



LÖSUNGSANSÄTZE

zur Beschleunigung des
Markthochlaufs von
Sustainable Aviation Fuels

Projekt InnoFuels, Innovationsschwerpunkt Anwendungsfeld Luftfahrt

Autoren Sandra Richter, Deandra Drewke, Franziskus Hellwig
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Léonie Lauer, Bernhard Dietrich, Melanie Grohs
CENA Hessen
Sina Rathgeber, Sophia Dunning
Condor Flugdienst GmbH

Inhalt

1	Einführung	4
2	Sicherstellung der Nachhaltigkeit	6
2.1	Anerkennung oder Angleichung abweichender Nachhaltigkeitskriterien	6
2.2	Zielgerichtete Flexibilität bei der Umsetzung.....	7
2.3	Zertifizierungsanforderungen mit langfristiger Perspektive.....	9
2.4	Politische Entscheidung zur Nachhaltigkeit der Biomassenutzung	10
2.5	Klarheit bei der Anrechenbarkeit.....	13
3	Erhöhung der Nachfrage	15
3.1	Schaffung gleicher Wettbewerbsbedingungen.....	15
3.2	Schaffung finanzieller Anreize	17
3.3	Erhöhung der Zahlungsbereitschaft der Kunden.....	21
3.4	Erhöhung der Zahlungsbereitschaft der Airlines	24
4	Erhöhung der Investitionsbereitschaft	26
4.1	Business Case für die Investition in SAF-Anlagen	26
4.2	Chancensteigernde Maßnahmen als Investitionsanreize.....	30
4.3	Risikomindernde Maßnahmen für höhere Planungssicherheit	31
5	Erhöhung der Produktion	32
5.1	Erhöhung des Technology Readiness Levels (TRL)	33
5.2	Sicherstellung der Finanzierung	37
5.3	Klare Regulatorik für die Herstellung und Anwendung.....	37
5.4	Standortspezifische Faktoren	38
6	Ausblick	40
	Abkürzungsverzeichnis	42
	Literaturverzeichnis	45

1 Einführung

Die Transformation zu einer klimafreundlicheren Luftfahrt erfordert den Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen (Sustainable Aviation Fuels, SAF). Denn diese sind mit dem Wissensstand von heute die vielversprechendste Lösung zur Reduktion von klimaschädlichen Emissionen des Luftverkehrs, und reduzieren neben CO₂-Emissionen auch klimawirksame Nicht-CO₂-Effekte. Als Schlüssel für die Kraftstoffwende im Luftverkehr, v.a. auf der Langstrecke, werden nachhaltigere Flugtreibstoffe daher durch entsprechende, gesetzlich verpflichtende, nationale und EU-weite Beimischungsverpflichtungen forciert. Trotzdem sind SAF derzeit weltweit nur in geringen Mengen verfügbar und zudem deutlich teurer als fossiles Kerosin [1]. Um die gesetzlichen Quoten zu erfüllen und einen signifikanten Beitrag zur Senkung der Emissionen zu leisten, ist ein schneller und wettbewerbsneutraler Markthochlauf unerlässlich.

Dem Markthochlauf von SAF stehen vielfältige Hemmnisse entgegen, die in vier Bereiche gegliedert werden können [2]. Im Zentrum steht die Frage, wie die **Nachhaltigkeit** von SAF sichergestellt werden kann, da insbesondere aufgrund aktuell unklarer bzw. uneinheitlicher Nachhaltigkeitskriterien Investitionsentscheidungen von Anlagenbetreibern auf unbestimmte Zeit verschoben oder Projekte zum Bau im hochskaligen Maßstab abgesagt werden. Dass derzeit nicht ausreichend **Investitionen** getätigt werden, liegt darin begründet, dass kein Business Case existiert und die Planungssicherheit für Investoren stark eingeschränkt ist. Dies ist auf die genannten fehlenden bzw. international unterschiedlichen Nachhaltigkeitskriterien, die Komplexität der Vorhaben und zugleich hohen Risiken für First-Mover zurückzuführen.

Darüber hinaus fehlt der **Nachfrageanreiz** seitens der Fluggesellschaften. Dies wird zum einen durch Wettbewerbsverzerrung bedingt, da die hohen Kosten von SAF im Vergleich zu fossilem Kerosin im stark wettbewerbsorientierten, globalen Luftverkehrsmarkt nur eingeschränkt an die Kunden weitergegeben werden können. Zum anderen wird die Zahlungsbereitschaft der Airlines gesenkt, weil weiterhin Unklarheit über die Anrechenbarkeit und die bilanzielle Nutzung von SAF herrscht und zusätzlich staatliche Fördermittel fehlen, die den Markthochlauf effektiv stimulieren könnten.

Dass die **Produktionskapazitäten** für SAF perspektivisch nicht schnell genug und in ausreichendem Maßstab erhöht werden können, liegt wiederum u. a. an den fehlenden Investitionsentscheidungen (s.o.), der begrenzten Rohstoffverfügbarkeit (z.B. Biomasse und

Wasserstoff) und dem geringen Technologiereifegrad im industriellen Maßstab bei Power-to-Liquid-(PtL-)Anlagen.¹

Es muss also die Nachhaltigkeit durch entsprechende Regulatorik sichergestellt werden, damit sich die Planungssicherheit für Investoren sowie die Nachfrage der Airlines erhöhen, wodurch die Investitionsbereitschaft steigt und die Produktionskapazitäten ausgebaut werden können. Abbildung 1 stellt eine Übersicht möglicher Lösungsansätze für die genannten Hemmnisse dar.

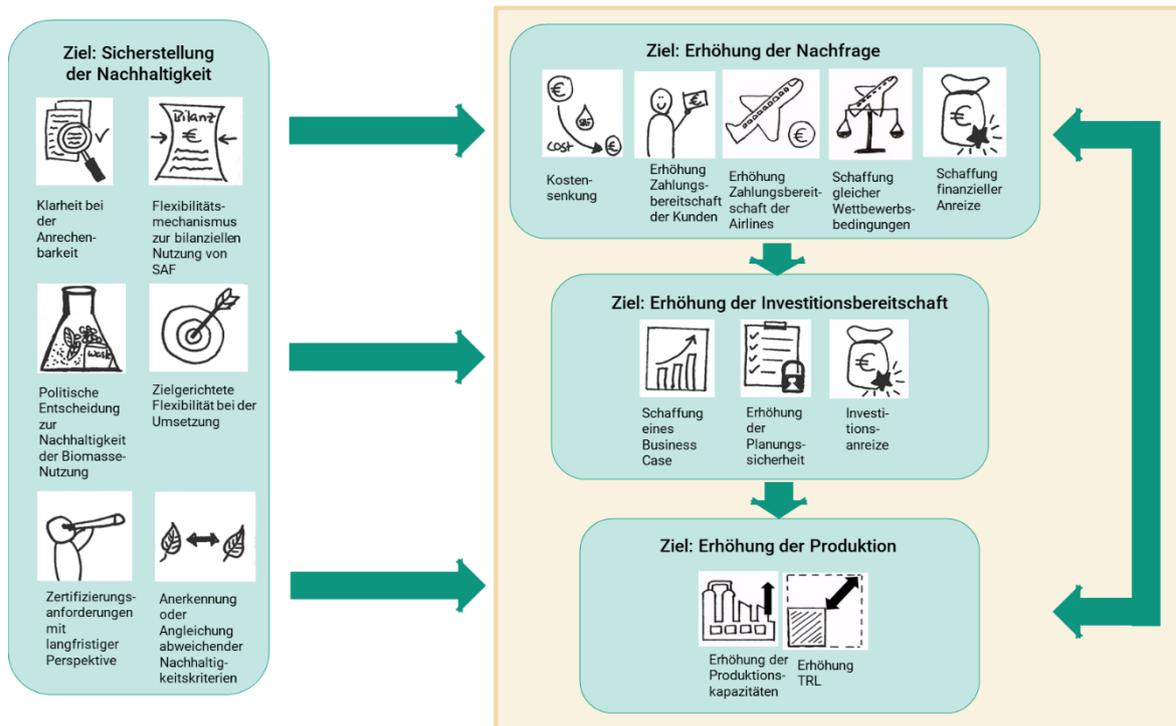


Abbildung 1: Übersicht möglicher Lösungsansätze für den Abbau von Hemmnissen beim Markthochlauf von SAF [eigene Darstellung]

Im Folgenden werden für diese vier Bereiche Lösungsansätze aufgezeigt, die im Rahmen des vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderten Projekts InnoFuels im Anwendungsfeld Luftfahrt erarbeitet wurden. Die Basis hierfür bildet ein Stakeholder-Workshop, welcher im Juni 2024 durchgeführt wurde. Dabei wurden bereits vorhandene Lösungsansätze diskutiert, welche u.a. im Vorfeld aus dem Maßnahmenpapier der AG SAF des Arbeitskreises klimaneutrale Luftfahrt (AKKL) der Bundesregierung [3] abgeleitet wurden sowie auch neue mögliche Lösungsansätze erörtert. Im Anschluss wurden

¹ Für eine Übersicht über die unterschiedlichen Produktionspfaden siehe [6]

diese mit den betroffenen InnoFuels-Innovationsschwerpunkten weiterentwickelt und durch Literaturrecherche sowie Experteninterviews ergänzt.

2 Sicherstellung der Nachhaltigkeit

Damit alternative Treibstoffe zu einer klimaverträglicheren Luftfahrt beitragen können, ist ihre Nachhaltigkeit der zentrale Aspekt. Dies umfasst die Eingangsstoffe ebenso wie den Produktionsprozess. Im Rahmen der Hemmnis-Analyse² wurden in Bezug auf die Nachhaltigkeit von SAF zahlreiche Unsicherheiten identifiziert. Diese sind maßgeblich sowohl auf unklare Nachhaltigkeitskriterien (wie z.B. nationale Unterschiede in erlaubten biogenen Rohstoffen oder anrechenbaren CO₂-Quellen), als auch auf eine mangelnde Klarheit bei der Anrechenbarkeit und bilanziellen Nutzung von SAF zurückzuführen. Dies betrifft biogene wie auch strombasierte SAF. Die diskutierten Lösungsansätze zielen daher primär auf transparente Regularien ab, welche eine nachhaltige Produktion des Treibstoffes gewährleisten, aber auch – vor allem in der Markthochlaufphase – einen bestimmten Spielraum zur Flexibilität beinhalten.

2.1 Anerkennung oder Angleichung abweichender Nachhaltigkeitskriterien



In einer global agierenden Branche sind **international einheitliche Standards essenziell**, um eine Transparenz in der Nachhaltigkeit zu erlangen. Dies betrifft das Endprodukt ebenso wie die Eingangsstoffe, denn wenn diese beispielsweise importiert werden, müssen sie den Nachhaltigkeitsstandards des Importlandes entsprechen. Die Kriterien, nach denen SAF als nachhaltig gilt, divergieren jedoch nach Ländern und Region. Innerhalb der EU gibt es mit der Renewable Energy Directive (RED II- und RED III-Richtlinien) und der ReFuelEU Aviation zwar theoretisch bereits einheitlich definierte Nachhaltigkeitskriterien. Diesen mangelt es allerdings zum Teil an Verständlichkeit (insbesondere, da die Rechtstexte oft schwierig zu lesen sind und die Berechnung der THG-Emissionen komplex ist) und Transparenz in der Anwendung (vor allem durch fehlende Kontrollmechanismen). Zudem können die **Vorgaben und Definitionen außerhalb**

² Die Analyse der Hemmnisse beim Markthochlauf von SAF erfolgte im Rahmen von InnoFuels durch das Anwendungsfeld Luftfahrt in einem voran gegangenen Bericht.

der EU stark davon abweichen. Handlungsbedarf besteht bei der Hinwirkung auf international einheitliche Standards beispielsweise im Hinblick auf global einheitliche Regeln zur Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO₂), insbesondere bei der Nutzung von Industriequellen [3].

Da die Luftfahrt ein globaler Markt ist, sollte hier eine weltweite **Homogenisierung der Nachhaltigkeitskriterien** angestrebt werden, was allerdings als besondere Herausforderung zu betrachten ist. In Anbetracht nationaler Gesetzgebungen und Unterschiede muss befürchtet werden, dass eine Homogenisierung der Nachhaltigkeitskriterien auf eine Absenkung zum kleinsten gemeinsamen Nenner hinauslaufen könnte, welche wiederum die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele gefährden könnte. Zunächst müssten jedoch die bestehenden Standards der größeren Märkte, wie z.B. EU, USA und China analysiert werden, um die Unterschiede in den Nachhaltigkeitskriterien zu identifizieren. Auch die International Civil Aviation Organization (ICAO) hat bereits im Rahmen des Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) Nachhaltigkeitskriterien für SAF festgelegt³ [4]. Ein erster Schritt in Richtung Anerkennung oder Angleichung abweichender Nachhaltigkeitskriterien könnte daher die **Erstellung eines Leitfadens** durch die offiziellen Stellen sein, der Zielsetzungen, Unterschiede in regionalen Verordnungen und Optionen zur Angleichung thematisiert.

2.2 Zielgerichtete Flexibilität bei der Umsetzung



Strenge Nachhaltigkeitskriterien sind grundlegend wichtig, um das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität nicht zu gefährden. Hinzu kommen in der Luftfahrt strenge Zertifizierungsprozesse (siehe ASTM D4054 [5]), die beachtet werden müssen. Dennoch sollte geprüft werden, ob der Markthochlauf von SAF, im Sinne eines pragmatischen Ansatzes, beschleunigt werden könnte, wenn auch **Übergangslösungen** möglich wären bzw. verstärkt genutzt werden könnten, wie z.B. die **Nutzung von CO₂ aus schwer oder nicht-vermeidbaren Punktquellen** oder die Herstellung via **Co-Processing** (zum Co-Processing siehe [6]). Im Sinne der Nachhaltigkeit sollte hier die Frage nicht vernachlässigt werden, ob mit einer Übergangslösung, die beispielsweise

³ Siehe dazu auch den Bericht „Übersicht zu relevanten Gesetzen und Industriestandards beim Markthochlauf von Sustainable Aviation Fuels“ des Anwendungsfeldes Luftfahrt im Projekt InnoFuels [6]

zu 80 % nachhaltig ist, nicht aktuell schon ein Mehrwert erzielt werden kann, anstatt auf eine 100 %-Lösung zu warten.⁴

Hieraus ergibt sich auch die Frage nach dem langfristig sinnvollen Einsatz von Investitionsmitteln. Denn solche **Zwischen- bzw. Übergangslösungen** sind im Bereich der PtL-Produktion aktuell von der EU und der Regulatorik nicht vorgesehen, da keine Anreize für Lösungen geschaffen werden sollen, die nur von (vergleichsweise) kurzer Dauer sind. So soll verhindert werden, dass diese sich zu Dauerlösung manifestieren, was aus Sicht von politischen Entscheidungsträgern langfristig die Nachhaltigkeit gefährden könnte, und diese kritische Haltung begründet. Andererseits könnten Zwischenlösungen einen Beitrag zum Ausbau von Produktionskapazitäten leisten.

Abgesehen von regulatorischen Vorgaben, sollte auch die **Akzeptanzbildung**, z.B. in Form von Informationen über die tatsächlich erzielbare Vermeidungswirkung von klimaschädlichen Emissionen, Erklärungen warum die Produktion teurer ist als fossiles Kerosin und weitere Hintergründe von SAF bei den Fluggästen und in der Gesellschaft nicht vernachlässigt werden. Neben den bereits genannten Zwischenlösungen zur Gewinnung von CO₂ und der SAF-Herstellung, lässt sich dies am Beispiel der Produktion von Wasserstoff (H₂) zeigen. Wird dieser mittels Einsatzes von Atomstrom gewonnen, könnte dies die Akzeptanz in der Bevölkerung deutlich senken, obwohl Atomstrom unter bestimmten Bedingungen laut der EU zu den nachhaltigen Stromquellen zählt. So sind bestimmte Erdgas- und Atomkraftaktivitäten gemäß der EU Taxonomie (Klassifizierungssystem für nachhaltige wirtschaftliche Aktivitäten) als Übergangstätigkeiten eingestuft, die zum Schutz des Klimas beitragen sollen. Diese unterliegen bestimmten Voraussetzungen und sind zeitlich befristet. So werden beispielsweise neue Kernkraftwerksprojekte zur Energieerzeugung als klimafreundlich anerkannt, wenn eine Baugenehmigung bis 2045 erfolgt ist [7, 8]. Die Umsetzung von Übergangslösungen ist also nicht grundlegend ausgeschlossen und das Beispiel Wasserstoffproduktion könnte als Vorbild für die Herstellung von PtL-Produkten bzw. SAF in der speziellen Anwendung dienen.

⁴ Vertieft wird diese Thematik neben dem InnoFuels Innovationsschwerpunkt Nachhaltigkeit auch in den Innovationsschwerpunkten Markt & Regulatorik sowie Supply Chain.

2.3 Zertifizierungsanforderungen mit langfristiger Perspektive



Die Schaffung einer langfristigen Perspektive wird von Stakeholdern als ein sehr wichtiger Lösungsansatz eingestuft, wenn nicht sogar als der wichtigste.

Ohne eine langfristige Perspektive besteht beispielsweise bei Investitionen in PtL-Anlagen ein sehr hohes Risiko, da viel Zeit vergeht, bis eine Anlage gebaut ist (je nach Anlagengröße mehrere Jahre). Das heißt, die Rahmenbedingungen müssen verlässlich sein und einen **Bestandsschutz für heutige Nachhaltigkeitskriterien** bieten, um Investitionen abzusichern. In der Lernphase des Markthochlaufs können sich (technische) Anforderungen an die PtL-SAF-Produktion, beispielsweise beim Bezug von erneuerbaren Energien oder CO₂, ändern und weiterentwickeln. Ähnliches gilt auch für den bilanziellen Bezug der Rohgase CO₂ und H₂. Aktuell ist es möglich die Eduktgase bilanziell über eine Sammelleitung zu beziehen. Dies ist allerdings an enge Rahmenbedingungen gebunden, z.B. dadurch, dass der Bilanzzeitraum auf 3 Monate bzw. ein Quartal begrenzt ist. Zudem gibt es keine Sicherheit, dass die Bezugskriterien in den nächsten Jahren nicht noch einmal angepasst werden. Zudem gibt es in Bezug auf die anrechenbaren Rohstoffe noch Widersprüche zwischen der RED II Revision und der ReFuel EU Aviation Verordnung [9]. Um Investitionen voranzubringen, könnten Bestandsschutzmaßnahmen für erste Projekte (Grandfathering Rights) in Betracht gezogen werden, da viele private Investoren aufgrund der fehlenden Absicherung aktuell das Risiko nicht tragen möchten, Anlagen und Projekte zu finanzieren (siehe Kapitel 4.3) [3].

Wichtig ist dabei, dass es nicht darum geht, Gesetze oder Rahmenbedingungen wieder aufzuweichen, sondern **Regeln zu schaffen, auf welche langfristig Verlass ist**. Ein Beispiel dazu ist die Einführung von E10-Benzin im Jahr 2010. In Deutschland wurde E10 eingeführt, um die Vorgaben der EU-Richtlinie zur Minderung der THG-Emissionen von Kraftstoffen zu erfüllen [10]. Seitdem gab es zunächst die verbindliche Vorgabe, dass Benzin mit einem Anteil von bis zu 10 Vol-% Bioethanol an den Tankstellen angeboten werden muss. Seit 2015 müssen die Inverkehrbringer allerdings nur die THG-Minderung nachweisen [11], d.h. der Biokraftstoffanteil kann entsprechend geringer ausfallen. Da es zu einem günstigeren Preis angeboten wird als normales (Super-)Benzin, gab es trotz vieler Kritik bei der Einführung einen gesicherten Absatzmarkt.

2.4 Politische Entscheidung zur Nachhaltigkeit der Biomassenutzung



Nicht nur aktuell, sondern auch zukünftig wird der **Einsatz von Biomasse** notwendig sein, um den Bedarf an SAF, gemeinsam mit PtL-Kerosin, zu decken [1]. Um Produktionskapazitäten auszubauen und die PtL-Prozesskette zu skalieren (siehe Kapitel 0), sind ausreichende Mengen an H₂ und CO₂ bzw. Biomasse notwendig. Die Versorgung mit den entsprechenden Mengen an H₂ ist dabei an den Ausbau der Elektrolysekapazität und der erneuerbaren Energien gebunden. Hinsichtlich der Biomasse lag der Anteil der Rohstoffe aus Deutschland zur Herstellung von Biokraftstoffen im Jahr 2023 bei 15 % [12]. Es stellt sich die Frage, wo weiteres, **nachhaltiges Biomasse-Potenzial** vorhanden ist, das für die SAF-Produktion genutzt werden kann. Die Entscheidungen zur Nutzung nachhaltiger Biomasse werden in der EU auf Basis der RED II bzw. deren Überarbeitung (RED III) getroffen. Die dortige Auflistung erlaubter Biomasse sollte jedoch als dynamisch betrachtet werden, denn in Anbetracht der Tatsache, dass sich die Forschung stetig weiterentwickelt, besteht kontinuierlicher Nachsteuerungsbedarf. Wo neue, konkrete und nachhaltige Ansätze der Nutzung von Biomasse liegen, wird zum einen in Richtung der Weiterentwicklung bestehender Ansätze, zum anderen in Richtung neuer Optionen diskutiert.

Beim Einsatz von Biomasse bzw. biogenen Rohstoffen ist die **Abwägung** zwischen Nachhaltigkeitszielen sowie sozialen und wirtschaftlichen Aspekten nicht außer Acht zu lassen. Eine strategische Richtungsentscheidung kann dazu nur auf politischer Ebene getroffen und konsequent umgesetzt werden [3]. Unsicherheiten existieren v.a. bei der Frage der Nachhaltigkeit und Zertifizierung von biogenem SAF sowie der Kriterien für die Herstellung, welche die Auswahl an biogenen Ausgangsstoffen einschränken.

Aktuell verfügbares Biomasse-Potenzial

Aufgrund der definierten Biomassenutzung durch die RED II, kommt der **strategischen Weiterentwicklung bestehender Ansätze**, d.h. konkret der Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen aus der Land- und Forstwirtschaft eine entsprechende Bedeutung zu. Die Verwertung dieser Biomasse ist in Europa auch allgemein mit dem höchsten Potenzial hinsichtlich der Verfügbarkeit und der Biomassenutzung verbunden. Dies gilt auch für Deutschland, wo immer noch neue Quellen (wirtschaftlich) erschlossen werden können. Daher sollten Ansätze wie innovative Konversionsverfahren oder synergetische Verfahren, die der

effizienten Aufarbeitung bzw. Wiederverwertung von Rest- und Abfallstoffen dienen, zur Marktreife weiterentwickelt werden.⁵

Im Hinblick auf **neue Optionen** bzw. Quellen für Biomasse kommen immer wieder Möglichkeiten wie beispielsweise das Potenzial von Algen oder der Einsatz genveränderter und damit ertragreicherer Pflanzen (v.a. in den USA ein Forschungsthema [13]) für Biomasse zur Sprache. Bei Algen gibt es trotz großen Potenzials (sie binden effizient CO₂ aus der Atmosphäre und enthalten einen hohen Anteil an fetten Ölen) [14] jedoch erhebliche Herausforderungen bei der Produktion von Algenkraftstoffen. Bislang ist es nicht gelungen, eine großflächige und wirtschaftlich tragfähige Herstellung zu realisieren. Ein zentrales Problem sind die hohen Produktionskosten [15, 16]. Aus diesen Gründen haben viele Unternehmen, darunter auch große Konzerne wie Shell und ExxonMobil, ihre Algenkraftstoffprojekte eingestellt [17]. Ein vielversprechender Lösungsansatz, um die Wirtschaftlichkeit der Algenproduktion zu verbessern, könnte das sogenannte Biorefinery-Konzept sein. Dabei würden neben Biokraftstoffen auch nachhaltige Alternativen für die Nahrungsergänzung und Plastikproduktion – etwa Omega-3-Fettsäuren, Vitamine, Proteine oder Bioplastik – aus Algen gewonnen. Diese parallele Erzeugung mehrerer Produkte könnte zusätzliche Einnahmequellen erschließen und somit die Produktionskosten senken. Allerdings bleibt auch hier die Herausforderung bestehen, die Prozesse effizient und kostengünstig zu gestalten [15].

Weitere potenzielle Ressourcen ergeben sich aus dem Einsatz von Industrieabgasen oder kommunaler Abfälle. Entsprechende Verfahren werden vor allem in den USA durch Unternehmen wie LanzaTech / LanzaJet [18 - 20] entwickelt.

Darüber hinaus kann auch eine **geographische Ausweitung** zur Erschließung weiterer Biomasse in Betracht gezogen werden, indem das Potenzial in Nachbarländern sowie Ländern jenseits des europäischen Kontinentes untersucht wird. Dieses ist für Deutschland als hochindustrialisiertes Land von hoher Relevanz, um gegebenenfalls Biomasse zu importieren, zu verarbeiten und einen Teil der Endprodukte wieder zu exportieren. Hier könnten entsprechende Supply Chains aufgebaut werden. Dazu muss die Einhaltung der Nachhaltigkeitskriterien gewährleistet werden, Faktoren wie lange Transportwege, damit einhergehende Kosten sowie mögliche Risikofaktoren wie Industriepolitik und Investitionssicherheit in den entsprechenden Ländern mit betrachtet und die entsprechenden Vor- und Nachteile im Sinne einer Importstrategie ausreichend abgewogen werden.

⁵ AG SAF Maßnahme 9

Zusätzlich verfügbares Biomasse-Potenzial

Zuletzt sei noch die Überlegung erwähnt, ob sich gegebenenfalls langfristig Biomasse-Potenzial für SAF durch **Umverteilung** erschließen ließe, beispielsweise indem aktuell existierende Produktionen auf anderen Sektoren langfristig anderweitig substituiert werden. So beispielsweise durch die Nutzung von Biomasse, welche zur Herstellung von Bioethanol für die Beimischung in E10 genutzt wird. Durch die zunehmende Elektrifizierung im PKW-Bereich könnte langfristig weniger getankt werden, was dadurch freiwerdendes Biomasse-Potenzial bergen würde. Hieraus könnte eine zusätzliche Quelle für die **Herstellung von bio-gemem SAF**, z.B. Alcohol-to-Jet (AtJ), erschlossen werden.

Abbildung 2 zeigt die Energiebereitstellung aus Biomasse in Deutschland im Jahr 2021 nach Biomassekategorie, Energieträger und sektoraler Nutzung. Insgesamt betrug die eingesetzte Biomasse in diesem Jahr 1.713 Petajoule (PJ), womit 10 % des deutschen Energiebedarfs gedeckt werden konnten [21, 22].

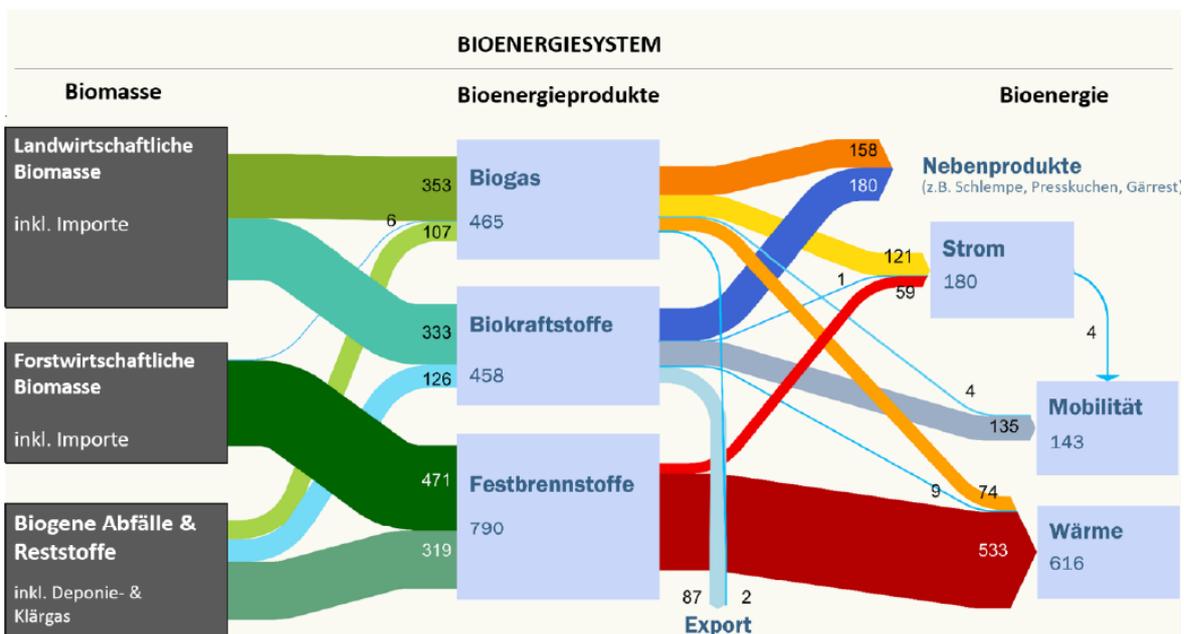


Abbildung 2: Energetische Biomassenutzung in Deutschland für das Jahr 2021 in Petajoule (PJ) [21]

Die Mobilität ist der Sektor mit der geringsten Biomassenutzung und hier in ähnlicher Größenordnung wie Strom aus Biomasse (siehe Abb. 2). Daher ist nicht nur eine Verlagerung von genutzter Biomasse innerhalb des Verkehrssektors zu betrachten. Auch die Umlenkung der Biomassenutzung im Strom- und Wärmesektor ist mittel- bis langfristig denkbar und

sinnvoll. So könnten z.B. auch durch das Auslaufen der EEG-Förderung von Altholz perspektivisch relevante Mengen für andere energetische oder stoffliche Nutzungen verfügbar werden.

2.5 Klarheit bei der Anrechenbarkeit



Nur wenn es klare Regelungen zur **Anrechenbarkeit von SAF** auf die THG-Reduktionsziele gibt, die auch einen Anreiz zur Nutzung schaffen, entsteht eine Motivation seitens der Fluggesellschaften, den nachhaltigeren Treibstoff einzusetzen und damit positiv auf die Klimabilanz einzuwirken. Der tatsächliche Umweltnutzen von SAF in Form einer CO₂-Reduktion und ggf. weiterer Minderungen von Nicht-CO₂-Effekten muss nachvollziehbar sein und vollständig erfasst werden können.⁶ Zur Nachweisführung des SAF-Einsatzes wird von sogenannten Chain of Custody (CoC)-Systemen oder Tracking Tools gesprochen [23]. Neben den Optionen einer kompletten physischen Trennung des SAF durch eine separate Lieferkette oder dem Massenbilanz-System, einer gemeinsam genutzten Infrastruktur durch verschiedene Lieferanten und Abnehmer, ist das sogenannte Book & Claim-System der derzeit in der Luftfahrt am intensivsten diskutierte Lösungsansatz zur Anrechenbarkeit von SAF.

Book & Claim

Ein Book & Claim-System kann als **Weiterentwicklung des** durch die EU-Kommission festgelegten **SAF-Flexibilitätsmechanismus** aus der Verordnung ReFuelEU Aviation betrachtet werden. Dieser ermöglicht, zur **Sicherstellung der SAF-Versorgung** bis zum Ausbau der Produktions- und Lieferkapazitäten in den kommenden zehn Jahren, die flexible Verteilung des SAF-Anteils auf die EU-Flughäfen. So können in der Übergangszeit manche Flughäfen mit einem höheren SAF-Anteil versorgt werden, während an anderen Flughäfen kein oder nur ein geringer Anteil des nachhaltigeren Treibstoffes zum Einsatz kommt [24]. Einzelheiten zur konkreten Funktionsweise und möglichen Implementierung eines solchen Mechanismus stehen seitens der Europäischen Kommission allerdings noch aus.⁷

Beim Book & Claim wird die **Anrechnung von SAF von der physischen Nutzung des Treibstoffs entkoppelt**. Hersteller, denen auch die Nachweisführung zur Nachhaltigkeit

⁶ Zertifizierungs- und Anrechnungssysteme werden im Rahmen von InnoFuels vor allem im Innovationsschwerpunkt "Nachhaltigkeit" behandelt.

⁷ Als Zieldatum für die Ausgestaltung der Einzelheiten war der 1.7.2024 angekündigt.

obliegen würde, stellen Zertifikate im Umfang ihrer Produktionsmenge aus, welche dann frei handelbar wären. So könnte der nachhaltigere Treibstoff von einer Fluggesellschaft auch bilanziell geltend gemacht werden, wenn er am Flughafen nicht verfügbar ist bzw. nicht direkt getankt wird. Die Definition von Zielsetzungen und Rahmenbedingungen zur Ausarbeitung konkreter Modelle erfolgt bereits durch verschiedene Initiativen und Institutionen [25]. Bei der Ausgestaltung eines solchen Mechanismus muss sichergestellt werden, dass Scope 1 und Scope 3⁸ in der Nachweisführung an den Regulator nicht voneinander entkoppelt werden. Ansonsten wird der Fluggesellschaft als SAF-Nutzer keine Möglichkeit zur Anrechnung der Emissionsreduktion gegeben.

Ein pragmatischer und flexibler Book & Claim-Mechanismus könnte den Markthochlauf von SAF unterstützen, da ein **Zugang zu SAF für alle Anwender ortsunabhängig** und logistisch effizient verfügbar wäre, ohne eine zusätzliche Infrastruktur und entsprechende Transportwege zu benötigen. Für die Produzenten wiederum erweitert es das Marktpotenzial. Die zu bewältigenden Herausforderungen hingegen liegen in der Gestaltung eines breit anwendbaren Modells und einer entsprechenden unbürokratischen Umsetzung. Kämen verschiedene Systeme zum Einsatz, würde dies wiederum die Komplexität für den Anwender erhöhen durch ggf. regionale Überschneidungen.

Smart Use of SAF

Die Entkopplung der SAF-Anwendung durch Zertifikatkauf vom physischen Einsatz im Flugzeug kann langfristig auch den Weg ebnen hin zu einem Konzept des „Smart Use of SAF“. Hierbei wird der nachhaltigere Treibstoff gezielt auf Flugrouten eingesetzt, wo eine zusätzliche Reduktion der Klimawirkung durch die Vermeidung von Nicht-CO₂-Effekten zu erwarten ist [26]. Zum Start eines Book & Claim-Mechanismus sollte ein neues System allerdings nicht zu komplex gestaltet werden, um die allgemeine Akzeptanz seiner Anwendung zu fördern. Zudem wäre auch eine EU-weite und im besten Fall weltweit einheitliche Gestaltung eines solchen Mechanismus sinnvoll.

⁸ Gemäß der Definition im Greenhouse Gas Protocol umfasst Scope 1 die direkten THG-Emissionen eines Anwenders (Verbrennungsemissionen des Treibstoffes im Flugzeug), während Scope 3 auch alle indirekten Emissionen der gesamten Wertschöpfungskette umfasst.

3 Erhöhung der Nachfrage

Laut aktueller Studien wird das Preisdelta zwischen SAF und herkömmlichem Kerosin auf absehbare Zeit groß bleiben. Eine Grundvoraussetzung für einen schnelleren Markthochlauf und damit für eine effektive Steigerung der Nachfrage nach SAF – perspektivisch auch über gesetzliche Quoten hinaus – ist die **wettbewerbliche Gleichbehandlung** von heimischen EU-Fluggesellschaften und außereuropäischen Konkurrenten. Dass SAF, und insbesondere strombasierte PtL-Treibstoffe, in absehbarer Zukunft weder in ausreichender Menge, noch zu wettbewerbsneutralen Preisen erhältlich sein werden, bleibt in der regulatorischen Betrachtung bislang oftmals unberücksichtigt. Eine spürbare Kostendegression ist nicht in Sicht. Nur durch eine **ganzheitliche Strategie**, die den SAF-Hochlauf durch wettbewerbsneutrale Maßnahmen systematisch ankurbelt und den Preis von SAF substantiell senkt, kann der Übergang zur CO₂-Neutralität im Luftverkehr gelingen.

Um die Nachfrage nach SAF effektiv zu steigern, müssen gezielte Maßnahmen ergriffen werden, welche die Verfügbarkeit von SAF zu wettbewerbsfähigen Preisen erhöhen. Die nachfolgenden Beispiele sollen verdeutlichen, wie eine ganzheitliche Strategie für einen wettbewerbsneutralen Markthochlauf von SAF incentiviert werden kann und welche regulatorischen Voraussetzungen dafür geschaffen werden müssten. Sie zeigen auf, wie **regulatorische und wirtschaftliche Anreize effektiv kombiniert werden** können, um die Akzeptanz und den Einsatz von SAF nachhaltig zu fördern.

3.1 Schaffung gleicher Wettbewerbsbedingungen



Unterschiede in internationalen und nationalen SAF-Quoten können zu ungleichen Wettbewerbsbedingungen bei den Anwendern führen. Damit für Fluggesellschaften, die in Weltregionen und Ländern mit hohen SAF-Quoten operieren, keine Nachteile aufgrund höherer Treibstoffkosten entstehen, sollten entsprechende Maßnahmen entwickelt werden, welche darauf ausgelegt sind, Wettbewerbsverzerrungen zu vermeiden.

3.1.1 Klimaclub-Modell

Aus ökonomischer Sicht ist ein Club ein freiwilliger Zusammenschluss von Teilnehmern, die sich die Kosten für die Produktion eines Gemeinschaftsgutes teilen, um daraus gemeinsam einen Nutzen zu ziehen. Dabei müssen die Vorteile des Clubs hinreichend groß sein, die Mitglieder entsprechende Beiträge zahlen und sich an die Regeln des Clubs halten. Ein

Modell zur Beschleunigung des Markthochlaufs von SAF und damit der Gestaltung einer Marktordnung für die Luftfahrt könnte beispielsweise auf Basis des Klimaclub-Modells von William D. Nordhaus entworfen werden [27]. Durch internationale Zusammenarbeit und einheitliche Standards könnte ein „Klimaclub Aviation“ für den SAF-Markthochlauf dazu beitragen, Wettbewerbsnachteile im europäischen und globalen Luftverkehr zu minimieren, die durch unterschiedliche regulatorische Vorgaben für den Einsatz von SAF je nach Weltregion entstehen. Ein solches Modell sollte einen CO₂-neutralen Luftverkehr unter Einhaltung des Pariser Klimaabkommens anstreben, nach entsprechenden Nachhaltigkeitskriterien agieren, faire Wettbewerbsbedingungen gewährleisten und Technologieoffenheit bei der Umsetzung zulassen.⁹

Koordinierte Maßnahmen zur Förderung von SAF sowie gezielte wirtschaftliche Anreize könnten die Marktdurchdringung beschleunigen und den Übergang zur CO₂-Neutralität im Luftverkehr effektiv unterstützen. Indem der Klimaclub den Fokus auf technologische Innovation und den Wettbewerbsschutz legt, könnte der Einsatz von SAF weltweit harmonisiert und hochskaliert werden. Durch eine Selbstfinanzierung der Industrie, bspw. aus dezidiertem Nutzung der Mittel des EU-ETS-Aviation, könnte zudem die Transformation unabhängig werden. Die Ausarbeitung eines entsprechenden Modellansatzes erfolgt im Projekt InnoFuels im Rahmen einer separaten Studie.

3.1.2 Endzielbezogene Klimaabgabe

Ein weiterer Hebel, um die Skalierung und Nutzung nachhaltiger Flugtreibstoffe effektiv voranzutreiben und damit das Ziel der CO₂-Neutralität im Luftverkehr bis Mitte des Jahrhunderts zu erreichen, wäre die Einführung einer EU-Klimaschutzabgabe. Diese würde passagier- und reiseendzielbezogen für alle Fluggesellschaften gleichermaßen erhoben, und die Einnahmen zweckgebunden für den SAF-Markthochlauf verwendet. Voraussetzung für eine solche **kostenneutrale Lösung zur Schaffung eines selbsttragenden Marktes** für SAF sowie eines globalen Level-Playing-Fields wäre, dass sämtliche bereits bestehenden nationalen Luftverkehrsabgaben im EU-Luftverkehr in einer einheitlichen Abgabe zusammengeführt würden. Die endzielbezogene Klimaabgabe würde sich an den Emissionen der spezifischen Flugziele orientieren und so effektiv zur Reduktion der CO₂-Emissionen und gleichzeitig zur erhöhten Nachfrage nach SAF beitragen [28].

⁹ Im InnoFuels Anwendungsfeld Luftfahrt wird ein solches Modell im Rahmen einer separat vergebenen Studie ausgearbeitet.

Die Höhe der Abgabe könnte sich, analog zur deutschen Luftverkehrsteuer, nach der Entfernung zum Zielflughafen (wettbewerbsneutral) richten und würde jährlich so festgelegt, dass das Gesamtaufkommen die Beschaffung des regulatorisch benötigten SAF abdeckt. Letztlich könnte das so beschaffte SAF zum Preis von konventionellem Flugtreibstoff in der EU in Umlauf gebracht werden, was die Nachfrage nach SAF effektiv ankurbeln, und perspektivisch auch über gesetzliche Vorgaben hinaus, steigern würde.

Da eine solche Klimaschutzabgabe einem bestimmten fiskalischen Zweck dient, wäre ihre Einführung europarechtlich gemäß Art. 100 (2) AEUV (Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union) zulässig und bei Vorliegen von Einstimmigkeit im Europäischen Rat möglich.

3.1.3 Verbindliche Umwelt- und Klimaschutzstandards in Luftverkehrsabkommen

Eine weitere Maßnahme zur gezielten Steigerung der Nachfrage nach nachhaltigen Flugtreibstoffen ist die Implementierung einheitlicher, verbindlicher Umwelt- und Klimaschutzstandards in bi- und multilateralen Luftverkehrsabkommen (siehe dazu auch Kapitel 2.1). Indem Deutschland und die Europäische Union sowohl bei der Revision bestehender als auch bei der Verhandlung zukünftiger globaler Luftverkehrsabkommen die Einhaltung europäischer SAF-Vorgaben (Quoten der ReFuelEU Aviation) sicherstellen, würde nicht nur ein globales Level-Playing-Field geschaffen, sondern vor allem auch die Nachfrage und Produktion von SAF auf internationaler Ebene erheblich gestärkt. Singapur plant beispielsweise zur Erhöhung der SAF-Nutzung ab 2026 eine vorgeschriebene SAF-Betankung von 1 % für alle abgehenden Flüge, welche bis 2030 auf 3-5 % gesteigert werden soll [29, 30]. Diese Quoten liegen damit allerdings unterhalb der europäischen Quoten.

3.2 Schaffung finanzieller Anreize



Um den Einsatz von SAF zu fördern, sollten für Anwender gezielte finanzielle Anreize geschaffen werden, um die Mehrkosten für den klimafreundlicheren Treibstoff abzupuffern. Dies kann beispielsweise über Steuer- oder Gebührenvorteile erfolgen oder dem Ausbau der SAF Allowances / FEETS („Fuels Eligible for ETS-Support“).

3.2.1 Steuervorteile

Bis zur Einführung eines europaweit harmonisierten, wettbewerbsneutralen Abgabesystems zur effektiven Skalierung von SAF in Europa, können zunächst **bereits bestehende steuerliche Hebel** – vor allem auf nationaler Ebene – genutzt und gezielt auf die Produktion und Verwendung von SAF ausgerichtet werden. In Deutschland betrifft dies vorrangig die nationale Luftverkehrsteuer. Diese wurde durch das Luftverkehrssteuergesetz (LuftVStG) am 1. Januar 2011 eingeführt und beläuft sich seit 2024 auf Beträge zwischen 15,53 € und 70,83 € pro Flug, abhängig von der Entfernung zum Zielflughafen [31 - 33].

Das Prinzip der effizienten Mittelverwendung für die Dekarbonisierung des Luftverkehrs wird auch vom Gesetzgeber ausdrücklich anerkannt: Gemäß dem Koalitionsvertrag 2021-2025 [34] der Bundesregierung war geplant, die Einnahmen aus der Luftverkehrsteuer zur Förderung von CO₂-neutralen, strombasierten Flugtreibstoffen zu verwenden. Eine Umwidmung dieser Steuermittel sollte den Markthochlauf von SAF unterstützen, indem sie in F&E-Vorhaben zur Produktion und den Einsatz nachhaltiger Flugtreibstoffe investiert werden. Ziel sollte sein, die Produktion von SAF – insbesondere in der kritischen Phase des Markthochlaufs – wirtschaftlich attraktiver zu gestalten und die Skalierung zu beschleunigen, wodurch Verfügbarkeit und Kosteneffizienz nachhaltig gesteigert werden. Trotz des ausdrücklichen Bekenntnisses im Koalitionsvertrag wurde durch eine außerplanmäßige Erhöhung der Luftverkehrsteuer den Airlines weiteres Kapital entzogen, das zur Investition in Flottenerneuerung und nachhaltige Treibstoffe hätte verwendet werden können. Wenn die von der Industrie aufgebrauchten Steuermittel, wie geplant, für die Skalierung von SAF eingesetzt werden könnten, wäre dies ein wichtiger Beitrag, um die Klimaziele im Luftverkehr zu erreichen.

Ein Blick in die USA zeigt, dass diese mit ihrer Förderpolitik für alternative Flugtreibstoffe eine Vorreiterrolle einnehmen. Die Biden-Regierung hat **Steuergutschriften (Tax-Credits)** eingeführt, um die Entwicklung und Nutzung dieser Treibstoffe voranzutreiben. Diese Gutschriften beginnen bei 1,25 USD pro Gallone SAF, die eine 50 %-ige Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilem Kerosin erreichen. Für jede zusätzliche Prozentreduktion wird ein zusätzlicher Cent gezahlt, maximal jedoch 1,75 USD pro Gallone. Diese Maßnahme, welche Teil des „Inflation Reduction Act“ (IRA) ist, zielt darauf ab, bis 2030 jährlich 3 Milliarden Gallonen SAF zu produzieren und die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs um 20% zu senken [35]. Ob diese Regelungen in der neuen amerikanischen Administration wie vor der Wahl angekündigt wieder abgeschafft werden oder Bestand haben werden, lässt sich aktuell nicht abschätzen.

3.2.2 Vorteile bei Gebühren und Entgelten

Die Schaffung finanzieller Anreize für nachhaltigen Flugtreibstoff im Luftverkehr durch Gebührenvorteile oder Spreizung von Entgelten ist eine zentrale Methode, um die Einführung von SAF zu fördern. Flughäfen und Staaten können spezielle Programme einführen, welche die Nutzung von SAF subventionieren und dadurch die wirtschaftlichen Hürden für Fluggesellschaften reduzieren. Ein Beispiel für solche Initiativen ist das SAF-Incentive-Programm am Flughafen Heathrow (London), das bis zu 50 % der Mehrkosten für SAF deckt. Heathrow strebt an, den Anteil von SAF am Flughafen zu verdreifachen. Auch andere Flughäfen wie Schiphol (Amsterdam) und Swedavia (Stockholm) bieten ähnliche Anreize. Schiphol subventioniert beispielsweise 500 € pro Tonne für biobasierte SAF und 1.000 € pro Tonne für PtL-SAF, damit synthetischer Treibstoff verfügbar ist und die Kosten für Fluggesellschaften gesenkt werden [36].

Ein ganzheitlicher Ansatz zur Definition einer SAF-Strategie sollte nicht nur diese individuellen Flughafeninitiativen berücksichtigen, sondern auch die Notwendigkeit einer koordinierten und regulatorischen Zielsetzung betonen. Unilaterale Flughafen-Aktionen haben den Nachteil, dass sie den Wettbewerb in Europa verzerren. Hingegen könnten gemeinsam mit den Airlines entwickelte verbindliche regulatorische Zielsetzungen, wie etwa eine EU-weit einheitliche Umsetzung von ReFuelEU Aviation sowie unterstützende Effizienzmaßnahmen wie ein Book & Claim-System, die Logistikkosten und Emissionen senken und die Nachweisführung erleichtern [37].

Durch die Kombination von Flughafen- und staatlichen Anreizen, sowie einer koordinierten regulatorischen Strategie, kann der Markthochlauf von SAF entscheidend vorangetrieben werden.

3.2.3 FEETS / SAF Allowances ausbauen

„FEETS“ bzw. Fuels Eligible for ETS-Support (ehemals als SAF-Allowances bezeichnet) bieten Fluggesellschaften finanzielle Anreize, den Einsatz von SAF zu steigern, indem sie den Preisunterschied zu herkömmlichem Kerosin teilweise durch den Bezug von Freizertifikaten ausgleichen. Dieser Mechanismus, verankert in der 2023 überarbeiteten EU-ETS-Richtlinie [38], variiert je nach Art des verwendeten SAF und des Betankungsortes. Die Ausgleichshöhen reichen beispielsweise von 50 % für nicht fossiles Kerosin, 70 % für fortschrittliche Biokraftstoffe, 95 % für PtL und bis zu 100 % bei SAF-Bezug auf Inseln. Die European Aviation Safety Agency (EASA) ist derzeit damit beauftragt, die Preisdifferenz zwischen herkömmlichem Kerosin und SAF zu ermitteln und festzulegen [39, 40].

Bei einem Marktpreis von etwa 2.800 € pro Tonne (t) für biogenes SAF (Produktionskosten: 1.800 €/t [39]) und einem angenommenen zukünftigen Preis von 4.500 € pro Tonne für PtL-Kerosin, werden die Mehrkosten im Vergleich zu fossilem Kerosin, das bei rund 820 €/t [39] liegt, deutlich reduziert, wie in Abbildung 3 dargestellt.

Was den Preis für PtL-Kerosin betrifft, können aktuell nur theoretische Aussagen auf Basis von Produktionskosten getroffen werden. Diese variieren je nach Literaturquelle oder Szenario aufgrund der gewählten Allokationsmethoden, Technologien sowie der Rohstoff- und Personalkosten, die je nach Standort bzw. Herstellungsland unterschiedlich ausfallen. Laut der EASA belaufen sich die Produktionskosten für PtL-Kerosin im Jahr 2023 auf etwa 6.600–8.700 €/t [39]. Die Studie von Andreas Meurer et al. [41] schätzt die aktuellen Kosten im Baseline-Szenario mit 4.000–7.700 €/t etwas niedriger ein.

Langfristige Prognosen deuten jedoch auf günstigere Entwicklungen hin: Stefan Bube et al. [42] gehen davon aus, dass die Produktionskosten für synthetisches Kerosin in den kommenden Jahren bei rund 3.500–5.500 €/t liegen könnten. Dabei lassen sich die geringsten Kosten erzielen, wenn der Verkauf der Nebenprodukte wie Diesel und Naphtha mitberücksichtigt wird. Noch optimistischer sind die Schätzungen von Andreas Meurer et al. [41], die für das Jahr 2050 Produktionskosten von 1.900–3.500 €/t erwarten. Eine Hochskalierung der Produktion ist zwar zu erwarten, dass der Preis dadurch aber zeitnah die Grenze von 3.500 €/t erreicht oder sogar darunter sinken könnte, ist aktuell allerdings nicht absehbar. Daraus resultiert die obige Annahme von zukünftig 4.500 €/t für PtL-Kerosin.

Eine Verlängerung der FEETS über 2030 hinaus sowie eine Erhöhung der verfügbaren Menge wären entscheidende Hebel, um den Luftverkehr auf dem Weg zur CO₂-Neutralität bis 2050 zu unterstützen. Die gezielte Förderung von SAF durch wirtschaftliche Anreize scheint unverzichtbar, um die notwendigen Investitionen in die Produktion und Nutzung von SAF zu mobilisieren und die Emissionen im Luftverkehr nachhaltig zu senken.

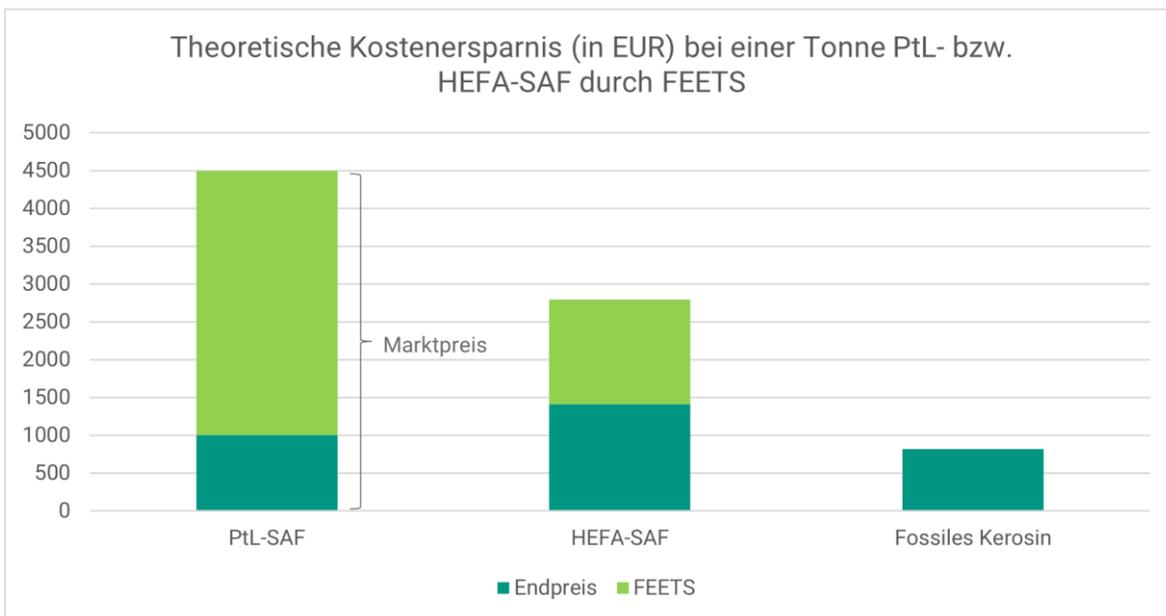


Abbildung 3: Kostenersparnis (in EUR) bei einer Tonne PtL- bzw. HEFA-SAF (Fortschrittliche Biokraftstoffe) durch den möglichen Erhalt von FEETS (ehem. SAF-Allowances), Gesamtbalken zeigen den jeweiligen Marktpreis inkl. SAF-Allowances in hellgrün und den Endpreis in dunkelgrün [eigene Darstellung]

Die nationale Umsetzung des EU-ETS 1 durch die Novelle des Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes (TEHG) sieht vor, dass FEETS nur im reduzierten Anwendungsbereich („intra-EU“) zur Verfügung gestellt werden. Dies betrifft alle Flüge, die im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) starten und landen, sowie Flüge aus dem EWR in die Schweiz und nach UK aufgrund bestehender Abkommen. Die Beantragung der FEETS erfolgt über den Emissionsbericht ab dem Berichtsjahr 2024. Die International Air Transport Association (IATA) betont die Bedeutung solcher Maßnahmen. Durch eine verstärkte Förderung und ein verbessertes Anreizsystem könnte Deutschland eine Vorreiterrolle bei der Einführung von SAF im Luftverkehr übernehmen und wesentlich zur Erreichung der Klimaziele beitragen [43, 44].

3.3 Erhöhung der Zahlungsbereitschaft der Kunden



Deutlich höhere Treibstoffkosten durch die Verwendung von SAF werden sich am Ende der Wertschöpfungskette auch auf die Ticketpreise der Passagiere oder die Transportkosten im Luftfrachtbereich auswirken. Hier besteht je nach Kundensegment die Möglichkeit, gezielte Maßnahmen zu ergreifen, um die Zahlungsbereitschaft für die entstehenden Mehrkosten zu steigern. Bei Passagieren können vor allem

individuelle Anreize wirken, während im Geschäftskundenbereich (Dienstreisen, Luftfracht) insbesondere regulatorische Anforderungen relevant sind. Im Bereich der Privatflugzeuge könnten ebenfalls vor allem regulatorische Maßnahmen die Nutzung von SAF fördern.

3.3.1 Verpflichtung zu CO₂-neutralen Dienstreisen

Unternehmen, die ihre Dienstreisen CO₂-neutral gestalten, setzen entweder auf nachhaltige Technologien oder Kompensation. Durch die Integration von SAF in ihre Reiserichtlinien oder deren Bevorzugung, schaffen Unternehmen eine Nachfrage nach dem umweltfreundlicheren Treibstoff. Das Weltwirtschaftsforum betont, dass die Etablierung eines erfolgreichen SAF-Marktes zwar Großabnehmer wie Airlines erfordert, die Nachfrage nach SAF aber auch durch Dienstreisende von Unternehmen gesteigert werden kann [45].

Ein wesentlicher Treiber für den verstärkten Einsatz von SAF im Unternehmenskontext ist die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD). Diese verpflichtet Unternehmen dazu, ihre Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette transparent darzustellen und aktiv zu reduzieren. Dabei rücken insbesondere die indirekten Scope-3-Emissionen in den Fokus, zu denen unter anderem Dienstreisen mit dem Flugzeug zählen [46].

Kompensation ergänzt diesen Ansatz, indem Unternehmen den verbleibenden CO₂-Ausstoß durch Investitionen in Klimaschutzprojekte ausgleichen. Die Kombination aus SAF und Kompensation kann die Nachfrage nach SAF weiter steigern, wenn Unternehmen SAF als zentralen Bestandteil ihrer Emissionsminderungsstrategie bei Flugreisen nutzen. Die Gold Standard Organisation betont, dass diese Verpflichtung zur Emissionskompensation und der Einsatz von SAF zur Förderung der Marktentwicklung und Verfügbarkeit von nachhaltigen Treibstoffen beitragen [47]. Durch Reiserichtlinien, die umweltfreundliche Tarife bevorzugen, verstärken Unternehmen diesen Effekt, indem sie finanzielle Anreize für die Luftfahrtindustrie schaffen, mehr in SAF zu investieren [48].

3.3.2 Einsatz von SAF im Luftfrachtbereich

Auch im Bereich der Luftfracht gewinnt der Einsatz von SAF zunehmend an Bedeutung. Wie bei Dienstreisen fällt auch der Luftfrachttransport in die Kategorie der indirekten Emissionen (Scope 3) von Unternehmen, die im Rahmen der CSRD offengelegt und reduziert werden müssen [46]. Da Luftfracht in vielen Branchen maßgeblich zu diesen Emissionen beiträgt, stellt der Einsatz von SAF hier eine Möglichkeit dar, Emissionen zu verringern und diese in der Nachhaltigkeitsberichterstattung transparent zu dokumentieren.

Entsprechend bieten Logistikdienstleister und Airlines inzwischen SAF-basierte Transportlösungen gezielt für ihre Frachtkunden an, beispielsweise in Form von SAF-Zuschlägen. Kunden, die diese nachhaltigen Optionen buchen, erhalten anschließend entsprechende Zertifikate, die im Rahmen der CSRD-Berichterstattung für Scope-3-Emissionen genutzt werden können [49, 50]. SAF stellt im Luftfrachtbereich damit eine konkrete Option dar, den steigenden Anforderungen an eine nachvollziehbare und überprüfbare Emissionsberichterstattung gerecht zu werden.

Die Zahlungsbereitschaft für SAF ist im Luftfrachtbereich daher weniger durch individuelle Überzeugung, sondern primär durch regulatorische Notwendigkeiten und unternehmerische Nachhaltigkeitsstrategien geprägt.

3.3.3 Regulatorische Vorgaben für Business Jets/Privatjets

Die Diskussion über die verpflichtend ausschließliche Nutzung von SAF für Business Jets beleuchtet wichtige regulatorische und umwelttechnische Fragen. Business Jets weisen eine höhere Umweltbelastung pro Passagier auf, sind aber aktuell u. a. von Umweltabgaben wie dem EU-ETS 1 befreit und regulatorisch in Bezug auf SAF nicht berücksichtigt. Aber auch dieses Segment des Luftverkehrs könnte durch SAF, das deutlich geringere CO₂-Emissionen verursacht als herkömmliches Kerosin, erheblich umweltfreundlicher werden und mit einer entsprechenden Nachfrage den Markthochlauf fördern. Die europäische Dachorganisation der NGOs im Verkehrsbereich Transport & Environment (T&E) hebt hervor, dass mit entsprechenden Maßnahmen, die auf wohlhabende Fluggäste von Privatjets abzielen, zusätzliche Mittel generiert werden könnten. Diese könnten wiederum in die Förderung von PtL-SAF investiert werden, um SAF in der Luftfahrt voranzutreiben. Dies könnte beispielsweise in Form einer Abgabe für Privatjets pro Flug erfolgen [51].

3.3.4 Kaufanreize für Kunden

Auch in Branchen wie beispielweise der Nahrungsmittel- oder der Modeindustrie geht die nachhaltigere Kaufoption in der Regel mit einem höheren Preis einher. Der Teil der Konsumenten, der Wert auf nachhaltige Produkte legt, ist bereit, diesen Preis zu entrichten, da für ihn das Endprodukt einen Nutzen im Sinne der Nachhaltigkeit verspricht. So stellt sich auch im Flugverkehr die Frage, welche Anreize Passagieren geboten werden könnten, damit möglichst viele von ihnen mit ihrer Kaufentscheidung einen Beitrag zum nachhaltigen

Fliegen leisten. Eine Untersuchung zu diesem Thema fand im Rahmen des Projekts “ComplIncent” [52] durch die Frankfurt University of Applied Sciences statt.¹⁰ Ziel des Projektes war es, innovative Anreizmechanismen zu entwickeln, mit denen Flugreisende motiviert werden sollen, freiwillig die Mehrkosten von SAF zu tragen. Gemäß einer Umfrage mit 1.208 Teilnehmern im Rahmen des Projektes, stellte sich heraus, dass 51,2 % der Teilnehmer nicht bereit wären, einen freiwilligen Aufpreis für einen Flug zu zahlen, der nachweislich weniger oder kein CO₂ verursacht. Auf die Frage, ob hingegen bestimmte Anreize dazu motivieren könnten, einen Aufpreis zu zahlen, bejahten 45 % der Befragten. Am häufigsten würden sich die Teilnehmer dabei durch Add-Ons wie beispielsweise eine kostenlose Umbuchung, das Nutzen einer “Green Lounge” oder einem Priority Check-In zu einem Aufpreis für das Flugticket motivieren lassen. Weitere Anreizmechanismen könnten nach den Ergebnissen des ComplIncent-Projektes in den Bereichen der Wertschätzung (z.B. Präsent im Flugzeug, kostenloser Kaffee am Flughafen), der Informationspolitik in Richtung Endkunde (CO₂-Ausstoß, Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion) sowie der Sichtbarkeit (grüne Bordkarte, Erkennbarkeit am Flughafen und an Bord) liegen.

Bei der Gestaltung eines Anreizsystems und den damit einhergehenden Ticketpreisen sollte auch das entsprechende Kundensegment berücksichtigt werden. So verursacht ein Fluggast in der Business-Class und der First-Class aufgrund des höheren Platzbedarfes im Verhältnis einen höheren CO₂-Ausstoß pro Kopf als ein Fluggast in der Economy-Class. Berücksichtigt man dieses Verhältnis auch in den Mehrkosten für SAF beim Flugpreis, würde dies zu einer gerechteren Verteilung der Belastung führen.

3.4 Erhöhung der Zahlungsbereitschaft der Airlines



Neben Maßnahmen zur Steigerung der Zahlungsbereitschaft in den unterschiedlichen Kundensegmenten, sollten auch Maßnahmen Berücksichtigung finden, welche die Zahlungsbereitschaft der Airlines erhöhen. Hier kann beispielsweise in finanzieller Hinsicht ein entsprechendes Finanzierungsmanagement in Betracht gezogen werden oder es können in technischer Hinsicht die zusätzlichen Vorteile bei der Nutzung von SAF vermarktet werden.

¹⁰ Das Projekt wird aus Mitteln des Landes Hessen und der HOLM-Förderung im Rahmen der Maßnahme „Innovationen im Bereich Logistik und Mobilität“ des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen gefördert.

3.4.1 Finanzierungsmanagement

Um die Nachfrage nach SAF zu steigern, ist ein effektives Finanzierungsmanagement entscheidend. Hier können Einkaufsgenossenschaften ansetzen, welche die Nachfrage mehrerer Fluggesellschaften bündeln und als einheitlicher Block mit SAF-Produzenten verhandeln. Diese Bündelung verbessert Preisbedingungen und stabilisiert Lieferungen, was zu einem Markthochlauf des SAF beiträgt [53]. Ebenso wichtig sind spezialisierte Beschaffungsorganisationen, die sich auf langfristige Verträge und die logistische Infrastruktur konzentrieren, um eine zuverlässige SAF-Versorgung sicherzustellen.

Diese Maßnahmen müssen jedoch rechtlich geprüft werden, insbesondere in Bezug auf das Kartellrecht. Einkaufsgenossenschaften und Beschaffungsorganisationen könnten potenziell den Wettbewerb beeinflussen, daher ist eine sorgfältige Planung notwendig, um rechtliche Risiken zu minimieren und den Einklang mit Wettbewerbsregeln zu gewährleisten. Eine solche Beschaffungsorganisation könnte bspw. auch Teil eines Klimaclubs Aviation sein (siehe dazu Kapitel 3.1.1).

Auch der Maßnahmenkatalog der AG SAF, der im Rahmen des Arbeitskreises Klimaneutrale Luftfahrt der Bundesregierung erarbeitet wurde, unterstreicht die Notwendigkeit solcher Initiativen, um den Markthochlauf von SAF zu unterstützen. Die in diesem Katalog aufgeführten Maßnahmen fördern die Schaffung effizienter Beschaffungsstrukturen und die Bündelung der Nachfrage als zentrale Hebel zur Steigerung der SAF-Nachfrage und zur Skalierung des Marktes [3].

3.4.2 Vermarktung zusätzlicher Vorteile/Nutzen von SAF

Die zusätzlichen Vorteile beim Einsatz von SAF können zu einer erfolgreichen Vermarktung beitragen. Um dabei Bedenken im Hinblick auf Greenwashing zu vermeiden und die Akzeptanzbildung zu fördern, sollte eine entsprechende Kommunikation faktenbasiert zur Aufklärung der Umweltwirkungen erfolgen. Neben der Verringerung der Netto-CO₂-Emissionen werden auch die sogenannten Nicht-CO₂-Effekte beim Einsatz von SAF reduziert. Darunter fallen alle Emissionen, die ebenfalls einen Beitrag zur Klimaerwärmung haben, insbesondere die partikelinduzierte Bildung von Kondensstreifen ist hier zu nennen [54, 55].

Aufgrund der geänderten Zusammensetzung von v.a. aromatenfreien SAF im Vergleich zum fossilen Kerosin enthält der Abgasstrahl deutlich weniger bis kaum noch Rußpartikel. Dies reduziert in der Folge nicht nur die Nicht-CO₂-Effekte, sondern ermöglicht auch insgesamt eine vollständigere und damit sauberere Verbrennung. Dadurch kommt es zu weniger Verschleiß in den Triebwerken und zu einer effizienteren Verbrennung.

Diese Vorteile sind umso größer, je höher der Anteil an getanktem SAF ist. Aufgrund der bestehenden Logistik und Pipeline-Infrastruktur an den Flughäfen, ist das Vertanken auch einer bereits zugelassenen 50 %-Mischung nur mit separater Tanklogistik möglich. Im Regelfall wird SAF über die bestehenden Infrastrukturen, wie z.B. über das Central Europe Pipeline System der NATO, eingespeist und dort mit dem reinen fossilen Kerosin vermischt. Der Aufwand für das Vertanken eines 100 %-SAF wäre ungleich höher, wenn dieses nur in durch die Hersteller freigegebenen Flugzeugen verwendet werden dürfte.

4 Erhöhung der Investitionsbereitschaft

Die unzureichende Bereitschaft zu Investitionen in Produktionsanlagen für nachhaltige Flugtreibstoffe lässt sich insbesondere auf die geringe Renditeerwartung, das hohe Risiko des nicht Gelingens der Herstellung des zertifizierten Produktes und dessen Absatz sowie auf Schwierigkeiten bei der Beschaffung von Finanzkapital zurückführen. Um die Investitionsbereitschaft zu erhöhen, sind daher ein stabiler Business Case, Planungssicherheit und u.a. staatliche Investitionsanreize notwendig. Im Folgenden wird ausgeführt, wie diese Aspekte die Attraktivität von Investitionen in SAF-Anlagen erhöhen können.

4.1 Business Case für die Investition in SAF-Anlagen



Ein Business Case umfasst alle relevanten Faktoren, die zu einer Entscheidung über die Durchführung eines Projektes führen. Eine Investition wird nur dann getätigt, wenn die Summe aller relevanten Faktoren und deren Auswirkungen positiv ist. Dabei werden Chancen und Risiken gegeneinander abgewogen und bewertet. Die Wirksamkeit von Maßnahmen und Lösungsansätzen lässt sich somit gut abschätzen. Es gilt, Chancen zu schaffen bzw. zu erhöhen und Risiken möglichst auszuschließen oder zu minimieren.

4.1.1 Schaffung eines Marktes und eines vermarktbareren Produktes

Die meisten Maßnahmen, die darauf abzielen, neue Chancen zu schaffen, sind marktorientiert. Der Markt für SAF ist der Luftverkehr mit seinen verschiedenen Marktsegmenten. SAF ist aktuell noch ein kostenintensives Produkt, das keinen oder kaum direkten Mehrwert gegenüber konventionellem Kerosin hat. Der wesentliche Mehrwert liegt in der signifikanten Reduktion fossiler Treibhausgase und -effekte. Diese Effekte sind jedoch bisher kaum - fast

vernachlässigbar - in die Kostenrechnung des Einsatzes von fossilem Kerosin eingeflossen. Zudem ist ihre Berücksichtigung weltweit noch nicht etabliert.

Bei einem EU-ETS CO₂-Preis von beispielsweise 70 Euro¹¹ pro Tonne CO₂ fallen pro Tonne Kerosin zusätzlich rund 220 € an.¹² Bei einem Preis von rund 820 € pro Tonne fossilen Kerosins liegen die Gesamtkosten mit rund 1.040 € pro Tonne damit immer noch weit unter dem Preis für SAF, der im Fall von HEFA-SAF bei rund 2.800 € und bei PtL-SAF mit einem angenommenen zukünftigen Preis ca. 4.500 € noch wesentlich höher liegt (zum Marktpreis von SAF, insbesondere der Herleitung des PtL-Preises siehe Abschnitt 3.2.3). Für eine Kompensation unter CORSIA¹³ würden stattdessen nur rund 60 € pro Tonne Treibstoff hinzukommen, d.h. für fossiles Kerosin ergeben sich dann Kosten von 880 € [36]. Bei Nicht-Erfüllung der ReFuelEU-SAF-Quote ergeben sich mit den angenommenen Preisen hingegen Pönale von mindestens 3.960 € bzw. 7.360 € pro Tonne (siehe Abbildung 4) für Inverkehrbringer, welche sich wie folgt berechnet [56]:

$$2 \times (\text{Preis/t SAF} - \text{Preis/t fossiles Kerosin}) \times \text{Fehlmenge SAF} = \text{Pönale}$$

$$2 \times (2.800 \text{ €/t} - 820 \text{ €/t}) \times \text{Fehlmenge SAF} = 3.960 \text{ €/t Minimum-Pönale für HEFA-SAF}$$

$$2 \times (4.500 \text{ €/t} - 820 \text{ €/t}) \times \text{Fehlmenge SAF} = 7.360 \text{ €/t Minimum-Pönale für PtL-SAF}$$

Für Airlines soll die Pönale mindestens beim doppelten des mittleren Marktpreises für Kerosin liegen. Für Flughäfen gelten ebenfalls andere Pönalen, welche von den Mitgliedsstaaten festzulegen sind [56]. Die Pönalen gelten aber nur für den sehr geringen Teil, den die Quoten anfangs abdecken (Beimischungsquote EU ab 2025: 2 % SAF).

Ergänzend sei an dieser Stelle hinsichtlich die ohnehin zur Abschaffung zugunsten der EU-Quoten vorgesehene nationale PtL-Quote in Deutschland (BlmSchG) angemerkt, dass die in diesem Zusammenhang vorgesehene Pönale von etwa 3.000 € pro Tonne bei den zuvor angenommenen Produktionskosten in Höhe von 4.500 € keine Lenkungswirkung entfalten kann. Die Vermeidungskosten wären in dem Fall geringer als die Produktionskosten.

¹¹ Der durchschnittliche Preis für Emissionsberechtigungen im EU-ETS lag 2024 bei 65 € und 2023 bei 83,66 Euro [66].

¹² Bei der Verbrennung von einer Tonne Kerosin werden ca. 3,16 Tonnen CO₂ freigesetzt. Seit dem Berichtsjahr 2024 gilt bei der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) dieser Wert als Emissionsfaktor für Jetkerosin Jet A und Jet A1 [65].

¹³ Für eine Übersicht zu CORSIA siehe [6]

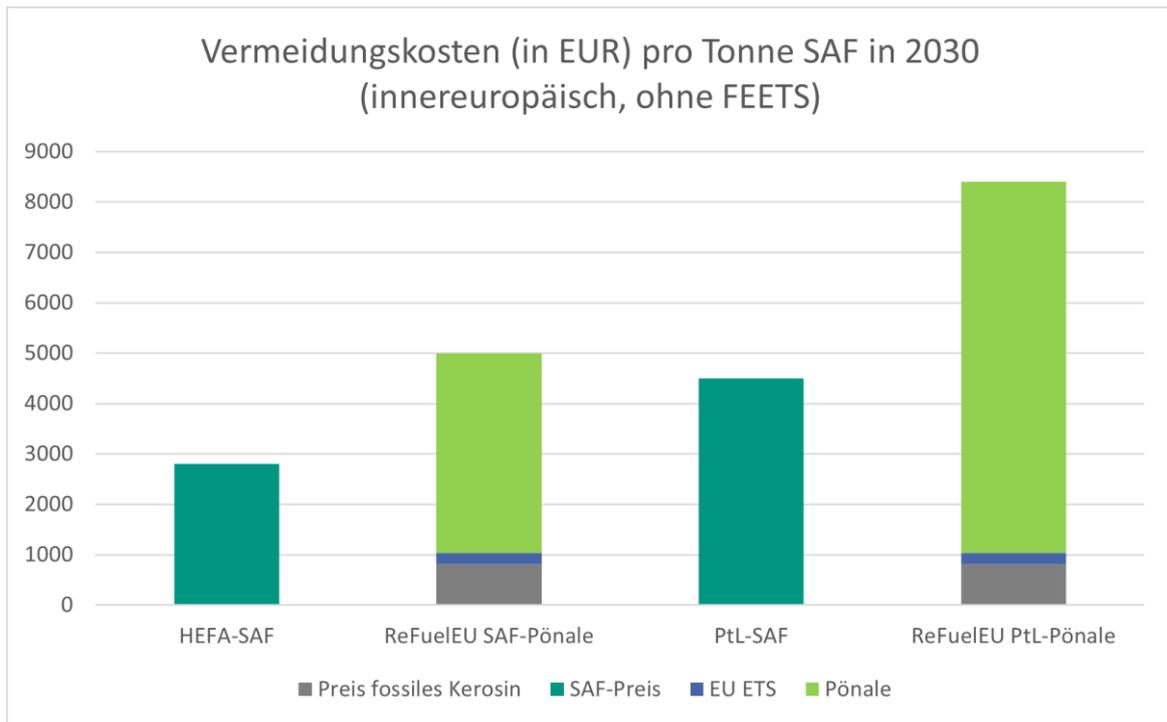


Abbildung 4: Vermeidungskosten pro Tonne SAF in der EU ohne Berücksichtigung von FEETS (ehem. SAF-Allowances); Hinweis: der Preis für PtL-SAF in Höhe von 4.500 € ist ein zukünftig angenommener Marktpreis basierend auf verschiedenen Studien (siehe Abschnitt 3.2.3) [eigene Darstellung]

Da der Anteil, den die Quoten und damit die Pönale abdecken, zu Beginn sehr gering ist, wird sich allein durch das Instrument der Pönalisierung kein Markt für SAF von innen heraus entwickeln. Daher ist es erforderlich, diesen Markt aktiv über einen entsprechenden Rahmen zu schaffen.

Die erste und wichtigste Maßnahme zur Erhöhung der Marktchancen ist die **Definition eines attraktiven Marktes mit einer kritischen Größe und Wachstumspotenzial für SAF**, soliden Kunden, hoher Stabilität und berechenbaren Spielregeln. Die kritische Größe und das Wachstumspotenzial sind gegeben: Der Markt für fossiles Kerosin ist groß und dürfte weiter wachsen: Im Jahr 2019 wurden in Europa ca. 48 Mio. Tonnen fossiles Kerosin vertankt [57]. Bei einem Preis von ca. 620 € pro Tonne im Jahr 2019 [58] entsprach dies einem fossilen Marktvolumen von rund 30 Milliarden Euro. Selbst bei stagnierendem Verbrauch wird dieser Markt durch die höheren Preise für SAF weiter wachsen. Solide Kunden, eine hohe Stabilität und berechenbare Spielregeln sind im Markt hingegen nicht gegeben.

Für Investoren sind darüber hinaus eine steigende Nachfrage und ein marktfähiges Produkt unabdingbar. Da sich die Nachfrage angesichts der hohen Preise für SAF nicht automatisch

einstellt, muss sie erst geschaffen werden. Dies kann grundsätzlich direkt über Quoten geschehen, deren Nichterfüllung sanktioniert wird. Alternativ kann dies auch indirekt über einen definierten Ausstieg aus fossilem Kerosin erfolgen. Das marktfähige Produkt wird ebenfalls extern definiert: Es muss technische Anforderungen für den Einsatz in der Luftfahrt (z.B. Jet A1-Qualität) sowie Nachhaltigkeitskriterien erfüllen, die von der Politik vorgegeben werden. Hier könnten Möglichkeiten geschaffen werden, in dessen Rahmen für erste Produkte und deren Herstellung weniger strenge Kriterien gesetzt werden (z.B. Play-grounds, Reallabore) als zu einem späteren Zeitpunkt. Zudem muss das Produkt als SAF anerkannt werden, um in CO₂-Bepreisungssystemen als solches ausgewiesen zu werden.

4.1.2 Wettbewerbsfähige Produktion

Unternehmern oder Geldgeber investieren in eine "(Future) State of the Art"-Lösung wie PtL, weil sie sich davon Wettbewerbsvorteile oder eine gute Rendite versprechen. Die Investitionskosten bei SAF sind jedoch extrem hoch: Pro Tonne Produktionskapazität liegen sie bei über 6.500 € [59]. Um diese Investitionen finanzieren zu können, muss der **Zugang zu bezahlbarem Kapital** gewährleistet sein. Hier setzt **Venture Capital** an. Geht man davon aus, dass eine Investition in eine SAF-Anlage risikofrei wäre, müsste man bei den genannten Investitionen mit einem Gewinn von ca. 150 € pro Tonne rechnen. Bei einer durchschnittlichen Aktienrendite wären es über 600 € und bei risikobehafteten Investitionen über 1.000 Euro.¹⁴

Darüber hinaus sind **günstige Standortkosten und günstige Faktorkosten** für die Rohstoffe/Eingangsstoffe (Deionat-Wasser bzw. H₂, CO₂, erneuerbare Energie) erforderlich. Die Produktion einer Tonne PtL erfordert ca. 25.000 kWh Strom und ca. 3,5 Tonnen CO₂.¹⁵ Für Investoren ist zudem von Bedeutung, wie zeitnah die Umsetzung des Vorhabens erfolgen kann. Hier sind auf der zeitlichen Schiene vor allem Faktoren wie Genehmigungsverfahren, Einkaufsprozesse, Vertragsgestaltung und Lieferzeiten mit Technologiegebern sowie die Baufeldvorbereitung zu berücksichtigen. Durch schnellere Prozesse können Investoren auf bessere Absatzchancen hoffen und schneller Einnahmen generieren.

¹⁴ Risikofreie Anlage Bundeswertpapiere 2,5 %, durchschnittliche Rendite MSCI World 9,2 %, Rendite bei riskanten Anlagen 20 %

¹⁵ Energiegehalt 1 Tonne Kerosin ca. 12.500 kWh, stöchiometrischer CO₂-Effekt 3,15

Die Komplexität eines Business Plans und der Einfluss der einzelnen Elemente verdeutlichen die **Notwendigkeit, einen exemplarischen Business Case** zusammen mit Industriebeteiligten zu entwickeln und darauf aufbauend wirksame Maßnahmen und deren Hebelwirkung abzuleiten. Im Folgenden werden die wesentlichen Maßnahmen dargestellt, die aus Investorensicht relevant sind, um die Attraktivität und Solidität einer Investition in eine SAF-Produktionsanlage zu steigern.

4.2 Chancensteigernde Maßnahmen als Investitionsanreize



Im Hinblick auf den Absatz bestehen verschiedene Möglichkeiten, die sowohl die Absatzsicherheit als auch die Lukrativität des Preises erhöhen. Eine indirekte Erhöhung der Kosten des Konkurrenzprodukts fossilen Kerosins könnte durch differenzierte Steuern oder eine sukzessive Erhöhung der Preise der airline-spezifischen Zertifikate im EU-ETS erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Anwendung eines **Swap-Modells, um die Preise für SAF zunächst auf einen Referenzpreis zu reduzieren** und so die Absatzchancen der ersten Produktionen zu erhöhen. Dies könnte im Kontext von Ausschreibungen erfolgen oder über einen Contract-for-Difference (CfD).

Zur Erhöhung der Absatzchancen im Geschäftskunden-Bereich wäre es eine Option, das **Geschäftsfliegersegment des General-Aviation-Bereichs in den EU-ETS aufzunehmen** oder **Flüge ohne SAF steuerlich nicht mehr absetzbar** zu machen. Zudem könnten staatliche Stellen (z.B. Dienstreisen der Angehörigen von Einrichtungen des Bundes, Flugbereitschaft der Bundeswehr) in die Vorreiterrolle gehen und für den eigenen Bedarf SAF einkaufen. Hier könnte die Preisgestaltung auf Basis der Selbstkosten erfolgen.

Um die Rendite der Investition kostenseitig zu verbessern, wären Fördermaßnahmen im Bereich CAPEX (Investitionsbeihilfen) oder OPEX (Preis- und Nutzungsgarantien bei erneuerbarer Energie, CO₂ sowie Feedstock) denkbar. In Anlehnung an den Inflation Reduction Act (IRA) in den USA könnten **Steuergutschriften z.B. in der Luftverkehrssteuer für das Erreichen von CO₂-Minderungen durch SAF** gegenüber fossilem Kerosin gewährt werden (siehe Kapitel 3.2). Diese könnten sowohl beim Hersteller als auch bei der abnehmenden Airline zur Anwendung kommen.

Neben den direkt finanziellen Maßnahmen gibt es aber auch unterstützende Elemente. So kann die Beschaffung von Finanzquellen durch sogenannte „**Investorenkonferenzen**“ erleichtert werden. Bei diesen Treffen haben Banken und Venture-Capital-Geber die Möglichkeit, sich mit potenziellen Produzenten und Vertretern der Politik auszutauschen und Vorhaben sowie deren Umsetzung zu besprechen. Der Vorteil solcher Konferenzen besteht

darin, die Partner bei der verständlichen Darstellung der Komplexität der SAF-Herstellung und -Vermarktung zu unterstützen.

Die Umsetzung des Verfahrens zur Auktionierung sowie die Anwendung eines Swap-Modells, sowie u. a. die Umsetzung von Förderungen oder Risikoabsicherungen (siehe unten), würde die **Einrichtung eines Transformations-Finanzierungs-Systems (TFS)** notwendig machen. Dieses System definiert und koordiniert, wie Kapitalzuflüsse, beispielsweise aus staatlichen Quellen oder Abgaben, mit Kapitalabflüssen in Förderungen, Investitionen oder Preismechanismen (CfD, Swap, Preisgarantien) zusammenwirken.

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die **Beschleunigung von Planungs- und Genehmigungsprozessen**. Der Bau der Flüssiggasterminals im Jahr 2022 hat gezeigt, dass auch größere Vorhaben sehr schnell genehmigt werden können. Dies hat einen unmittelbaren positiven Einfluss auf die Generierung von Einnahmen und damit eine positive Wirkung auf die Rentabilität der Investition.

4.3 Risikomindernde Maßnahmen für höhere Planungssicherheit



Die Reduzierung von Risiken im Business Case führt zu einer Steigerung der Bankability für die Anlage. Technologische Risiken lassen sich durch eine diversifizierte Portfolio-Strategie mindern, die auf Investitionen in unterschiedliche Technologien basiert. Die **größten Risiken für Investoren sind jedoch regulatorischer Natur**, da hier die Spielregeln geändert werden können. Insbesondere die Sorge vor möglichen regulatorischen Änderungen nach einer FID bzw. während der mind. 10-15 Jahre umfassenden Betriebsphase mit hohen OPEX hemmt Investmententscheidungen. Das betrifft vor allem solche Bereiche, die sich unmittelbar auf die Herstellungskosten oder die Vermarktbarkeit der Produkte, bis die Anlage abgeschrieben ist auswirken, also z.B. Änderungen zugelassener Rohstoffe, Rahmenbedingungen für Bezug grüner Energie, Quoten, Pönalen, CO₂-Reduktionsziele etc. Sie **betreffen das gesamte Portfolio** und erhöhen dadurch das Risiko für Investitionen in SAF insgesamt. Während je nach Vollzug die „Force Majeure“-Klausel der ReFuelEU Aviation [60] für Airlines und Inverkehrbringer das Risiko mindern kann, Pönalen zu zahlen, erhöht sie das Risiko für Investoren. Und auch die Forderung, dass von der „Review“-Klausel der ReFuelEU Aviation Gebrauch gemacht werden soll, um Wettbewerbsnachteile zu mindern, adressiert zwar wichtige Anliegen der Luftverkehrswirtschaft, erhöht aber gleichzeitig die Investmentrisiken für SAF-Produktionsanlagen,

solange unbekannt ist, ob und in welcher Form die Vorgaben von ReFuelEU Aviation umgesetzt werden. Dies kann dazu führen, dass Investitionen unterbleiben oder sich verzögern, was als zentrales Hemmnis im Stakeholderkreis benannt wurde.

Stabilität in der Regulatorik ist daher der entscheidende Faktor für den Erfolg. Diese kann durch **Bestandsschutzregelungen** ("Grandfathering Rights") ermöglicht werden. Hierfür wären allerdings Ergänzungen an den europäischen Rechtsvorschriften notwendig. Eine rein nationale Lösung wäre nicht EU-rechtskonform. Das Instrument kann außerdem nur solche regulatorischen Risiken abdecken, die sich durch Änderung bei Nachhaltigkeitskriterien oder Beschaffenheit von Treibstoffen ergeben. Hierbei würde festgelegt, dass bspw. Projekte, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums realisiert werden, gemäß den zum Zeitpunkt ihrer Genehmigung geltenden Regelungen bis zum Ende ihrer technischen Laufzeit (20–30 Jahre) produzieren und die Produkte als SAF vermarkten dürften.

Falls die Regulatorik geändert würde, bspw. indem die Beimischungsquoten zeitlich nach hinten geschoben würden, entstünden Erlös- und Kostenrisiken für Produzenten. Um diese zu mindern, braucht es andere Instrumente. Im Bereich der Finanzierung sind **Risikominderungen durch Preisgarantien beim Absatz** von SAF oder beim Bezug von Rohstoffen und Energie denkbar. Die Finanzierung dieser Maßnahmen kann über staatliche Mittel oder einen Transformationsfonds als Teil des bereits angesprochenen TFS erfolgen. Insbesondere bei "First-Of-Its-Kind"-Anlagen können **Risikominderungen über Nachrangdarlehen oder Staatsbürgschaften** erfolgen. Darüber hinaus erleichtern diese Maßnahmen den Zugang zu privatem Kapital. Somit kann die Finanzierung sichergestellt werden.

Außerdem kann eine klare Darstellung der Regulatorik dazu beitragen, Risiken in der Planung und Abwicklung zu mildern. Als einfache Möglichkeiten bieten sich die Erstellung eines Handbuchs, einer Toolbox oder die Einrichtung von Beratungsstellen an – Projekte wie InnoFuels können hierfür ein Initiator sein bzw. eine Starthilfe geben. Zudem könnte ein integriertes und abgestimmtes Vorgehen der beteiligten Genehmigungsstellen beim Bau entsprechender Anlagen das Verfahren deutlich beschleunigen.

5 Erhöhung der Produktion

Die Erhöhung der Produktionskapazität von PtL-Anlagen ist einer der wichtigsten Hebel, um mehr SAF bereitzustellen und damit den Markthochlauf zu beschleunigen. Dazu müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein:



- Erhöhung des Technology Readiness Levels (TRL)
- Sicherstellung der Finanzierung
- Klare Regulatorik für die Herstellung und Anwendung
- Standortspezifische Faktoren
- Versorgung mit den notwendigen Rohstoffen

Die mangelnde Investitionssicherheit bzw. Sicherung der Finanzierung sowie die unsichere Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe (H₂, CO₂, Biomasse), welche vor allem bedingt ist durch teils unklare regulatorische Vorgaben, werden aktuell als die größten Hemmnisse angesehen. Wenn diese gelöst werden, kann sich daraus ein maßgeblicher Hochlauf der Produktionskapazitäten ergeben. Die oben genannten Bedingungen sind nachfolgend näher erläutert. Zur Verfügbarkeit der Rohstoffe sei auf Kapitel 2 verwiesen.

5.1 Erhöhung des Technology Readiness Levels (TRL)



Eine wesentliche Voraussetzung zum Auf- und Ausbau von Produktionskapazitäten für die Herstellung von SAF ist die Ausentwicklung, Demonstration und Etablierung der entsprechenden Technologien. Während biogene SAF auf Basis von Pflanzenölen und Kohlenhydraten (wie z.B. Zucker, Stärke und Lignocellulose) bereits weit entwickelt sind (z.B. AtJ- oder HEFA-SPK), ist der technologische Reifegrad für die Herstellung von synthetischem SAF über die Fischer-Tropsch- oder die Methanol- bzw. die Dimethylethersynthese für eine kommerzielle Umsetzung noch nicht ausreichend. Dabei ist zu beachten, dass die Verwendung erneuerbarer Flugtreibstoffe bislang vor allem auf eine Beimischung ausgerichtet war. Langfristig ist es das Ziel reine (100 %) SAFs zu entwickeln, die den Anforderungen an die Infrastruktur, Triebwerkstechnologie u.a. voll entsprechen müssen.

Eine Schwierigkeit bei der Beurteilung von Entwicklungsständen ist, dass ähnliche **Entwicklungen mit unterschiedlichen TRL** eingeschätzt werden (können), da diese üblicherweise einer individuellen Einschätzung der Entwickler selbst entstammen oder werden nach unterschiedlichen Kriterien durch andere vorgenommen. Die Definitionen für die TRL-Skala, ursprünglich von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) entwickelt [61], wurde sinngemäß auf die Einschätzung der Entwicklung anderer Prozesse übertragen, so auch z.B. von der EU im Rahmen ihrer Förderungsmaßnahmen im aktuellen Energieforschungs-Rahmenprogramm der Bundesregierung oder bei Projektträgern [62]. Eine Einordnung für die Entwicklung von Verfahrensrouten für die Herstellung von Kraftstoffen findet sich im DBFZ-Report 44 [63]. Eine allgemein gebräuchliche Definition existiert

allerdings nicht. Der InnoFuels-Innovationsschwerpunkt Produktion verfolgt dazu das Ziel, **einheitliche Kriterien** zu entwickeln, mit deren Hilfe eine Einschätzung des TRL für eine bestimmte Entwicklung vorgenommen werden kann. Zudem bestehen Prozessketten zur Herstellung erneuerbarer Flugtreibstoffe in der Regel aus einer ganzen Reihe von Einzelprozessen in unterschiedlichem Entwicklungsstand. Der Gesamtentwicklungsstand wird dann auf meist unterschiedliche Weise abgeleitet. Daher wird auch eine Empfehlung für die Einschätzung des TRL von zusammengesetzten Prozessketten entwickelt.

Forschung und Entwicklung zur Erhöhung des TRL

Ein Ansatz zur Erhöhung des TRL von Technologien ist die **Bündelung von Forschung und Entwicklung** (F&E) in diesem Bereich, beispielsweise durch den Bau von Versuchs- und Pilotanlagen (TRL 5-7) in entsprechend zusammengesetzten Konsortien. Insbesondere im vorwettbewerblichen Teil der Prozessentwicklung ist eine koordinierte Intensivierung der Zusammenarbeit wünschenswert, um Prozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette abzubilden sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit und sich daraus ergebende Synergien zu fördern. Dies könnte durch die entsprechende **Förderung von Forschung und Entwicklung** unterstützt werden, auf welche die Forschung insbesondere bei Arbeiten mit dem Ziel den TRL zu erhöhen immer angewiesen ist. Das Aussetzen oder der gänzliche Wegfall von Fördermitteln, wie Ende 2023 geschehen, steht hier der gewünschten zeitnahen Umsetzung diametral entgegen. Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass sich die F&E-Förderung nicht allein auf die Errichtungskosten von Versuchsanlagen beschränken darf. Insbesondere bei Technikums- und Pilotanlagen ab TRL 5 zeigt die Erfahrung, dass es nach erster Inbetriebnahme einer längeren Zeit bedarf bis Funktion, Betrieb und Produktqualität der Erwartung entsprechen. Dazu ist auch gut ausgebildetes Personal für einen entsprechenden Zeitraum von mehr als drei Jahren erforderlich, welches **über die Errichtungsphase hinaus finanziert** werden muss.

Analog zur Industrie ist auch die Forschung auf ein Derisking angewiesen. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, dass Projekte bzw. Pilotanlagen eine Förderung über mehrere Jahre (> 3) bis hin zu Jahrzehnten erhalten. So wäre es auch möglich über **Leuchtturmprojekte** einen Business Case zu schaffen. Dies würde auch Industriepartnern mehr Sicherheit geben, um ebenfalls in die Forschung zu investieren. Neben einer langfristigen Perspektive für ein Geschäftsmodell im jeweiligen Marktsegment, sind Maßnahmen zur Kompensation der in diesem Entwicklungsstadium vergleichsweise hohen Produktgestehungskosten erforderlich, um Anreize für eine Investition zu bieten. Geschieht dies über genügend lange Zeiträume, werden für Industriepartner zusätzliche Impulse gegeben, sich bereits in der

Forschungsphase stärker zu engagieren und zu investieren. Dabei gilt es nicht nur den Fokus auf die Produktion von PtL-SAF zu legen, sondern v.a. hinsichtlich der FT-Route auch weitere PtL-Produkte in der Entwicklung zu berücksichtigen. Technisch bedingt beinhaltet das FT-Produktspektrum nicht nur SAF, sondern auch PtL-Naphtha und/oder -Diesel als unvermeidbare Nebenprodukte (Koppelprodukte). Geht es um industrieseitige Investitionen in die Forschung sollte dies daher auch für weitere Stakeholdergruppen (z.B. die Chemieindustrie als möglicher Abnehmer für Naphtha oder die Schifffahrt für Diesel) attraktiv gestaltet werden. Denn klar ist auch, dass nur mit einer zielgerichteten Forschung die Anhebung des TRL und damit die Hochskalierung der Produktionskapazitäten selbst unterstützt werden kann.

Hinsichtlich der Entwicklungszeit und des erforderlichen Aufwands (u.a. finanziell, personell, methodisch) macht es einen Unterschied

- ob eine Prozessentwicklung zur Erhöhung des TRL den klassischen Weg des **Scale-up über verschiedene Anlagengrößen** (Technikum → Pilot → Demo → Produktion) mit jeweils zunehmender Produktionskapazität verfolgt oder
- ob die gleiche Produktionskapazität, bedarfsgerecht räumlich verteilt, mit einer größeren Zahl modularer Kleinanlagen erreicht wird, die in kürzerer Entwicklungszeit zur kommerziellen Reife gebracht werden können (**Numbering-up**).

Dafür ist jeweils wiederum eine entsprechende Fertigungskapazität für deren Herstellung und die dazu gehörige Einsatzstoff- und Produktlogistik zu entwickeln, welche für Großanlagen an bereits industriell genutzten Standorten zumindest teilweise vorhanden ist (sogenanntes Brown Field).

Weiterentwicklung der Produktionsrouten

Im Fokus der Forschung und Entwicklung sollte nicht nur die Weiterentwicklung und Optimierung der aktuell vielversprechendsten Technologien liegen – neben dem Fischer-Tropsch-Prozess ist für die SAF-Herstellung auch das Methanol-to-Jet-Verfahren interessant – sondern auch die **Erprobung und Entwicklung neuer Verfahren** weiter gefördert werden. Zum einen bieten neue Verfahren das Potenzial, bislang ungenutzte Ressourcen für die SAF-Herstellung einsatzfähig zu machen. Zum anderen hat sich gezeigt, dass sich mit neuen Prozessen auch die Möglichkeit eröffnet, Treibstoffe in geänderter Zusammensetzung herzustellen, was wiederum einen Einfluss auf die Emissionen und die Eigenschaften des Treibstoffes haben kann. Aufgrund der möglichen Änderung der Zusammensetzung müssen neue Treibstoffe auch einen aufwendigen, zeit- und kostenintensiven Zulassungsprozess gemäß der ASTM-Norm D4054 [5] durchlaufen. Dieser Prozess kann ebenfalls

durch die Forschung unterstützt werden, z.B. mit dem **Pre-Screening** des DLR [64], wodurch Zeit und Kosten für das Zulassungsverfahren erheblich reduziert werden können. Dabei werden alle relevanten Parameter des Treibstoffes bereits vor dem eigentlichen Zulassungsverfahren bestimmt und validiert, was die Erfolgsaussichten für eine direkte Zulassung deutlich erhöht, ohne dass einzelne Schritte wiederholt werden müssen.¹⁶

Insbesondere für PtL-Prozessketten relevante Prozesse weisen neben grundlegenden (wirtschaftlichen) Herausforderungen noch eine vergleichsweise niedrige technische Reife auf und sind noch deutlich von einer kommerziellen Nutzung entfernt. Dabei handelt es sich einerseits um die Technologien zur Nutzbarmachung von Kohlenstoffdioxid in chemischen Synthesen, also z.B. die reverse Wassergas-Shift-Reaktion und die Hochtemperatur-Co-Elektrolyse zur Erzeugung von Synthesegas oder neue Katalysatoren für Direktsynthesen. Andererseits muss insbesondere das TRL für die **Bereitstellung von CO₂ mittels DAC-Technologie** (Direct Air Capture) angehoben werden. Solange das DAC-Verfahren noch nicht ausreichend entwickelt ist, werden andere Kohlenstoffquellen benötigt, die zunächst vor allem auf Biomasse und begrenzt auch auf konzentrierten CO₂-Quellen („Punktquellen“) basieren werden. Biomasse ist jedoch eine begrenzte Ressource und aufgrund gesetzlicher Vorgaben ist nicht jede biogene Kohlenstoffquelle auch eine potenzielle Kohlenstoffquelle für die Herstellung von anrechenbarem SAF. Der Einsatz von CO₂ aus Punktquellen ist regulatorisch stark begrenzt, u.a. um zu vermeiden, dass die Nutzung von CO₂ mit geringerer THG-Minderung zu einer Dauerlösung wird. Allerdings ist absehbar, dass auch zukünftig (2040+), selbst unter der Annahme einer vollständigen Defossilierung, nicht-vermeidbare CO₂-Emissionen aus industriellen Prozessen (z.B. Zementherstellung, chemische Industrie) vorhanden sein werden. Die DAC-Technologie wird daher langfristig zur Minderung der CO₂-Emissionen benötigt. Die Erprobung von Verfahren zur Herstellung von PtL-SAF im Pilot- und Demonstrationsmaßstab bietet die Möglichkeit, diese Technologie parallel weiterzuentwickeln.

¹⁶ Eine Weiterentwicklung des Pre-Screening Verfahrens erfolgt aktuell kontinuierlich im Rahmen von der EU oder national geförderten Projekten z.B. im BMDV-Projekt „Refineries for Future“.

5.2 Sicherstellung der Finanzierung

Zunächst sei für die rein ökonomische Betrachtung bzgl. der Sicherstellung der Investitionsbereitschaft auf Kapitel 4 dieses Berichtes verwiesen. Nachfolgend sind die möglichen Lösungsansätze aus Sicht der Produktionsseite skizziert.

Aufgrund der aktuell geringen Produktionskapazitäten und mangelnder Förderung der Industrie müssten Unternehmen gegenwärtig viel **Eigenkapital** einbringen (je nach Anlagengröße ist mindestens von einem mittleren dreistelligen Millionenbetrag auszugehen), was bei einer unklaren Regulatorik ein hohes Risiko birgt. Solange eine **langfristige Sicherheit** nicht über regulatorische Maßnahmen abgedeckt wird, ist ein möglicher Lösungsansatz die Erstellung von Leitfäden um betroffene Unternehmen bei der Umsetzung zu unterstützen und das Risiko notwendiger Investitionen (zumindest ein Stück weit) zu mindern [3].

Bei der **Erstellung eines Leitfadens** muss der Adressatenkreis bedacht werden – mit Produzenten, Inverkehrbringern und Anwendern gibt es mindestens drei Gruppen mit unterschiedlichen Anforderungen. Dabei sind für die Produzenten z.B. die Vorgaben für die Ausgangsstoffe oder die Informationen zu den erlaubten Einsatzstoffen und -mengen für das Co-Processing sowie ggf. „Best-Practices“ und ökonomische Randbedingungen zu den Herstellungsverfahren relevant [6]. Ggf. kann hier auch auf andere Leitfäden verwiesen werden, wie z.B. den Zulassungsprozess für die Einführung eines neuen SAF (ASTM D4054) [5], was bei der Anwendung eines neuen Produktionsverfahrens ebenfalls relevant ist. Für Inverkehrbringer und Produzenten (die oft deckungsgleich sind) sind Leitfäden zum Umgang und Logistik der Kraftstoffe sowie insbesondere zur Nachhaltigkeitszertifizierung wichtig. Die Anwender, z.B. Airlines, müssen sich wiederum darauf verlassen, dass die Produzenten alle Nachhaltigkeitskriterien erfüllen. Für sie ist nur relevant, unter welchen Bedingungen sie wo und wie die Nutzung des SAF anrechnen lassen können (siehe z.B. CORSIA, EU-ETS, Book & Claim).

5.3 Klare Regulatorik für die Herstellung und Anwendung

Mit der Regulatorik kann von den Rohstoffen über die Herstellung bis hin zur Anwendung der gesamte Lebenszyklus des SAF bestimmt werden. Der regulatorische Rahmen zu den Rohstoffquellen sowie zur Herstellung ist dabei jeweils vor allem durch die Sicherstellung der Nachhaltigkeit bedingt und bereits in Kapitel 2 beschrieben. Eine möglichst klare und verlässliche Regulatorik soll hier einen Markt schaffen. Für Produzenten ist Planbarkeit, dass dieser Markt und die zugehörigen (klaren) Regeln langfristig bestehen unabdingbar,

um entsprechende Geschäftsmodelle/Business-Cases zu entwickeln und folglich den Markt zu bedienen.

Für die Anwendung und Förderung des Markthochlaufs von SAF wurden im Rahmen des Stakeholder-Workshops (siehe Kapitel 1) vier grundlegende **industriepolitische Instrumente** identifiziert, deren Umsetzung in einen regulatorischen Rahmen als potenziell zielführend erachtet wird:

- (I) Die Einführung von verpflichtenden Quoten für die Nutzung von SAF
- (II) das Auferlegen von Pönalen bei Nichteinhaltung der Quoten
- (III) Subventionen für den Bezug von SAF
- (IV) Besteuerung auf fossiles Kerosin

Quoten und Pönalen wurden mit der ReFuelEU Aviation bereits eingeführt. Es zeigt sich allerdings, dass sie allein nicht ausreichen, um den Markthochlauf anzustoßen [1]. Inwieweit die bestehenden Quoten aufgrund des aktuellen Mangels an SAF umgesetzt werden können, ist allerdings noch fraglich. In welchem Maße **Subventionen** für SAF und/oder eine **Besteuerung für fossiles Kerosin** einen Anreiz schaffen oder im Gegenteil kontraproduktiv wirken, wird im Rahmen des Innovationsschwerpunktes Markt & Regulatorik behandelt.

An dieser Stelle sei betont, dass die **Politik** nicht allein für den Ausbau von Produktionskapazitäten und den Markthochlauf für SAF verantwortlich sein kann, da sie selbst keine Anlagen baut und Treibstoffe auf den Markt bringt. Sie muss aber mit entsprechenden Instrumenten (siehe z.B. die Punkte I-IV) und klarer Regulatorik einen **gesicherten Rahmen für die Industrie und Wirtschaft** schaffen. Diese wiederum sind auf Basis der Vorgaben bzw. politischen Rahmenbedingungen verantwortlich für die Umsetzung mit Blick auf den Ausbau von Produktionskapazitäten und den Markthochlauf für SAF.

5.4 Standortspezifische Faktoren

Neben den, oben beschriebenen, grundlegenden Herausforderungen gibt es auch immer **standortspezifische Faktoren**, die sowohl als Hemmnisse, aber auch Treiber wirken können. Dabei handelt es sich um Faktoren, die von den Gegebenheiten vor Ort bestimmt sind, wie vorhandene oder aufzubauende Infrastruktur, Logistik und Versorgung mit Ressourcen, wie Energie, Rohstoffen und Fachkräften. Aber auch lokale politische, wirtschaftliche, gesellschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen spielen eine wichtige Rolle. Beispielsweise gibt es aktuell nur wenige mögliche Standorte in Europa und insbesondere

Deutschland, welche die **Anforderungen an Strom** bzgl. der Netzinfrastruktur und dem Anteil an erneuerbaren Energien zur Herstellung von PtL-Kraftstoffen erfüllen. Hinzu kommt, dass ein Ausgleich für schwankende Produktion erneuerbaren Stroms notwendig ist, insbesondere wenn Dunkelflaute herrscht (d.h. es ist weder Sonnen- noch Windenergie verfügbar). Dadurch entstehen Lastschwankungen bei der Elektrolyse, d.h. es kommt zu einer ungleichmäßigen oder sogar diskontinuierlichen Produktion von Wasserstoff. PtL-Produktionsanlagen sollten allerdings idealerweise immer in einem kontinuierlichen Betrieb und bei möglichst hoher Auslastung laufen. Voraussetzung dafür ist eine gleichmäßige Versorgung mit den Eduktgasen H₂ und CO₂. Ergo müssen geeignete Standorte identifiziert und ertüchtigt oder geschaffen werden, z.B. durch Versorgung bereits bestehender Industrieparks mit ausreichenden Mengen an regenerativen Energien und dem Vorhalten von Speichermöglichkeiten für H₂ wie auch für CO₂.¹⁷

Ein weiteres standortspezifisches Thema ist die Verfügbarkeit von Fachkräften. In Industrieländern müssen einerseits klassische Raffinerien langfristig ihren Betrieb ohnehin umstellen. Andererseits wird es den parallelen Betrieb von konventionellen Raffinerien und Anlagen zur Herstellung von biogenem und strombasierten SAF sowie auch anderen PtL-Produkten über viele Jahre geben. Beide Sektoren sind auf den gleichen begrenzten Pool an Fachkräften angewiesen, was neben der kontinuierlichen Ausbildung neuer Fachkräfte auch eine Art Koordination des Transfers der Fachkräfte notwendig erscheinen lässt. Hinzu kommt, dass die notwendigen Zertifizierungen zur Sicherstellung der Nachhaltigkeitskriterien speziell **geschultes Personal** erfordern. Hier stellt sich die Frage, ob dieses Problem nicht industriepolitisch geregelt werden sollte.

Ein weiteres prominentes Beispiel für den Einfluss standortspezifischer Faktoren ist die Produktion von nachhaltigen Kraftstoffen oder deren Vorprodukten, wie Fischer-Tropsch-Produkten oder Methanol, in vorgelagerten Prozessketten an „Gunststandorten“, in der Regel außerhalb Europas. Diese Standorte bieten meist ein hohes Potenzial zur Erzeugung erneuerbarer Energie, dafür bestehen aber teilweise Herausforderungen auf Seiten der Infrastruktur, der Rohstoffversorgung (insbesondere Trinkwasser) oder auch der politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Müssen beispielsweise erst Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms installiert, Infrastruktur aufgebaut oder Fachkräfte grundlegend geschult oder vor Ort gebracht werden, bietet dies natürlich einerseits Möglichkeiten

¹⁷ Wie der flexible Betrieb einer PtL-Anlage unter schwankender Stromverfügbarkeit in der Praxis funktioniert, wird im BMDV-Förderprojekt „RePoSe“ (Real-time Power Supply for e-fuels) untersucht.

die entsprechenden Regionen bei ihrer wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung zu unterstützen, andererseits verursacht dies aber auch zusätzliche Kosten, Aufwand und Zeitbedarf. Unklare Regulatorik oder nicht abgestimmte Zertifizierungssysteme, sowie politische Unsicherheiten können derartige Konzepte sogar ausschließen.

Die obigen Beispiele sollen verdeutlichen, dass standortspezifische Faktoren eine gewichtige, vor allem aber auch ambivalente Rolle spielen können. Sie müssen bei der Entwicklung von Produktionskonzepten oder Konzepten für Wertschöpfungsketten und natürlich der Auswahl geeigneter Standorte beachtet werden. Dabei müssen treibende gegenüber hindernden Faktoren abgewogen werden. Dazu könnten, wie in den vorherigen Kapiteln allgemein dargelegt, Forschungs- und sonstige Aktivitäten, beispielsweise zu Ressourcenpotenzialen, Wirtschaft und Infrastruktur, aber auch sozialen Faktoren, gebündelt und in Leitfäden verfügbar gemacht werden und eine klare und verlässliche Regulatorik und Zertifizierung mit den entsprechenden Partnerländern entwickelt werden.

6 Ausblick

Der vorliegende Bericht kann als Sammlung von Lösungsansätzen in die Diskussion um die Beschleunigung des Markthochlaufs von SAF einfließen. Es wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Nachhaltigkeit sichergestellt, die Nachfrage gesteigert, die Investitionsbereitschaft erhöht und damit die Produktion ausgebaut werden kann.

Zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit bedarf es u.a. Klarheit bei der Anrechenbarkeit, einen Flexibilitätsmechanismus zur bilanziellen Nutzung von SAF, eine politische Entscheidung zur Nachhaltigkeit der Biomassennutzung, Zertifizierungsanforderungen mit langfristiger Perspektive, zielgerichtete Flexibilität bei der Umsetzung und eine Anerkennung oder Angleichung abweichender Nachhaltigkeitskriterien. Zur Steigerung der Nachfrage gilt es die Kosten für SAF zu senken, die Zahlungsbereitschaft von Airlines und Flugkunden zu erhöhen sowie gleiche Wettbewerbsbedingungen und finanzielle Anreize zu schaffen. Um die Investitionsbereitschaft in SAF-Anlagen zu erhöhen, sind neben Investitionsanreizen vor allem ein solider Business Case und Planungssicherheit nötig. Im Bereich der Produktion müssen schließlich die Produktionskapazitäten ausgebaut und das TRL erhöht werden.

Als wesentlich haben sich insbesondere die Schaffung eines Business Case sowie der systemische Ansatz eines Marktmodells herausgestellt, da hier viele Hemmnisse gleichzeitig adressiert werden können. Ein weiterer Schwerpunkt liegt im Bereich der (noch) fehlenden

Hochskalierung von Produktionsanlagen. Im weiteren Projektverlauf ist vorgesehen, ausgewählte Lösungsansätze vertiefend zu betrachten. Dabei werden im Anwendungsfeld Luftfahrt u. a. ein beispielhafter Business Case und ein übergreifendes Marktmodell („Klimaclub Aviation“) erstellt, das Fragen zur Organisation des Finanzierungs- und Beschaffungssystems diskutiert. Darüber hinaus werden sowohl im Anwendungsfeld Luftfahrt als auch in den anderen Bereichen von InnoFuels weitere ausgewählte Lösungsansätze ausgearbeitet.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
AG	Arbeitsgemeinschaft
AKKL	Arbeitskreis klimaneutrale Luftfahrt
ASTM	American Society for Testing and Materials
AtJ (-SPK)	Alcohol-to-Jet (- Synthetic Paraffinic Kerosene)
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr (ehemals BMVI)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (ehemals BMWi)
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
CfD	Contract for difference
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CoC	Chain of Custody
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DAC	Direct Air Capture
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EU	Europäische Union
EU-ETS	EU Emission Trading System (Europäisches Emissionshandelssystem)

EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
E10	Ottokraftstoff mit einem Anteil von 5 bis 10 % Bioethanol
FEETS	Fuels Eligible for ETS-Support
FMS	Formular-Management-System
F&E	Forschung und Entwicklung
H₂	Wasserstoff
HEFA (-SPK)	Hydroprocessed Esters and Fetty Acids (- Synthetic Paraffinic Kerosene)
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
IRA	Inflation Reduction Act
Jet A1	Flugturbinenkraftstoff, Kerosin
LuftVStG	Luftverkehrssteuergesetz
Mio.	Millionen
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OPEX	Operational Expenditures (Betriebsausgaben)
PtL	Power to Liquid
RED	Renewable Energy Directive
SAF	Sustainable Aviation Fuels
TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes
TFS	Transformations-Finanzierungs-Systeme
THG	Treibhausgase



TRL Technology Readiness Level

UK United Kingdom

USD US-Dollar

USA United States of America

Literaturverzeichnis

- [1] CENA Hessen, „CENA SAF-Outlook 2024-2030 / Eine Analyse von Mengen, Technologien und Produktionsstandorten für nachhaltige Flugtreibstoffe,“ CENA Hessen – Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr, Frankfurt am Main, 2023.
- [2] DLR, CENA Hessen, Condor, „Hemmnisse und Herausforderungen zum Markthochlauf von SAF,“ 2024.
- [3] Arbeitsgruppe SAF, „10 Maßnahmen zur Beschleunigung des Markthochlaufs von Sustainable Aviation Fuel (SAF),“ AG SAF im Rahmen des AK "Klimaneutrale Luftfahrt", 2024. [Online]. Available: https://aireg.de/wp-content/uploads/2024/09/Massnahmenkatalog_SAF-Hochlauf.pdf. [Zugriff am 21 Oktober 2024].
- [4] ICAO, „An Overview of CORSIA Eligible Fuels (CEF),“ 2019. [Online]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg228-231.pdf. [Zugriff am 21 Oktober 2024].
- [5] ASTM International, „Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives,“ 16 Mai 2023. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d4054-22.html>. [Zugriff am 21 Oktober 2024].
- [6] DLR, CENA Hessen, Condor, „Übersicht zu relevanten Gesetzen und Industriestandards beim Markthochlauf von Sustainable Aviation Fuels,“ 2024.
- [7] European Parliament, „Taxonomie: Keine Einwände gegen Einstufung von Gas und Atomkraft als nachhaltig,“ 6 Juli 2022. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20220701IPR34365/taxonomie-keine-einwande-gegen-einstufung-von-gas-und-atomkraft-als-nachhaltig>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].

- [8] European Commission, „Questions and Answers on the EU Taxonomy Complementary Climate Delegated Act covering certain nuclear and gas activities,“ 2 Februar 2022. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_22_712. [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [9] K. Meisel, „Neuerungen der RED-II-Revision für fortschrittliche Kraftstoffe,“ 28 Mai 2024. [Online]. Available: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Fachgespraeche/Biokraftstoff-Fachgespraeche/Vortraege/01_BKFG_Meisel_Neuerungen_RED_II_revision_1_.pdf. [Zugriff am 16 April 2025].
- [10] Deutscher Bundestag, „Aktueller Begriff - Der neue Kraftstoff E10,“ [Online]. Available: <https://www.bundestag.de/resource/blob/191732/2f4ab6390b65f6a72e9623fcc2a36957/e10-data.pdf>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [11] Shell, „Gibt es eine Beimischungspflicht für Biokraftstoffe?,“ 2024. [Online]. Available: <https://support.shell.de/hc/de/articles/360010714317-Gibt-es-eine-Beimischungspflicht-f%C3%BCr-Biokraftstoffe>. [Zugriff am 9 Januar 2025].
- [12] K. Naumann, K.-F. Cyffka und F. Müller-Langer, „Hintergrundpapier zur THG-Quote und der Quotenerfüllung 2023,“ 19 Dezember 2024. [Online]. Available: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Statements/Hintergrundpapier_Quote_2023.pdf. [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [13] Spiegel Wissenschaft, „Forscher züchten die Super-Pflanze,“ 4 Januar 2019. [Online]. Available: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/gentechnik-40-prozent-mehr-biomasse-forscher-zuechten-super-pflanze-a-1246385.html>. [Zugriff am 23 Oktober 2014].
- [14] A. Kaiser, „Fliegen mit Algen - ist das die Lösung?,“ Das Wirtschaftsportal von manager magazin & Havard Business Manager, 1 November 2019. [Online]. Available: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/energie/biosprit-kerosin-aus-algen-noch-lange-nicht-wirtschaftlich-a-1294185.html>. [Zugriff am 23 Oktober 2014].

- [15] C. Ridley, „Why is algae fuel in decline?“, World Economic Forum, 20 Mai 2016. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/agenda/2016/05/why-are-algal-biofuels-in-decline/>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [16] G. N. F. M. Taofeeq D. Moshood, „Microalgae biofuels production: A systematic review on socioeconomic prospects of microalgae biofuels and policy implications,“ *Environmental Challenges*, 2021.
- [17] E. Wesoff, „Hard Lessons From the Great Algae Biofuel Bubble,“ 17 April 2017. [Online]. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/lessons-from-the-great-algae-biofuel-bubble>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [18] LanzaTech, „Biorefining - Operating at Commercial Scale since 2018,“ [Online]. Available: <https://lanzatech.com/biorefining/>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [19] LanzaTech, „The Circular Carbon Economy starts with recycled carbon, found above ground.,“ [Online]. Available: <https://lanzatech.com/putting-recycled-carbon-to-use/>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [20] Lanzajet, „Forging a new pathway to sustainable fuels,“ [Online]. Available: <https://www.lanzajet.com/circular>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [21] D. Thrän, M. Borchers, M. Jordan, V. Lenz, T. Markus, N. Matzner, K. Oehmichen, D. Otto, K. S. Radtke, N. Reshef, M. Sadr, D. Siedschlag und R. Wollnik, „BECCS – ein nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO₂-Entnahme in Deutschland? Diskussionspapier,“ November 2024. [Online]. Available: https://www.ufz.de/export/data/2/296151_29966.pdf. [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [22] BMWK, „Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland,“ September 2023. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [23] ICAO, „SAF accounting and Book & Claim systems,“ [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ACT->

SAF/ACT%20SAF%20Series%206%20-%20SAF%20accounting%20and%20book%20and%20claim%20systems.pdf.
[Zugriff am 18 November 2024].

- [24] European Union, „Verordnung (EU) 2023/2405 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr (Initiative ReFuelEU Aviation) (Text von Bedeutung für den EWR),“ 31 Oktober 2023. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302405. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [25] ICAO, „SAF accounting and Book & Claim systems,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/ACT%20SAF%20Series%206%20-%20SAF%20accounting%20and%20book%20and%20claim%20systems.pdf>. [Zugriff am 9 Januar 2025].
- [26] R. Tech, U. Schumann, C. Voigt, T. Schripp, M. Shapiro, Z. Engberg, J. Molloy, G. Koudis und M. E. Stettler, „Targeted Use of Sustainable Aviation Fuel to Maximize Climate Benefits,“ *Environmental Science & Technology*, 17 November 2022.
- [27] W. Nordhaus, „Climate Clubs - Overcoming Free-riding in International Climate Policy,“ *American Economic Review*, Bd. 105, Nr. 4, pp. 1339-70, April 2015.
- [28] BDL Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, „Klimaschutz,“ [Online]. Available: <https://www.bdl.aero/themen/klima-und-umweltschutz/klimaschutz/>. [Zugriff am 14 November 2024].
- [29] CAAS, „Singapore Sustainable Air Hub Blueprint,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.caas.gov.sg/docs/default-source/docs---so/singapore-sustainable-air-hub-blueprint.pdf>. [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [30] L. Barrington und B. Goh, „Singapore to require departing flights to use sustainable fuel from 2026,“ Reuters, 19 Februar 2024. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/sustainability/singapore-require-departing-flights-use-sustainable-fuel-2026-2024-02-19/>. [Zugriff am 27 Februar 2025].

- [31] Generalzolldirektion, „Luftverkehrsteuer,“ [Online]. Available: https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Luftverkehrsteuer/luftverkehrsteuer_node.html. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [32] Forschungsinformationssystem, „Luftverkehrssteuer in Deutschland,“ 18 Juli 2023. [Online]. Available: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/478884/?clsId0=276646&clsId1=276653&clsId2=0>. [Zugriff am 23 November 2024].
- [33] Generalzolldirektion, „Steuersätze,“ [Online]. Available: https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Luftverkehrsteuer/Grunderdsatze-Besteuerung/Steuersaetze/steuersaetze_node.html. [Zugriff am 14 November 2024].
- [34] SPD, Bündnis 90 / Die Grünen, FDP, „Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit,“ 7 Dezember 2021. [Online]. Available: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [35] Klimaschutzportal, „USA fördern alternative Flugkraftstoffe,“ 29 November 2022. [Online]. Available: <https://www.klimaschutz-portal.aero/meldung/usa-foerdern-alternative-flugkraftstoffe/>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [36] To70, „Airports as Catalysts: Driving SAF Adoption Through Incentive Funds,“ 10 Oktober 2023. [Online]. Available: <https://to70.com/airports-as-catalysts-driving-saf-adoption-through-incentive-funds/>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].
- [37] IATA, „Airports & Sustainable Aviation Fuel (SAF),“ [Online]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/fa95ede4dee24322939d396382f2f82d/iata-saf---position-paper.pdf>. [Zugriff am 14 November 2024].
- [38] European Union, „Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates,“ 13 Oktober 2003. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2003/87/oj/deu>. [Zugriff am 23 Oktober 2024].

- [39] EASA, „EASA 2024 REPORT - State of the EU SAF market in 2023,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/state-eu-saf-market-2023#group-easa-downloads>. [Zugriff am 9 Januar 2025].
- [40] European Commission, „Initiative: Aviation fuels & emissions trading – calculating the price difference between eligible fuels and kerosene (detailed rules),“ 6 Januar 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/14020-Aviation-fuels-emissions-trading-calculating-the-price-difference-between-eligible-fuels-and-kerosene-detailed-rules-_en. [Zugriff am 23 Januar 2025].
- [41] A. Meurer, P. Jochem und J. Kern, „Decentralised production of e-fuels for aviation: implications and trade-offs of a targeted small scale production of sustainable aviation fuel based on Fischer–Tropsch synthesis,“ *Sustainable Energy Fuels*, p. 752–765, 15 Januar 2024.
- [42] S. B. Bube, S. Voß, G. Quante und M. Kaltschmitt, „Cost analysis of kerosene production from power-based syngas via the Fischer-Tropsch and methanol pathway,“ *Fuel* 384, p. 133901, 4 Dezember 2024.
- [43] IATA, „SAF Deployment,“ [Online]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-policy-2023.pdf>. [Zugriff am 18 November 2024].
- [44] IATA, „Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF),“ [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/>. [Zugriff am 18 November 2024].
- [45] World Economic Forum, „Aviation must make these changes to meet long-term emissions goals,“ 30 November 2023. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/stories/2023/11/aviation-changes-needed-meet-long-term-emissions-goals/>. [Zugriff am 9 Januar 2025].



- [46] N. Emig, „Scope 3 Emissionen und ihre Bedeutung in der CSRD,“ Envalor, 28 Februar 2025. [Online]. Available: <https://envalor.com/de/blog/scope-3-emissionen/>. [Zugriff am 16 April 2025].
- [47] Gold Standard, „How Do You Solve a Problem Like Scope 3?,“ 3 Juli 2024. [Online]. Available: How Do You Solve a Problem. [Zugriff am 9 Januar 2025].
- [48] AirPlus, „Nachhaltige Geschäftsreisen,“ 21 Oktober 2019. [Online]. Available: <https://comms.airplus.com/de/blog/nachhaltige-geschaeftsreisen>. [Zugriff am 9 Januar 2025].
- [49] DHL, „GoGreen Plus,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.dhl.de/de/geschaeftskunden/paket/leistungen-und-services/services/service-loesungen/gogreen-plus.html>. [Zugriff am 16 April 2025].
- [50] Lufthansa Cargo, „Sustainable Choice,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.lufthansa-cargo.com/de/add-on-services/sustainable-choice>. [Zugriff am 16 April 2025].
- [51] Transport & Environment, „Wer könnte die E-Kerosin-Produktion in Deutschland finanzieren?,“ 29 Mai 2024. [Online]. Available: <https://www.transportenvironment.org/te-deutschland/articles/wer-koennte-die-e-kerosin-produktion-in-deutschland-finanzieren>. [Zugriff am 9 Januar 2025].
- [52] Frankfurt University of Applied Sciences, „ComplIncent - Anreize zur CO2 Kompensation im Luftverkehr,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.frankfurt-university.de/de/hochschule/fachbereich-3-wirtschaft-und-recht/forschung-am-fachbereich-3-wirtschaft-und-recht/aktuelle-forschungsprojekte-am-fb-3/complncent/>. [Zugriff am 9 Januar 2025].
- [53] ATAG Air Transport Action Group, „Sustainable aviation fuel,“ [Online]. Available: <https://www.atag.org/industry-topics/sustainable-aviation-fuel/>. [Zugriff am 18 November 2024].
- [54] Lee, Fahey, Skowron, Allen, Burkhardt, Chen, Doherty, Freeman, Forster, Fuglestvedt, Gettelman, D. Léon, Lim, Lund, Millar, Owen, Penner, Pitari, Prather,

Sausen und Wilcox, „The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018,“ *Atmospheric Environment*, 1 Januar 2021.

- [55] R. S. Märkl, C. Voigt, D. Sauer, R. K. Dischl, S. Kaufmann, T. Harlaß, V. Hahn, A. Roiger, C. Weiß-Rehm, U. Burkhardt, U. Schumann, A. Marsing, M. Scheibe, A. Dörnbrack, C. Renard, M. Gauthier, P. Swann, P. Madden, D. Luff, ... und P. Le Clercq, „Powering aircraft with 100 % sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails,“ *Atmospheric Chemistry and Physics*, Bd. 24, Nr. 6, p. 3813–3837, 27 März 2024.
- [56] NOW GmbH, „NOW-Factsheet ReFuelEU-Aviation-Regulation,“ Mai 2025. [Online]. Available: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/11/NOW-Factsheet_ReFuelEU-Aviation-Regulation.pdf. [Zugriff am 16 April 2025].
- [57] FuelsEurope, „Statistical Report 2024,“ 2024. [Online]. Available: https://www.fuelseurope.eu/uploads/files/modules/documents/file/1720682523_b0kO2xvpBcF1zMAkf2g2kLpgAjlUsRdNymMKmajT.pdf. [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [58] R. Bocksch, „Kerosinpreis weiterhin deutlich über Vor-Pandemie-Niveau,“ statista, 24 Juli 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/infografik/32682/entwicklung-des-preises-fuer-kerosin/>. [Zugriff am 23 Januar 2025].
- [59] P. Smeets, „Sustainable Aviation Fuel: Herausforderung Markthochlauf,“ 6 September 2024. [Online]. Available: <https://background.tagesspiegel.de/verkehr-und-smart-mobility/briefing/sustainable-aviation-fuel-herausforderung-markthochlauf>. [Zugriff am 21 Oktober 2024].
- [60] European Parliament, „ReFuelEU Aviation initiative - Summary of the Commission proposal and the Parliament's draft committee report,“ Mai 2022. [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729457/EPRS_BRI\(2022\)729457_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729457/EPRS_BRI(2022)729457_EN.pdf). [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [61] NASA, „Definition Of Technology Readiness Levels,“ [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness->

levels/#:~:text=Technology%20Readiness%20Levels%20(TRL)%20are,level%20of%20a%20particular%20technology.. [Zugriff am 14 November 2024].

- [62] Projektträger Jülich, „Definition des Technologischen Reifegrades (in Anlehnung an die TRL Definition der NASA),“ [Online]. Available: https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/2373/live/lw_file/definition_des_technologischen_reifegrades.pdf. [Zugriff am 21 Oktober 2024].
- [63] J. Schröder, K. Naumann, N. Dögnitz, G. Costa de Paiva, S. Hauschild, K. Meisel, H. Etzold, S. Nieß, J. Köchermann, K. Görsch, K.-F. Cyffka, F. Müller-Langer, E. Remmele und K. Thuneke, „DBFZ Report Nr. 44 - Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-44>. [Zugriff am 27 Februar 2025].
- [64] DLR Institut für Verbrennungstechnik, „Prescreening neuer Treibstoff-Kandidaten,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/vt/forschung-transfer/forschungsdienstleistungen/prescreening-neuer-treibstoff-kandidaten>. [Zugriff am 21 Oktober 2024].
- [65] Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt), „Emissionsfaktor für Jetkerosin Jet A und Jet A1,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.dehst.de/SharedDocs/Newsletter/DE/2024/2024-01-30-luftverkehr-fms-vertraulichkeit-emissionsfaktor-02-emissionsfaktor.html>. [Zugriff am 23 Januar 2025].
- [66] Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt), „Einnahmen aus dem Emissionshandel erneut auf Rekordniveau,“ 7 Januar 2025. [Online]. Available: <https://www.dehst.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2025-001-jahresabschluss-2024-euets-nehs.html>. [Zugriff am 23 Januar 2025].



GESAMTKONZEPT
**ERNEUERBARE
KRAFTSTOFFE**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projektträger:

