



Übersicht zu relevanten Gesetzen und Industriestandards beim Markthochlauf von Sustainable Aviation Fuels

Kontakt

Projekt InnoFuels, Innovationsschwerpunkt Anwendungsfeld Luftfahrt

Institutionen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., CENA Hessen, Condor Flugdienst GmbH

Autoren: Dr. Sandra Richter, Dr. Katharina Großmann, Deandra Drewke, Léonie Lauer, Nina Dietrich, Melanie Grohs

Beitragend: Franziskus Hellwig

E-Mail: InnoFuels@dlr.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projektträger:



Inhalt

1	Einführung	3
2	Übersicht über bestehende und in Planung befindliche relevante Rahmenbedingungen	5
2.1	Internationale Rahmenbedingungen zum Einsatz von SAF	5
2.1.1	Das globale Rahmenwerk der ICAO	5
2.1.2	Die 4-Säulen-Strategie der IATA	9
2.2	Exkurs: Rahmenbedingungen für SAF in den USA.....	11
2.3	Rahmenbedingungen auf EU-Ebene	13
2.3.1	Der European Green Deal	13
2.3.2	EU-Taxonomie.....	17
2.4	Nationale Rahmenbedingungen	19
3	Treibstoff- und Technik-Anforderungen: Übersicht über bestehende und in Planung befindliche relevante Industriestandards	24
3.1	Standards und Normkonformität auf internationaler Ebene	24
3.1.1	ASTM-Standards.....	24
3.1.2	Status der Zulassung von SAF	26
3.2	REACH-Registrierung auf europäischer Ebene.....	33
4	Zusammenfassung	34
	Abkürzungsverzeichnis	38
	Quellenverzeichnis	41

1 Einführung

Mit dem Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 haben sich 195 Vertragsstaaten darauf geeinigt, die Emissionen von Treibhausgasen (THG) zu reduzieren, um den globalen Temperaturanstieg zu begrenzen [1]. Mit dem europäischen Green Deal folgten Klimaziele für die EU und in den USA wurde der Inflation Reduction Act (IRA) ins Leben gerufen.

Im Bereich der Luftfahrt wurden auf Basis der Zielsetzungen des Pariser Abkommens diverse Programme und Maßnahmen zur Erreichung der CO₂-Neutralität des Flugverkehrs durch die global agierenden Institutionen umgesetzt. Auf internationaler Ebene hat sich die Branche zum Ziel gesetzt, ab dem Jahr 2050 mit Netto-Null-CO₂-Emissionen klimaverträglicher zu agieren. Der Luftverkehr setzt dabei, neben innovativen Flugzeugtechnologien, Optimierungen der Infrastruktur und der Verwendung von Kompensationsmaßnahmen, vor allem auf den Einsatz von Sustainable Aviation Fuels (SAF). So sieht die International Air Transport Association (IATA) den Einsatz synthetischer Treibstoffe mit einem Anteil von 65 % als größtes Element ihrer Strategie zu Emissionsreduzierung [2].

Darüber hinaus birgt die Anwendung von SAF das Potenzial weiterer Vorteile durch die Reduktion der so genannten Nicht-CO₂-Effekte, wie Schwefeldioxid, Rußemissionen und ultrafeiner Partikel (Feinstaub). Diese Nicht-CO₂-Effekte sind zu etwa 2/3 für die klimaschädliche Wirkung der Luftfahrt verantwortlich [3]. Ihre Reduzierung würde nicht nur langfristig dem Klima auf der Erde helfen, sondern auch die Luftqualität in der Umgebung von Flughäfen verbessern, wo v.a. die Feinstaubbelastung zu gesundheitlichen Risiken für die Anwohner führen kann.

Dem ökologischen Vorteil und der technischen Machbarkeit steht jedoch der ökonomische Aspekt gegenüber, dass SAF noch sehr teuer sind, da es nur wenige Produzenten gibt. Dadurch sind die verfügbaren Mengen und entsprechend auch der Nutzungsanteil von SAF gering. Je nach Quelle werden für 2023 SAF-Produktionsmengen zwischen 0,5 Mio. Tonnen und 2 Mio. Tonnen angegeben, was einem weltweiten Treibstoffverbrauch von 0,2 % bis 0,8 % entspricht [2, 4]. Dieser Anteil soll durch entsprechende Quoten, welche z.B. in der Refuel EU Aviation festgelegt sind [5] weiter gesteigert werden (s. Kap. 2.3.1). Gleichzeitig muss dabei die Erfüllung der Nachhaltigkeitskriterien synthetischer Treibstoffe durch

strenge Rahmenbedingungen, z.B. bzgl. der CO₂-Quelle oder des verwendeten Wasserstoffs, gewährleistet sein.

Wenn SAF ihren Beitrag zu einer klimaverträglichen Luftfahrt leisten und die festgelegten Quoten erfüllt werden sollen, muss die Entwicklung, Produktion und der Einsatz dieser Treibstoffe durch einen gezielten Markthochlauf forciert und politisch unterstützt werden. Hier setzt das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderte **Verbundvorhaben InnoFuels** (Laufzeit 2023-2026) an. Es soll zu einem beschleunigten Markthochlauf strombasierter Kraftstoffe und fortschrittlicher Biokraftstoffe, so genannter reFuels¹ beitragen, indem es die Vernetzung von Akteuren und Aktivitäten, die Weiterentwicklung der Technologien und Darstellung der Rahmenbedingungen im Bereich synthetischer Kraftstoffe fördert. Ziel der Plattform ist eine flächendeckende Vernetzung und ein intensiver Austausch vorhandener Expertise, um Gesamtlösungen zu erarbeiten. Dem interdisziplinären Charakter dieser Aufgabe wird das Projekt InnoFuels durch die kooperative Arbeit in sieben fachspezifischen Innovationsschwerpunkten (Produktion, Supply Chain, Anwendung Luftverkehr, Anwendung Schiffverkehr, Anwendung Straße und Schiene, Nachhaltigkeit sowie Markt & Regulierung) gerecht, die in Teams mit Experten aus Wissenschaft, Industrie und Politik gemeinsam Lösungen für die Schwerpunkte erarbeiten und diese zusammenführen.

Der **Innovationsschwerpunkt Anwendung Luftfahrt** hat sich zum Ziel gesetzt, zu einem beschleunigtem Markthochlauf von SAF beizutragen. Die Aktivitäten des Anwendungsfeldes werden vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und von CENA Hessen (Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr) geleitet und der Condor Flugdienst GmbH als assoziierter Partner unterstützt. Die Aufgaben des Anwendungsfeldes sind die Analyse und Einordnung der Hemmnisse zum Markthochlauf von SAF sowie die Erarbeitung von Handlungsoptionen und Forschungsideen vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen. Mit der vorliegenden Bestandsaufnahme des Anwendungsfeldes Luftfahrt soll im ersten Schritt gezeigt werden, welche Regelungen, Gesetze und Industriestandards die Rahmenbedingungen für den Markthochlauf von SAF auf internationaler, EU-weiter und nationaler Ebene bilden.

¹ Der Begriff „renewable energy fuels (reFuels)“ umfasst alle Kraftstoffe, die auf Basis von erneuerbaren Energien produziert werden. Dazu zählen u. a. auf Basis von grünem Wasserstoff erzeugte synthetisch hergestellte Kohlenwasserstoffe und nachhaltige Biokraftstoffe. [60]

2 Übersicht über bestehende und in Planung befindliche relevante Rahmenbedingungen

2.1 Internationale Rahmenbedingungen zum Einsatz von SAF

Auf internationaler Ebene wird der Markthochlauf von SAF maßgeblich durch das Engagement großer Luftfahrt-Institutionen geprägt. Zum einen durch die Internationale Zivilluftfahrt-Organisation ICAO (International Civil Aviation Organization), einer Sonderorganisation der Vereinten Nationen, in der sich auch Deutschland als Mitgliedsstaat im globalen Kontext engagiert. Ihre Hauptaufgabe besteht in der Erarbeitung und Weiterentwicklung von einheitlichen Regelungen für die Sicherheit, Regelmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit des internationalen Luftverkehrs [6]. Im Hinblick auf die weltweite Entwicklung nachhaltiger Treibstoffe sieht sich die ICAO als Vermittler, um Staaten bei ihren Bemühungen zur Entwicklung und dem Einsatz von SAF zu unterstützen [7].

Zum anderen engagiert sich die IATA, die mit 329 Mitgliedern in über 120 Ländern [8] die Branche der Airlines repräsentiert, für weltweit harmonisierte Luftverkehrsregeln. Unter den IATA-Mitgliedern sind aktuell zehn deutsche Fluggesellschaften verzeichnet.² In ihrer SAF-Roadmap aus dem Jahr 2015 definiert der Branchenverband seine primäre Rolle, bei der Kommerzialisierung und Einführung von SAF, in der Umsetzung von politischen Empfehlungen, der Bereitstellung von Expertenbeiträgen für relevante Arbeitsgruppen sowie in der Beseitigung von Hindernissen für den Einsatz dieser Treibstoffe [9].

2.1.1 Das globale Rahmenwerk der ICAO

In ihrer **Vision 2050 für nachhaltige Treibstoffe** fordert die ICAO ihre Mitgliedsstaaten, die Industrie und weitere Interessengruppen auf, bis zum Jahr 2050 einen erheblichen Anteil³ der konventionellen Flugkraftstoffe durch nachhaltige Treibstoffe (SAF) zu ersetzen. So sollen die CO₂-Emissionen der internationalen Zivilluftfahrt erheblich reduziert werden, bei

² IATA-Mitglieder aus Deutschland sind Condor, Discover Airlines, European Air Transport, Eurowings, German Airways, Hahnair, Lufthansa, Lufthansa Cargo, Lufthansa CityLine und TUIfly [8]

³ Dieser Anteil wurde durch die ICAO nicht näher quantifiziert.

gleichzeitiger Nutzung aller weiteren Möglichkeiten an Minderungsmaßnahmen [10]. Der Weg dorthin wurde auf der dritten ICAO-Konferenz über Luftfahrt und alternative Kraftstoffe im November 2023 weiter konkretisiert mit der Verabschiedung eines neuen **globalen Rahmenwerks der ICAO** für nachhaltige Flugtreibstoffe (SAF), kohlenstoffärmere Flugtreibstoffe (LCAF) und andere nachhaltige Energien in der Luftfahrt. Die ICAO und ihre Mitgliedstaaten haben sich als **Ziel** gesetzt die **CO₂-Emissionen in der internationalen Luftfahrt bis 2030 um 5 % zu reduzieren**. Zu den Schlüsselementen des Rahmenwerks gehören neben der gemeinsamen Vision für den Übergang zu nachhaltiger Energie auch harmonisierte regulatorische Grundlagen, unterstützende Umsetzungsinitiativen und ein verbesserter Zugang zu Finanzmitteln für entsprechende Initiativen, damit "kein Land zurückbleibt" [11].

Die Tätigkeiten der ICAO basieren dabei auf vier Ansätzen:

- der Definition von SAF-Zielen und Richtlinien,
- der Unterstützung ihrer Mitgliedsstaaten beim Kompetenzaufbau,
- der Entwicklung weltweit anerkannter Umweltstandards für SAF, z.B. im Rahmen von CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)
- sowie der Verbreitung von Informationen und Best Practice

Das Long-Term Aspirational Goal: Potenzial von SAF

In Unterstützung des Pariser Abkommens haben die Mitgliedsstaaten der ICAO im Oktober 2022 ein gemeinsames langfristiges Ziel, das so genannte **Long-Term Aspirational Goal (LTAG)** [12], von Netto-Null-CO₂-Emissionen zum Jahr 2050 für die internationale Luftfahrt verabschiedet. Dieses Ziel soll durch die Kombination mehrerer Maßnahmen zur Emissionsreduzierung erreicht werden. Neben der beschleunigten Einführung neuer und innovativer Flugzeugtechnologien und eines effizienteren Flugbetriebs, spielen dabei auch die verstärkte Produktion und Nutzung nachhaltiger Treibstoffe eine wesentliche Rolle. Der diesem Ziel zugrunde liegende LTAG-Report, in dem drei Szenarien abgebildet werden, zeigt, dass nachhaltige Treibstoffe⁴ dabei das größte Potenzial zur Reduzierung der CO₂-

⁴ Gemäß dem LTAG Report der ICAO umfassen die nachhaltigen Treibstoffe drei Kategorien: (1) Nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF) auf der Basis von Biomasse, Abfall und atmosphärischem CO₂, (2) Low Carbon Aviation Fuels (LCAF) auf Erdölbasis

Emissionen aus dem internationalen Luftverkehr haben. Demnach könnten im Jahr 2050 die CO₂-Einsparungen durch nachhaltige Treibstoffe bis zu 55 % betragen. Darüber hinaus können bis zum Jahr 2070 Wasserstoff sowie SAF auf Basis von atmosphärischem CO₂ eine bedeutende Rolle spielen, wobei die CO₂-Reduzierung durch diese Treibstoffe potenziell 88 % erreichen kann.

Das LTAG weist den einzelnen Staaten keine spezifischen Verpflichtungen oder Zusagen in Form von Emissionsreduktionszielen zu. Stattdessen wird anerkannt, dass die jeweiligen Umstände und Fähigkeiten eines Staates (z.B. der Entwicklungsstand, die Reife der Luftverkehrsmärkte oder die nationalen Prioritäten bei der Entwicklung des Luftverkehrs) das Potenzial jedes Staates bestimmen werden, innerhalb seines eigenen nationalen Zeitrahmens zum LTAG beizutragen.

Das Programm ACT-SAF: Unterstützung der Mitgliedsstaaten beim Kompetenzaufbau

Um die Verfügbarkeit und Nutzung von SAF zu beschleunigen wurde am 1. Juni 2022 das ICAO-Programm "Assistance, Capacity-building and Training for Sustainable Aviation Fuels", kurz ACT-SAF, ins Leben gerufen [13]. Das Programm zielt darauf ab, Staaten in verschiedenen Stadien der SAF-Entwicklung und -Einführung maßgeschneiderte Unterstützung zu bieten, Partnerschaften und die Zusammenarbeit bei SAF-Initiativen unter der Koordination der ICAO zu erleichtern und als Plattform für den Wissensaustausch und der Erfassung aller SAF-Initiativen weltweit zu dienen. Bisher haben 90 Staaten und 60 Organisationen zugestimmt, sich aktiv am ACT-SAF Programm zu beteiligen. Deutschland hat dem Programm bislang noch nicht zugestimmt [14].

CORSIA: Internationales System zur Verrechnung und Reduzierung von CO₂

Mit dem Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) hat die ICAO 2016 ein marktbasiertes Klimakompensationssystem geschaffen. Dabei werden die CO₂-Emissionen, die derzeit in der Luftfahrt nicht vermieden werden können, als Out-of-Sector-Maßnahme außerhalb des eigentlichen Luftfahrtsektors kompensiert. Dies erfolgt

sowie (3) Nicht-Drop-in fähige Treibstoffe wie Wasserstoff sowie Elektrizität [12] Ein LCAF wird durch die ICAO definiert als ein Treibstoff auf fossiler Basis, der die CORSIA-Nachhaltigkeitskriterien erfüllt. [61]

durch die Finanzierung CO₂-senkender Klimaschutzprojekte mit Projektgutschriften, den so genannten Offsets. Die Einführung des Systems erfolgt in drei Stufen: Von 2021 bis 2023 lief eine Pilotphase. Von 2024 bis 2026 folgt eine erste Phase mit freiwilliger Teilnahme. In einer zweiten Phase von 2026 bis 2035 soll die Teilnahme schließlich für alle Mitgliedsstaaten verpflichtend werden. Bisher haben sich bereits 88 Länder (u.a. 44 europäische Länder, die USA, Kanada und Japan), welche zusammen ca. 77 % des weltweiten Flugverkehrs abdecken, von Beginn an zu einer freiwilligen Teilnahme verpflichtet. Zur Berichterstattung ihrer CO₂-Emissionen sind die Fluggesellschaften aller ICAO-Mitgliedstaaten im Rahmen von CORSIA bereits seit 2019 verpflichtet.

CORSIA findet bei allen zivilen, internationalen Flügen Anwendung, die zwei Teilnehmerstaaten miteinander verbinden. Die zu kompensierenden Emissionen werden nach einem dynamischen Ansatz berechnet, der zunächst als sektoraler Ansatz gestaltet ist und ab 2030 schrittweise in einen individuellen Ansatz übergehen soll. Die sektorale Berechnung erfolgt auf Basis der durchschnittlichen weltweiten CO₂-Wachstumsrate, dessen Prozentsatz eine Fluggesellschaft auf ihre eigenen CO₂-Emissionen anwenden muss. Dabei wird das Wachstum einer Fluggesellschaft nicht berücksichtigt. Der individuelle Ansatz berechnet die Höhe der Kompensation hingegen auf Grundlage der eigenen verursachten CO₂-Emissionen. Bis 2030 zahlen Fluggesellschaften, die im globalen Vergleich weniger wachsen, somit mehr Kompensationen, als sie an CO₂-Emissionen verursachen [15].

Das CORSIA-System enthält auch eine Möglichkeit, die Ausgleichsverpflichtungen durch die Verwendung von SAF und LCAF zu reduzieren. Die Bedingung für eine solche Anrechnung ist der Einsatz eines CORSIA-fähigen Treibstoffs (CORSIA Eligible Fuel, CEF). Um einen Brennstoff zu einem anrechnungsfähigen CEF zu machen, müssen verschiedene Kriterien erfüllt sein. Diese werden im ICAO-Umweltbericht von 2019 definiert [16]. So hat das Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) des ICAO-Rates Standardwerte für Lebenszyklusemissionen für CORSIA-fähige Flugkraftstoffe entwickelt, die aus 16 verschiedenen Rohstoffen hergestellt werden.⁵ Darüber hinaus muss der Herstellungsprozess nach einem zertifizierten Verfahren der

⁵ Die 16 berechneten Rohstoffe umfassen landwirtschaftliche Rückstände, forstwirtschaftliche Rückstände, Hausmüll, gebrauchtes Speiseöl, Talg, Maisöl, Sojabohnenöl, Rapsöl, Palmöl, Zuckerrohr, Zuckerrüben, Maiskörner, Pappeln, Schilf, Rutenhirse und Palmfettsäure-Destillat (Stand Februar 2019) [16]

Standardisierungsorganisation ASTM erfolgen (s. Kap. 3.1.1). Als letztes Kriterium müssen die Brennstoffe eine Nachhaltigkeitszertifizierung erhalten, auf Basis eines durch das CAEP entwickelten Zertifizierungsprozesses. Zusammenfassend werden die Verfahren und Anforderungen für einen CEF, der im Rahmen von CORSIA berücksichtigt werden kann, in den folgenden fünf ICAO Dokumenten festgelegt:

- CORSIA Eligibility Framework and Requirements for Sustainability Certification Schemes (SCS)
- CORSIA Approved Sustainability Certification Schemes
- CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels
- CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels
- CORSIA Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values

Gemäß ihrer Resolution A39-3 [17] legt die ICAO fest, dass CORSIA die marktbasierende Kompensationsmaßnahme für die CO₂-Emissionen für den internationalen Flugverkehr sein soll. Auf europäischer Ebene ist allerdings auch der Europäische Emissionshandel (EU-EHS) in Kraft (s. Kap. 2.3.1). Auch die IATA strebt im Rahmen ihre 4-Säulen-Strategie zur Emissionsreduzierung die Verwendung von anerkannten Kompensationsmaßnahmen an [18]. Regionale Maßnahmen, wie beispielsweise den EU-EHS betrachtet der Verband kritisch, da dies in einem internationalen Markt zu Wettbewerbsverzerrungen führen und eine globale Maßnahme wie CORSIA unterwandern könne [19].

2.1.2 Die 4-Säulen-Strategie der IATA

In der Strategie zur Emissionsreduzierung der IATA bilden nachhaltige Flugkraftstoffe ebenfalls eine entscheidende Säule. In 2021 haben sich die Fluggesellschaften auf der 77. IATA-Jahreshauptversammlung mit der „Net zero carbon 2050 resolution“ [18] dazu verpflichtet, ab dem Jahr 2050 keine CO₂-Emissionen mehr zu verursachen, um die Ziele des Pariser Abkommens zu stützen. Darüber hinaus erfolgte eine weitere Verpflichtungserklärung der IATA im Jahr 2022, indem sie dem langfristig ambitionierten Ziel „LTAG“ der ICAO zugestimmt hat. Somit verfolgen beide Institutionen auf globaler Ebene die gleichen Dekarbonisierungsziele.

Das Potenzial von SAF als Beitrag zur Emissionsreduzierung und dem Erreichen der Klimaneutralität in 2050 sieht die IATA bei 65 % und somit als größtes Element in ihrer 4-

Säulen Strategie. Daneben stehen die Verwendung von Kompensationsmaßnahmen, einschließlich der CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage) zur Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff (19 %), Investitionen in neue Flugzeugtechnologien (13 %) und die Verbesserungen der Infrastruktur sowie der betrieblichen Effizienz (3 %).

In ihrer SAF-Policy hat die IATA formuliert, dass sie länder- und branchenübergreifend harmonisierte Richtlinien fördert, unabhängig von der Technologie und dem Rohstoff [20]. Bereits in ihrer SAF-Roadmap [9] von 2015 wurden Maßnahmen definiert, um den kommerziellen Einsatz von Biotreibstoff in der Luftfahrt zu fördern:

- Zusammenführung von Interessengruppen im Bereich alternativer Treibstoffe
- Politische Unterstützung auf nationaler, regionaler (z.B. EU) und internationaler (UN) Ebene, um Rahmenbedingungen zur Kommerzialisierung von SAF zu schaffen
- Beseitigung von Hindernissen, die der Entwicklung eines wettbewerbsfähigen SAF-Marktes im Wege stehen
- Förderung der Verwendung von SAF in Übereinstimmung mit robusten Nachhaltigkeitskriterien
- Sensibilisierung der Öffentlichkeit für entsprechende Bemühungen der Industrie
- Übernahme einer führenden Rolle bei der Festlegung von Standards für Drop-In-SAF in den Bereichen der technischen Zertifizierung und Logistik sowie die Bereitstellung entsprechender technischer Unterstützung
- Errichtung einer Plattform für den Wissensaustausch, sowohl zwischen Fluggesellschaften als auch für externe Partner (z.B. Flughäfen)

2.2 Exkurs: Rahmenbedingungen für SAF in den USA

Die Rahmenbedingungen zum Einsatz von SAF in den USA werden maßgeblich durch den Inflation Reduction Act (IRA) von 2022 beeinflusst. Das geplante Fördervolumen von 369 Milliarden US-Dollar (USD) soll über eine Laufzeit von 10 Jahren vorrangig in den Klimaschutz und in zukunftsweisende Branchen fließen. Der IRA zielt darauf ab, das Wirtschaftswachstum anzukurbeln, den Klima- und Umweltschutz zu fördern und soziale Gerechtigkeit zu stärken. Ein Kernziel des IRA besteht in der Reduktion der CO₂-Emissionen der USA bis 2030 um etwa 40 % im Vergleich zu 2005, was gleichzeitig mit einer Senkung der Inflation einhergehen soll [21].

Um die Ziele des IRA zu erreichen, werden verschiedene Fördermaßnahmen und Bonusprogramme implementiert. So bildet der IRA unter anderem die finanzielle Grundlage für das Fueling Aviation's Sustainable Transition (FAST) Programm, speziell definiert durch die IRA Section 40007. Dieses Programm zielt darauf ab, die Produktion und Nutzung von SAF zu beschleunigen und die Entwicklung emissionsarmer Luftfahrttechnologien voranzutreiben. Im Fokus stehen dabei die Unterstützung des globalen Ziels, bis 2050 Netto-Null-Treibhausgasemissionen zu erreichen sowie die Förderung von Innovationen in der Luftfahrtbranche. Der FAST-SAF-Teil des Programms umfasst eine Investition von 244,5 Millionen USD für Infrastrukturprojekte zur SAF-Produktion, -Transport, -Beimischung und -Lagerung. Zusätzlich werden 46,5 Millionen USD für den Technologie-Teil (FAST-Tech) bereitgestellt, der die Entwicklung und Demonstration neuer Luftfahrttechnologien zur Verbesserung der Kraftstoffeffizienz und Emissionsreduktion unterstützt. Dieses Programm dient als Ergänzung zu bereits bestehenden Initiativen wie dem Aviation Sustainability Center (ASCENT)⁶, der Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI)⁷ und dem Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise Program (CLEEN)⁸ und soll die USA als Vorreiter in Sachen nachhaltiger Luftfahrt etablieren [22, 23].

⁶ ASCENT arbeitet an wissenschaftsbasierten Lösungen zur Reduzierung der Umweltauswirkungen der Luftfahrtindustrie und der Herstellung nachhaltiger Flugkraftstoffe im kommerziellen Maßstab. [56]

⁷ CAAFI zielt darauf ab, alternative Flugkraftstoffe zu entwickeln und einzusetzen, um die Energieversorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit der Luftfahrt zu verbessern. [57]

⁸ Zielsetzung von CLEEN ist es, die Entwicklung von Flugzeug- und Triebwerkstechnologien voranzutreiben, um Lärm, Emissionen und Treibstoffverbrauch in der Luftfahrt zu reduzieren und damit die Umweltleistung zu verbessern. [58]

Ein weiterer wichtiger Aspekt in Bezug auf den Einsatz von SAF in den USA ist der SAF-Credit, der vom Finanzministerium und dem Internal Revenue Service (IRS) verwaltet wird. Diese Form der Steuergutschrift gilt für den Verkauf qualifizierter Treibstoffmischungen mit nachhaltigem Flugkraftstoff in den Jahren 2023 und 2024 und beläuft sich auf 1,25 USD pro Gallone⁹. Um eine Treibstoffmischung als qualifiziert anerkennen zu lassen, muss ein mindestens 50%iger Rückgang der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen nachgewiesen werden. Die Bestimmung des Emissionsreduktionsprozentsatzes erfolgt dabei entweder durch die CORSIA-Methode (siehe Kapitel 2.1.1) oder eine ähnliche Methode, welche die spezifischen Anforderungen des Clean Air Act (CAA) erfüllt [24].

Als zentrales regulatorisches Instrument in Bezug auf erneuerbare Kraftstoffe fungiert in den USA der Renewable Fuel Standard 2 (RFS2) des US-Kongresses. Er legt, ähnlich der Renewable Energy Directive (RED) in der EU¹⁰, die Nachhaltigkeitsstandards für erneuerbare Kraftstoffe fest sowie verbindliche Vorgaben für die Beimischung dieser Kraftstoffe. Obwohl der RFS2 primär auf den Straßenverkehr ausgerichtet ist, kann sich seine Wirkung auch auf den Luftverkehrssektor erstrecken. Die jährlichen Ziele des RFS2 werden als Volumenprozentsatz angegeben und anteilig auf die in den USA ansässigen Raffinerien, Mischbetriebe und Importeure aufgeteilt, um ihre angestrebten Mengenverpflichtungen für erneuerbare Kraftstoffe zu bestimmen. Um die Einhaltung der RFS2-Vorgaben zu erleichtern, werden so genannte Renewable Identification Numbers (RINs) verwendet. Bei diesen RINs handelt es sich um handelbare Zertifikate, die als Kennzeichnung für die Herkunft und den Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe dienen. Sie werden pro Gallone vergeben. Sofern ein Treibstoff also den korrekten RFS-Anforderungen entspricht, können auch Hersteller und Importeure von SAF entsprechende RINs generieren. Ein Unternehmen, das SAF gemäß dem RFS2 nutzt, benötigt eine entsprechende Anzahl von RINs zur Erfüllung seiner Verpflichtungen. Wenn es mehr SAF verwendet als gesetzlich vorgeschrieben, kann es überschüssige RINs wiederum an andere Unternehmen verkaufen, die ihre Verpflichtungen nicht erfüllen können [9, 25].

⁹ Umrechnung US-Gallone: 1 gal = 3,785 l

¹⁰ Ein Vergleich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Systemen RFS2 und RED wird in der SAF Roadmap 2015 der IATA aufgezeigt [9]

2.3 Rahmenbedingungen auf EU-Ebene

2.3.1 Der European Green Deal

Mit dem European Green Deal [26] wurde das Ziel festgelegt, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität in der EU zu erreichen. Für dieses Ziel ist es im Rahmen des „Fit-for-55-Pakets“ der EU erforderlich, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 zu senken. Dies erfordert Maßnahmen auf EU-Ebene, um den Mitgliedstaaten die richtigen Anreize zu bieten, den Übergang vom bisherigen Energiesystem, das noch zu großen Anteilen auf fossilen Brennstoffen basiert, zu einem energieeffizienteren Energiesystem zu beschleunigen, das sich auf erneuerbare Energiequellen stützt. Die EU-Staaten haben gemeinsam, im Rahmen vom European Green Deal, mehrere luftfahrt- und klimarelevante Richtlinien und Verordnungen verabschiedet.

Die Verordnung ReFuelEU Aviation

Auch der Luftverkehr ist gefordert, vor dem Hintergrund des Fit-for-55-Pakets, die Mobilität klimafreundlicher zu gestalten. Dies obliegt auch, den Einsatz von SAF im Luftverkehr zu fördern. Dafür sorgt die Verordnung der ReFuelEU Aviation [27] in der unter anderem definiert wird, welche Flugkraftstoffe zur Erfüllung der Quoten zugelassen werden. Sie bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Nachhaltigkeitskriterien der Renewable Energy Directive (RED). Zudem gibt sie vor, welche SAF-Beimischungsquoten aus der Verordnung für Inverkehrbringer hervorgehen und welche Strafen bei Nichteinhaltung der Vorgaben drohen [5].

Die Bestimmungen der ReFuelEU Aviation zielen darauf ab, die Verwendung von nachhaltigen Luftfahrtkraftstoffen im Flugverkehr zu erhöhen. Die festgelegten SAF- und Power-to-Liquid (PtL)-Quoten im § 4 der ReFuelEU Aviation stellen eine Mindestmenge an SAF im Flugverkehr sicher und sehen eine steigende Beimischungsverpflichtung ab 2025 an allen Flughäfen der EU vor, die bis 2050 schrittweise angehoben wird. Der Mindestanteil an nachhaltigen Flugtreibstoffen sieht für Fluggesellschaften und Flughäfen der Union¹¹ für

¹¹ Ein „Flughafen der Union“ beschreibt „im Sinne von Artikel 2 Nummer 1 der Richtlinie 2009/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates“ einen Flughafen, auf dem im vorherigen Berichtszeitraum mehr als 800.000 Fluggäste oder über 100.000 Tonnen Fracht befördert wurden und der sich nicht in einem in Artikel 349 AEUV aufgeführten Gebiet in äußerster Randlage befindet“ (ReFuel EU Artikel 3(1)).

2025 bis 2028 eine Beimischungspflicht von 2 % SAF vor, die bis 2030 auf 6 % und bis 2050 bei 70 % ansteigt. Während eines Übergangszeitraums bis 2034 wird ein gewichtetes Mittel in der gesamten EU angewendet (ReFuelEU Aviation § 15). Bei Nichterfüllung der Quoten sind die Mitgliedstaaten dazu verpflichtet, Strafzahlungen zu erheben (ReFuelEU Aviation § 12). Hierbei wird unterschieden zwischen Luftfahrzeugbetreiber, Leitungsorgan eines Flughafens und Flugkraftstoffanbieter [28, 29]:

- **Luftfahrzeugbetreiber** sind verpflichtet mindestens 90 % ihres Treibstoffbedarfes an EU-Flughäfen zu decken (ReFuelEU Aviation § 5). Kommen sie dem nicht nach beträgt die Geldbuße mindestens das Doppelte des Betrages, der sich aus der Multiplikation des jährlichen Durchschnittspreises für den Treibstoff pro Tonne mit der jährlichen nicht vertankten Gesamtmenge ergibt. Aktuell würde der Mindestbetrag für die Strafzahlungen etwa 2000 €/t entsprechen.
- **Leitungsorgane der EU-Flughäfen** sind laut § 6 der ReFuelEU Aviation dazu verpflichtet den Zugang zu SAF zu ermöglichen. Kommen sie dieser Pflicht nicht nach, müssen sie Strafzahlungen leisten. Diese sind allerdings nicht in der ReFuelEU Aviation definiert, sondern werden durch die Mitgliedsstaaten verhängt.
- Nach § 4 der ReFuelEU Aviation müssen **Flugkraftstoffanbieter** gewährleisten, dass Treibstoff mit dem vorgeschriebenen Mindestanteil an SAF zur Verfügung steht. Können sie dem nicht nachkommen, beträgt die Geldbuße mindestens das Doppelte des Betrages, der sich aus der Multiplikation der Differenz zwischen dem Jahresdurchschnittspreis von synthetischem und konventionellem Flugkraftstoff pro Tonne mit der Menge an Treibstoff, der nicht den Mindestanforderungen entspricht, ergibt. Aktuell würde der Mindestbetrag für die Strafzahlungen etwa 3000 €/t entsprechen. Die Fehlmenge muss zudem im folgenden Jahr bzw. Berichtszeitraum nachträglich bereitgestellt werden, insbesondere im Hinblick auf erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (Renewable fuels of non-biological origin, RNFBO).

Die derzeit angenommenen Mindeststrafen basieren auf den Marktpreisen von Biotreibstoffen, da es für PtL-Treibstoffe aktuell noch keinen Marktpreis gibt.

Artikel 3 der ReFuelEU Aviation definiert, welche Flugkraftstoffe verwendet werden können, um die Mindestanteile an den SAF-Quoten zu erreichen. Unter den Geltungsbereich fallen zertifizierte Biokraftstoffe, die jedoch nicht auf Basis von Nahrungs- und Futtermitteln hergestellt werden dürfen und RNFBOs, die den Nachhaltigkeits- und

Emissionseinsparungskriterien der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der RED entsprechen. Dabei ist anzumerken, dass zur Quotenerfüllung auch „wiederverwertete kohlenstoffhaltige Flugkraftstoffe“, „kohlenstoffarme Flugkraftstoffe“ und „kohlenstoffarmer Wasserstoff“ genutzt werden dürfen, diese aber nicht die Nachhaltigkeitskriterien der RED erfüllen.

Renewable Energy Directive II & III und die Delegierten Rechtsakte

Durch die Aktualisierung der Renewable Energy Directive (RED) von RED II zur RED III [30] wird das verbindliche Unionsziel für den Gesamtanteil von Energie aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbare Energien, EE) am Bruttoendenergieverbrauch der Union für 2030 neu ausgelegt, sowie auch die finanzielle Förderung für die Nutzung von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen, der Nutzung im Wärme- und Kältesektor sowie im Verkehrssektor.

Der vorgesehene EE-Anteil in allen Sektoren, gemessen am Bruttoendenergieverbrauch der Union im Jahr 2030, erhöht sich von 32 % (RED II) auf 45 % (RED III). Der angestrebte EE-Anteil bis 2030 im Verkehrssektor steigt von 14 % (RED II) auf 29 % (RED III), von denen 1 % durch RNFB0 erreicht werden sollen. Alternativ können die Sektorziele im Verkehr auch über eine THG-Reduktion von einem Anteil von 14,5 % (RED III) erreicht werden.

Alle EU-Mitgliedsstaaten sind verpflichtet, die Vorgaben der RED II und RED III in nationales Recht umzusetzen. Die übergeordneten Ziele enthalten neben den verbindlichen Erneuerbare-Energie-Richtlinien für die verschiedenen Sektoren, wie dem Verkehr, in dem der Flugverkehr einen Beitrag zu leisten hat, auch die Nachhaltigkeitskriterien für erneuerbare Kraftstoffe und die Treibhausgaseinsparungen für Biokraftstoffe, flüssige Biobrennstoffe und Biomasse-Brennstoffe. Die methodische Konkretisierung der Herstellung von erneuerbaren Kraftstoffen erfolgt in den Delegierten Rechtsakten der RED II, in denen die Anforderungen an die SAF-Produktion präzisiert werden.

Die in der RED II verankerten delegierten Rechtsakte konkretisieren den regulatorischen Rahmen für die SAF-Produktion. Insbesondere definiert Artikel 29a(1) der RED, welche Kraftstoffe als nachhaltig angesehen werden können. Ein Kraftstoff ist demnach dann nachhaltig, wenn die Treibhausgaseinsparungen durch die Nutzung von SAF und den wiederverwerteten kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen (Recycled Carbon Fuels, RCF) mindestens 70 % gegenüber dem fossilen Vergleichswert (94 g CO₂eq/MJ) betragen. Der Delegierte Rechtsakt (EU) 2023/1185 bestimmt, dass diese Regelungen auch für RCF gelten. Zudem definiert der delegierte Rechtsakt die zulässigen CO₂-Quellen für die PtL-

Herstellung. Zum einen kann CO₂ aus Punktquellen bezogen werden, jedoch ist zu beachten, dass dies nur bis zum Jahr 2041 genutzt werden darf. Zum anderen kann das CO₂ direkt aus der Atmosphäre, aus Biogasanlagen oder sonstigen biogenen Quellen bezogen werden sowie aus natürlichen Quellen, wo CO₂ zuvor direkt in die Atmosphäre freigesetzt wurde.

Der Delegierte Rechtsakt (EU) 2023/1184 definiert außerdem die verschiedenen Möglichkeiten zur Erfüllung der Anforderungen an EE-Strom für die PtL-Produktion. Die Möglichkeiten umfassen den Direktbezug, den Anteil von 90 % an EE im nationalen Stromnetz oder ein Power-Purchase-Agreement unter Erfüllung der Anforderungen an das Zusätzlichkeitsgebot sowie an die zeitliche und geografische Korrelation.

Zudem definiert die RED die Nachhaltigkeitskriterien für SAF und PtL, mit denen die in der RED definierten Ziele erreicht werden können und zeigt damit auf, welche Kraftstoffe zur Zielerreichung angerechnet werden dürfen. Gemäß der RED erfüllen Biokraftstoffe¹², synthetische Flugkraftstoffe¹³ und wiederverwertete kohlenstoffhaltige Kraftstoffe¹⁴ die Nachhaltigkeitskriterien für SAF und werden damit laut der RED als nachhaltige Flugkraftstoffe definiert.

Der Europäische Emissionshandel (EU-EHS)

Der Europäische Emissionshandel (EU-EHS) ist das zentrale Klimaschutzinstrument der EU mit dem Ziel, Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie zu reduzieren [31]. Er wurde 2005 etabliert, um das internationale Klimaschutzabkommen von Kyoto umzusetzen und funktioniert nach dem „Cap-and-Trade“-Prinzip (Richtlinie 2003/87/EG). Seit 2012 ist auch der Luftverkehr Teil des EU-EHS (Richtlinie 2008/101/EG) und gilt für alle Flüge, die innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) starten oder landen. Die bislang niedrige CO₂-Bepreisung des

¹² Biokraftstoffe sind definiert als flüssige Kraftstoffe für den Verkehr, die aus Biomasse (Art. 2 (33) RED) und aus bestimmten Rohstoffen hergestellt werden, die in Teil B von Anhang IX RED aufgeführt sind. Fortschrittliche Biokraftstoffe sind Biokraftstoffe, die aus den in Teil A von Anhang IX aufgeführten Rohstoffen hergestellt werden (Art. 2 (34) RED).

¹³ Bei synthetischen Flugkraftstoffen handelt es sich im Falle von RNFBOs um erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (Art. 2 (36) RED).

¹⁴ RCF sind definiert als flüssige oder gasförmige Brennstoffe, die nicht für eine stoffliche Verwertung gemäß Artikel 4 der Richtlinie 2008/98/EG geeignet sind, oder aus Prozess- und Abgasen nicht erneuerbaren Ursprungs hergestellt werden, die als unvermeidbare und unbeabsichtigte Folge des Produktionsprozesses in Industrieanlagen entstehen (Art. 2 (35) RED).

Luftverkehrs wurde durch die Reform des EU-EHS im Rahmen des Fit-for-55-Pakets deutlich ambitionierter gestaltet (Richtlinie (EU) 2023/958). Dabei wurde das Minderungsziel für 2030 von 43 % auf 62 % gegenüber 2005 verschärft und schließt nun auch Luft- und Schiffverkehr mit ein. Dies soll durch eine Erhöhung des linearen Reduktionsfaktors¹⁵ (LRF) von derzeit 2,2 % auf 4,3 % ab 2024 und auf 4,4 % ab 2028 erreicht werden (Art. 9 EU-EHS). Zusätzlich ist eine Reduktion der Obergrenze (Cap) um 90 Millionen Zertifikate im Jahr 2024 und um 27 Millionen Zertifikate im Jahr 2026 vorgesehen. Das schnelle Auslaufen der kostenlosen Zuteilung bis Ende 2025 wird begleitet von der nachgelagerten Einführung einer kostenlosen Zuteilung von maximal 20 Mio. Emissionsberechtigungen für die Verwendung nachhaltiger Kraftstoffe (s.g. SAF Allowances). Diese sollen zur Kompensation der bei Airlines durch die verpflichtende SAF-Beimischungsquote (ReFuelEU Aviation) verursachten Mehrkosten dienen [32].

Darüber hinaus besteht im Rahmen des EU-ETS ab 2025 eine Berichtspflicht zu Nicht-CO₂-Effekten. Diese wird zunächst über die Überwachung, der Berichterstattung und der Prüfung (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs ins EU-ETS miteinbezogen, sowie später voraussichtlich auch mit einer Abgabepflicht. Bis Ende 2027 wird die Europäische Kommission einen Report – voraussichtlich inklusive Legislativvorschlag – vorlegen, der Nicht-CO₂-Effekte in die Abgabepflicht integriert. Zudem wird CORISA für Flüge von und zu Drittstaaten sowie zwischen Drittstaaten in den EU-EHS im EWT implementiert [32].

2.3.2 EU-Taxonomie

Die EU-Taxonomie [33] definiert Branchen und Wirtschaftsaktivitäten, die mit Blick auf die Transformation zu einer klimaneutralen Wirtschaft besonders relevant sind und bestimmt anhand von Kriterien, welche Wirtschaftstätigkeiten als ökologisch nachhaltig einzustufen sind. Damit legt sie den Grad der ökologischen Nachhaltigkeit einer Investition fest. Sie unterstützt die Zielsetzung des European Green Deals, indem sie auf die Neuausrichtung von Kapitalströmen auf nachhaltige Investitionen, die Etablierung von Nachhaltigkeit als

¹⁵ Die verfügbare Menge an Emissionszertifikaten im EU-ETS wird durch eine Obergrenze „Cap“ begrenzt, um das Minderungsziel des EU-ETS zu erreichen. Der Verlauf des Caps wird durch einen linearen Reduktionsfaktor bestimmt, welcher das Cap jedes Jahr um eine bestimmte Menge an Zertifikaten reduziert [59].

Bestandteil des Risikomanagements und die Förderung für langfristige Investitionen und langfristiges Wirtschaften setzt. Für die Nachhaltigkeitsbeurteilung werden in der Taxonomie sechs Klimaziele definiert, deren Erreichung Taxonomie-konforme Investitionen unterstützen sollen. Dabei gilt das „do no significant harm“-Prinzip, nach dem jede Aktivität einen Beitrag zu mindestens einem der definierten Umweltziele leisten muss und keinem anderen der Umweltziele signifikant schaden darf. Die sechs definierten Klimaziele sind:

1. Klimaschutz
2. Anpassung an den Klimawandel
3. Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasserressourcen
4. Wandel zu einer Kreislaufwirtschaft
5. Vermeidung von Verschmutzung
6. Schutz von Ökosystemen und Biodiversität [34]

Die Taxonomie-Verordnung (EU) 2020/852 stellt dabei den regulatorischen Rahmen der EU-Taxonomie dar, um „nachhaltige“ Wirtschaftstätigkeiten allgemeingültig zu klassifizieren. Somit bildet die EU-Taxonomie-Verordnung die rechtliche Grundlage für die Nachhaltigkeitsklassifizierung und ermöglicht eine stärkere Markttransparenz für nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten. Dies ermöglicht die Integration weiterer Wirtschaftsaktivitäten in die EU-Taxonomie.

Basierend auf dem regulatorischen Rahmen der Verordnung gestalten verschiedene Delegierte Rechtsakte die Ausgestaltung für ihre Anwendung und Umsetzung. Beispielsweise definiert der Climate Delegated Act (Delegierter Rechtsakt (EU)2021/2139) die technischen Bewertungskriterien für die Wirtschaftssektoren und Umweltziele, während der Disclosures Delegated Act (Delegierter Rechtsakt 2021/2178) Anforderungen an die Berichterstattung formuliert. Beide Delegierte Rechtsakte wurden 2023 aktualisiert (Delegierte Verordnung (EU) 2023/2486 und Delegierte Verordnung (EU) 2023/2486). Der umstrittene Complementary Climate Delegated Act (Delegierter Rechtsakt (EU) 2022/1214) nahm 2022 Atomkraft und Erdgas in die EU-Taxonomie auf.

Die transparente Klassifizierung relevanter wirtschaftlicher Aktivitäten als nachhaltig ist auch für den Flugverkehrssektor essenziell, um nachhaltige Investitionen sinnvoll zu steuern. Mit einem neuen Maßnahmenpaket hat die EU Kommission im Juni 2023 die EU-Taxonomie um zusätzliche wirtschaftliche Aktivitäten, u.a. im Verkehrssektor, erweitert. Unter bestimmten Bedingungen umfasst dies auch Operationen im Luftverkehr [35].

2.4 Nationale Rahmenbedingungen

Die THG-Reduktionsziele werden auf nationaler Ebene durch das Bundes-Klimaschutzgesetz festgelegt. Dieses sieht eine schrittweise Minderung der THG-Emissionen von mindestens 65 % bis 2030 und mindestens 88 % bis 2040 im Vergleich zum Jahr 1990 vor. Bis 2045 soll Netto-THG-Neutralität erreicht werden sowie negative THG-Emissionen nach 2050 [36].

Neben den umfassenden regulatorischen Instrumenten der EU gelten in Deutschland noch eine Reihe weiterer legislativer und strategischer Elemente. Die Umsetzung der RED II in nationales Recht ist im **Bundesimmissionsschutzgesetz** (BImSchG) [37] abgebildet. Für den Flugverkehr ist hier eine PtL-Quote verankert, welche eine Beimischungsverpflichtung von 0,5 % bis 2026, 1 % bis 2028 und 2 % bis 2030 definiert (§ 37a (4a) BImSchG). Verpflichtete zur Umsetzung dieser Quote sind Inverkehrbringer der Flugturbinenkraftstoffe. Wird die nationale PtL-Quote nicht erfüllt, so ist eine Pönale zu entrichten, die sich nach dem Energiegehalt der berechneten Fehlmenge des Kraftstoffs richtet. Die veranschlagten 70 Euro pro Gigajoule (§ 37c (2) BImSchG) entsprechen einer Abgabe von circa 3.000 € pro nicht vertankter Tonne PtL-Kraftstoff. Aktuell würde sich die Pönale damit am unteren Ende der aktuellen Gestehungskosten bewegen. Studien aus 2023 und 2024 zeigen, dass momentan mit PtL-Kosten im Bereich von knapp unter 3.000 €/t bis 4.400 €/t zu rechnen ist. Erst ab 2030 ist zu erwarten, dass die Kosten sinken, wobei aufgrund der großen Spannweite der prognostizierten Gestehungskosten zu erwarten ist, dass es bis deutlich über 2030 hinaus dauern wird, bis die PtL-Kosten den Betrag der Pönale von 3.000 €/t deutlich unterschreiten werden [38, 39, 40].

Alternative Treibstoffe im aktuellen Regierungsprogramm

Der derzeit geltende **Koalitionsvertrag** [41] von 2021 zwischen SPD, Grünen und FDP formuliert mit Blick auf alternative Flugkraftstoffe folgende Ziele:

- Deutschland soll Vorreiter beim CO₂-neutralen Fliegen werden.
- Bis zur europäischen Entscheidung über die Einführung einer Kerosinsteuer in Anlehnung an den Energiegehalt, wird die Bundesregierung sich dafür einsetzen, auch europaweit eine Luftverkehrsabgabe einzuführen, wie sie in Deutschland erhoben wird.

- Flugtickets sollen nicht zu einem Preis unterhalb der Steuern, Zuschläge, Entgelte und Gebühren verkauft werden dürfen.
- Einnahmen aus der Luftverkehrssteuer sollen für die Förderung von Produktion und Einsatz von CO₂-neutralen, strombasierten Flugkraftstoffen sowie für Forschung, Entwicklung und Flottenmodernisierung im Luftverkehr eingesetzt werden.
- Die Bundesregierung unterstützt ambitionierte Quoten für PtL im Luft- und Schiffsverkehr, um einen Markthochlauf anzureizen.

Diese Zielsetzungen müssen jedoch vor dem Hintergrund jüngster Entwicklungen betrachtet werden. So wurden im November 2023 durch Urteil des Bundesverfassungsgerichts 60 Milliarden Euro aus der Rücklage des Klima- und Transformationsfonds (KTF) gestrichen [42]. Dies führte zu entsprechenden Einsparungen im Bundeshaushalt und damit dem Wegfall von Fördermaßnahmen.

Mit dem zweiten Haushaltsfinanzierungsgesetz, das vom Bundesrat am 22. März 2024 gebilligt wurde [43], hat die Bundesregierung Maßnahmen im Zusammenhang mit der Einigung zum Bundeshaushalt 2024 auf den Weg gebracht. Damit wurden auch die geltenden Sätze der **Luftverkehrssteuer** (auch Ticketsteuer genannt, da sie auf gewerbliche Passagierflüge erhoben wird) zum 1. Mai 2024 erhöht (siehe Tabelle 1). Die Programmausgaben des Klima- und Transformationsfonds wurden um 12,7 Milliarden Euro reduziert. Zugleich soll das Programm „Klimaneutrales Fliegen“ im Klima- und Transformationsfonds bestehen bleiben.

	Neu, ab 1.5.24	Alt, bis 30.4.24
Distanzklasse I (Europa)	15,53 €	12,48 €
Distanzklasse II (Mittelstrecke, u. a. Nordafrika oder mittlerer Osten)	39,24 €	31,61 €
Distanzklasse III (Langstrecke, u. a. amerikanischer Kontinent)	70,83 €	56,91 €

Tabelle 1: Änderung der Luftverkehrssteuer zum 1. Mai 2024 [44]

Nationale Biomassestrategie

Im Koalitionsvertrag verankert ist außerdem die Erstellung einer **Nationalen Biomassestrategie** (NABIS) [45]. Bereits 2022 haben das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) ein Eckpunktepapier für die Erstellung einer solchen Strategie veröffentlicht. Angesichts des Ungleichgewichts zwischen hoher und rasant wachsender Nachfrage nach pflanzlichen und tierischen Rohstoffen und einem begrenzten Aufkommen an biogenen Abfall- und Reststoffen, sieht das NABIS-Eckpunktepapier folgende Leitprinzipien für die Nutzung von Biomasse vor:

- Grundsatz einer Nutzungshierarchie unter Berücksichtigung der Möglichkeiten von Mehrfach- und Kaskadennutzungen zur Ausschöpfung der Potenziale der Kreislaufwirtschaft
- Priorisierung der stofflichen Nutzung; Kohlenstoff soll möglichst lange gebunden werden
- Vorrang der Mehrfachnutzung
- Vorrang der Nutzung des Biomasseanteils und biogenen Abfallstoffen

Die Nationale Biomassestrategie zielt darauf ab, einen Instrumentenmix mit praktischer Lenkungswirkung zu erarbeiten, der eine nachhaltige, klimaschutzwirksame und ressourceneffiziente Biomasseerzeugung und -nutzung sicherstellt. Dies soll zum Aufbau verlässlicher Rahmenbedingungen für die Politik der Länder sowie für Investitionen der Wirtschaft beitragen. Bestehende Fehlanreize und Regulierungen für die Biomasseerzeugung und -nutzung sollen identifiziert und durch geeignete Maßnahmen angepasst bzw. weiterentwickelt werden.

Als Grundlage für die zu erarbeitenden Maßnahmen sollen das derzeit nachhaltig verfügbare Biomassepotenzial, die verschiedenen Anwendungsbereiche sowie die aktuellen politischen Rahmenbedingungen analysiert werden. Die zu formulierenden Maßnahmen selbst sollen auf den definierten Leitprinzipien fußen und sich gliedern in

- (I) die konsequente Anpassung bestehender Politikinstrumente (z. B. Förderprogramme, Ordnungsrecht, Abbau klima- und biodiversitätsschädlicher Subventionen) an die genannten Leitprinzipien sowie

- (II) die Einführung neuer Maßnahmen zur Lenkung von Biomasseströmen (z. B. Ordnungsrecht bzw. neue ökonomische Anreizinstrumente).

Obwohl die Verabschiedung und Veröffentlichung der Nationalen Biomassestrategie für 2023 vorgesehen war, liegt sie derzeit nur als Entwurfsfassung aus dem Stakeholder-Beteiligungsprozess vor. Hier war die vorrangige Nutzung von biogenem CO₂ für die PtX-Produktion (Power-to-X) gegenüber der CO₂-Speicherung in ersten Entwurfsfassungen noch vorgesehen. In der zuletzt vorliegenden Entwurfsfassung wurde diese Maßnahme jedoch wieder gestrichen.

Nationale Wasserstoffstrategie

Die 2020 veröffentlichte **Nationale Wasserstoffstrategie** (NWS) [46] wurde 2023 durch eine Fortschreibung [47] ergänzt. Während die NWS 2020 grundsätzlich weiter Bestand hat, wurde das nationale Wasserstoff-Produktionsziel für 2030 auf 10 Gigawatt (GW) verdoppelt. Die Strategie basiert auf der Annahme, dass der nationale Wasserstoffbedarf bis 2030 bei 95-130 Terawattstunden (TWh) liegen und danach stark ansteigen wird. Außerdem muss der derzeitige Bedarf von 55 TWh an grauem Wasserstoff¹⁶ zusätzlich sukzessive nachhaltig produziert werden. Die Importquote wird auf 50-70 % (45-90 TWh) beziffert. Soweit in der Markthochlaufphase notwendig, soll neben der Nutzung von grünem Wasserstoff auch kohlenstoffarmer blauer, türkiser und orangener Wasserstoff¹⁷ gefördert werden - unter Berücksichtigung von ambitionierten THG-Grenzwerten, einschließlich der Emissionen der Vorkette sowie der Erhaltung des gesetzlichen Ziels der Klimaneutralität.

Die Nationale Wasserstoffstrategie sieht den Einsatz von PtL-Treibstoffen vor allem im Luft- und Schiffverkehr vor. Für die klimaneutrale Luftfahrt für die Kurz- und Mittelstrecke soll, in Abhängigkeit von der Produktverfügbarkeit entsprechender Flugzeuge, die Unterstützung des Aufbaus einer initialen Betankungsinfrastruktur für Flüssigwasserstoff geprüft werden.

¹⁶ Grauer Wasserstoff wird meist aus fossilem Erdgas hergestellt. Damit erzeugt er CO₂-Emissionen und ist nicht klimafreundlich. [62]

¹⁷ Grüner Wasserstoff ist CO₂ neutral, da er unter Verwendung erneuerbarer Energiequellen durch Elektrolyse von Wasser hergestellt wird. Als CO₂-frei gilt ebenfalls orangener Wasserstoff, der auf Basis von Abfall und Reststoffen entsteht. Als blauer Wasserstoff gilt grauer Wasserstoff, bei dessen Produktion CO₂ durch CCS teilweise abgeschieden und gespeichert wird. Türkiser Wasserstoff wird über die thermische Spaltung von Methan hergestellt, wobei fester Kohlenstoff entsteht, der nicht in die Atmosphäre entweicht. [62]

Roadmap für PtL-Treibstoffe

Der Vollständigkeit halber ist im Kontext der nationalen Rahmenbedingungen auch die **PtL-Roadmap** der Bundesregierung [48] zu nennen. Die gemeinsame Roadmap von Bund, Ländern, Luftfahrt, Mineralölwirtschaft sowie Anlagenbauern und -betreibern für den Markthochlauf von strombasierten Treibstoffen auf Basis erneuerbarer Energiequellen wurde 2021 gemeinsam vom BMU (heute BMUV, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz), BMVI (heute BMDV, Bundesministerium für Digitales und Verkehr), BMWi (heute BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz), BMZ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) und dem Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. (BDL) veröffentlicht. Das Ziel der Roadmap ist es, die Produktion von aus erneuerbarem Strom erzeugtem PtL-Kerosin in Deutschland signifikant auf- und auszubauen.

So soll der Flugverkehr stärker in Einklang mit nationalen und internationalen Klimaschutzzielen gebracht werden. Synthetische, nachhaltig produzierte Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien sollen einen Beitrag zum CO₂-neutralen Fliegen leisten, indem fossiles Kerosin durch strombasiertes Kerosin (PtL) sukzessive ersetzt werden soll. Darüber hinaus will Deutschland die Technologieführerschaft in der Herstellung und im Einsatz von PtL-Kerosin auf- und ausbauen. Als Zielsetzung wurde definiert, dass bis 2030 mindestens 200.000 Tonnen PtL-Kerosin im deutschen Luftverkehr zur Verfügung stehen sollen. Einige der geplanten Aktivitäten zur Zielerreichung der PtL-Roadmap wurden durch die zwischenzeitliche Finalisierung diverser legislativer Elemente im Rahmen des European Green Deals überholt, z. B. die Nachhaltigkeitskriterien, verbindliche Absatzziele in Form von Beimischungsquoten etc.

3 Treibstoff- und Technik-Anforderungen: Übersicht über bestehende und in Planung befindliche relevante Industriestandards

3.1 Standards und Normkonformität auf internationaler Ebene

Luftfahrt findet global statt und ihre Sicherheit hat dabei oberste Priorität. Daher müssen bei der Herstellung und dem Einsatz von Treibstoffen internationale Standards gesetzt werden. Bei der Zertifizierung und Zulassung ist vor allem die ASTM International von Bedeutung, die als internationale Standardisierungsorganisation ihren Sitz in den USA hat. Werden Treibstoffe und Herstellrouten durch die ASTM zertifiziert und zugelassen, sind diese international anerkannt und besitzen eine weltweite Gültigkeit. Für die Anwendung in Deutschland bedeutet dies, dass der ASTM-zertifizierte Treibstoff eingesetzt werden darf, ohne dass er in der BImSchV aufgenommen werden muss [49].

Nachdem der erste Testflug mit einer SAF-Beimischung im Februar 2008 durch die Fluggesellschaft Virgin Atlantic stattgefunden hatte, zog dies viele weitere Testflüge zahlreicher Fluggesellschaften mit verschiedenen Flugzeug- und Triebwerkstypen sowie Treibstoff-Mischungen aus verschiedenen Rohstoffen nach sich. Parallel dazu erfolgte unter Leitung der ASTM und mit großer Unterstützung der Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI) sowie der US Airforce die technische Zertifizierung alternativer Treibstoffe, die im Jahr 2009 zur Zulassung des ersten SAF führte, einem nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellten Treibstoff, der mit einem Beimischungsanteil von 50 % für die kommerzielle Luftfahrt eingesetzt werden darf [50].

3.1.1 ASTM-Standards

ASTM-Spezifikation D1655 für Jet A und Jet A-1

Im kommerziellen Luftverkehr darf ein Flugtreibstoff grundsätzlich nur eingesetzt werden, wenn er alle Anforderungen der seit 1959 bestehenden ASTM-Spezifikation D1655 erfüllt. In dieser sind die Anforderungen an die Zusammensetzung und Eigenschaften der klassischen, rohölbasierten Treibstoffe Jet A und Jet A-1 definiert. Zu den hier relevanten

Treibstoffeigenschaften gehören die Flüchtigkeit, die Viskosität, Verbrennungs- und Korrosionseigenschaften sowie die thermische Stabilität. Auch sind Grenzwerte für Verunreinigungen sowie eine Liste zulässiger Additive aufgeführt [50].

Prozessstandard nach ASTM D4054 für neue synthetische Treibstoffe

Um die Bewertung von neuen, synthetischen Flugkraftstoffen (SAF) und Kraftstoffadditiven zu standardisieren, hat das ASTM-Subkomitee für synthetische Flugturbinentreibstoffe den Prozessstandard D4054 entwickelt. Dieser definiert das Verfahren zur Zulassung und Zertifizierung von neuen Treibstoffen, in welches u.a. Flugzeug- und Triebwerkshersteller involviert sind. Neben der Bestimmung der Zusammensetzung sowie der Treibstoffeigenschaften umfassen die Prüfverfahren Leistungstests wie Dauerversuche in Flugzeugtriebwerken. Alle neuen Treibstoffe müssen diesen Zertifizierungsprozess durchlaufen. Bei erfolgreichem Abschluss dieses Prozessstandards, erfolgt eine Aufnahme des Herstellungspfades und des Kraftstoffes in den Annex des ASTM-Standards D7566 [50].

Treibstoff-Zertifizierung nach ASTM D7566

Der ASTM-Standard D7566 ist die einzige globale Spezifikation für Flugturbinentreibstoff mit synthetischen Kohlenwasserstoffen. Durch diese werden die Zusammensetzung (einschließlich zulässiger Additive), Eigenschaften und auch der Herstellungsweg für die synthetischen Komponenten definiert. Sie wurde im Jahr 2009 durch das ASTM-Subkomitee für synthetische Flugturbinentreibstoffe veröffentlicht und gewährleistet die Kompatibilität der zugelassenen Treibstoffe mit allen Flugzeugen, unabhängig vom Typ, Alter, Triebwerk, etc. Die ASTM D7566 wird auf synthetische Mischungskomponenten angewandt, welche den Zertifizierungsprozess der ASTM D4054 erfolgreich durchlaufen haben. Die ASTM D7566 wurde in die in Großbritannien gültige Norm Defence Standard 91-091 (DEF STAN 91-091) aufgenommen und ist auch der Standard, nach der in Europa und Asien Treibstoffe für die Luftfahrt gekauft werden.

Derzeit enthält der Standard acht Anhänge. Dabei beschreibt ein Anhang jeweils eine genehmigte Methode zur Herstellung einer synthetischen Mischungskomponente, die konventionellem Düsentreibstoff (Jet A oder Jet A-1) zugesetzt werden darf und damit in

einer bis zu 50 %igen Mischung mit Jet A / Jet A-1 einem Treibstoff entspricht, der die Anforderungen der Standardspezifikation nach ASTM D1655 erfüllt. Jeder Anhang enthält dazu die Definition der zulässigen Rohstoffe, des Herstellungsprozesses, der Eigenschaften der Mischungskomponenten und der Mischungskriterien bzw. -anteile. Demzufolge sind Treibstoffe, welche die ASTM D7566 erfüllen, wie klassisches Jet A-1 gemäß der ASTM D1655 anzusehen [50].

3.1.2 Status der Zulassung von SAF

Die bislang vielversprechendsten Verfahren zur SAF-Herstellung sind der HEFA-Prozess sowie die Alcohol-to-Jet (AtJ) -Route. Der HEFA-Prozess basiert auf der Hydrierung von natürlichen Estern und Fettsäuren, wobei in der Anwendung überwiegend gebrauchte Speisefette und -öle eingesetzt werden. Für das AtJ-Verfahren werden kurzkettige Alkohole mit 2 bis 5 C-Atomen in einem mehrstufigen Verfahren¹⁸ zum SAF umgesetzt. Die Alkohole können dabei in biotechnologischen Prozessen gewonnen werden oder aus Kohlenhydraten und Lignocellulose sowie Synthesegas oder Industrieabgasen hergestellt werden. Seit Ende 2023 sind zwei unterschiedliche AtJ-Herstellungsverfahren zugelassen, welche sich hinsichtlich der Zusammensetzung des Produktes unterscheiden. Mit dem Methanol-to-Jet (MtJ) -Prozess könnte eine dritte Verfahrensvariante hinzukommen, wobei hierbei kein biogenes Material als Einsatzstoff dient, sondern dieses den PtL-Prozessen¹⁹ zuzurechnen ist.

Den HEFA- und AtJ-Verfahren ist gemein, dass es biogene Prozesse sind, d.h. sie basieren auf dem Einsatz von Biomasse. Da die Verwendung von Biomasse aufgrund der endlichen Verfügbarkeit die SAF-Produktion früher oder später limitiert, ist die Herstellung von SAF über den PtL-Prozess von immenser Bedeutung für die zukünftige Bereitstellung ausreichender SAF-Mengen. Beispielsweise rechnet die Luftfahrt-Organisation ATAG (Air Transport Action Group) damit, dass der Anteil von PtL-Kerosin ab 2030 immer stärker zunehmen wird und im Jahr 2050 ungefähr die Hälfte der SAF-Produktion abdecken kann [51]. Kern der PtL-Technologie ist das Fischer-Tropsch (FT) -Verfahren, welches, ähnlich wie

¹⁸ Dies umfasst die Dehydratisierung der Alkoholmoleküle, die Oligomerisierung und anschließende Hydrierung

¹⁹ Power-to-Liquid

der HEFA-Prozess, auch bereits im großtechnischen Maßstab bekannt ist. Die Herausforderung liegt hier gegenwärtig noch in der Kopplung aller notwendigen Prozessschritte, der Erzeugung ausreichender Mengen an grünem Wasserstoff aus der Elektrolyse (was sich v.a. in den Kosten widerspiegelt) sowie der effizienten Bereitstellung des Synthesegases, welches als Eduktstrom für den FT-Reaktor dient [49].

Eine Übersicht aller durch die ASTM genehmigten SAFs (einschließlich ihrer Herstellverfahren) zeigt Tabelle 2. Beachtet werden muss, dass jedes Herstellungsverfahren vor dem Hintergrund der bestehenden internationalen und nationalen Regularien zur Nachhaltigkeit zu betrachten ist (z.B. RED II etc.).

Von der Beimischungskomponente zu 100 % SAF

Die Übersicht der Herstellprozesse in Tabelle 2 zeigt auch, dass SAF bislang mit Jet A-1 (oder Jet A) gemischt werden müssen, um als Treibstoff eingesetzt zu werden. Der nach ASTM D7566 zulässige maximale Beimischungsanteil von SAF liegt derzeit bei 50 %. Wenn ein nach ASTM D7566 zugelassener Treibstoff mit Jet A-1 / Jet A gemischt wird, ist diese Mischung wie ein reiner Treibstoff nach ASTM D1655 anzusehen und einzusetzen [50]. Am Ende entsteht also immer das gleiche Produkt, unabhängig davon, welcher Herstellungspfad entsprechend der D7566 verfolgt wurde.

Ein SAF, welche zu 100 % eingesetzt werden darf, gibt es im Anhang der ASTM D7566 bislang nicht. Für eine Zulassung müsste die entsprechende Spezifikation angepasst werden. An dieser Stelle ist auch zu unterscheiden zwischen SAF mit und ohne Aromaten. Aromaten sind eine Stoffgruppe, welche die Bildung von Rußpartikeln bei der Verbrennung fördern. Die meisten Herstellverfahren führen zu Produkten, welche überwiegend paraffinisch sind, d.h. keine Aromaten enthalten und sich damit durch eine deutliche Minderung der Rußemissionen auszeichnen. Ein Mindestanteil von 8 %Vol Aromaten ist in der ASTM D7566 gegenwärtig noch eine Voraussetzung für SAF, was das Mischen von rein paraffinischen SAF mit Jet A-1 unumgänglich macht. Das Hauptargument hierfür ist immer noch das Quellverhalten von Dichtungen bei Kontakt mit einem aromatenhaltigen Treibstoff. Moderne Flugzeuge können allerdings nachweislich auch mit einem aromatenfreien SAF betrieben werden. Für die Nutzung reiner SAF, auch in älteren Flugzeugen, fehlt es v.a. an Langzeitversuchen und entsprechender Erfahrung, ob und, wenn notwendig, nach welcher Betriebszeit, ein Tausch von kritischen Bauteilen wie

Dichtungen oder Ventilen erfolgen sollte. Allerdings sind dies auch Bauteile, welche ohnehin bei regulären Wartungsintervallen geprüft und bei Bedarf getauscht werden (können) [38].

Obwohl es mit dem FT-SKA und dem AtJ-SKA (siehe Tabelle 2) bereits synthetische Treibstoffe gibt, die auch synthetische Aromaten enthalten, sind diese nicht für den Einsatz als 100 % Drop-In-Treibstoff zugelassen, sondern müssen ebenfalls zu 50 % mit Jet A-1 gemischt werden. Die Minderung der Rußpartikelemissionen wäre bei der Nutzung eines 100 % Drop-In-Treibstoffes mit Aromaten zwar weniger stark ausgeprägt als bei einem 100 % synthetischen Treibstoff ohne Aromaten, jedoch ähnlich oder sogar besser (je nach Anteil und Art der Aromaten) als mit einer 50 %-Mischung [38].

Als großen Schritt in Richtung Zertifizierung eines 100 % SAF wird die 2023 genehmigte Spezifikation des AtJ-SKA mit dem Anhang 8 der ASTM D7566 betrachtet. Dieser Treibstoff wird aus dem Alkohol-to-Jet-Verfahren gewonnen und ist das erste rein biogene synthetische Kerosin, welches Aromaten enthält (für die Herstellung des FT-SKA wurde bislang v.a. Kohle und Erdgas verwendet, weswegen es hier nicht zu den SAF gezählt werden darf). Das Verfahren wurde von der Firma Swedish Biofuels eingereicht und umfasst auch die Produktion von Aromaten. Der Anteil an Aromaten lässt sich laut Hersteller hier flexibel variieren, sodass sich das AtJ-SKA in seiner Zusammensetzung und seinen Eigenschaften nicht von fossilem Kerosin unterscheidet [52].

Bestrebungen um 100 % synthetische Treibstoffe herzustellen, die nicht mehr gemischt werden müssen, gibt es zahlreiche. In den letzten zwei Jahren wurde viel Arbeit in Bezug auf die Demonstration von 100 % synthetischen Kraftstoffen geleistet und eine D4054-Methode entwickelt, die dies ermöglicht. So schätzt die CAAFI, dass es möglich sei, kurzfristig eine Änderung der Spezifikation D7566 zu verabschieden. [50]

ASTM Referenz	Umwandlungsprozess	Abkürzung	Mögliche Rohstoffe	Max. Mischverhältnis
ASTM D7566 Annex A1	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene	FT	Kohle, Erdgas, Biomasse	50 %
ASTM D7566 Annex A2	Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids	HEFA	Pflanzenöl, tierische Fette, Altspeiseöl	50 %
ASTM D7566 Annex A3	Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars	SIP	Biomasse aus der Zuckerproduktion	10 %
ASTM D7566 Annex A4	Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources	FT-SKA	Kohle, Erdgas, Biomasse	50 %
ASTM D7566 Annex A5	Alcohol to jet synthetic paraffinic kerosene	ATJ-SPK	Ethanol, Isobutanol und Isobuten aus Biomasse	50 %
ASTM D7566 Annex A6	Catalytic hydrothermolysis jet fuel	CHJ	Pflanzenöl, tierische Fette, Altspeiseöl	50 %
ASTM D7566 Annex A7	Synthesized paraffinic kerosene from hadrocarbon – hydroprocessed esters and fatty acids	HC-HEFA-SPK	Algen	10 %
ASTM D7566 Annex A8	Synthetic paraffinic kerosene with aromatics	ATJ-SKA	C2-C5-Alkohole aus Biomasse	
ASTM D1655 Annex A1	co-hydroprocessing of esters and fatty acids in a conventional petroleum refinery		Pflanzenöl, tierische Fette, Altspeiseöle aus mit Erdöl verarbeiteter Biomasse	5 %
ASTM D1655 Annex A1	co-hydroprocessing of Fischer-Tropsch hydrocarbons in a conventional petroleum refinery		Gemeinsam mit Erdöl verarbeitete Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe	5 %
ASTM D1655 Annex A1	Co-Processing of HEFA	Hydroprocessed esters/fatty acids from biomass		10 %

Tabelle 2: Nach ASTM zertifizierte Herstellverfahren für synthetische Treibstoffe [53]

Co-Processing: Mitverarbeitung alternativer Rohstoffe im konventionellen

Raffinerieprozess

Neben den acht SAF-Verfahren, die aktuell im Annex der D7566 gelistet sind, gibt es drei weitere Optionen zur Treibstoff-Produktion, bei denen alternative Rohstoffe zum Einsatz kommen. Diese sind im Anhang A1 der ASTM D1655 gelistet und betreffen das so genannte Co-Processing. Nach diesem Verfahren können beispielsweise Pflanzenöle, tierische Fette oder Fischer-Tropsch basierte Kohlenwasserstoffe in einer konventionellen Erdölraffinerie im Prozess der Treibstoff-Herstellung beigemischt und mitverarbeitet werden [53].

Beim Co-Hydroprocessing von Estern und Fettsäuren dürfen pflanzliche Öle, tierische Fette oder gebrauchte Speiseöle mit einem maximalen Anteil von 5 % beigemischt werden. Die gleiche Beimischungsgrenze von 5 % gilt für das Co-Hydroprocessing von Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffen, die gemeinsam mit Erdöl verarbeitet werden. Das HEFA Co-Processing darf hingegen mit einem maximalen Mischungsanteil von 10 % erfolgen. Eine Übersicht der Prozesse zeigt Tabelle 2. Aktuell gibt es Bestrebungen, den maximalen Beimischungsanteil von 5 % auf 30 % zu erhöhen. Des Weiteren wird ein Bewertungsschema entwickelt, um die Zulassung neuer Rohstoffe für das Co-Processing zu erleichtern und getrennt vom Zulassungsprozess nach der ASTM D4054 bewerten zu können [53].

Zudem hat der ASTM-Unterausschuss, der sich mit der Spezifikation von Düsentreibstoff befasst, über einen Zusatz zu einem Co-Processing-Anhang (WK78597) in D1655 abgestimmt. Derzeit ist das Co-Processing von nicht-konventionellen Rohstoffen nur möglich für Triglyceride, Fettsäuren und Fettsäureester sowie Fischer-Tropsch-Rohprodukte (gemäß Anhang A1 der ASTM D1655). Mit der Mitverarbeitung von weiteren Rohstoffen würde der Anteil an erneuerbaren Komponenten im Flugzeugtreibstoff weiter erhöht werden können [50].

Herstellungsverfahren in der Entwicklung: Power-to-Liquid

Das Potenzial von Power-to-Liquid (PtL) -Treibstoffen liegt vor allem in ihrer hohen Energiedichte, der CO₂-neutralen Verbrennung, der Möglichkeit einer deutlichen Reduktion der Schadstoffemissionen sowie ihrer Drop-In-Fähigkeit in die bestehende Infrastruktur. Hier soll im Folgenden nur ein kurzer Überblick zu der Herstellung via PtL-Verfahren

gegeben werden. Für eine detaillierte Darstellung und Bestandsaufnahme der einzelnen Syntheseverfahren und Prozessschritte sei auf den Innovationsschwerpunkt "Produktion" im Projekt InnoFuels verwiesen.

Die Herstellung von PtL-Produkten basiert grundlegend auf der Herstellung von flüssigen Kraft- und/oder Treibstoffen aus Wasserstoff (H_2), welcher in einer Elektrolyse unter Verwendung erneuerbarer Energien erzeugt wurde. Unabhängig vom Endprodukt sind die Verfahrensschritte bei allen Varianten eines PtL-Prozesses ähnlich:

1. Bereitstellung von grünem H_2 und grünem CO_2 (d.h. Anforderungen an die RED II müssen erfüllt sein)
2. Erzeugung des Synthesegases ($H_2 + CO$) mittels umgekehrter Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS)
3. Umsetzung des Synthesegases via FT-Prozess oder über Methanol-Route
4. Aufarbeitung des Rohproduktes zu einem drop-in-fähigen Kraft- oder Treibstoff

Die einzelnen Prozessschritte sind grundlegend bekannt, allerdings noch auf sehr unterschiedlichen TRL-Niveaus. Vor allem der FT-Prozess, die Aufbereitungsverfahren sowie Teile der Methanol-Route (Herstellung sogenannter Olefine als Zwischenprodukt) sind bereits industrielle Standards und in großtechnischen Prozessen umgesetzt. Andere Prozessschritte sind bezüglich ihrer technologischen Reife und damit auch hinsichtlich ihrer Skalierung sowie Effizienz noch nicht so weit entwickelt. Dies gilt v.a. für die Gewinnung von CO_2 aus der Luft (DAC – Direct Air Capture), dem RWGS-Prozess und der Umsetzung von Olefinen aus der Methanol-Route zu langkettigen Kohlenwasserstoffen. Aber auch bei der Elektrolyse besteht noch Weiterentwicklungsbedarf, v.a. im Hinblick auf die Ausbeute an H_2 im Vergleich zur aufgewendeten Energie bzw. dem Strombedarf.

Abgesehen von der fehlenden Hochskalierung einzelner Prozessschritte mangelt es derzeit auch noch an der Demonstration der kompletten PtL-Prozesskette von der H_2 - und CO_2 -Bereitstellung bis zum fertigen Produkt. Einzelne Testanlagen im Technikums- und Demomaßstab zur Herstellung von insbesondere einem FT-Rohprodukt oder MtJ sind zwar bekannt. Aber bislang existiert keine Anlage, die über einen längeren Zeitraum kontinuierlich ein PtL-Produkt im mindestens semiindustriellen Maßstab erzeugt hat.

In der ASTM-Zulassung befindliche Verfahren

Viele neue Verfahren für die Treibstoff-Herstellung aus nicht-konventionellen Rohstoffen befinden sich aktuell in der Prüfung. Motiviert werden diese Bestrebungen beispielsweise darin, geringere Produktionskosten zu realisieren, günstigere und/oder kontinuierlich verfügbare Rohstoffe zu verwenden oder vielversprechende Rohstoffe zu betrachten, für die aktuell noch keine effektiven Umwandlungsprozesse existieren [54].

Eine Übersicht zu Herstellungspfaden, die sich aktuell in der Entwicklung befinden, zeigt Tabelle 3.

Umwandlungsprozess in Evaluierung	Abkürzung	Leitende Entwickler
Synthesized aromatic kerosene	SAK	Virent
Integrated hydrolysis and hydroconversion	IH2	Shell
Single Reactor HEFA (Drop-in Liquid Sustainable Aviation and Automotive Fuel)	DOLSAAF	Indian CSIR-IIP
Pyrolysis of non-recyclable plastics	ReOIL	OMV
Co-processing of pyrolysis oil from used tires	TPO	Philips 66
Methanol to jet	MTJ	ExxonMobil
Increase in fatty acid/ester co-processing from 5% to 30%		
HEFA with higher cycloparaffins		Revo
Biomass pyrolysis		Alder
Biomass/Waste pyrolysis		Green Lizard
Cycloalkanes from Ethanol		Vertimass

Tabelle 3: Herstellverfahren für synthetische Treibstoffe im ASTM Evaluationsverfahren [53]

Zeit und Kosten im Zulassungsverfahren

Die ASTM-Zertifizierung ist ein kosten- und zeitaufwändiges Verfahren. Die Prüfung von synthetischen Kraftstoffen dauert durch den mehrstufigen Ansatz der umfassenden Datenerfassung und der Überprüfungsprozesse gemäß D4054 mehrere Jahre. Um den Zulassungsprozess für synthetische Kraftstoffe, die eine ähnliche Zusammensetzung und ähnliche Eigenschaften wie herkömmlicher Düsenkraftstoff haben, zu beschleunigen, hat die ASTM gemeinsam mit dem University of Dayton Research Institute (UDRI) und der Federal Aviation Authority (FAA) ein "Fast Track"-Programm entwickelt. Ziel des Programms ist es, das Verfahren auf die Dauer von nur ein bis zwei Jahre zu reduzieren [50].

3.2 REACH-Registrierung auf europäischer Ebene

Neben der internationalen ASTM-Zertifizierung ist für das Inverkehrbringen von Flugkraftstoffen auf europäischer Ebene die Registrierung durch die Europäische Chemikalienagentur ECHA von Bedeutung. Die EU-Verordnung REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) regelt, dass Chemikalien, die in Verkehr gebracht werden, sicher verwendet werden. Dabei liegt die Verantwortung bei den Herstellern, Importeuren und nachgeschalteten Anwendern. Diese müssen bei der verpflichtenden Registrierung umfangreiche Daten und eine entsprechende Risikobewertung vorlegen. Ist dies nicht gegeben, gelangen die Chemikalien gemäß dem Grundsatz „no data – no market“ nicht auf den europäischen Markt [55].

Die Anforderungen der Reach gelten für neue Stoffe, Gemische sowie für bekannte Stoffe in neuen Anwendungen bzw. Herstellungspfaden, was demzufolge auch die synthetischen Treibstoffe betrifft. Von der Registrierungspflicht ausgenommen sind Stoffe in Mengen von weniger als einer Tonne pro Jahr. Werden diese für die wissenschaftliche Forschung und Entwicklung eingesetzt sind sie außerdem von den Zulassungen und Beschränkungen befreit [49].

4 Zusammenfassung

Das Anwendungsfeld von SAF muss aufgrund des internationalen Charakters der Luftfahrt immer aus einem globalen Blickwinkel betrachtet werden. Durch das Engagement in internationalen Luftfahrt-Organisationen, wie beispielsweise der ICAO und der IATA sind deren Vorgaben und Leitlinien zur Herstellung und dem Einsatz von SAF auch für Deutschland bzw. deutsche Luftfahrtgesellschaften von Bedeutung. Zudem werden die relevanten Industriestandards zur Zertifizierung der Herstellprozesse und Luftfahrt-Treibstoffe ebenfalls auf internationaler Ebene gesetzt, wobei die ASTM als zentrale Institution fungiert. ASTM-zertifizierte Treibstoffe dürfen auch direkt in Deutschland eingesetzt werden. Auf europäischer Ebene müssen neue Treibstoffe zusätzlich bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) registriert werden, um in Verkehr gebracht werden zu dürfen.

Umfangreich ist auf europäischer Ebene die Gesetzeslage zu den Kriterien der nachhaltigen Produktion von SAF. Diese finden sich in mehreren luftfahrt- und klimarelevanten Richtlinien und Verordnungen, die von den EU-Staaten gemeinsam im Rahmen des European Green Deal verabschiedet wurden und darauf abzielen, die Verwendung von nachhaltigen Treibstoffen im Flugverkehr zu erhöhen. Durch feste Quoten soll der Einsatz dieser Treibstoffe forciert werden. Kernelement ist dabei die Verordnung ReFuelEU Aviation, in der unter anderem definiert wird, welche Treibstoffe zur Erfüllung der Quoten zugelassen werden. Die entsprechenden Nachhaltigkeitskriterien werden in der Renewable Energy Directive (RED) festgelegt.

Neben den umfassenden regulatorischen Instrumenten der EU, gibt es in Deutschland noch eine Reihe weiterer legislativer und strategischer Elemente in Bezug auf die Herstellung und den Einsatz von SAF. Die Umsetzung der RED-Verordnung in nationales Recht ist im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) abgebildet. Nationale Strategien existieren beispielsweise für Wasserstoff, welcher als Grundelement zur SAF-Herstellung nach dem PtL-Verfahren von elementarer Bedeutung für den Markthochlauf ist. Für Biomasse befindet sich eine nationale Strategie noch im Entwurfsstadium.

Mit dem derzeit geltenden Koalitionsvertrag ist die Förderung alternativer Treibstoffe auch im aktuellen Regierungsprogramm verankert, doch jüngste Entwicklungen im Bundeshaushalt haben zu entsprechenden Kürzungen der Förderbudgets geführt. Grundsätzlich soll das Programm „Klimaneutrales Fliegen“ fest im Klima- und

Transformationsfonds (KTF) bestehen bleiben. Ein erfolgreicher und vor allem schneller Markthochlauf wird allerdings nur mit entsprechenden politischen Maßnahmen zur Finanzierung und Akzeptanzbildung gelingen. Darüber hinaus hat die Zusammenfassung existierender Rahmenbedingungen (siehe auch Tabelle 4) zum Markthochlauf von SAF aufgezeigt, dass regulatorische Maßnahmen, auch Hemmnisse bergen können. Diese gilt es, im nächsten Schritt zu identifizieren und in ihrer Bedeutung zu analysieren, was Gegenstand des Folgeberichtes im Anwendungsfeld Luftfahrt im Rahmen von InnoFuels sein wird.

	International	Europäische Union	Deutschland	USA
THG-Reduktionsziele	<p>Pariser Abkommen 2015 Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf deutlich unter 2 °C, wenn möglich sogar unter 1,5 °C ggü. dem vorindustriellen Niveau</p> <p>Net Zero Carbon 2050 Resolution (IATA, 2021) Netto-Null-CO₂-Emissionen ab 2050</p> <p>LTAG (ICAO, 2022) Netto-Null-CO₂-Emissionen für die internationale Luftfahrt bis 2050 (keine spezifischen Reduktionsziele für einzelne Staaten)</p> <p>Globales Rahmenwerk der ICAO 2023 Reduktion der CO₂-Emissionen in der int. Luftfahrt um 5 % bis 2030</p>	<p>European Green Deal Klimaneutralität in der EU bis 2050</p> <p>Fit-for-55-Paket Reduktion der THG-Emissionen bis 2030 um 55 % ggü. 1990</p>	<p>Bundes-Klimaschutzgesetz* Schrittweise Minderung der THG-Emissionen im Vergleich zu 1990</p> <ul style="list-style-type: none"> - um min. 65 % bis 2030 - um min. 88 % bis 2040 - Netto-THG-Neutralität bis 2045 - Nach 2050 negative THG-Emissionen 	<p>Inflation Reduction Act Reduktion der CO₂-Emissionen bis 2030 um etwa 40 % im Vergleich zu 2005</p>
Maßnahmen zur Zielerreichung in Bezug auf SAF	<p>Globales Rahmenwerk ICAO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vision 2050 für nachhaltige Treibstoffe - harmonisierte regulatorische Grundlagen - unterstützende Umsetzungsinitiativen - verbesserter Zugang zu Finanzmitteln - SAF Ziele und Richtlinien - Unterstützung von Mitgliedsstaaten - Informationen, Best Practice - Programm ACT-SAF 	<p>Verordnung ReFuelEU Aviation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erhöhung des Einsatzes von SAF im Flugverkehr - Vorgabe Beimischungsquoten bzw. Pönalen bei Nichteinhaltung - Definition zugelassener Treibstoffe zur Quotenerfüllung - Bezug auf RED-Kriterien 	<p>Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) PtL- Beimischungsquote Flugverkehr:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0,5 % bis 2026 - 1 % bis 2028 - 2 % bis 2030 - Pönale <p>Nationale Wasserstoffstrategie (NWS)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nat. Produktionsziel für 2030: 10 GW Wasserstoff - Wasserstoffbedarf bis 2030 ca. 95-130 TWh - Importquote 50-70 % (45-90 TWh) - Einsatz von PtL-Treibstoffen 	<p>Renewable Fuel Standard 2 (RFS2)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mengenverpflichtungen für in den USA ansässige Raffinerien, Mischbetriebe und Importeure hinsichtlich erneuerbarer Kraftstoffe <p>FAST-Förderprogramm</p> <ul style="list-style-type: none"> - FAST-SAF und FAST-Tech - Ziel: Beschleunigung der Produktion und Nutzung von SAF

	4-Säulen Strategie der IATA <ul style="list-style-type: none"> - Verwendung von SAF sowie Nutzung von Kompensationsmaßnahmen als zwei von vier Säulen 		Nationale Biomassestrategie (NABIS) <ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung von Rahmenbedingungen mit Lenkungswirkung - Aktuell Entwurfsfassung PtL-Roadmap der Bundesregierung <ul style="list-style-type: none"> - Zielsetzung: bis 2030 min. 200.000 Tonnen PtL-Kerosin für den deutschen Luftverkehr 	SAF Credit <ul style="list-style-type: none"> - Steuergutschrift für den Verkauf qualifizierter Treibstoffmischungen mit nachhaltigem Flugkraftstoff
Festlegung von Nachhaltigkeitsstandards	Anrechnungskriterien für CORSIA Eligible Fuels (CEF) <ul style="list-style-type: none"> - Umweltstandards im Rahmen von CORSIA (ICAO) 	Renewable Energy Directive (RED) + Delegierte Rechtsakte <ul style="list-style-type: none"> - EE Richtlinie - Nachhaltigkeitskriterien - Anforderungen an die SAF-Produktion EU Taxonomie-Verordnung Definition ökologisch nachhaltiger Wirtschaftstätigkeiten (seit 2023 unter best. Bedingungen um Operationen im Luftverkehr erweitert)	Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) Umsetzung der RED von EU-Ebene in nationales Recht	Renewable Fuel Standard 2 (RFS2) <ul style="list-style-type: none"> - Nachhaltigkeitsstandards für erneuerbare Kraftstoffe - Vorgaben für Beimischung - RINs als handelbare Zertifikate
Klimakompensationssysteme* * freiwillige CO ₂ -Ausgleichsmöglichkeiten, die sich an Flugpassagiere richten, werden hier nicht berücksichtigt	CORSIA (ICAO) <ul style="list-style-type: none"> - Betrifft alle zivilen, internationalen Flüge, die zwei Teilnehmerstaaten verbinden - Out-of-Sector-Maßnahme - Anrechnung von SAF-Nutzung möglich 	Europäischer Emissionshandel (EU-EHS) <ul style="list-style-type: none"> - Betrifft alle Flüge, die innerhalb des EWR starten oder landen - Cap-and-Trade-Prinzip - Emissionsberechtigungen für die Verwendung von SAF („SAF Allowances“) 		
Für SAF erforderliche Industriestandards	Prozessstandard ASTM D4054 für neue synthetische Treibstoffe Treibstoff-Zertifizierung nach ASTM D7566 jeweils mit weltweiter Gültigkeit	ECHA Registrierung gemäß EU-Verordnung REACH	Aufnahme in BImSchV nicht erforderlich durch ASTM-Standards	Siehe ASTM Standards

Tabelle 4: Zusammenfassung der Rahmenbedingungen zum SAF-Markthochlauf

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ACT	Assistance, Capacity-building and Training
ASCENT	Aviation Sustainability Center
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATAG	Air Transport Action Group
AtJ	Alcohol-to-Jet
BDL	Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V.
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr (ehemals BMVI)
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (ehemals BMU)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (ehemals BMWi)
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CAA	Clean Air Act
CAAFI	Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCS	Carbon Capture and Storage
CEF	CORSIA Eligible Fuel
CLEEN	Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise Program
CO	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ eq/MJ	CO ₂ -Equivalent pro Megajoule

CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
DAC	Direct Air Capture
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
ECHA	European Chemical Agency
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union
EU-EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
FAA	Federal Aviation Authority
FAST	Fueling Aviation's Sustainable Transition
FDP	Freie demokratische Partei
FT	Fischer-Tropsch
GW	Gigawatt
H₂	Wasserstoff
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
IRA	Inflation Reduction Act
IRS	Internal Revenue Service
KTF	Klima- und Transformationsfonds
LCAF	Low Carbon Aviation Fuels
LFR	Linearer Reduktionsfaktor
LTAG	Long-Term Aspirational Goal
Mio.	Millionen
MRV	Monitoring, Reporting and Verification
MtJ	Methanol-to-Jet

NABIS	Nationalen Biomassestrategie
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
PtL	Power to Liquid
PtX	Power-to-X
RCF	Recycled carbon fuels
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals Regulation
RED	Renewable Energy Directive
RFS2	Renewable Fuel Standard 2
RIN	Renewable Identification Number
RNFBO	Renewable fuels of non-biological origin
RWGS	Reverse Water Gas Shift reaction (umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion)
SAF	Sustainable Aviation Fuels
SCS	Sustainability Certification Schemes
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level
TWh	Terawattstunden
UDRI	University of Dayton Research Institute
UN	United Nations
USD	US-Dollar

Quellenverzeichnis

- [1] UBA, „Übereinkommen von Paris,“ 31 Januar 2024. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris#ziele-des-ubereinkommens-von-paris-uvp>. [Zugriff am 20 Februar 2024].
- [2] IATA, „Net zero 2050: sustainable aviation fuels,“ Dezember 2023. [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/>.
- [3] 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*, 01 01 2021.
- [4] CENA, „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.
- [5] E. C. - C. o. t. E. Union, „RefueLEU aviation initiative: Council adopts new law to decarbonise the aviation sector,“ 23 Oktober 2023. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/09/refueleu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>. [Zugriff am 5 März 2024].
- [6] BMDV, „Internationale Zusammenarbeit - Die Rolle des BMDV im internationalen Luftverkehr,“ 5 Juli 2016. [Online]. Available: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/internationale-zusammenarbeit.html#:~:text=Hauptaufgabe%20der%20ICAO%20ist%20die,den%20neun%20Weltregionen%20des%20Luftverkehrs](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/internationale-zusammenarbeit.html#:~:text=Hauptaufgabe%20der%20ICAO%20ist%20die,den%20neun%20Weltregionen%20des%20Luftverkehrs.). [Zugriff am 16 April 2024].

- [7] ICAO, „Declaration of the second conference on aviation and alternative fuels (CAAF/2),“ Oktober 2017. [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/pages/ICAO-Vision.aspx>. [Zugriff am 27 Februar 2024].
- [8] IATA, „Current Airline Members,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/about/members/airline-list/?search=®ion=Europe&ordering=Alphabetical>. [Zugriff am 12 März 2024].
- [9] IATA, „IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-r-1-2015.pdf>. [Zugriff am 14 März 2024].
- [10] ICAO, „ICAO Vision - DECLARATION OF THE SECOND CONFERENCE ON AVIATION AND ALTERNATIVE FUELS (CAAF/2),“ 2017. [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/pages/ICAO-Vision.aspx>. [Zugriff am 08 05 2024].
- [11] ICAO, „Sustainable Aviation Fuel (SAF),“ 2024. [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF.aspx>. [Zugriff am 27 Februar 2024].
- [12] ICAO, „Long term global aspirational goal (LTAG) for international aviation,“ [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx>. [Zugriff am 13 März 2024].
- [13] ICAO, „States adopt net-zero 2050 global aspirational goal for international flight operations,“ 7 Oktober 2022. [Online]. Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>. [Zugriff am 26 Februar 2024].
- [14] ICAO, „ICAO Assistance, Capacity-building and Training for Sustainable Aviation Fuels (ICAO ACT-SAF),“ [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/act-saf.aspx>. [Zugriff am 16 April 2024].

- [15] Klimaschutz Portal, „CORSA: Weltweit einzigartige CO₂-Kompensation,“ [Online]. Available: <https://www.klimaschutz-portal.aero/co2-kompensieren/corsia/>. [Zugriff am 16 April 2024].
- [16] 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 14 März 2024].
- [17] ICAO, „Resolution A39-3: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Global Market-based Measure (MBM) scheme,“ [Online]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Resolution_A39_3.pdf. [Zugriff am 08 05 2024].
- [18] IATA, „Net zero carbon 2050 resolution,“ 12 2023. [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---iata-net-zero-resolution/>. [Zugriff am 08 05 2024].
- [19] R. Schwartzman, „EU ETS reform destabilizes international consensus for aviation carbon reductions,“ 18 04 2023. [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/about/worldwide/europe/blog/eu-ets-reform-destabilizes-international-consensus-for-aviation-carbon-reductions/>. [Zugriff am 08 05 2024].
- [20] IATA, „SAF Deployment (Policy),“ 2023. [Online]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-policy-2023.pdf>. [Zugriff am 08 05 2024].
- [21] Bundesfinanzministerium, „US-Inflation Reduction Act (IRA): Implikationen für Europa,“ Mai 2023. [Online]. Available: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Ministerium/Wissenschaftlicher-Beirat/Gutachten/us-inflation-reduction-act.pdf?__blob=publicationFile&v=6. [Zugriff am 12 März 2024].

- [22] J. Hileman und A. Orton, „IRA Section 40007 FAST-SAF and FAST-Tech Grant Program,“ 14 Dezember 2022. [Online]. Available: <https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2022-12/IRA-Section-40007-FAST-Program-Briefing.pdf>. [Zugriff am 12 März 2024].
- [23] FAA, „Fueling Aviation’s Sustainable Transition (FAST) Grants,“ 4 Dezember 2023. [Online]. Available: <https://www.faa.gov/general/fueling-aviations-sustainable-transition-fast-grants>. [Zugriff am 12 März 2024].
- [24] IRS, „Treasury, IRS issue guidance on Sustainable Aviation Fuel Credit,“ 15 Dezember 2023. [Online]. Available: <https://www.irs.gov/newsroom/treasury-irs-issue-guidance-on-sustainable-aviation-fuel-credit>. [Zugriff am 12 März 2024].
- [25] ICCT, „U.S. EPA Renewable Fuel Standard 2,“ 2 April 2010. [Online]. Available: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/policyupdate6_rfs2.pdf. [Zugriff am 15 April 2024].
- [26] E. Commission, „The European Green Deal - Delivering the European Green Deal,“ [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en#email. [Zugriff am 7 März 2024].
- [27] E. Parliament, „ReFuelEU Aviation initiative: Sustainable aviation fuels and the 'fit for 55' package,“ 28 November 2023. [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2022\)698900#:~:text=The%20new%20regulation%20is%20a%20part%20of%20a,a%20level%20playing%20field%20for%20sustainable%20air%20transport..](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)698900#:~:text=The%20new%20regulation%20is%20a%20part%20of%20a,a%20level%20playing%20field%20for%20sustainable%20air%20transport..) [Zugriff am 7 März 2024].
- [28] EU Parlament, „Verordnung (EU) 2023/2405,“ 18 Oktober 2023. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302405. [Zugriff am 29 Mai 2024].

- [29] NOW GmbH, „Factsheet ReFuelEU-Aviation-Regulation,“ Mai 2024. [Online]. Available: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/11/NOW-Factsheet_ReFuelEU-Aviation-Regulation.pdf. [Zugriff am 3 Juni 2024].
- [30] NOW GmbH, „Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (RED III),“ April 2024. [Online]. Available: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW-Factsheet_REDIII.pdf. [Zugriff am 15 05 2024].
- [31] E. R. / R. d. E. Union, „Fit für 55“: Reform des EU-Emissionshandelssystems,“ 27 Januar 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-eu-emissions-trading-system/>. [Zugriff am 6 Mai 2024].
- [32] Umweltbundesamt, „Der Europäische Emissionshandel,“ 23 November 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#luftverkehr-im-emissionshandel->. [Zugriff am 6 Mai 2024].
- [33] E. Union, „REGULATION (EU) 2020/852 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088,“ 22 Juni 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852&from=EN>. [Zugriff am 7 März 2024].
- [34] R. d. E. Union, „Interinstitutionelles Dossier: 2018/0178 (COD),“ 1 April 2020. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CONSIL:ST_5639_2020_INIT. [Zugriff am 7 März 2024].
- [35] European Commission, „Sustainable finance package,“ 13 06 2023. [Online]. Available: https://finance.ec.europa.eu/publications/sustainable-finance-package-2023_en. [Zugriff am 15 05 2024].

- [36] Bundesministerium der Justiz, „Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG),“ 12 Dezember 2019. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>. [Zugriff am 4 Juni 2024].
- [37] Bundesministerium der Justiz, „Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG),“ [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/>. [Zugriff am 17 April 2024].
- [38] Verbundvorhaben BEniVer, „Roadmap für strombasierte Kraftstoffe,“ November 2023. [Online]. Available: <https://www.energiesystemforschung.de/forschen/projekte/beniver-begleitforschung>. [Zugriff am 18 April 2024].
- [39] Agora Verkehrswende, „E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit. Was strombasierte synthetische Kraftstoffe für die Energiewende im Verkehr leisten können – und was nicht.,“ 2023.
- [40] M. Braun, W. Grimme und K. Oesingmann, „Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing,“ *Journal of Air Transport Management*, Bd. 117, Nr. 102580, 2024.
- [41] Bundesregierung, „Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/bregde/aktuelles/koalitionsvertrag-2021-1990800>. [Zugriff am 17 April 2024].
- [42] Deutscher Bundestag, „Karlsruhe: Umwidmung von Corona-Mitteln in Klimafonds nichtig,“ 15 11 2023. [Online]. Available: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2023/kw46-verfassungsgericht-haushalt-2021-977776#:~:text=Das%20Bundesverfassungsgericht%20hatte%20den%20zweiten,%f%C3%BCr%20verfassungswidrig%20und%20nichtig%20erkl%C3%A4rt..> [Zugriff am 13 05 2024].

- [43] Bundesrat, „Bundesrat kompakt,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.bundesrat.de/DE/plenum/bundesrat-kompakt/24/1042/05.html>. [Zugriff am 13 05 2024].
- [44] Bundesfinanzministerium, „Luftverkehrssteuer,“ 2024. [Online]. Available: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Glossareintraege/L/001_Luftverkehrsteuer.html?view=renderHelp. [Zugriff am 13 05 2024].
- [45] BMEL, „Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS),“ 28 September 2022. [Online]. Available: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/eckpunkte-nationale-biomassestrategie-nabis.pdf?__blob=publicationFile&v=4. [Zugriff am 17 April 2024].
- [46] BMWi, „Nationale Wasserstoffstrategie,“ Juni 2020. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=11. [Zugriff am 17 April 2024].
- [47] BMWK, „Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie,“ Juli 2023. [Online]. Available: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1. [Zugriff am 17 April 2024].
- [48] Bundesregierung, „PtL-Roadmap,“ April 2021. [Online]. Available: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile. [Zugriff am 17 April 2024].
- [49] J. Artz und P. Ruff, „Normkonformität und Materialverträglichkeit alternativer Kraftstoffe,“ Juni 2023. [Online]. Available: https://dechema.de/normakraft/_/2023_NormAKraft%20Fact%20Sheets.pdf. [Zugriff am 16 April 2024].

- [50] K. Hunt, „Standardization News,“ ASTM International, Juli 2023. [Online]. Available: <https://sn.astm.org/features/fueling-future-aviation-ja23.html>. [Zugriff am 3 April 2024].
- [51] ATAG, „Waypoint 2050 - Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century.,“ September 2021. [Online]. Available: https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf. [Zugriff am 5 April 2024].
- [52] Swedish Biofuels, „ASTM decision brings 100% SAF certification within reach,“ 8 August 2023. [Online]. Available: <https://swedishbiofuels.se/news/astm-decision-brings-100-saf-certification-within-reach>. [Zugriff am 16 Juni 2024].
- [53] ICAO, „Conversion processes,“ [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>. [Zugriff am 3 April 2024].
- [54] S. Csonka, K. C. Lewis und M. Rumizen, „ICAO: New Sustainable Aviation Fuels (SAF) technology pathways under development,“ 2022. [Online]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art49.pdf. [Zugriff am 22 März 2024].
- [55] UBA, „Chemikalien / REACH,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/reach-chemikalien-reach>. [Zugriff am 8 April 2024].
- [56] FAA, Washington State University, Massachusetts Institute of Technology, „ASCENT – the Aviation Sustainability Center,“ [Online]. Available: <https://ascent.aero/>. [Zugriff am 12 März 2024].
- [57] CAAFI, „About CAAFI®,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.caafi.org/about/caafi.html>. [Zugriff am 12 März 2024].

- [58] FAA, „Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise (CLEEN) Program,“ [Online]. Available: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/eee/technology_saf_operations/cleen. [Zugriff am 12 März 2024].
- [59] Umweltbundesamt, „Ausrichtung des EU-ETS-1 auf das neue EU-Klimaschutzziel,“ 16 Oktober 2023. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_cap_msr_v2.pdf. [Zugriff am 3 Mai 2024].
- [60] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „Roadmap reFuels für Baden-Württemberg,“ Stuttgart, 2022.
- [61] ICAO, „Lower Carbon Aviation Fuels,“ [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LCAF.aspx>. [Zugriff am 08 05 2024].
- [62] BMBF, „Wissenswertes zu Wasserstoff,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/wissenswertes>. [Zugriff am 13 05 2024].