieben werden, auf die sich Erzeuger(-konsortien) bewerben können. Die Erzeuger erhalten dann für einen festen Zeitraum eine (fixe) (Zusatz-)Vergütung, um die Wettbewerbsfähigkeit mit konventionellen fossilen Kraftstoffen sicherzustellen.

Derartige Mechanismen können so ausgestaltet werden, dass möglichen Herstellern ein vorgegebenes Budget an Fördermitteln zugutekommen kann, während die Fördermittel bzw. Zuschüsse in Abhängigkeit der angegeben SAF-Produktionskosten oder ihrer THG-Vermeidungskosten vergeben werden. Ausschreibungsmodelle müssen dabei so ausgestaltet werden, dass ein möglichst breites Spektrum an SAF gefördert werden kann und eine einseitige Förderung weniger SAF-Optionen möglichst vermieden wird. Auch hier sollte eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industrie und Administration angestrebt werden, um Informationslücken und potenzielle Asymmetrien frühzeitig zu erkennen und dadurch zu vermeiden.

Mittel- und langfristiger Vorrang flüssiger Kraftstoffe für Luftfahrt / Schifffahrt

Da auch auf längere Sicht nur begrenzte Mengen an nachhaltigen flüssigen Kraftstoffen verfügbar sein werden, ist es wichtig, die Ausgangsstoffe und Produkte in Sektoren bzw.

Verkehrsbereichen einzusetzen, in denen mittel- bis langfristig keine Alternativen zur breiten Emissionsreduktion (z. B. durch direkte Elektrifizierung oder den unmittelbaren Einsatz von Wasserstoff) realistisch sind. Das gilt insbesondere für die Luftfahrt sowie die (Hochsee-)Schifffahrt und in Teilen für den schweren Güterfernverkehr auf der Straße.

THG-Minderungsquote für den europäischen SAF-Absatz

Zur Einführung eines Quotenmodells kommen verschiedenste Ausgestaltungsmöglichkeiten in Frage. Eine Möglichkeit ist die THG-Minderungsquote – wie sie in Deutschland zur Förderung von Biokraftstoffen umgesetzt ist. Sie wäre ein effektives Instrument, um Klimagasemissionen im Luftverkehr zeitnah und planbar durch den Einsatz von SAF zu reduzieren, und gleichzeitig Planungssicherheit für die Kapitalbereitstellung für einen Anlagenaufbau zu bieten, da mittels Quotenmodell eine definierte und planbare Nachfrage nach nachhaltigen Flugkraftstoffen geschaffen wird.

Durch eine THG-Minderungsquote im Luftverkehr würden beispielsweise Kraftstoff-Inverkehrbringer dazu verpflichtet werden, die durchschnittliche Emissionsbilanz von (fossilen) in den Verkehr gebrachten Flugkraftstoffen durch die Beimischung von klimagasärmeren SAF zu senken. Die erforderliche Menge an SAF zur Erfüllung dieser Verpflichtung ist von den jeweiligen (Lebenszyklus-)Emissionen der entsprechenden SAF-Option abhängig. Damit gilt, dass je niedriger die Klimagasbilanz einer SAF-Option ist, desto weniger SAF ist erforderlich, um die vorgegeben Klimagaseinsparung zu erreichen und umgekehrt.

Im Vergleich zu reinen Beimischungsquoten dient vor allem auch die Klimagasbilanz (Ökobilanz) einer SAF-Option als Benchmark im Rahmen von THG-Minderungsquoten. Dadurch werden vor allem nachhaltige biogene und strombasierte Kraftstoffe gefördert, die niedrige THG-Emissionen bzw. niedrige THG-Vermeidungskosten erlauben; d. h., die eine möglichst kostengünstige Klimagasreduktion ermöglichen. Durch die Einführung einer THG-Minderungsquote kann somit vorangetrieben werden, dass (bis 2030) eine signifikante Nutzung von nachhaltigen Kraftstoffen – und damit ein entsprechender Klimaschutzeffekt – erreicht wird.

In verschiedenen europäischen Staaten sind Quotenmodelle auf nationaler Ebene zur Förderung von SAF bereits beschlossen (gesetzlich oder faktisch) oder in der Debatte (z. B. Norwegen, Schweden, Finnland, Frankreich, Niederlande, Großbritannien). Um eine möglichst große SAF-Nachfrage durch eine Quote zu induzieren, damit möglichst hohe THG-Einsparungen erreicht werden können und Kostendegressionen durch Skaleneffekte möglichst effektiv auszunutzen, sollte eine THG-Minderungsquote vorrangig mindestens im europäischen Maßstab umgesetzt werden. Das ist vor allem auch dafür entscheidend, um Wettbewerbsverzerrungen weitgehend zu reduzieren, eine möglichst hohe Nutzerakzep-

tanz zu erzeugen und etwaige negative ökologische Sekundäreffekte (z. B. Tankering oder Re-Routings) zu minimieren bzw. vermeiden. Eine Quotenimplementierung bietet sich daher für den gesamteuropäischen oder mindestens den innereuropäischen Luftverkehr an. Letzteres wäre nahezu kompatibel zum derzeitigen Bilanzraum des EU ETS.

Ein Quotenmodell muss ferner an die RED II angelehnt werden und vor allem die dort definierten Nachhaltigkeitskriterien erfüllen. Sie sollte möglichst schnell implementiert werden und bis zum Jahr 2030 stufenweise auf eine Treibhausgasminderung von mindestens 10 % ansteigen; dies entspricht weitgehend einer Ausrichtung an dem Gesamtziel der RED II für den Verkehrssektor.[2] Soll der Luftverkehr allerdings einen gleichwertigen Beitrag zu den Klimazielen des Verkehrssektors in Deutschland leisten (Klimagasreduktionen von 40 bis 42 % gegenüber 1990 bis 2030) wäre eine noch deutlich höhere Quote erforderlich, wenn diese Treibhausgasemissionsreduktion durch SAF (und nicht beispielsweise durch eine Reduktion des kommerziellen Luftverkehrs insgesamt) erreicht werden soll.

Bis ein Quotenmodell EU-weit greifen kann, sollte sich Deutschland Beispielen anderer EU-Mitgliedstaaten anschließen. Dies kann im Rahmen der ohnehin anstehenden Implementierung der RED II in deutsches Recht beispielsweise durch eine Quote für den Luftverkehr effektiv und einfach umgesetzt werden.

Aufgrund einer potenziell begrenzten Rohstoffverfügbarkeit für die Produktion von Biokraftstoffen und wegen des prognostizierten starken Marktwachstums des Luftverkehrs müssen strombasierte Kraftstoffe mittelfristig Biokraftstoffe ergänzen und ggf. langfristig ersetzen. Da die Hürden für den Produktionsaufbau von PtL-Kraftstoffen angesichts immens hoher Investitionsaufwände vergleichsweise hoch sind und signifikante kommerzielle PtL-Anteile erst nach 2030 zu erwarten sind, sollte ein Mindestanteil dieser Kraftstoffe im Gesamtkraftstoffmix durch eine Subquote im Rahmen einer THG-Minderungsquote sichergestellt werden. Neben einer angebotsseitigen PtL-Förderung wird dadurch auch eine Nachfrage und Nutzung dieser Kraftstoffe sichergestellt. Dies ermöglicht es, Lernkurven zu durchlaufen und so langfristig die Kosten für PtL Kraftstoffe potenziell zu senken. Eine PtL-Subquote bezogen auf den innerdeutschen Luftverkehr könnte ab 2025 mit 1 % eingeführt und bis 2030 jährlich um jeweils 1 %-Punkt erhöht werden. Die Einführung einer Quote im Rahmen der deutschen Umsetzung der RED II muss aber neben PtL-Kerosin auch die Verfügbarkeit und sinnvolle Nutzung von nachhaltigen Biokraftstoffen berücksichtigen. Deshalb

[2] Nach Artikel 25 Absatz 1 der RED II muss der Anteil erneuerbarer Energie am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors jedes Mitgliedsstaats bis 2030 mindestens 14 % betragen. Außerdem müssen flüssige Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs nach Artikel 25 Absatz 2 eine Mindesttreibhausgaseinsparung von 70 % aufweisen. Somit entsprechen die 14 % bezogen auf den Energiegehalt einer THG-Minderungsquote von ca. 10 %.

sollte die vorgeschlagene Quotenhöhe von 0,5 % in 2026 und 2 % in 2030 verdoppelt werden, um damit auch nachhaltigem Biokerosin einen Zugang zum deutschen Markt zu erleichtern.

Opt-in für nachhaltige Flugkraftstoffe

Zusätzlich zur Einführung einer SAF-Quote kann durch einen Opt-in Mechanismus ein zusätzlicher Anreiz für ein möglichst wirtschaftliches Inverkehrbringen nachhaltiger Flugkraftstoffe und damit für ihre Nutzung geschaffen werden. Das würde vor allem heute verfügbaren biogenen SAF-Optionen einen Zugang zum Markt und die Erprobung administrativer und buchhalterischer Prozesse im Umgang mit SAF ermöglichen.[3] Ähnlich wie beispielsweise in den Niederlanden könnten Kraftstoffproduzenten durch einen Opt-in Mechanismus für die Erzeugung zertifizierter nachhaltiger Flugkraftstoffe bestimmte Zertifikate erhalten, die sie an Verpflichtete zur Erfüllung der Quote des straßengebundenen Verkehrs verkaufen können. Das hergestellte SAF wird anschließend als "konventioneller" Flugkraftstoff im Luftverkehr bereitgestellt. Für das entsprechende SAF erlischt damit ein Nachhaltigkeitsanspruch oder der Anspruch zur Anrechnung von THG-Emissionsminderungen.

Unterstützende Maßnahmen

Mit den nachfolgenden Maßnahmen sollen weitere Hürden zur Nutzung von SAF abgebaut bzw. vermieden und die vorherigen Maßnahmen flankiert werden, um damit den Weg für eine großtechnische SAF Nutzung weiter zu ebnen.

Frühzeitiger Austausch mit nationalen und internationalen NGOs und Verbänden

Die hier vorgestellten Maßnahmen und damit bezweckte Wirkungen sowie deren Auswirkungen auf die Umwelt und die Bevölkerung müssen frühzeitig und transparent kommuniziert werden, um mögliche Missverständnisse beseitigen oder weitere Argumentationen und Standpunkte berücksichtigen zu können. Deshalb sollten nationale NGOs möglichst frühzeitig in die Kommunikation eingebunden werden. Zusätzlich können nationale bzw. transnationale Maßnahmen nur ein erster Schritt hin zu effektiven internationalen Maßnahmen sein, um eine signifikante Reduktion der Emissionen im internationalen Luftverkehr durch den Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe zu erreichen. Deshalb ist es ebenso wichtig, geplante Maßnahmen frühzeitig in Richtung internationaler Organisationen zu kommunizieren und zu diskutieren, nicht zuletzt mit der aireg-Schwesterorganisation CAAFI in den USA.

---

[3] Eine nahtlose administrative Handhabung nachhaltiger Flugkraftstoffe im operativen Betrieb durch praxistaugliche Nachweisführungs- und Anrechnungsverfahren ist bisher nicht gegeben [Bullerdiek et al. 2019b; Pechstein et al. 2020].

Diskurs über langfristige Rolle von Biokraftstoffen anstoßen

Unter ökonomischen Gesichtspunkten und unter Berücksichtigung vorhandener Technologien und Rohstoffverfügbarkeiten kann eine zeitnahe Markteinführung nachhaltiger Flugkraftstoffe nur auf Basis Biomasse-basierter SAF geschehen. Aufgrund ihres begrenzten Potenzials können biogene Kraftstoffe allerdings nicht als einzige erneuerbare Kraftstoffoption im Luftverkehr dienen und müssen mittelfristig durch PtL-Kraftstoffe ergänzt und langfristig teilweise substituiert werden. Im Rahmen einer ganzheitlichen Strategie ist es dabei erforderlich, die Rolle von biogenen Kraftstoffen zu bewerten; d. h. es muss diskutiert werden, ob, wann und wie eine bestimmte Biokraftstoffoption bzw. -technologie zukünftig neben der Förderung von PtL weiterverfolgt und gefördert werden soll; das gilt beispielsweise für die Rohstoffoption „Siedlungsabfälle".

Ein kurzfristiger Aufbau höherer Biokraftstoffproduktionskapazitäten, der mit dem Aufbau zukünftiger PtL-Anlagen potenziell obsolet wird, ist von vornherein zu vermeiden. Hierfür ist eine gezielte Auseinandersetzung erforderlich, ob bzw. welche Biokraftstoffoptionen ab wann und bis wann in welchem Umfang gefördert und bereitgestellt werden sollen und müssen.

Konzepte zur Nachweisführung und Anrechnung von SAF

Das Rohstoffangebot zur SAF-Herstellung sowie die Verfügbarkeit von SAF-Optionen werden sich regional und kontinental wahrscheinlich stark unterscheiden – vor allem während der Markthochlaufphasen. Da Fluggesellschaften international und interkontinental agieren, sind sie nicht ausschließlich auf das SAF-Angebot in ihrem Heimatmarkt angewiesen. Sie können SAF prinzipiell innerhalb ihres gesamten Streckennetzes aufnehmen und die Grenzen eines lokal unterschiedlichen SAF-Angebots damit teilweise überwinden.

Zukünftig könnte sich eine großtechnische Herstellung von SAF an bestimmten Standorten und in bestimmten Ländern, in denen ein ausreichendes Rohstoffangebot für biogene und/oder strombasierte SAF besteht, allerdings stärker ausprägen als an anderen Standorten. Trotz des vorhandenen internationalen und interkontinentalen Streckennetzes wird die Möglichkeit, SAF aufzunehmen für bestimmte Fluggesellschaften daher wahrscheinlich (stark) eingeschränkt bzw. ungleich verteilt sein – und das, obwohl eine Zahlungsbereitschaft vorliegen kann oder die Nutzung von SAF durch regulatorische Maßnahmen vorgegeben wird (z. B. Quotenmodelle).

Um die Verfügbarkeit von SAF insgesamt zu erhöhen, ohne dabei auf lokale, regionale, nationale oder kontinentale Rohstoffangebote, verfügbare Herstellungspfade und Anlagenkapazitäten, Logistik- und Bereitstellungskette oder das Streckennetz von Fluggesellschaften

angewiesen zu sein, sondern stets auf ein allgemeines/globales SAF-Angebot zurückgreifen zu können, müssen geeignete Konzepte zur Nachweisführung, Nutzung und Anrechnung von SAF etabliert werden. Dafür eignet sich vor allem eine Book-and-Claim-Methodik, die eine physische SAF-Aufnahme und SAF-Nutzung von der Anrechnung der Klimagasminderung physisch entkoppelt und damit bilanzielle Freiheitsgrade schafft [Pechstein et al. 2020]. Damit kann SAF dort hergestellt und in Umlauf gebracht werden, wo es sich u. a. aufgrund der Rohstoff- und Anlagenverfügbarkeit anbietet und z. B. günstig ist. Das trägt auch dem Umstand Rechnung, dass die Wirkung von Klimagasemissionen ein globaler Effekt ist und nicht (bzw. nur gering) abhängig vom Ort der physischen SAF-Nutzung. Damit wird auch eine maximale Flexibilität bei der Bereitstellung und Nutzung von SAF geboten und mögliche „unnötige" Kraftstofftransporte zwischen Produktionsstätten und weit entfernten Flughäfen oder gar Zwischenlagerungen vermieden.

Derartige Konzepte dienen vor allem auch dafür, eine möglichst flexible und administrativ einfache Anrechnung und Nachweisführung der SAF-Nutzung in Umweltinstrumenten wie dem EU ETS oder CORSIA zu ermöglichen. Dabei sollte grundsätzlich durch entsprechende Anforderungen an das Reporting gesichert sein, dass sich die Nutzer (Fluggesellschaften) die Emissionsreduktionen durch SAF in ihrem CO_2-Fußabdruck anrechnen lassen können.

Abb. 12 Book & Claim Anrechnungskonzept

Geeignete Anrechnungs- und Nachweisführungskonzepte und dafür erforderliche, weitere Elemente – beispielsweise ein internationaler SAF Meta-Standard mit Nachhaltigkeitskriterien für den internationalen Flugverkehr, damit jede Fluggesellschaft unabhängig vom Abflugort sicher sein kann, dass ein getankter nachhaltiger Flugkraftstoff gemäß eines solchen internationalen Standards nachhaltig hergestellt wurde – sind zu untersuchen.

Erschließung von Nischenmärkten

Gerade zu Beginn eines SAF-Hochlaufes und in der Abwesenheit effektiver regulatorischer Rahmenvorgaben kann es förderlich sein, die anfängliche SAF-Nutzung in Nischen anzustoßen und weitere Erfahrungen im operativen Umgang zu sammeln. Dafür könnten Nischen in Frage kommen, in denen potenziell eine höhere Zahlungsbereitschaft (für Kraftstoff) besteht – z. B. der General Aviation Bereich, in dem auch eine Energiesteuer für Flugkraftstoffe gezahlt wird und die wettbewerblichen Hürden von SAF einfacher überwunden werden können (unter der Annahme, dass für SAF keine Energiesteuer zu entrichten ist).

Eine weitere Nische zur SAF-Nutzung könnte der Einsatz für Regierungsflüge darstellen, indem der Staat hier eine gewisse Vorreiterrolle einnimmt und die Nutzung von SAF demonstriert.

Derartige und weitere Nischen könnten für erste SAF-Nutzungen aktiviert werden. Sie können aber nur einen ersten Schritt darstellen und ersetzen das Erfordernis nicht, einen ganzheitlichen und strategischen Ordnungsrahmen für den langfristig großtechnischen Einsatz von SAF zu etablieren.

Einrichtung einer Informationsstelle zum Gesetzgebungsrahmen für nachhaltige Flugkraftstoffe

Für Start-ups und mittelständische Unternehmen ist es kaum leistbar, die sich ständig ändernde Gesetzgebung insbesondere zu RED II, zu CORSIA und zu den internationalen bzw. nationalen Normen ausreichend genau zu verstehen und permanent zu verfolgen. Dadurch entsteht ein hohes Maß an Unsicherheit darüber, ob (innovative) Herstellungsverfahren Anerkennung finden. Auch sind die Wege zur Anerkennung und Zulassung häufig unklar. Daher sollte eine Stelle etabliert werden (z. B. bei einer nachgeordneten Behörde, Hochschuleinrichtung), die Know-how und Informationen sicher und gebündelt bereitstellt und Klarheit darüber vermittelt, ob und inwiefern bzw. mit welchen weiteren Maßnahmen ein Kraftstoff im Rahmen bestimmter regulatorischer Rahmenwerke (z. B. Quotenmodelle im Rahmen der RED II, aber auch in Lenkungsinstrumenten anderer Länder, z. B. den USA) angerechnet werden kann.

Marketingstrategie und Öffentlichkeitarbeit für die Einführung von Lenkungsinstrumenten (z. B. Quotenmodelle) entwickeln

Um sowohl die Öffentlichkeit als auch betroffene Stakeholder bereits im Vorfeld über die angedachten Maßnahmen und deren Auswirkungen zu informieren, muss eine Marketingstrategie entwickelt werden, um Kommunikationsfehler der Vergangenheit, die beispielsweise mit der Einführung von biogenen Kraftstoffen im Straßenverkehr aufgetreten sind (z. B. E10–Einführung), im Vorfeld zu verhindern. In diesem Zusammenhang muss auch die Einführung der hier vorgestellten THG-Minderungsquote für den Luftverkehr forciert in die Öffentlichkeitsarbeit der betroffenen Stakeholder, NGOs und der zuständigen Behörden integriert werden, um für eine breite Akzeptanz in allen Bereichen zu sorgen.

Literatur

Agora, Frontier Economics Ltd. (2018): The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels. Agora Energiewende; Agora Verkehrswende; Frontier Economics Ltd. Berlin, Köln.

Airbus (2019): Global Market Forecast. 2019-2038. Cities, Airports & Aircraft. Airbus S.A.S. Toulouse.

aireg (2012): Klimafreundlicher fliegen: Zehn Prozent alternative Flugkraftstoffe bis 2025. Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e. V. (aireg). Berlin.

aireg (2020): Synthetische Luftfahrtkraftstoffe – eine aktuelle Bestandsaufnahme. Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e. V. (aireg).

Boeing (2019): Commercial Market Outlook. 2019–2038. The Boeing Company. Seattle.

Brynolf S, Taljegard M, Grahn M, Hansson J (2018): Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Rev 81: 1887–1905.

Bullerdiek N, Buse J, Dögnitz N, Feige A, Halling A-M, Hauschild S, Hawighorst P, Kaltschmitt M, Kuchling T, Kureti S, Majer S, Marquardt C, Müller-Langer F, Neuling U, Oehmichen K, Pechstein J, Posselt D, Scheuermann S, Schripp T, Stein H, Zschocke A (2019a): Einsatz von Multiblend-JET-A-1 in der Praxis. Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Modellvorhaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). Leipzig.

Bullerdiek N, Buse J, Kaltschmitt M, Pechstein J (2019b): Regulatory Requirements for Production, Blending, Logistics, Storage, Aircraft Refuelling, Sustainability Certification and Accounting of Sustainable Aviation Fuels (SAF). Report within the Research and Demonstration Project on the Use of Renewable Kerosene at Airport Leipzig / Halle (DEMO-SPK). Adeptus Green Management GmbH; Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE). Hamburg.

CST (2020): Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation. Insight Report. Clean Skies for Tomorrow (CST); McKinsey & Company; World Economic Forum (WEF).

Dietrich S, Zech K, Oehmichen K, Müller-Langer F, Majer S, Kalcher J, Naumann K, Wirkner R, Pujan R, Braune M, Gröngröft A, Albrecht U, Raksha T, Weindorf W, Reichmuth M, Gansler J, Schiffler A (2017): Machbarkeitsanalyse für eine PTG-HEFA-Hybridraffinerie in Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST); Leipziger Institut für Energie GmbH (IE-Leipzig). Leipzig.

DLR, BDLI (2020): Zero Emission Aviation – Emissionsfreie Luftfahrt. White Paper der deutschen Luftfahrtforschung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V. (BDLI). Köln.

EASA (2020): European Aviation Environmental Report. Sustainable Aviation Fuels. Figures and Tables. European Union Aviation Safety Agency (EASA). Online verfügbar unter https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/figures-and-tables, zuletzt aktualisiert am 20.10.2020, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

EC (2020a): ReFuelEU Aviation Public Consultation. European Commission (EC). Brüssel. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-ReFuelEU-Aviation-Sustainable-Aviation-Fuels/public-consultation, zuletzt aktualisiert am 23.11.2020, zuletzt geprüft am 24.11.2020.

EC (2020b): SAF Roundtable n°2. ReFuelEU Aviation. European Commission (EC).

EEX (2019): EEX Market Data. EUA Primary Auction Reports. European Energy Exchange (EEX). Leipzig. Online verfügbar unter

https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/auction-market/european-emission-allowances-auction/european-emission-allowances-auction-download, zuletzt geprüft am 23.10.2019.

EIA (2020): International Energy Data. Jet fuel consumption. U.S. Energy Information Administration (EIA). Online verfügbar unter https://www.eia.gov/opendata/qb.php?category=2135044, zuletzt geprüft am 30.11.2020.

Hobohm J, Maur A auf der, Dambeck H, Kemmler A, Koziel S, Kreidelmeyer S, Piégsa A, Wendring P, Meyer B, Apfelbacher A, Dotzauer M, Zech K (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Endbericht. Prognos AG; Das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT; Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). Basel.

IATA (2018): Fact Sheet. Climate Change & CORSIA. International Air Transport Association (IATA). Montréal.

IATA (2020a): Air Passenger Forecasts 2019-2039. International Air Transport Association (IATA). Montréal. Online verfügbar unter https://www.iata.org/contentassets/e938e150c0f547449c1093239597cc18/pax-forecast-infographic-2020-final.pdf, zuletzt geprüft am 15.10.2020.

IATA (2020b): Industry Statistics. Fact Sheet. June 2020. International Air Transport Association (IATA). Montréal.

IATA (2020c): Economic Performance of the Airline Industry 2020. Mid-year report. International Air Transport Association (IATA). Montréal.

ICAO (2017): Sustainable Aviation Fuels Guide. International Civil Aviation Organization (ICAO). Montréal.

ICAO (2018): ICAO Long-Term Traffic Forecasts. Passenger and Cargo. International Civil Aviation Organization (ICAO). Montréal.

ICAO (2019): CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels. ICAO document. International Civil Aviation Organization (ICAO). Montréal.

ICAO (2020): ICAO Council agrees to the safeguard adjustment for CORSIA in light of COVID-19 pandemic. International Civil Aviation Organization (ICAO). Montréal. Online verfügbar unter https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ICAO-Council-agrees-to-the-safeguard-adjustment-for-CORSIA-in-light-of-COVID19-pandemic.aspx, zuletzt aktualisiert am 15.10.2020, zuletzt geprüft am 15.10.2020.

IEA (2020): Changes in transport behaviour during the Covid-19 crisis. International Energy Agency (IEA). Paris. Online verfügbar unter https://www.iea.org/articles/changes-in-transport-behaviour-during-the-covid-19-crisis, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Jong S de, Hoefnagels R, Faaji A, Slade R, Mawhood R, Junginger H Martin (2015): The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels – a comprehensive techno-economic comparison (6).

U Neuling (2019): Biokerosinherstellung. Verfahrensidentifikation, Simulation und Bewertung. 1. Auflage. Hamburg: Kovac, Dr. Verlag (Schriftenreihe Technische Forschungsergebnisse, 34).

Pavlenko N, Searle S, Christensen A (2019): The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. International Council on Clean Transportation (ICCT). Wilmington, zuletzt geprüft am 15.05.2019.

Pechstein J, Bullerdiek N, Kaltschmitt M (2020): A "book and Claim"-Approach to account for sustainable aviation fuels in the EU-ETS – Development of a basic concept. Energy Policy 136, S. 111014. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111014.

Schmidt P, Weindorf W, Roth A, Batteiger V, Riegel F (2016): Power-to-Liquids. Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation

Fuel. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST); Bauhaus Luftfahrt e.V. Dessau-Roßlau.

Thomson R, Sachdeva N, Healy A, Bailly N, Stern C (2020a): Sustainable Aviation Fuels. The Best Solution to Large Sustainable Aircraft. Roland Berger. London.

Thomson R, Weichenhain U, Sachdeva N, Kaufmann M (2020b): Hydrogen: A future fuel for aviation? Roland Berger. München.

Timmerberg S, Bullerdiek N, Kaltschmitt M, Gnann T, Neumann F, Wietschel M (2019): Teilstudie „Import von Stromkraftstoffen für den Verkehr – Lkw, Binnen-/Seeschiffe, Flugzeuge". Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE); Fraunhofer ISI. Hamburg.

WEF (2020): Joint Policy Proposal to Accelerate the Deployment of Sustainable Aviation Fuels in Europe. A Clean Skies for Tomorrow Publication. White Paper. World Economic Forum (WEF). Köln, Genf.

World Bank (2020): Air Transport. Passengers Carried. World Bank. Washington D.C. Online verfügbar unter https://data.worldbank.org/indicator/is.air.psgr, zuletzt geprüft am 25.03.2020.

aireg Mitglieder

AIRBUS

air bp

Aviation Fuel Projects Consulting GmbH & Co. KG

BAUER RESOURCES

Bauhaus Luftfahrt Neue Wege.

Hamburg | Behörde für Wirtschaft und Innovation

Catalysis Leibniz-Institut für Katalyse e.V.

CAPHENIA Turning CO_2 into fuel

Deutsche Post DHL Group

Die Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Fraunhofer IBP

GLOBAL BIOENERGIES

GRIESEMANN GRUPPE

HESSEN Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

MTU Aero Engines

ISCC International Sustainability & Carbon Certification

JATROGREEN Sustainable Energy Madagascar

JÜLICH Forschungszentrum

KIT Karlsruhe Institute of Technology

NESTE

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

OMV

PETRIXO OIL & GAS

reisetopia

ROSNEFT DEUTSCHLAND

SH Schleswig-Holstein Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Technologie

sunfire

Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft IUE

TOTAL

WIWeB