



# Sustainable Aviation Fuels: Erfolgsfaktoren für die Defossilierung des Luftverkehrs

■ ■ ■  
The better the question.  
The better the answer.  
The better the world works.



Shape the future  
with confidence

# Vor

## Autoren

**Daniel Eisenhuth**

Partner  
EY Strategy and Transactions GmbH  
+ 49 160 939 25893  
daniel.eisenhuth@de.ey.com

**Dr. Viktoriia Betina**

Senior Managerin  
EY Strategy and Transactions GmbH  
+ 49 160 939 10431  
viktoriia.betina@de.ey.com

*Federführende Bearbeitung  
in Kapitel 1.1 und Kapitel 1.2  
Mitarbeit an Kapitel 6.1,  
insbesondere zum Thema bio-SAF*

**Dr. Axel Kraft**

Bio-SAF-Experte  
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
+ 49 172 837 2815  
axel.kraft@umsicht.fraunhofer.de

*Federführende Bearbeitung  
in Kapitel 1.1*

**Dr. Robert Daschner**

Abteilungsleiter Advanced Carbon Conversion Technologies  
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg  
+ 49 9661 8155-410  
robert.daschner@umsicht.fraunhofer.de

*Federführende Bearbeitung  
in Kapitel 1.1*

**Dr. Arne Roth**

Abteilungsleiter Nachhaltige katalytische Prozesse  
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Institutsteil Straubing  
+ 49 9421 9380-1030  
arne.roth@igb.fraunhofer.de

Diese Studie wurde in Zusammenarbeit  
mit der Deutschen Energie-Agentur (dena),  
Matteo Micheli, durchgeführt.

Stand der im Paper verwendeten Daten: Januar 2025

# wort

## Luftfahrt vor Paradigmenwechsel: Sustainable Aviation Fuels als Grundlage für eine nachhaltigere Zukunft

Willkommen zu unserer gemeinsam von EY und den Fraunhofer Instituten IGB und UMSICHT erarbeiteten Studie über Sustainable Aviation Fuels (SAF) – einem der spannendsten und zukunftsweisendsten Themen der modernen Luftfahrt. In einer Zeit, in der der Klimawandel und die Notwendigkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen immer drängender werden, bietet diese Studie einen tiefen Einblick in die Möglichkeiten und Herausforderungen, die mit der Einführung von SAF verbunden sind.

Die Luftfahrtindustrie steht vor einem Paradigmenwechsel. Mit der Einführung von SAF können wir nicht nur die Umweltbelastung erheblich reduzieren, sondern auch die Grundlage für eine nachhaltigere Zukunft legen. Diese Studie beleuchtet die technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen, die notwendig sind, um SAF erfolgreich zu implementieren. Sie bietet zudem einen Überblick über die verschiedenen Arten von SAF, ihre Produktionsmethoden und die potenziellen Märkte.

Ein besonderes Augenmerk der Studie liegt auf den aktuellen politischen Diskussionen und den regulatorischen Entwicklungen, die den Einsatz von SAF fördern sollen. Die Europäische Union hat mit Initiativen wie dem „Fit for 55“-Paket und der „ReFuelEU Aviation“-Verordnung ehrgeizige Ziele gesetzt, um die Emissionen im Luftfahrtsektor zu senken. Diese Maßnahmen sind entscheidend, um die Defossilierung der Luftfahrt voranzutreiben und die Klimaziele zu erreichen.

Wir haben Interviews mit Branchenexperten geführt und umfangreich recherchiert, um Ihnen ein umfassendes Bild der aktuellen Lage und der zukünftigen Entwicklungen zu vermitteln.

Wir hoffen, dass diese Studie nicht nur Ihr Interesse weckt, sondern auch als wertvolle Ressource für Ihre Arbeit dient. Tauchen Sie ein in die Welt der SAF und entdecken Sie die Möglichkeiten, die diese innovative Technologie für die Zukunft der Luftfahrt bereithält.

Wir wünschen viel Spaß bei der Lektüre!



# Zusammen SAF-

Auf europäischer Ebene verabschiedete die Europäische Union (EU) im Rahmen des EU Green Deal das „Fit for 55“-Paket. Die Regelungen sollen bewirken, dass die Treibhausgasemissionen in der EU bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Stand von 1990 gesenkt werden. Die EU hat sich das Ziel gesetzt, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen.<sup>1</sup>





# fassung der Studie

## **Wie können die Net-Zero-Ziele der Luftfahrtbranche erreicht werden?**

Zur Reduktion von Flugverkehrsemissionen setzt der Luftfahrtsektor derzeit auf drei komplementäre Strategien: operative Verbesserungen, technologische Neuerungen und umweltfreundlicher Kraftstoff. Zur Koordination der Umsetzung hat die EU neue Regelwerke erlassen. Strängere Verordnungen im Rahmen des Europäischen Emissionshandelssystems (ETS) werden den Preis pro Tonne emittierten Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) weiter und schneller steigen lassen als bisher vorgesehen. Zum anderen schreiben die ReFuelEU-Regelungen den zunehmenden Einsatz von SAF in der Luftfahrt vor. Bei SAF handelt es sich um erneuerbaren oder nachhaltigen Flugkraftstoff, der als sogenannte Drop-in-Lösung konventionellem Kerosin beigemischt werden kann. Durch vorgeschriebene Quoten soll der Luftfahrtsektor von 2025 bis 2050 an Flughäfen dazu bewegt werden, vermehrt SAF zu verwenden und damit die Emissionen zu senken.

Die International Air Transport Association (IATA), die etwa 348 Fluggesellschaften weltweit und über 80 % des globalen Flugverkehrs repräsentiert, gab im Jahr 2021 das Ziel bekannt, bis 2050 mit netto null Emissionen zu fliegen und damit den Luftverkehr in Einklang mit dem Ziel des Pariser Klimaabkommens zu bringen. Die IATA prognostiziert, dass SAF mit 65 % zur Emissionsreduktion des Luftsektors beitragen kann und damit einen erheblichen Anteil zum Erreichen des Netto-null-Ziels beisteuert<sup>2</sup>.

Um die Markt- und Technologieentwicklung von SAF genau zu verstehen, die Nachfrage zu prognostizieren und relevante Hürden für die Umsetzung von Projekten zu identifizieren, wurde diese SAF-Studie erstellt. Hier die wichtigsten Inhalte pro Kapitel:



## 1 | Technische Rahmenbedingungen und SAF-Arten

Es wird zwischen Bio- und E-SAF unterschieden, die sich in der Rohstoffnutzung und den Produktionsrouten voneinander abgrenzen. Global sind insgesamt acht Prozessrouten für die Produktion von SAF gemäß den beiden Zertifizierungen ASTM D1655 und ASTM D7566 zugelassen. Die ASTM D7566 regelt die Prozeduren und die Quote der Beimischung, die derzeit maximal 50 % beträgt, während die ASTM D1655 Spezifikationen für herkömmliche und für nach ASTM D7566 gemischte Flugzeugkraftstoffe definiert. Weiterhin regelt die ASTM D1655 auch die gemeinsame Verarbeitung von Biomasse mit Rohöl, die meistens als „Co-Processing“ bezeichnet wird.

Bio-SAF wird aus Biomasse und biogenen Reststoffen hergestellt. Dazu zählen Pflanzen- und Tierfette, Zucker und lignozelluläre Biomasse, aber auch weitere, nicht auf Nahrungsmitteln basierte Rohstoffe wie etwa Zwischen- und Deckfrüchte. In dieser Studie werden die Hauptproduktionswege für Bio-SAF betrachtet, darunter Hydrogenated Esters and Fatty Acids (HEFA), Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK), die Fischer-Tropsch-Synthese Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK), Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC), katalytische Hydrothermolyse (CHJ) und Hydrocarbon Hydrogenated Esters and Fatty Acids (HC-HEFA).

Die Produktion von E-SAF (auch PtL-SAF) erfordert den Einsatz von erneuerbarem („grünem“) Strom. Die elektrische Energie wird in den Zielprodukten, nämlich den Kraftstoffen, chemisch gespeichert. Dies erfolgt zumeist durch den Einsatz der Wasserelektrolyse. Im Gegensatz zu bio-SAF, die aus biogenen Rohstoffen hergestellt werden, basiert die E-SAF-Produktion auf der direkten technischen Umsetzung von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ). Die Studie konzentriert sich auf zwei E-SAF-Produktionsverfahren: die Fischer-Tropsch-Route mit der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) als zentralem Konversionsschritt und die Methanolroute, bei der Methanol durch Umsetzung von  $\text{CO}_2$  als wichtiges Zwischenprodukt erhalten wird. Während sich die Methanolroute noch im Prozess der technischen Zulassung für den Einsatz in der Luftfahrt befindet, ist die Fischer-Tropsch-Route bereits nach der Spezifikation ASTM D7566 zugelassen. Beide Verfahrensrouten werden in Zukunft eine wichtige Rolle in der Bereitstellung der für eine klimaverträgliche Luftfahrt benötigten SAF-Mengen spielen. In jedem Fall werden zur Produktion von E-SAF

$\text{CO}_2$  und Wasser als primäre Rohstoffe benötigt. Daher muss insbesondere die Bereitstellung von  $\text{CO}_2$  in ausreichender Qualität und Menge als Voraussetzung für eine nachhaltige und skalierbare Produktion von E-SAF sorgfältig betrachtet werden. Prinzipiell kommt für diesen Zweck sowohl die Gewinnung aus  $\text{CO}_2$ -reichen industriellen Abgasströmen (sogenannten Punktquellen) als auch die direkte Abscheidung aus der Luft in Frage.

## 2 | Regulatorische Rahmenbedingungen

Die EU hat sich das ambitionierte Ziel einer Netto-null-Emissionsbilanz bis zum Jahr 2050 gesetzt. Um dies zu erreichen, wurden zahlreiche Maßnahmen ins Leben gerufen, darunter der im Jahr 2019 eingeführte europäische Green Deal. Dieser umfangreiche Plan zielt auf eine nachhaltige Transformation der EU ab und umfasst auch relevante Maßnahmen für die Luftfahrtbranche wie das europäische Klimagesetz, das „Fit for 55“-Paket und die europäische Industriestrategie. Die RED III, das ETS und die Initiative ReFuelEU Aviation entstanden im Rahmen des „Fit for 55“-Programms.

Die ReFuelEU-Aviation-Initiative, die Anfang 2025 in Kraft trat, markiert einen Wendepunkt in der Luftfahrtindustrie. Sie sieht die schrittweise Einführung von SAF-Mandaten vor, die von 2 % im Jahr 2025 auf 70 % im Jahr 2050 ansteigen. Diese Regulierung wirkt nicht nur gängigen Tankpraktiken entgegen, die zu erhöhten Emissionen führen könnten, sondern setzen auch Strafen für Verstöße fest.

Ab 2025 wird die European Aviation Security Agency (EASA) im Auftrag der EU-Kommission und des EU-Parlaments ein Umweltkennzeichnungssystem für die Luftfahrt und damit die Vergabe von Ökolabels einführen. Es bietet Passagieren transparente Informationen über den ökologischen Fußabdruck ihrer Flüge, was die Wahl nachhaltiger Flugoptionen fördern soll.

Auf internationaler Ebene gibt es zahlreiche Initiativen und Richtlinien. Ein Beispiel hierfür ist das Sustainable Aviation Fuel Certificate (SAFc) der Clean Skies for Tomorrow (CST) Initiative des World Economic Forum (WEF). Dieses freiwillige Rahmenwerk soll den Übergang der globalen Luftfahrt zu Netto-null-Emissionen erleichtern. Weitere internationale Programme umfassen das Green Premium, bei dem Kunden



die Preisdifferenz zwischen Kerosin und SAF-Preis bezahlen, sowie die Emission Reduction Roadmap der IATA, die ein Netto-null-Ziel für die Luftfahrtindustrie bis 2050 vorsieht. Zusätzlich wurden globale Emissionshandelssysteme wie das CORSIA-Programm der UN-Luftfahrtorganisation ICAO eingeführt, das sicherstellen soll, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luftverkehrs nicht über das Niveau von 2020 steigen. Dieses Programm wird bis 2027 freiwillig sein und danach verpflichtend, was die Bedeutung von Emissionshandelssystemen und deren Fähigkeit, finanzielle Anreize zur Emissionsreduktion zu schaffen, unterstreicht.

### 3 | Nachfrage und Abnehmer

Globale Regulierungen und spezifische EU-Richtlinien haben einen signifikanten Einfluss auf die Produktion und die Nutzung von SAF, was wiederum die Marktdynamik von Angebot und Nachfrage maßgeblich prägt.

Interviews und eingehende Recherchen im Rahmen dieser Studie deuten auf eine steigende Nachfrage nach SAF in den kommenden Jahren hin. Bis zum Jahr 2030 planen zahlreiche Fluggesellschaften, ihren Flugzeugkraftstoffbedarf zu 10 % mit SAF zu decken. Gemäß unseren Prognosen wird im Zeitraum von 2030 bis 2050 mit einer jährlichen Wachstumsrate von 7 % gerechnet, was zu einem Anstieg von 49 Mio. Tonnen im Jahr 2030 auf 196 Mio. Tonnen im Jahr 2050 führt. In Europa wird zwischen 2030 und 2050 ein Anstieg der Nachfrage von jährlich 11 % prognostiziert – der stärkste von allen Regionen.

Um den Bedarf an umweltfreundlichem Kraftstoff zu decken, gehen Fluggesellschaften zunehmend langfristige Lieferverträge mit aktuellen und potenziellen Produzenten ein. Im Jahr 2024 wurden global 20 solcher neu abgeschlossenen Verträge verkündet. Diese sichern nicht nur die Verfügbarkeit des Produkts, sondern auch die kontinuierliche Abnahme. Obwohl diese Vereinbarungen oft auf Absichtserklärungen basieren, stärken sie die Sicherheit der Produzenten und unterstreichen das Engagement der Fluggesellschaften für ihre Nachhaltigkeitsziele. Derzeit konzentrieren sich diese Kooperationen fast ausschließlich auf Bio-SAF, da Verträge für E-SAF durch die noch ausstehende Kommerzialisierung und technologische Entwicklung begrenzt sind.



Der enorme prognostizierte Bedarf an umweltfreundlichem Kraftstoff erfordert bis 2050 Investitionen von 1,0 bis 1,5 Billionen US-Dollar in Produktionsanlagen. Die Fluggesellschaften sehen hier primär die Ölindustrie in der Pflicht. Zusätzlich sollen Lieferverträge Investitionen in künftige Produktionsstätten stimulieren. Darüber hinaus ist eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Flughäfen, Airlines und Unternehmen erkennbar, um die Produktionskapazitäten zu steigern.



### 4 | Globales Produktionspotenzial

Die Produktion von SAF wird gemäß aktuellen Prognosen in den nächsten Jahren exponentiell steigen. Zwischen 2019 und 2022 stieg das globale Produktionsvolumen bereits signifikant von 0,02 auf 0,24 Mio. Tonnen Bio-SAF. Die IATA geht davon aus, dass die SAF-Produktion im Jahr 2025 2,1 Millionen Tonnen oder 0,7 % der gesamten Düsentreibstoffproduktion erreichen wird.

Eine interne Analyse zu geplanten und aktiven SAF-Projekten zeigt Nordamerika mit einem prognostizierten Produktionspotenzial von ca. 14 Mio. Tonnen pro Jahr bis 2030 an der Spitze, während die Produktionskapazität in Afrika vergleichsweise gering bleibt. Projekte, die aktuell in der FEED-Phase oder in Bau sind, summieren sich zu einem möglichen Produktionsvolumen bis 2030 von etwa 3,2 Millionen Tonnen im Jahr. Erwartet wird nicht nur ein genereller Anstieg des globalen Produktionsvolumens, sondern auch eine geografische Expansion der Produktionsstätten. E-SAF wird vor allem in Regionen mit begrenzten Biomassereserven an Bedeutung gewinnen. Dies könnte auf die erwarteten sinkenden Kosten von H<sub>2</sub>, Elektrolyse und DAC-Technologien zurückzuführen sein. Für die Bio-SAF-Produktion wird ein noch stärkeres Wachstum erwartet.

Bestehende Produktionslücken wurden insbesondere in der APAC-Region und im Nahen und Mittleren Osten identifiziert. Hier wird bis zum Jahr 2030 ein mögliches Defizit von 20,4 Mio. Tonnen pro Jahr prognostiziert, unter der Bedingung, dass die SAF-Produktionskapazitäten maximal ausgelastet sind. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Dringlichkeit, die globale SAF-Produktionskapazität zu erhöhen, um den steigenden Bedarf zu decken.



## 5 | Infrastruktur und Logistik

Um die zunehmende Produktion und Nutzung von SAF zu ermöglichen, sind erhebliche Investitionen in die Infrastruktur nötig, sowohl auf Produktions- als auch auf Distributionsseite. Die Produktionsinfrastruktur von SAF unterscheidet sich signifikant von der des herkömmlichen Kerosins. Für die Bio-SAF-Produktion ist eine spezielle Infrastruktur zum Sammeln, Lagern und Verarbeiten von Biomasse notwendig. Die Herstellung von E-SAF erfordert unter anderem die Bereitstellung von Elektrolysekapazitäten, höhere Strommengen aus erneuerbaren Energien, die Identifizierung geeigneter Flächen und die Bereitstellung von CO<sub>2</sub>. Um die 2 %-E-SAF-Regelung in Deutschland einzuhalten, werden 7,5 TWh Strom aus erneuerbaren Energien und 1 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> benötigt. Die volatilen erneuerbaren Energien erfordern einen innovativen Ansatz wie beispielsweise die Nutzung von H<sub>2</sub>-Speichern, um den Strom effektiv zu nutzen. Um die nötigen Mengen an CO<sub>2</sub> in Deutschland bereitzustellen, müssen zusätzlich 250 DAC-Anlagen in Betrieb genommen werden. Eine indirekte CO<sub>2</sub>-Nutzung durch Biomasse ist ebenfalls denkbar.

Die Beimischung bzw. (virtuelle) Nutzung von SAF kann nach drei Modellen erfolgen: dem Segregation-Verfahren, dem Mass-Balance-Verfahren und dem „Book & Claim“-Verfahren. Ein wesentlicher Vorteil der letztgenannten Methode besteht darin, dass SAF in der Nähe des Produktionsstandortes betankt und an anderen Orten geltend gemacht werden kann.

Die bestehende Distributionsinfrastruktur kann aufgrund der Ähnlichkeit zwischen herkömmlichem Kerosin und SAF-Blends weiterhin genutzt werden. Dies umfasst den Transport des SAF von den Produktionsstätten zu den Flughäfen per Lkw, Zug, Schiff oder über eine Pipeline. Die Nutzung von Pipelines ist nur in bestimmten Ländern und nur für zertifiziertes SAF gestattet. Mit der Zunahme der SAF-Nutzung müssen die Lagerkapazitäten durch den Bau neuer Kraftstofflager erweitert werden. Die Lagerung von SAF-Blends kann entweder getrennt von herkömmlichem Jet-Fuel erfolgen oder in denselben Tanks mittels Massenbilanz, wobei Letzteres die benötigte Infrastruktur reduziert und damit Kosten spart.



## 6-7 | Finanzierung, SAF-Preis und ESG-Auswirkungen

Umweltfreundliche Kraftstoffe sind derzeit noch bis zu sechsmal so teuer wie konventionelles Kerosin. EY-Berechnungen zufolge lag der globale Mindestverkaufspreis (Minimum Selling Price) im Jahr 2024 für Bio-SAF bei 2,7 US-Dollar/Kilogramm (~ 2.680 US-Dollar/Tonne) und für E-SAF bei 4,9 US-Dollar/Kilogramm (~ 4.880 US-Dollar/Tonne). Somit ergibt sich eine aktuelle Kostendifferenz von ca. 2,2 US-Dollar/Kilogramm (~ 2.200 US-Dollar/Tonne) zwischen Bio- und E-SAF.

Im Zeitverlauf erhöht sich unseren Prognosen zufolge der Mindestverkaufspreis für Bio-SAF, beispielsweise aufgrund möglicher Rohstoffknappheiten, um global etwa 19 % auf 3,2 US-Dollar/Kilogramm (~ 3.180 US-Dollar/Tonne), während der Mindestverkaufspreis für E-SAF, beispielsweise aufgrund technologischer Fortschritte, um ca. 54 % global auf 2,2 US-Dollar/Kilogramm (~ 2.240 US-Dollar/Tonne) sinkt. Im Jahr 2050 liegt die Preisdifferenz somit global bei ca. 0,9 US-Dollar/Kilogramm (~ 940 US-Dollar/Tonne).

Die nötige Infrastruktur für die SAF-Ausweitung erfordert bis zum Jahr 2050 Investitionen von 1,00 bis 1,45 Billionen US-Dollar. Aufgrund des zunehmenden Interesses an SAF steigen die privaten Investitionen weltweit an. Zudem spielen öffentliche Fördermittel bei der Entwicklung des Marktes eine wesentliche Rolle. Bereits heute gibt es weltweit eine Vielzahl staatlicher Förderprojekte, insbesondere in Europa und Nordamerika sowie in ausgewählten Ländern der APAC-Region.



Für einen effizienten Ausbau von SAF-Projekten bedarf es einer ausreichenden Bankfähigkeit, um eine solide Finanzierung zu sichern. Schlüsselfaktoren dafür sind unter anderem wirtschaftliche Rentabilität, zuverlässige Technologien, die Verfügbarkeit von Rohstoffen, staatliche Förderungen, Subventionen und gesetzliche Rahmenbedingungen, feste Abnahmeverträge, eine Fokussierung auf Nachhaltigkeit und die Minimierung von Risiken. Zusätzlich sollte die Skalierbarkeit der Projekte gewährleistet werden, um die Kapazitäten für SAF zu maximieren. In Kapitel 6 werden vor allem die Bereiche Technologie, Infrastruktur, Wirtschaftlichkeit, Regulierung und Nachhaltigkeit betrachtet, da diese Faktoren die Skalierbarkeit maßgeblich beeinflussen.

Der Ausbau der Produktion und Nutzung von SAF bringt umweltspezifische, soziale wie auch regulatorische Herausforderungen mit sich, bietet jedoch auch bedeutende Chancen und Potenziale für die ESG-Nachhaltigkeit. Ein tiefgehendes Verständnis dieser Wechselwirkungen ist erforderlich, um eine effektive und wirksame Steuerung zu gewährleisten. Bei der Implementierung eines Bio-SAF-Projekts in Kanada wird beispielsweise mit der Schaffung von 1.500 Konstruktionsarbeitsplätzen und 150 Vollzeitstellen gerechnet, bei einer geplanten Anlagenkapazität von 3,18 Mio. Litern (2.521,74 Tonnen) pro Tag. Andererseits birgt die Transformation von herkömmlichem Flugzeugkraftstoff zu SAF das Risiko von Arbeitsplatzverlusten im Bereich fossiler Brennstoffe.

## 8 | Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Prognosen für Nachfrage und Produktion in den nächsten Jahrzehnten und dem Status quo der SAF-Produktion haben wir konkrete Handlungsempfehlungen für eine erfolgreiche Skalierung der SAF-Produktion erarbeitet. Diese Empfehlungen fokussieren sich auf die vermehrte Bereitstellung finanzieller Mittel und das Vorantreiben technologischen Fortschritts im europäischen Raum. Wir schlagen die Etablierung eines zentralen Fonds auf EU-Ebene vor, der Gelder aus verschiedenen regulatorischen Mitteln erhält und diese gebündelt und strategisch in den Aufbau der SAF-Industrie investiert. Dieser Fonds könnte von der Europäischen Wasserstoffbank (EHB) verwaltet werden. Bei den vorgeschlagenen regulatorischen Mitteln handelt es sich um Strafzahlungen, die aus einer Nichteinhaltung der ReFuelEU-Regulierung entspringen, und um Einkünfte aus dem EU ETS. Außerdem können Gelder aus einem kapitalmarktorientierten Rentenfonds wie beispielsweise dem erst kürzlich beschlossenen Generationenkapital in Deutschland gegen Zinszahlungen in SAF-Projekte investiert werden. Des Weiteren könnte eine verpflichtende Abgabe bei Käufen von Flugtickets nach dem Vorbild der derzeit häufig freiwillig angebotenen Kompensationszahlungen eingeführt werden. Zuletzt wäre zur Finanzierung des dedizierten SAF-Fonds auch eine Steuer auf Einkünfte aus der SAF-Produktion im Co-Processing-Verfahren denkbar. Neben finanzieller Unterstützung gibt es auch technische Verbesserungen.

Der Einsatz von Co-Processing, also der Nutzung bestehender Raffinerien zur SAF-Produktion, wird gemäß EY-Vorausschau vorerst ein ergänzender Ansatz sein, um die SAF-Produktion hochzufahren und den SAF-Markt aufzubauen. Diese Technologie wird notwendig sein, um die Produktion von SAF bankfähig zu machen und die benötigte SAF-Skalierung zu ermöglichen.

Neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen beeinflussen auch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte wie Stickoxide, Rußpartikel, oxidierte Schwefelverbindungen und Wasserdampf das Klima im Luftverkehr. Die von Flugzeugen am Himmel erzeugten Kondensstreifen können je nach Umgebungsbedingungen entweder kühlend oder wärmend wirken. Der Einsatz von SAF kann dazu beitragen, sowohl CO<sub>2</sub>- als auch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte zu reduzieren, da SAF weniger Rußpartikel und andere Treibhausgase freisetzt. Allerdings ist eine vollständige Eliminierung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte durch SAF allein nicht möglich. Es bedarf weiterer Maßnahmen wie der Optimierung von Flugrouten oder Flughöhen.

# Inhalt

## 1

### Technische Rahmenbedingungen und SAF-Arten

Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

|               |                                                                               |    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1.1</b>    | SAF-Arten                                                                     | 14 |
| <b>1.1.1</b>  | Bio-SAF aus unterschiedlichen Biomassen                                       | 14 |
|               | Prozessroute 0: Flugzeugkraftstoff aus Erdöl                                  | 15 |
|               | Prozessroute 1: Bio-SAF aus Fetten und Ölen (HEFA)                            | 17 |
|               | Prozessroute 2: Bio-SAF aus Alkoholen (ATJ-SPK)                               | 19 |
|               | Prozessroute 3: Bio-SAF aus Synthesegas (FT-SPK)                              | 20 |
|               | Prozessroute 4: Bio-SAF aus Zucker (DSHC/SIP)                                 | 22 |
|               | Prozessroute 5 und 6: Bio-SAF aus anderen Rohstoffen (CHJ/HC-HEFA)            | 23 |
|               | Prozessroute 7: Bio-SAF mit Aromaten aus Alkoholen (ATJ-SKA)                  | 24 |
|               | Prozessroute 8: Gemeinsame Verarbeitung von Biomasse mit Rohöl- Co-Processing | 25 |
| <b>1.1.2.</b> | E-SAF aus CO <sub>2</sub> : Power-to-Liquid (PtL)                             | 26 |
|               | Fischer-Tropsch- Synthese                                                     | 28 |
|               | Methanolsynthese                                                              | 28 |
|               | CO <sub>2</sub> Quellen für E-SAF Produktion                                  | 29 |
| <b>1.2</b>    | Technische Zulassung (ASTM) für bio- und E-SAF                                | 31 |

## 2

### Regulatorische Rahmenbedingungen

Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

|            |                                                                      |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>2.1</b> | Regulatorische Rahmenbedingungen auf europäischer und globaler Ebene | 34 |
|            |                                                                      | 35 |
|            |                                                                      | 36 |

## 3

### Nachfrage und Abnehmer

Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

|            |                                                                   |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3.1</b> | Existierende und prognostizierte SAF-Nachfrage                    | 46 |
| <b>3.2</b> | Wichtige Sektoren als Key-Abnehmer                                | 47 |
| <b>3.3</b> | Sicherung des Produktes - Überblick über bestehende Kooperationen | 48 |
|            |                                                                   | 50 |
|            |                                                                   | 53 |

## 4

### Globale Produktionskapazität

Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

|            |                                                    |    |
|------------|----------------------------------------------------|----|
| <b>4.1</b> | Globale Produktionspotentiale                      | 56 |
| <b>4.2</b> | Produktionspotentiale nach Region                  | 57 |
| <b>4.3</b> | Bestehende Produktionslücken und mögliche Lösungen | 58 |
|            |                                                    | 61 |
|            |                                                    | 67 |



# 5

## Notwendige Logistik und Infrastruktur

Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

|            |                                           |    |
|------------|-------------------------------------------|----|
| <b>5.1</b> | Kerninfrastruktur auf<br>Produzentenseite | 74 |
| <b>5.2</b> | Kerninfrastruktur auf Flughäfen           | 81 |

# 6

## Finanzierung und Kosten

Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

|              |                                                            |    |
|--------------|------------------------------------------------------------|----|
| <b>6.1</b>   | Entwicklung der SAF –<br>Kostenstruktur und Verkaufspreise | 86 |
| <b>6.2</b>   | Finanzierungsquelle                                        | 90 |
| <b>6.3</b>   | Bankfähigkeit und Skalierbarkeit<br>von SAF-Projekten      | 93 |
| <b>6.3.1</b> | Bankfähigkeit                                              | 94 |
| <b>6.3.2</b> | Skalierbarkeit                                             | 99 |

# 7

## ESG-Auswirkungen auf globale SAF-Projekte

Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

|               |                                                                               |     |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>7.1</b>    | Überblick über Herausforderungen,<br>Risiken und Chancen mit Fokus<br>auf ESG | 104 |
| <b>7.2</b>    | Rahmenbedingungen und Maßnahmen<br>zur Minimierung von ESG-Risiken            | 111 |
| <b>7.2.1.</b> | Umweltbereich (E) für SAF-Projekte                                            | 111 |
| <b>7.2.2.</b> | Sozialer Bereich (S) für SAF-Projekte                                         | 116 |
| <b>7.2.3.</b> | Governance (G) für SAF-Projekte                                               | 118 |

# 8

## Kritische EU-Erfolgsfaktoren für die Transformation des Luftverkehrs

Einführung

|               |                                                                                                        |     |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>8.1</b>    | Entwicklung von Finanz-<br>instrumenten für SAF-<br>Projekten und Verbesserung<br>der Finanzierbarkeit | 124 |
| <b>8.1.1.</b> | Überblick über möglichen<br>Fonds und Finanzinstrumente                                                | 125 |
| <b>8.1.2</b>  | Die Funktion des dedizierten<br>Fonds                                                                  | 130 |
| <b>8.2</b>    | Weitere mögliche technische<br>Entwicklung für SAF-Produktion                                          | 131 |
| <b>8.2.1</b>  | Herstellung von Bio-SAF und<br>Co-processing von Biomasse                                              | 131 |
| <b>8.2.2</b>  | Verbesserung von<br>„Nicht-CO <sub>2</sub> -Effekte“                                                   | 132 |

## Abkürzungen

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

## Anhang I

Detaillierte Übersicht über  
Finanzierungsquelle

**Anhang II**

Schlüsselannahmen für das Kapitel 6  
Berechnungen

**Anhang III**

Forschungsglossar

**Anhang IV**

Quellenverzeichnis



# Technische Rahmenbedingungen und SAF-Arten



Neben HEFA sehen wir Alkohol to Jet als die vielversprechendste Technologie zur SAF-Produktion in den kommenden Jahren. Bei der Gasifizierung-Fischer-Tropsch-Technologie sehen wir trotz des sehr großen Feedstock-Potenzials kaum Fortschritte in der Anwendung. Generell haben wir jedoch keine Präferenzen, solange das SAF aus nachhaltigen Feedstocks produziert und bezahlbar und eine zuverlässige Produktion sichergestellt ist.

**Henrik von Storch**, Director Global Sustainable Aviation Fuels,  
DHL Express

## Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

Das nachfolgende Kapitel 1 fasst die aktuellen Prozesse bei der Herstellung von Sustainable Aviation Fuels (SAF) sowie die entsprechenden Regulierungen und die technische Entwicklung zusammen. Prinzipiell kann die Herstellung zwischen Bio-SAF und E-SAF unterschieden werden, selbst wenn hybride Ansätze möglich sind, in denen sowohl biogene als auch strombasierte Rohstoffe verwendet werden. Für E-SAF findet sich in der Literatur auch der Begriff Power-to-Liquid-SAF (kurz: PtL-SAF). Kapitel 1.1 beschreibt detailliert die verschiedenen Prozessrouten, die zur Herstellung von SAF bereits zugelassen wurden (zusätzlich die Methanolroute, die noch nicht zugelassen ist). Diese Prozessrouten unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Rohstoffe zur Herstellung des SAF. Diese wiederum beeinflussen

zum Teil die spezifischen Arbeitsschritte sowie die ablaufenden Prozesse. Des Weiteren ist zu beachten, dass in den Produktionsprozessen nicht ausschließlich SAF entsteht. In variierenden Mengenverhältnissen werden auch andere nachhaltige Kraftstoffe wie etwa Diesel- und Benzinfraktionen (beispielsweise Bio-Diesel) als Nebenprodukt gewonnen. Auch die Art der Nebenprodukte hängt von der Prozessroute ab. Die betrachteten Routen umfassen neben der Prozessroute 0, der Herstellung von fossilem Kerosin aus Erdöl, die Herstellung von Bio-SAF in acht weiteren Prozessrouten. Bei diesen wird der Flugzeugkraftstoff unter anderem aus Fetten und Ölen, Alkoholen oder Zuckern hergestellt. Außerdem wird die PtL-Herstellung von E-SAF über zwei unterschiedliche chemische Prozesse erläutert.

Wichtig ist jedoch zu erwähnen, dass SAF derzeit nur als Beimischung zu fossilem Flugzeugkraftstoff (Jet-A1) verwendet werden darf. Die Beimischungsquoten unterscheiden sich je

nach der Prozessroute und betragen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie maximal 50 %. Es gibt allerdings Bestrebungen, in Zukunft auch Zulassungen für die Durchführung von Flügen mit 100 % SAF zu erreichen. In Testflügen ist eine solche Nutzung bereits gelungen.

In Kapitel 1.2 wird die Zulassung von SAF im Rahmen der zugehörigen Spezifikationen beschrieben und der aktuelle Stand wiedergegeben. Diese technische Bewertung und Zulassung erfolgt in Form von Spezifikationen, die von der American Society for Testing and Materials (ASTM) definiert werden. Diese Standards regeln sowohl die Herstellung von SAF über die verschiedenen Prozessrouten als auch die Beimischung zu fossilem Kerosin. So können die Charakteristiken, die Eignung und auch die geforderten Eigenschaften der SAF gesichert werden. Dies ist essenziell, um die Sicherheit im Flugbetrieb zu gewährleisten.



# 1.1 SAF-Arten

## 1.1.1 Bio-SAF aus unterschiedlichen Biomassen

Unter Bio-SAF versteht man SAF, die aus Biomasse und biogenen Reststoffen als Ausgangsprodukt gewonnen wurden. Die Palette an Einsatzstoffen ist breit und reicht von Altöl bis zu Reststoffen aus der Landwirtschaft. Daher gibt es auch eine große Anzahl unterschiedlicher Verfahren, um Bio-SAF zu produzieren. Die im Folgenden beschriebenen acht Prozessrouten sind bereits in den zugehörigen Normen erfasst. Die von der ASTM zugelassenen Prozessrouten sind in Tabelle 1 mit ihrem technischen Namen gelistet und werden im Anschluss vom Rohstoff bis zum Betanken kurz beschrieben.

Die ASTM D7566 beschränkt die Menge der synthetischen Komponente aktuell auf 50 %. Das bedeutet, dass momen-

tan ein Einsatz von entsprechendem Bio-SAF lediglich als Beimischung (Blending) zu konventionellem, fossilem Flugzeugkraftstoff möglich ist. Die Nutzung von reinem SAF ohne Beimischung von fossilen Kraftstoffen ist aus Sicht der Qualitätsprüfung noch nicht möglich, da seine geringere Dichte die Reichweite von Flugzeugen beeinträchtigen kann. Zudem führt die leicht abweichende chemische Zusammensetzung, insbesondere der veränderte Anteil an aromatischen Verbindungen, dazu, dass Dichtungen im Tank- und Turbinensystem schrumpfen. Die flachen Destillationskurven, die ein unterschiedliches Verhältnis von leicht und schwer flüchtigen Kraftstoffkomponenten aufweisen, wirken sich negativ auf die Verbrennung in der Turbine aus. Daher ist die Beimischung von herkömmlichem Flugzeugkraftstoff, auch Jetfuel (Jet-A1) oder Flugzeugkraftstoff genannt, zurzeit eine wesentliche Voraussetzung, um die

benötigte Qualität der Flugzeugkraftstoffe für die bestehende Flugzeugtechnik sicherzustellen.

Die Entwicklung schreitet jedoch schnell voran. So konnte bereits reines SAF hergestellt und in kommerziellen Flugzeugen genutzt werden, das fossile Flugzeugkraftstoffe zu 100 % ersetzen konnte, ohne die Beimischung von fossilen Flugzeugkraftstoffen<sup>345</sup>. Unabhängig von den derzeit geringen qualitativen Unterschieden sind SAF als sogenannte Drop-in-Kraftstoffe konzipiert, die als zertifizierter Blend gemäß den oben genannten Prozessrouten völlig gleichwertig mit herkömmlichen Flugzeugkraftstoffen Jet-A1 sind. Folglich sind die Lagerungs- und Abfertungsverfahren, die für normgemäße Gemische aus SAF und fossilem Jet-A1 erforderlich sind, identisch und gelten als „fully fungible“.<sup>b</sup>

**Tabelle 1**

Zugelassene SAF-Arten (ASTM D1655 und ASTM D7566)<sup>a</sup>

| Routenname,<br>Norm, zugehöriger Annex                 | Beschreibung und Namensabkürzung gemäß ASTM                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Prozessroute 1,</b><br>ASTM D7566 (Annex 2)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bio-SAF aus Fetten und Ölen (HEFA)</li> <li>■ Synthesized Paraffinic Kerosene (SPK) aus hydroverarbeiteten Estern und Fettsäuren</li> </ul>                                           |
| <b>Prozessroute 2,</b><br>ASTM D7566 (Annex 5)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bio-SAF aus Alkoholen (ATJ-SPK)</li> <li>■ Derzeit sind nur Isobutanol- und Ethanol zertifiziert</li> </ul>                                                                           |
| <b>Prozessroute 3,</b><br>ASTM D7566 (Annex 1)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fischer-Tropsch-SPK (FT-SPK)</li> </ul>                                                                                                                                               |
| <b>Prozessroute 4,</b><br>ASTM D7566 (Annex 3)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bio-SAF aus Zuckern (DSHC/SIP)</li> </ul>                                                                                                                                             |
| <b>Prozessroute 5/6,</b><br>ASTM D7566 (Annex 6 und 7) | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bio-SAF aus anderen Rohstoffen (CHJ und HC-HEFA)</li> <li>■ Catalytic Hydrothermolyse Jet Fuel (CHJ, Annex 6), Hydrocarbon-Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HC-HEFA)</li> </ul> |
| <b>Prozessroute 7,</b><br>ASTM D7566 (Annex 8)         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bio-SAF mit Aromaten aus Alkoholen (ATJ-SKA)</li> <li>■ Gemische von Alkoholfraktionen von Ethanol bis Pentanol können gleichzeitig verarbeitet werden</li> </ul>                     |
| <b>Prozessroute 8,</b><br>ASTM D1655                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mitverarbeitung von Bio- und Fischer-Tropsch-Intermediaten mit Rohöl in der Raffinerie (Co-Processing)</li> </ul>                                                                     |

<sup>a</sup> Definition aus der ASTM D7566 für SPK: „synthesized paraffinic kerosine = synthetic blending component that is comprised essentially of iso paraffins, normal paraffins, and cycloparaffins“, SKA: = SPK plus aromatics

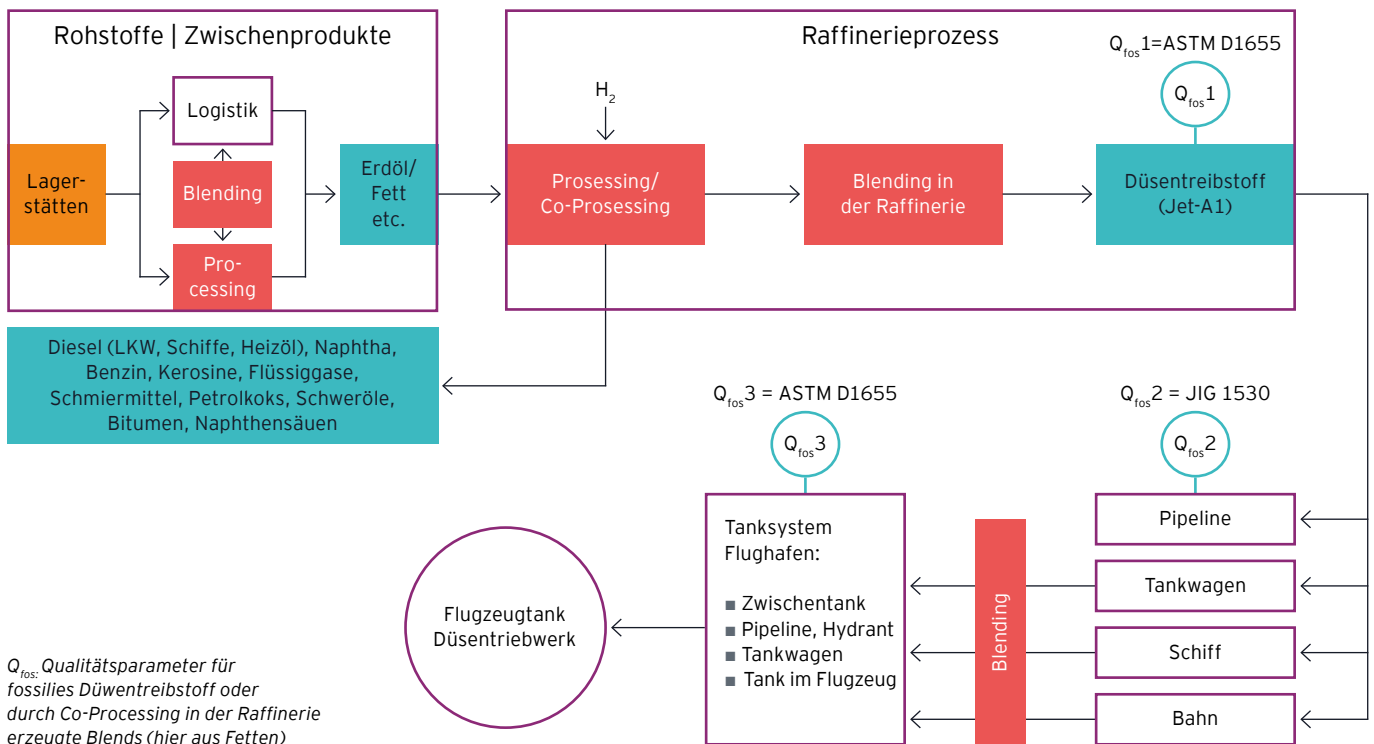
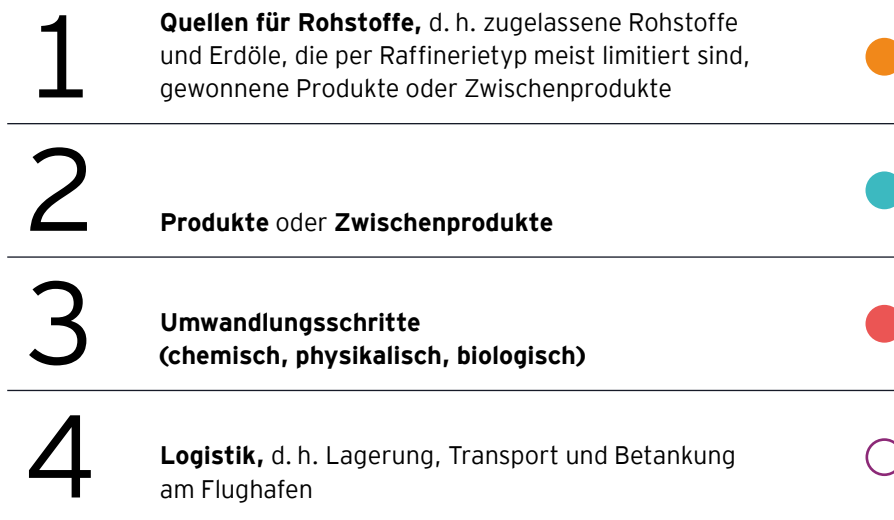
<sup>b</sup> Energy Institute und Joint Inspection Group: EI/JIG 1530 Standard Quality Assurance Requirements for the Manufacture, Storage & Distribution of Aviation Fuels to Airports (A4), Mai 2019

## Prozessroute 0: Flugzeugkraftstoff aus Erdöl

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Anwendung von SAF derzeit ausschließlich über die Zumischung in fossile Flugzeugkraftstoffe (Jet-A1). Daher wird einleitend die konventionelle Prozessroute 0 beschrieben, die die Herstellung von Flugzeugkraftstoff aus Erdöl umfasst (Abbildung 1). Die Darstellung der einzelnen Prozessschritte unterteilt sich in folgende Bereiche:

**Abbildung 1**

Darstellung der Prozessroute 0: Flugzeugkraftstoff aus Erdöl - optional auch zusätzlich mit alternativen Rohstoffen zum Co-Processing wie etwa Fetten - mit Qualitätskontrollen  $Q_{fos}$  (Quelle: Fraunhofer)



Wenngleich über die zugehörigen Raffinerieprozesse wenig publiziert wird, ist aufgrund der Spezifikationen der ASTM nachvollziehbar, wie Qualitätsparameter in der Lieferkette von konventionellem Flugzeugkraftstoff eingehalten und überwacht werden müssen (Tabelle 2).

Die Frequenz der Messungen der Produktqualität gemäß Tabelle 2 hängt von der Technologiereife der SAF-Prozessroute ab und ist daher, zumindest momentan, unterschiedlich. Es darf jeweils nur ein SAF über das Blending

zugemischt werden, d. h., die genannten Prozessrouten dürfen derzeit nicht per Blending kombiniert werden und die Gemische gelten nur so als identisch zu fossilem Jet-A1.

Für alle weiter unten beschriebenen Prozessrouten (1 bis 7) sind sowohl Rohstoffe und Zwischenprodukte, Umwandlungsschritte als auch die Struktur der Produktionssysteme (dezentrale versus zentrale Produktionsstrukturen) zum Teil sehr unterschiedlich. Auch die Anzahl der erzeugten Zertifikate gemäß Tabelle 2

ist unterschiedlich und wird perspektivisch, gemäß der jeweils aktuellen ASTM D7566, reduziert. Die Kontrolle von Qualitätsparametern ist nur für den letzten Schritt der Herstellung des jeweiligen SAF vor dem Blenden mit fossilem Jet-A1 über die Norm ASTM D7566 und für das Co-Processing über die ASTM D1655 festgelegt.

**Tabelle 2**  
Qualitätskontrollpunkten  $Q_{fos}$  für SAF  
(Quelle: Energy Institute, Joint Inspection Group 2019<sup>6</sup>)

| Typ        | Parameter         | Spezifikation           | Zertifikat EI/JIG1530/JIG1533                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{fos}1$ | Komplette Analyse | ASTM D1655              | <b>RCQ - REFINERY CERTIFICATE OF QUALITY</b><br>Ausgestellt vom Labor des Herstellers (oder einem Labor, das im Auftrag des Herstellers arbeitet). Es enthält Informationen über die Zugabe von Zusatzstoffen, sowohl deren Art als auch die Menge. Außerdem enthält es Angaben über die Identität der Ursprungsraffinerie und die Rückverfolgbarkeit des beschriebenen Produkts.                                               |
| $Q_{fos}2$ | Partielle Analyse | EI/JIG 1530 (Tabelle 2) | <b>RTC - RECERTIFICATION TEST CERTIFICATE</b><br>Analyse von Parametern, die besonders anfällig für Verunreinigungen sind. Damit wird nachgewiesen, dass eine Rezertifizierungsprüfung durchgeführt wurde, um zu überprüfen, dass sich die Qualität des betreffenden Flugkraftstoffs nicht verändert hat und innerhalb der Spezifikationsgrenzen bleibt, z. B. nach dem Transport in Seetankern oder in Multiprodukt-Pipelines. |
| $Q_{fos}3$ | Partielle Analyse | ASTM D1655 (Tabelle 1)  | <b>COA - CERTIFICATE OF ANALYSIS</b><br>Wird von einem anderen zertifizierten Labor als dem der Ursprungsraffinerie ausgestellt. Gibt keine Informationen über Additive oder den Prozentsatz an hydroverarbeiteten oder synthetischen Komponenten.                                                                                                                                                                              |

# Qualität



### Prozessroute 1: Bio-SAF aus Fetten und Ölen (HEFA)

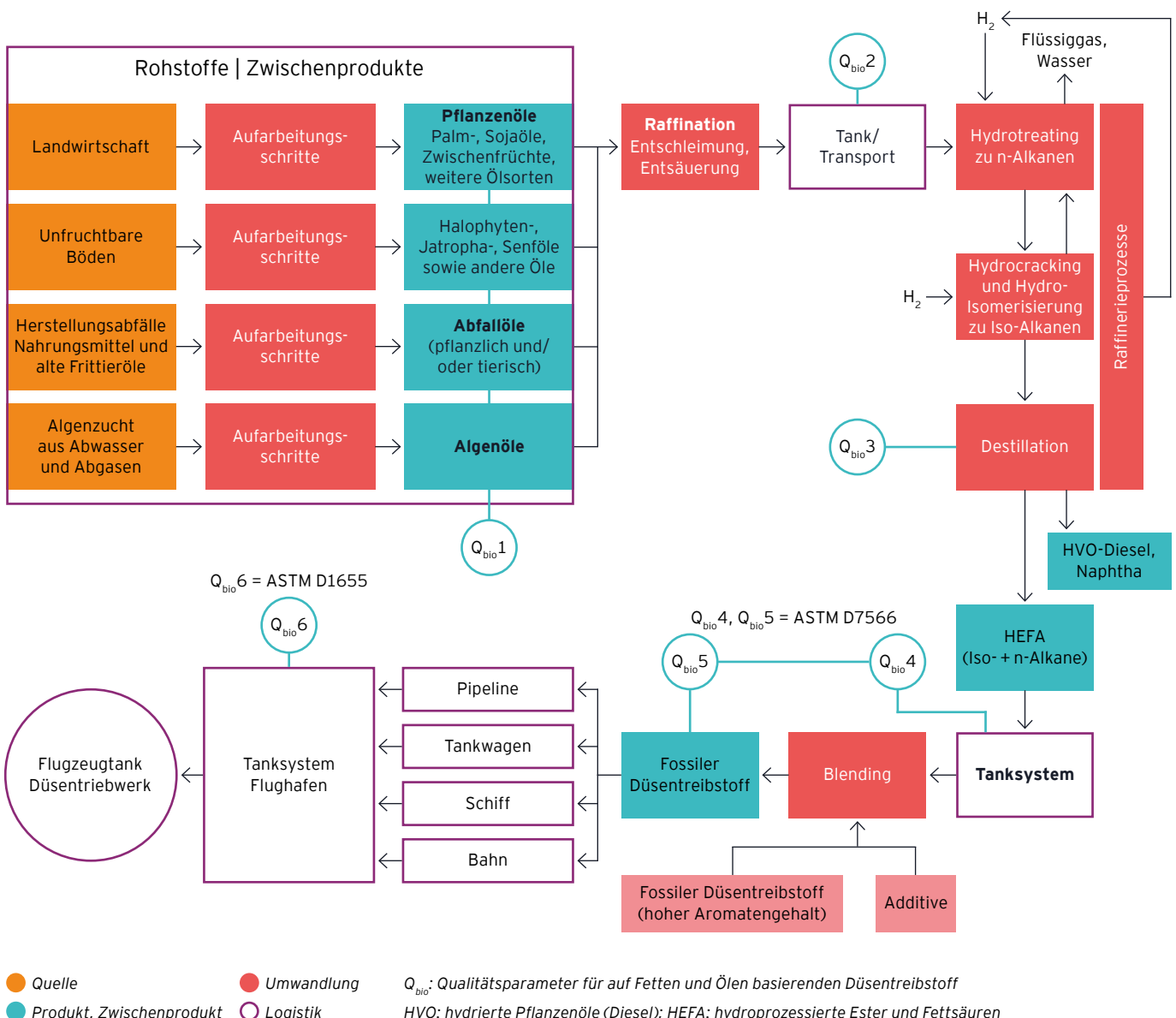
In der Prozessroute 1 werden Pflanzenöle wie etwa Sojaöl, Camelineöl („Leindotter“), Jatrophaöl sowie rezyklierte Frittier- und Tierfette und Reststoffe aus der Pflanzenölverarbeitung eingesetzt. Der Einsatz beispielsweise von essbarem Pflanzenöl wurde mittlerweile in vielen EU-Ländern weitestgehend eingeschränkt oder wird nicht auf Zumischquoten für Biokraftstoffe angerechnet. Die Verwendung von Algenölen, die pflanzenanaloge Öle enthalten, ist möglich, aber die Wirt-

schaftlichkeit ist bisher nicht gegeben. Der erste Verarbeitungsschritt umfasst die Vorbehandlung der Öle über das sogenannte Degumming und die Entsäuerung, wobei Katalysatorgifte und freie Fettsäuren (FFA) abgetrennt werden. Anschließend folgen mehrere Verarbeitungsschritte, die  $H_2$  verbrauchen. Konkret sind dies das sogenannte Hydrotreating, d. h. eine Hydrierung zur Entfernung aller Nicht-Kohlenstoffatome, sowie das Hydrocracking und die Hydroisomerisierung zur Anpassung der Kohlenstoffkettenstruktur. Abschließend erfolgt eine Destillation

zur Trennung aller Fraktionen gemäß deren Siedepunkten. Die Produkte und Nebenprodukte bestehen aus geraden N-Alkanen und verzweigten Isoalkanen im Flugzeugkraftstoff-Siedebereich zusammen mit weiteren chemisch sehr ähnlichen werthaltigen Fraktionen. Dies umfasst im Wesentlichen HVO-Diesel (Hydrogenated Vegetable Oil, meist eine teure Winterdieselqualität) und Naphtha, das als Leichtbenzin oder als Rohstoff für die Plastikproduktion Verwendung findet.

**Abbildung 2**  
HEFA-Prozessroute

(Quelle: Fraunhofer)



Der  $H_2$ -Bedarf für auf HVO-Diesel oder auf HEFA-SAF als Hauptprodukt ausgelegte Produktionsanlagen hängt vom Typ der eingesetzten Fette und Öle ab. Die folgende Tabelle 3 gibt einen Überblick über gemittelte  $H_2$ -Bedarfe und die Ausbeute für eine Anlage zur Herstellung von HEFA-SAF. Auf der Grundlage einer auf Industrieumfragen basierten Studie für den  $H_2$ -Bedarf und die Produktausbeuten einer HEFA-Anlage, die mit Abfallölen auf Basis gebrauchter Fette und Öle (UCO = Used Cooking Oil) betrieben wird, wurde

überschlägig der relative Mehrbedarf für weitere typische Fette und Öle gemäß den in Abbildung 2 genannten vier Rohstoffgruppen (Landwirtschaft, unfruchtbare Böden, Herstellungsfälle und Algenzucht) ermittelt. Hierbei können manche Ölpflanzensorten wie etwa Camelina sowohl auf fruchtbaren als auch auf unfruchtbaren Böden wachsen. Erwartungsgemäß ist jedoch die Ausbeute an Ölen und an Biomasse unterschiedlich.<sup>7</sup> Es wird davon ausgegangen, dass es sich jeweils um vorgereinigte Rohstoffe handelt,

die von dem in mit „ $Q_{bio,2}$ “ markierten Punkt in die Anlage eingespeist werden. Es wird weiterhin vorausgesetzt, dass sich die Produktselektivitäten per Rohstoff nicht ändern und eine höhere Wärmeproduktion durch einen höheren  $H_2$ -Verbrauch anlagentechnisch keine Probleme bereitet.

Es sei angemerkt, dass es sich bei den Zahlen um Mittelwerte für die Zusammensetzung der Öle handelt, die aus Literaturdaten ermittelt wurden.

**Tabelle 3**

Input und Output „HEFA-Anlage“ in Kilogramm/Tonne Fett- oder Öltyp

(Quelle: Fraunhofer)

| $H_2$<br>Input                        | HEFA<br>Output | HVO      | Naphtha* | Propan*** | Andere**** | Öltypen (Rohstoffgruppe) |
|---------------------------------------|----------------|----------|----------|-----------|------------|--------------------------|
| (Pflanzenöle aus der Landwirtschaft)  |                |          |          |           |            |                          |
| 61,8 kg                               | 621,8 kg       | 138,3 kg | 85,6 kg  | 95,7 kg   | 120,4 kg   | Sojaöl                   |
| 62,5 kg                               | 622,2 kg       | 138,4 kg | 85,7 kg  | 95,8 kg   | 120,4 kg   | Camelinaöl*****          |
| (Pflanzenöle von unfruchtbaren Böden) |                |          |          |           |            |                          |
| 62,5 kg                               | 622,2 kg       | 138,4 kg | 85,7 kg  | 95,8 kg   | 120,4 kg   | Camelinaöl*****          |
| 54,8 kg                               | 617,1 kg       | 137,3 kg | 85,0 kg  | 95,0 kg   | 120,4 kg   | Jatrophaöl               |
| 55,5 kg                               | 617,6 kg       | 137,4 kg | 85,0 kg  | 95,1 kg   | 120,4 kg   | Salicorniaöl             |
| (Öle aus Reststoffen)                 |                |          |          |           |            |                          |
| 44,0 kg                               | 610,0 kg       | 135,7 kg | 84,0 kg  | 93,9 kg   | 120,4 kg   | Frittierfette            |
| 44,0 kg                               | 610,0 kg       | 135,7 kg | 84,0 kg  | 93,9 kg   | 120,4 kg   | Tierfette*)              |
| (Öle aus Algen)                       |                |          |          |           |            |                          |
| -                                     | -              | -        | -        | -         | -          | Algenöle**)              |

\* UCO und Tierfette mit gemitteltem Molekulargewicht der Fettsäuren von 276 respektive 273 g/mol

\*\* benötigt mindestens so viel  $H_2$  wie für Camelinaöl

\*\*\* Propan wird als Flüssiggas verkauft und wird daher auch in Abb. 2 so bezeichnet

\*\*\*\* „Andere“ beinhalten  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ , leichte Kohlenwasserstoffe und Wasserdampf

\*\*\*\*\* Camelina und weitere hier nicht genannte Ölpflanzen wie etwa Carinata können sowohl auf fruchtbarem als auch auf unfruchtbarem Boden angebaut werden und sind daher doppelt gelistet

### Prozessroute 2: Bio-SAF aus Alkoholen (ATJ-SPK)

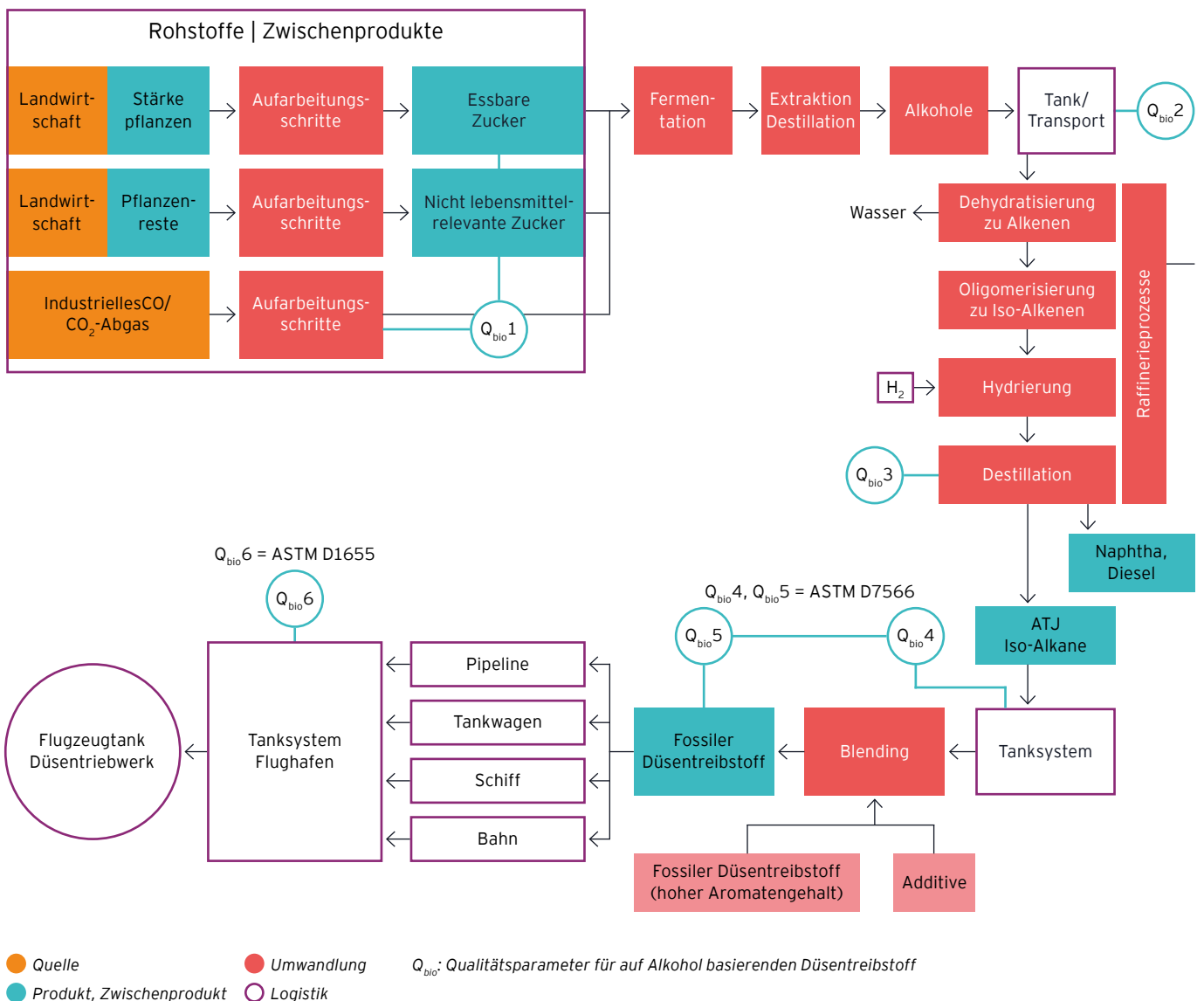
Diese Prozessroute baut einerseits auf Zucker, meist aus dem Lebensmittelbereich (Food) und weniger Non-Food, auf. Andererseits kann auch Synthesegas aus industriellen Abgasen wie etwa Gichtgas aus der Stahlproduktion in der analogen Prozessroute fermentativ zu Alkoholen umgewandelt werden. Die Alkohole werden über einen Raffinerieprozess mit  $H_2$  zu N-Alkanen und Isoalkanen weiterverarbeitet.

Lange war nur die biologische Fermentation auf der Basis des Alkohols „Isobutanol“ zertifiziert. Inzwischen sind auch analoge Routen auf der Basis von trinkbarem Ethanol und sogenannten Fuselalkoholen, die auch über die Fermentation von Industrieabgasen aus Biomasse erhältlich sind, zertifiziert worden.

Die meistverwendete Synthesesequenz umfasst die Wasserabspaltung (Dehydration) aus Alkoholen, gefolgt

von einer Oligomerisierung und Hydrierung mit  $H_2$ . Über eine Destillation wird Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosin (ATJ-SPK) von der Diesel- und der Naphthafraktion abgetrennt. ATJ-Prozesse wurden bereits von mehreren Unternehmen im Produktionsmaßstab realisiert.

**Abbildung 3** ATJ-SPK-Prozessroute ohne im Prozess selbst erzeugte „Aromaten“  
(Quelle: Fraunhofer)





Der H<sub>2</sub>-Bedarf von Anlagen, die auf ATJ-SPK als Hauptprodukt ausgelegt sind, hängt im Vergleich zu HEFA deutlich stärker vom Typ des eingesetzten Rohstoffes ab. Tabelle 4 gibt einen Überblick über gemittelte H<sub>2</sub>-Bedarfe und die Ausbeute für jeweils eine mit Ethanol oder eine mit Isobutanol betriebene und auf ATJ-SPK ausgelegte Anlage<sup>8</sup>. Jeweils vorge-reinigte Alkohole werden von dem in Abbildung 3 mit „Q<sub>bio,2</sub>“ markierten Punkt eingespeist. An dieser Stelle werden nur Daten und Ausbeuten für essbare Zucker gezeigt, weil es noch keine Anlage für die Herstellung von

Alkoholen aus nicht essbaren Zuckern im großen Maßstab gibt.

Die Daten in Tabelle 4 wurden durch Simulation von industrienahen Daten in ASPEN-Software ermittelt und berücksichtigen die speziell pro Alkoholtyp entstehende Herausforderung in der Verkettung der in Abbildung 3 gezeigten Raffinerieprozesse. Es sei angemerkt, dass sich die Kohlenstoffkettenlänge und deren Verteilung im erzeugten ATJ-SPK deutlich je nach Alkoholtyp unterscheiden. Weiterhin werden auch stark unterschiedliche Mengen von Naphtha und Diesel er-

zeugt. Für den H<sub>2</sub>-Bedarf einer auf industriellen Abgasen betriebenen Technologie sind keine genauen Zahlen zum H<sub>2</sub>-Bedarf und den Ausbeuten bekannt. Beide hängen aber sicherlich stark vom Verhältnis der Rohstoffe CO, CO<sub>2</sub> und ggf. auch zusätzlich des vorhandenem H<sub>2</sub> im Rohstoff, z. B. bei Stahlwerksabgasen, ab.

**Tabelle 4**

Input und Output „ATJ-SPK-Anlage“ in Kilogramm/Tonne Alkoholtyp

(Quelle: Fraunhofer)

| H <sub>2</sub><br>Input | ATJ-SPK<br>Output | Diesel   | Naphtha  | Propan* | Andere** | Alkoholtyp |
|-------------------------|-------------------|----------|----------|---------|----------|------------|
| 5,9 kg                  | 417,5 kg          | 119,3 kg | 59,6 kg  | 0 kg    | 403,6 kg | Ethanol    |
| 7,5 kg                  | 529,0 kg          | 0 kg     | 226,7 kg | 0 kg    | 244,3 kg | Isobutanol |

\* Propan entsteht in der Regel nicht und ist nur als Vergleich zu HEFA mit gelistet

\*\* „Andere“ beinhalten H<sub>2</sub>, leichte Kohlenwasserstoffe und Wasserdampf

### Prozessroute 3: Bio-SAF aus Synthesegas (FT-SPK)

In dieser Prozessroute wird zunächst Synthesegas durch Vergasung eines vielfältigen Rohstoffangebots hergestellt, das nachfolgend mehrstufig zu SAF umgewandelt wird.<sup>c</sup>

Zunächst erfolgt die thermochemische Vergasung von Abfallplastik oder von Biomasse wie etwa von Weidenholz, Stroh, Holzhackschnitzel oder von „Black Liquor“ aus der Papierherstellung zu einem Synthesegas. Der im Synthesegas enthaltene Teer wird über eine Gasreinigung zusammen mit Staub

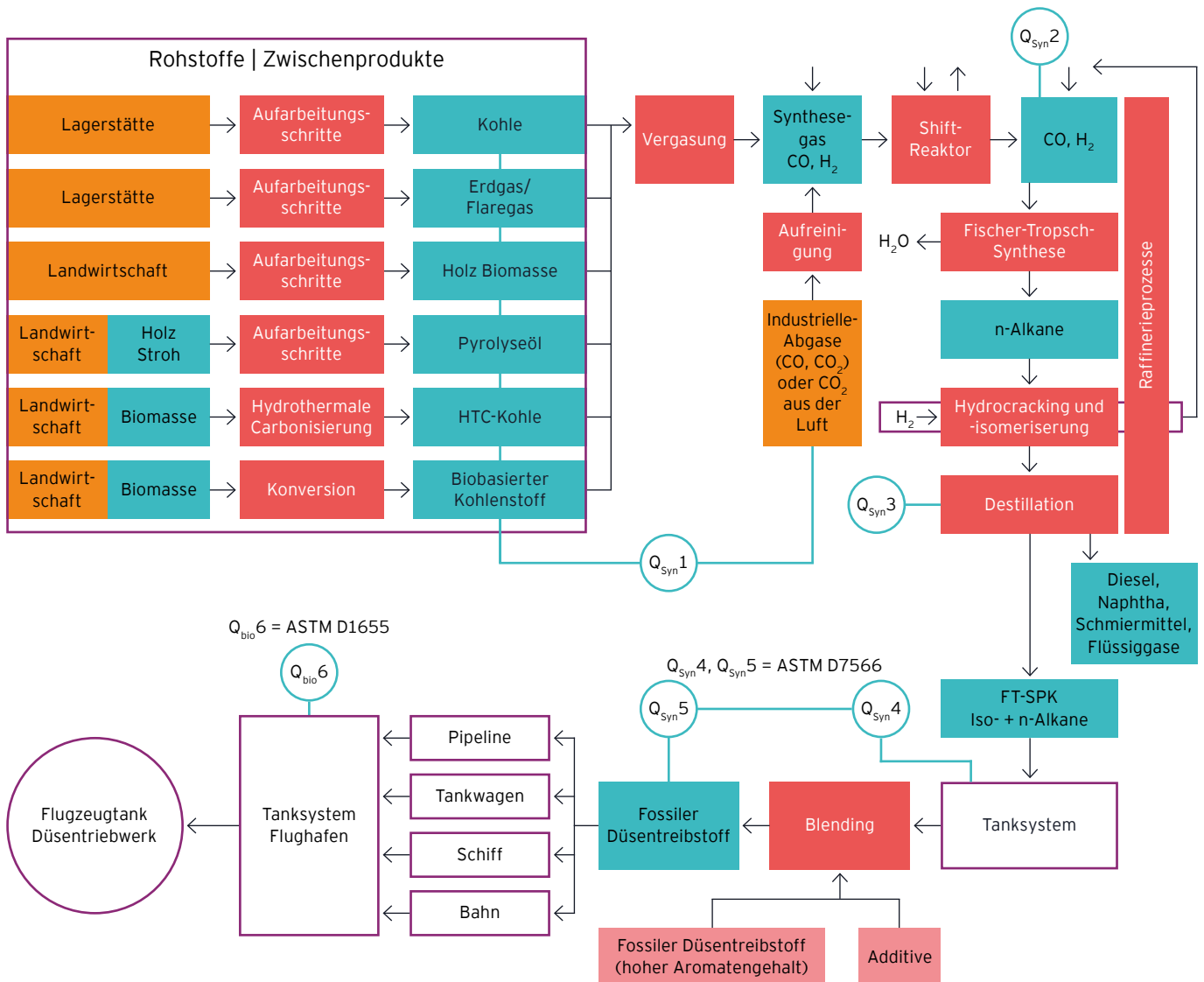
und Störstoffen abgetrennt. In der darauf folgenden Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) wird das Synthesegas bestehend aus CO, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> katalytisch in langkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt, die oft als „FT Syncrude“ bezeichnet werden. Hierzu gibt es zwei grundsätzliche Realisierungsmöglichkeiten: die Hochtemperatur-FTS und die neuere Tieftemperatur-FTS. Zur Verwendung der gebildeten langkettigen Kohlenwasserstoffe (Intermediate) als Flugzeugkraftstoff ist ein nachfolgendes Hydrocracking zur Ausbeuteerhöhung erforderlich, um langkettige Kohlenwasserstoffe in

Diesel und Kerosin umzuwandeln. Final wird das Produktgemisch destillativ in Flugzeugkraftstoff sowie in marktgängige Diesel, Naphtha, Schmiermittel und Wachse aufgetrennt, siehe Abbildung 4.

Aromaten werden bei der FTS im Normalfall nicht gebildet<sup>9</sup>, können aber über einen ähnlichen SKA-Prozess (Synthetic Kerosene Containing Aromatics) hergestellt werden<sup>10</sup>. In der ASTM D7566 ist dieser Produkttyp auch bereits spezifiziert und reguliert.

<sup>c</sup> Je nach Ausgangsstoff spricht man von Gas-to-Liquid (GtL, z. B. Shell), Coal-to-Liquid (CtL; hier ist die südafrikanische Sasol führend) oder Biomass-to-Liquid (BtL; früher z. B. Choren-Prozess). Zusammengenommen werden diese Prozesse auch als XtL-Verfahren bezeichnet.

**Abbildung 4**  
FT-SPK-Prozessroute  
(Quelle: Fraunhofer)



Für den H<sub>2</sub>-Bedarf der auf der gezeigten Rohstoffpalette erzeugten Produktgemische können zusammenfassend keine genauen Zahlen genannt werden. Die Ausbeuten hängen stark vom Verhältnis von Kohlenstoff zu O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> in den Rohstoffen als auch von der Gegenwart weiterer chemischer Elemente ab.

### Prozessroute 4: Bio-SAF aus Zucker (DSHC/SIP)

Diese Herstellungsmethode ist bekannt als „Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)“ bzw. „Synthesized Iso-Paraffins (SIP) produced from hydroprocessed fermented sugars“.

Der Prozess wandelt Zucker fermentativ zum Terpen „Farnesen“ um. Dieses wird über einen Raffinerieprozess zu Isoalkanen als finalem Produkt weiterverarbeitet, siehe Abb. 5. Das Produkt enthält nur wenige Molekülstrukturen, sogenannte Farnesane und weist daher nur eine sehr enge Siedeverteilung auf. Daher dürfen nur maximal

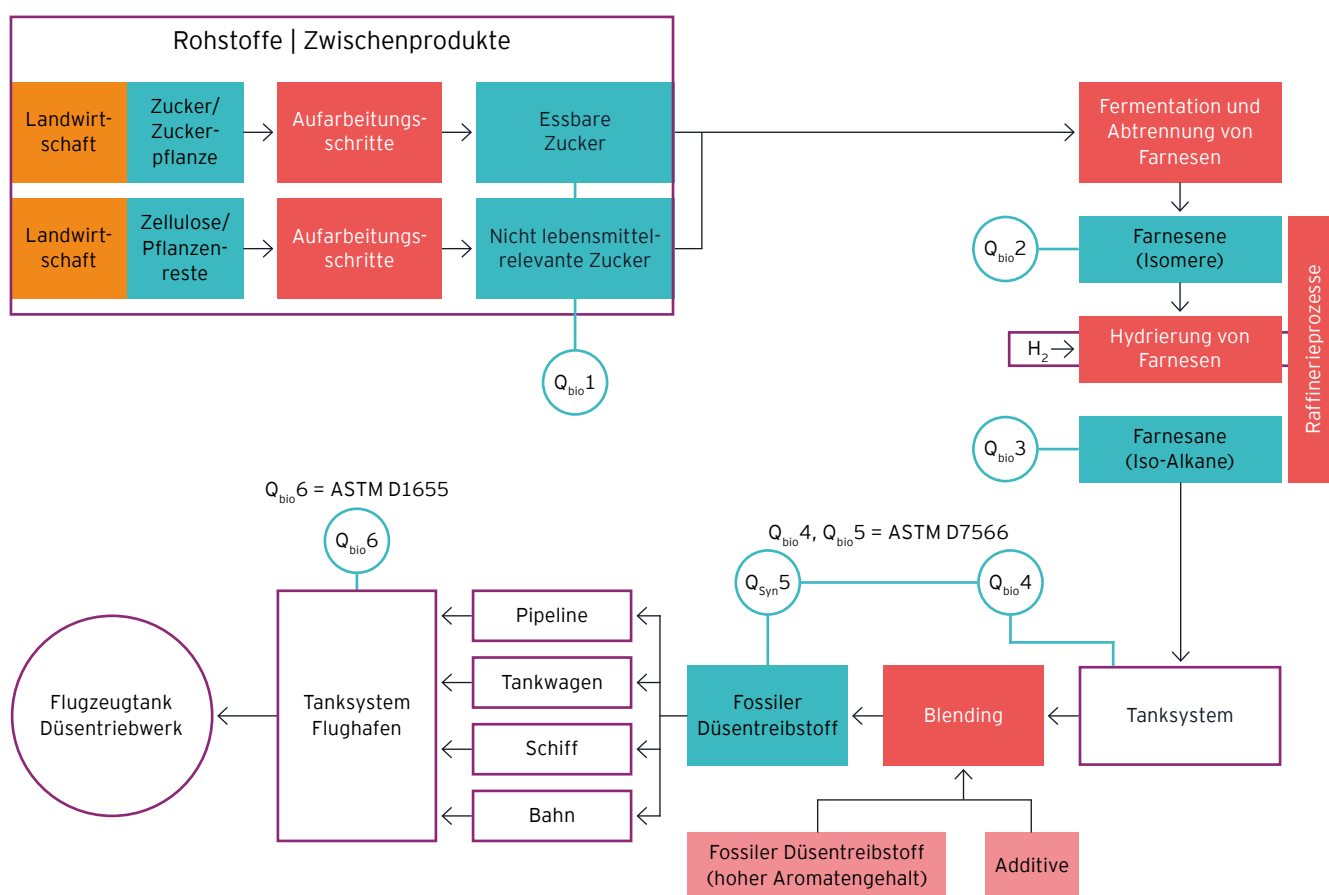
10 % mit fossilem Flugzeugkraftstoff vermischt bzw. geblendet werden.

Zur fermentativen Umsetzung werden gentechnisch veränderte Mikroorganismen auf der Basis von Algen, Bakterien oder Hefen eingesetzt. Derzeit werden bei diesem Verfahren fast ausschließlich herkömmliche Zuckerrohstoffe verwendet, obwohl auch zellulosehaltige Zucker (z. B. Zuckerrohrreste) getestet wurden. Die Komplexität und geringe Effizienz der Umwandlung zellulosehaltiger Zucker verursacht hohe Rohstoffkosten und einen zu hohen Energieverbrauch. Der  $H_2$ -Bedarf für diese Technologie ist nicht bekannt.



**Abbildung 5**  
DSHC/SIP-Prozessroute

(Quelle: Fraunhofer)



● Quelle      ● Umwandlung  
● Produkt, Zwischenprodukt      ○ Logistik

### Prozessroute 5 und 6: Bio-SAF aus anderen Rohstoffen (CHJ/HC-HEFA)

Weitere zugelassene Technologien für die SAF-Herstellung sind die katalytische Hydrothermolyse (CHJ, ASTM D7566 Annex 6) sowie hydrierte Kohlenwasserstoffe hergestellt aus nur einer einzigen Algensorte (HC-HEFA, ASTM D7566 Annex 7).

Beim CHJ-Verfahren, auch hydrothermale Verflüssigung genannt, wird bio-basiertes Öl mit FFA aus der Verarbeitung von Altfetten und Ölen mit Wasser vermischt und bei hohem Druck und hoher Temperatur gecrackt. Daraufhin wird das Gemisch mit  $H_2$  mehr-

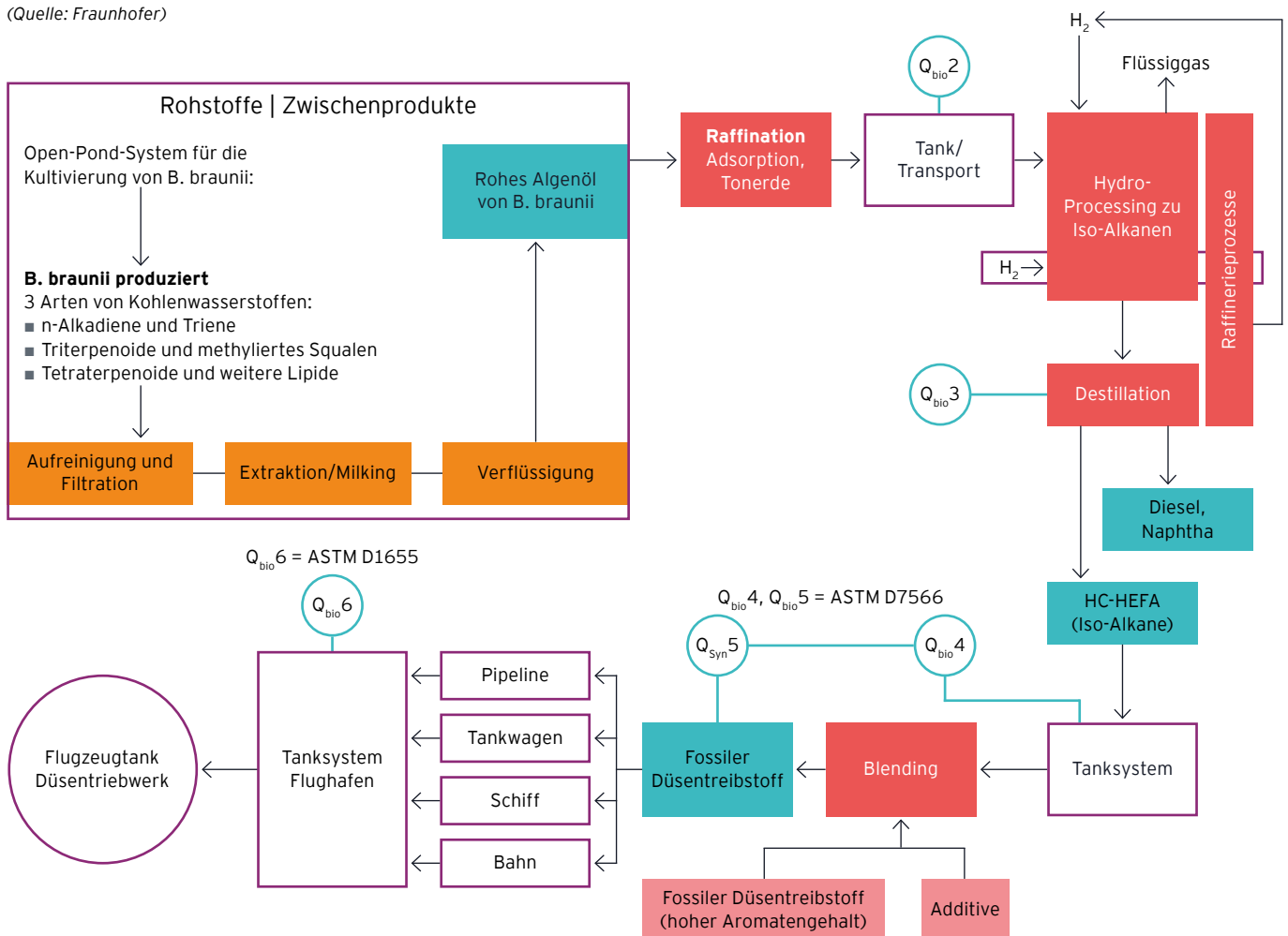
stufig zu N-, Iso- und Cycloalkanen sowie aromatischen Verbindungen umgesetzt. Das Produktgemisch wurde bereits als 100 % SAF von der US-Navy geflogen, da durch die Anwesenheit von Aromaten kein fossiles Produkt zugemischt werden muss.<sup>1</sup> Trotzdem ist dessen Einsatz für die kommerzielle Luftfahrt derzeit nur als 50 %-Blend mit fossilem Flugzeugkraftstoff erlaubt. Das Verfahren ähnelt dem HEFA-Verfahren in Abbildung 2, wobei aber der Prozessschritt „Raffination“ durch einen nicht katalytischen Crack-Prozess ersetzt wurde, der auch die Aromaten erzeugt. Laut Literaturangaben wurde

bisher nur dieser Crack-Prozess, jedoch nicht das ganze Verfahren als alternativer Prozessschritt der „Raffination“ in einen existierenden HEFA-Prozess bei Montana Renewables in den USA technisch im Produktionsmaßstab integriert.<sup>11</sup> Der  $H_2$ -Bedarf für diese Technologie ist nicht bekannt.

HC-HEFA umfasst die Umsetzung der Alge *Botryococcus braunii* (B. braunii) als einzigen für diese Prozessroute zugelassenen Algentyp. Diese wird durch mehrstufiges Hydroprocessing, d. h. mehrstufige  $H_2$ -Behandlungsschritte, zu N- oder Isoalkanen umgesetzt<sup>12</sup>, siehe Abbildung 6.

**Abbildung 6**  
HC-HEFA Prozessroute

(Quelle: Fraunhofer)



$Q_{bio}$ : Qualitätsparameter für auf *B. braunii* basierenden Düsentreibstoff  
*B. braunii*: planktonische Mikroalge, nur im Süßwasser lebend  
 n-Alkadiene: geradlinige/verzweigte Kohlenwasserstoffe mit 2 Doppelbindungen  
 Triterpenoide: große Gruppe an Sekundärmetaboliten im Pflanzenreich  
 Tetraterpenoide: chemisch modifizierte Tetraterpene mit Sauerstoffgruppen



B. braunii produziert einerseits Kohlenwasserstoffe, die sich in drei Hauptgruppen unterteilen lassen:

- 1 | n-Alkadiene und Triene,
- 2 | Triterpenoide und methyliertes Squalen und
- 3 | Tetraterpenoide;

darüber hinaus werden auch weitere Stoffe gebildet, mitunter klassische Lipide und Etherlipide. Während des exponentiellen Wachstums der Algen ist die Kohlenwasserstoff- und Etherlipidproduktivität am höchsten. Die Algen benötigen wie alle photosynthetischen Mikroorganismen  $\text{CO}_2$ , Licht, anorganische Nährstoffe und Wasser. Diese Voraussetzungen müssen bei der Kultivierung der Algen im Open-Pond-System berücksichtigt werden. Aufgrund der Toleranz der Algen gegenüber einigen Schadstoffen kann industrielles Rauchgas zur  $\text{CO}_2$ -Versorgung der Kulturen genutzt werden.

Die Aufreinigung zum rohen Algenöl erfordert weitere Vorbehandlungsschritte. So werden eine Zentrifugation und eine Filtration durchgeführt, beispielsweise durch pH-Veränderung, die zur Ausfällung der Algen führt. Zur Gewinnung der von der Alge produzierten Kohlenwasserstoffe, die sich in den äußeren Zellwänden der Algen befinden, werden Lösungsmittel zur Extraktion angewendet. Eine weitere Möglichkeit ist die Extraktion

mittels  $\text{CO}_2$ -Druckanpassungen. Letztendlich konnten bereits in der Vergangenheit vom Algenrohöl ausgehend Kraftstoffe, u. a. Diesel, Kerosin und Naphtha, gewonnen werden.<sup>13</sup>

Die Erzeugung von Flugzeugkraftstoffen über Hydroprocessing scheint laut Literatur im Wesentlichen über Hydrocracking zu erfolgen, d. h., große Moleküle werden im Kerosinsiedebereich zu kleineren umgesetzt.<sup>14</sup> Eine Studie hebt den potenziellen Vorteil der Nutzung von Algen des Typs B. braunii als Rohstoff für Kraftstoffe hervor, da diese mittels nicht destruktiver Extraktionstechnologien gewonnen werden können. Durch das sogenannte Milking, bei dem die Kohlenwasserstoffe aus den Algenzellen entnommen werden, ohne die Zellen zu zerstören, entfällt die Notwendigkeit einer erneuten Kultivierung, wie es bei landwirtschaftlichen Rohstoffen der Fall ist. Für die großflächige Umsetzung und Machbarkeit dieser Methoden ist jedoch weiterhin Forschung erforderlich.<sup>15</sup> Im Jahr 2021 flog die japanische Airline ANA im Rahmen des NEDO-Projekts auf der Grundlage von mit Mikroalgen (B. braunii) gemischtem Flugzeugkraftstoff. Trotz solcher Pilotprojekte befindet sich die Verwendung von B. braunii zur Herstellung von Jet Fuel noch in einer frühen Entwicklungsphase.<sup>16</sup> Der  $\text{H}_2$ -Bedarf für diese Technologie ist nicht bekannt.

### Prozessroute 7: Bio-SAF mit Aromaten aus Alkoholen (ATJ-SKA)

Diese erst jüngst zugelassene Technologie für die SAF-Herstellung beinhaltet die Fermentation von Zuckern, die ihrerseits aus Stärke und Zucker produzierenden Rohstoffen wie etwa Mais, Sorghum, Zuckerrohr oder Zuckerrüben wie auch über die Fermentation zellulosehaltiger Biomasse, meist aus mit Dampf hydrolysierte Lignozellulose, gewonnen wurden. Weiterhin ist auch die biochemische Umwandlung aus  $\text{H}_2$  und Kohlenmonoxid, d. h. „Synthesegas“, erlaubt. Das Verfahren darf sowohl einen einzigen Alkoholstrom mit zwei bis fünf Kohlenstoffatomen, d. h. chemisch gesehen Ethanol bis Pentanol, deren Gemische oft als Fuselalkohole bezeichnet werden, als auch eine Kombination aus zwei oder mehr Ethanol-bis-Pentanol-Alkoholgemischen verwenden und gemeinsam verarbeiten. Einerseits wird ein nicht aromatisches Produkt über die Verfahrensschritte Dehydratisierung, Oligomerisierung, Hydrierung und Destillation erhalten, andererseits ein aromatisches Produkt über die Verfahrensschritte Dehydratisierung, Oligomerisierung, Hydrierung und Destillation gewonnen<sup>17,5</sup>, das dem fossilem Flugkraftstoff deutlich ähnlicher ist als ATJ-SPK<sup>18</sup>. Technisch aber handelt es sich bei ATJ-SKA um ein dem SAF aus Alkoholen (ATJ-SPK) sehr ähnliches Verfahren. Nur der Prozessschritt Oligomerisierung ist bei ATJ-SKA um den Prozessschritt Aromatisierung erweitert worden, so dass der Zusatz von aus Erdöl erzeugten Aromaten oder die Vermischung mit viel Aromaten enthaltendem fossilem Flugzeugkraftstoff, im Gegensatz zu ATJ-SPK, am in Abbildung 3 mit „Qbio4“ bezeichneten Punkt nicht zwingend erforderlich ist.

Der  $\text{H}_2$ -Bedarf für diese Technologie ist nicht bekannt, sollte sich aber in der Größenordnung nicht wesentlich von der ATJ-SPK-Technologie unterscheiden.



### Prozessroute 8: Gemeinsame Verarbeitung von Biomasse mit Rohöl (Co Processing)

Diese Methode wird als Co-Processing bezeichnet, da sowohl Rohöl als auch auf Biomasse und Kohle basierte alternative Zwischenprodukte zusammen in einer Raffinerie verarbeitet werden.

Gegenwärtig ist die Mitverwendung von nicht konventionellen Rohstoffen in Raffinerien auf Fette und Öle, Fettsäuren und Fettsäureester sowie Fischer-Tropsch-Intermediate beschränkt, wie sie derzeit in der ASTM D1655 zugelassen sind. An der Ausweitung der zulässigen alternativen Rohstoffe über

die ASTM wird bereits von mehreren Stakeholdergruppen gearbeitet.<sup>6</sup> Da es sich bei den Raffinationsprozessen in der Regel um thermische Verfahren handelt, sind sowohl die Lagerstabilität als auch die thermische Stabilität der Rohstoffe beim Aufheizen wichtig und müssen durch geeignete Vorbehandlungsschritte sichergestellt werden. Weiterhin gilt es, den hohen O<sub>2</sub>-Gehalt biobasierter Öle zu berücksichtigen, da einerseits in der Raffinerie bisher nicht vorhandene O<sub>2</sub>-haltige Produkte entstehen und andererseits deutlich mehr Wärme beim ersten H<sub>2</sub>-Behandlungsschritt abgeführt werden muss. Beides erfordert in der Regel einen

Umbau oder eine Erweiterung des bestehenden Anlagenparks und schließt letztendlich auch zusätzliche Qualitätskontrollschritte mit ein. Fossile Öle können ähnlich wie biogene Öle organische Schwefel- oder Stickstoffverbindungen enthalten; diese zu behandeln ist die Raffinerie gewohnt. Anders ist dies bei O<sub>2</sub>-Verbindungen. Fossiles Öl ist nahezu frei von organischen O<sub>2</sub>-Verbindungen. Somit muss bei O<sub>2</sub>-reichen Ölen dem Raffinationsprozess eine H<sub>2</sub>-Behandlung (Hydrotreating) vorgeschaltet werden. Abbildung 7 zeigt das Prinzip sowie mögliche Einsatzstoffe für das Co-Processing.

### Abbildung 7

Co-Processing in einer Raffinerie mit den Optionen für fossile und erneuerbare Rohstoffe<sup>19, 20</sup>



Der H<sub>2</sub>-Bedarf für das Co-Processing ist nicht im Detail bekannt und sollte sich zumindest für Fette und Öle nicht wesentlich vom Bedarf von HEFA unterscheiden.

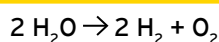
# Raffinerie

### 1.1.2. E-SAF aus CO<sub>2</sub>: Power-to-Liquids (PtL)

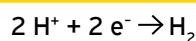
Das Ziel der Nutzung von E-SAF ist der Schluss des Kohlenstoffkreislaufs, also der Vermeidung der Einführung fossilen Kohlenstoffs in den aktiven Kreislauf. Letztlich bedeutet das für alle technischen Ansätze zur Produktion erneuerbarer Kraftstoffe, dass CO<sub>2</sub> als ultimatives Endprodukt jeder Nutzungskaskade kohlenstoffhaltiger Materialien rezykliert und in eine erneute Nutzungskaskade gebracht werden muss. Das gilt auch für alle Prozesse, in denen biogene Rohstoffe (Biomasse) eingesetzt werden: Biomasse wird primär durch photosynthetisch aktive Organismen, also durch Pflanzen oder auch durch Mikroorganismen aufgebaut. In der Photosynthese werden CO<sub>2</sub> und Wasser mittels solarer Energie (Licht) zu Kohlenhydraten umgesetzt, die letztlich der Bildung von Biomasse dient. Am Anfang jeder Nahrungskette steht also die Nutzung von CO<sub>2</sub> als kohlenstoffhaltiger Rohstoff. Insofern handelt es sich auch bei der Produktion von Biokraftstoffen um Carbon Capture and Utilization (CCU) Prozesse. Im Gegensatz zu dieser natürlichen CO<sub>2</sub>-Nutzung für den Aufbau von Biomasse steht bei dem PtL Ansatz die direkte technische Umsetzung von CO<sub>2</sub> im Mittelpunkt. Gemeinhin wird der Begriff CCU auch nur für Prozesse einer solchen technischen CO<sub>2</sub>-Nutzung verwendet.

E-SAF Produktionsrouten beinhalten immer mindestens einen elektrochemischen Prozessschritt, wie das Wort „Power“ im Begriff Power-to-Liquids impliziert. Dabei geht es nicht um den verfahrenstechnischen Einsatz von elektrischer Energie, etwa zum Heizen oder Kühlen von Reaktoren oder anderer Anlagekomponenten, sondern um Prozessschritte, in denen die zugeführte elektrische Energie auf che-

misches Weise in den Reaktionsprodukten gespeichert wird. PtL-Produkte sind also chemische Energieträger, die durch elektrischen Strom bildlich gesprochen energetisch „aufgeladen“ worden sind. In vielen E-SAF Prozessrouten besteht der elektrochemische Schritt in der Elektrolyse von Wasser, also der elektrochemischen Spaltung von Wasser in H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> nach der folgenden Bruttogleichung:



Die H<sub>2</sub>-Bildung erfolgt dabei an der Kathode durch die Reduktion von Protonen:



Der chemische Energieträger H<sub>2</sub> wird dann beispielsweise genutzt, um durch chemische Reaktion mit CO<sub>2</sub> energiereiche organische Verbindungen aufzubauen, wie etwa Methanol oder eben Kraftstoffe. Somit wird elektrische Energie auf indirekte Weise zur Reduktion von CO<sub>2</sub> genutzt, indem durch elektrochemische Reduktion aus Wasser H<sub>2</sub> gewonnen wird, der dann CO<sub>2</sub> chemisch reduziert.

Alternativ zu dieser chemischen „Aufladung“ von CO<sub>2</sub> mit H<sub>2</sub> können in einer elektrochemischen Reaktion Elektronen auch direkt von der Elektrode auf ein CO<sub>2</sub>-Molekül übertragen werden. So werden in der sogenannten Co-Elektrolyse von Wasser und CO<sub>2</sub> gleichzeitig H<sub>2</sub> (aus der Wasserspaltung) und CO (aus der CO<sub>2</sub>-Reduktion) gewonnen. Beide Produkte bilden zusammen ein als Synthesegas bezeichnetes Gemisch, das z. B. über die Fischer-Tropsch-Synthese (siehe unten in diesem Abschnitt) zu SAF umgesetzt werden kann (siehe 1.1.1, Prozessroute 3).

Ein weiterer Prozess zur elektrochemischen Reduktion von CO<sub>2</sub> liefert die

C<sub>2</sub>-Verbindung Ethen (Ethylen) als Zielprodukt.<sup>21</sup> Das gasförmige Ethen bildet sich bei diesem Prozess an Kupferkatalysatoren direkt an der Elektroden-grenzfläche und kann dann nach einem Gasreinigungsschritt auf chemischem Weg weiter zu SAF umgesetzt werden. Diese chemische Umsetzung ist eine Oligomerisierung<sup>d</sup>, also eine Verknüpfung mehrerer Ethenmoleküle in einem thermokatalytischen Prozess (bei hohen Temperaturen und über einem festen Katalysatorbett). Dieser Ansatz der kombinierten elektrochemisch-thermokatalytischen Synthese von Kraftstoffen aus CO<sub>2</sub> wurde beispielsweise im von der EU geförderten Projekt EcoFuel erfolgreich verfolgt.<sup>22</sup>

Dieses Kapitel konzentriert sich jedoch auf den Einsatz von H<sub>2</sub> zur chemischen CO<sub>2</sub>-Reduktion. Es bieten sich hier verschiedene Prozessrouten an, über die man aus CO<sub>2</sub> als primärer Kohlenstoffquelle SAF herstellen kann.

Derzeit befinden sich zwei verschiedene PtL-Produktionsverfahren für SAF auf dem Weg in die kommerzielle Anwendung, die auf der chemischen Umwandlung von CO<sub>2</sub> durch H<sub>2</sub> beruhen und dabei vergleichbare SAF-Produktgemische liefern, sich jedoch in Bezug auf die spezifischen Konversionsprozesse unterscheiden. Diese Verfahren werden oft als Fischer-Tropsch-Route und Methanolroute bezeichnet. Während sich die Methanolroute noch im Prozess der technischen Zulassung für den Einsatz in der Luftfahrt befindet, ist die Fischer-Tropsch-Route bereits nach der Spezifikation ASTM D7566 zugelassen (siehe 1.2 zur technischen Zulassung). Diese Nomenklatur der Fischer-Tropsch- und Methanolroute wird auch in dieser Studie verwendet. In Abbildung 8 sind beide Prozessrouten schematisch dargestellt.

<sup>d</sup> Bei einer Oligomerisierung werden vereinfacht gesprochen mehrere Moleküle chemisch zu einem größeren Molekül verknüpft.

Das Oligomer besteht dann aus sich wiederholenden Einheiten der oligomerisierten Moleküle. Bei einer hohen Zahl verknüpfter Moleküle spricht man von Polymeren.

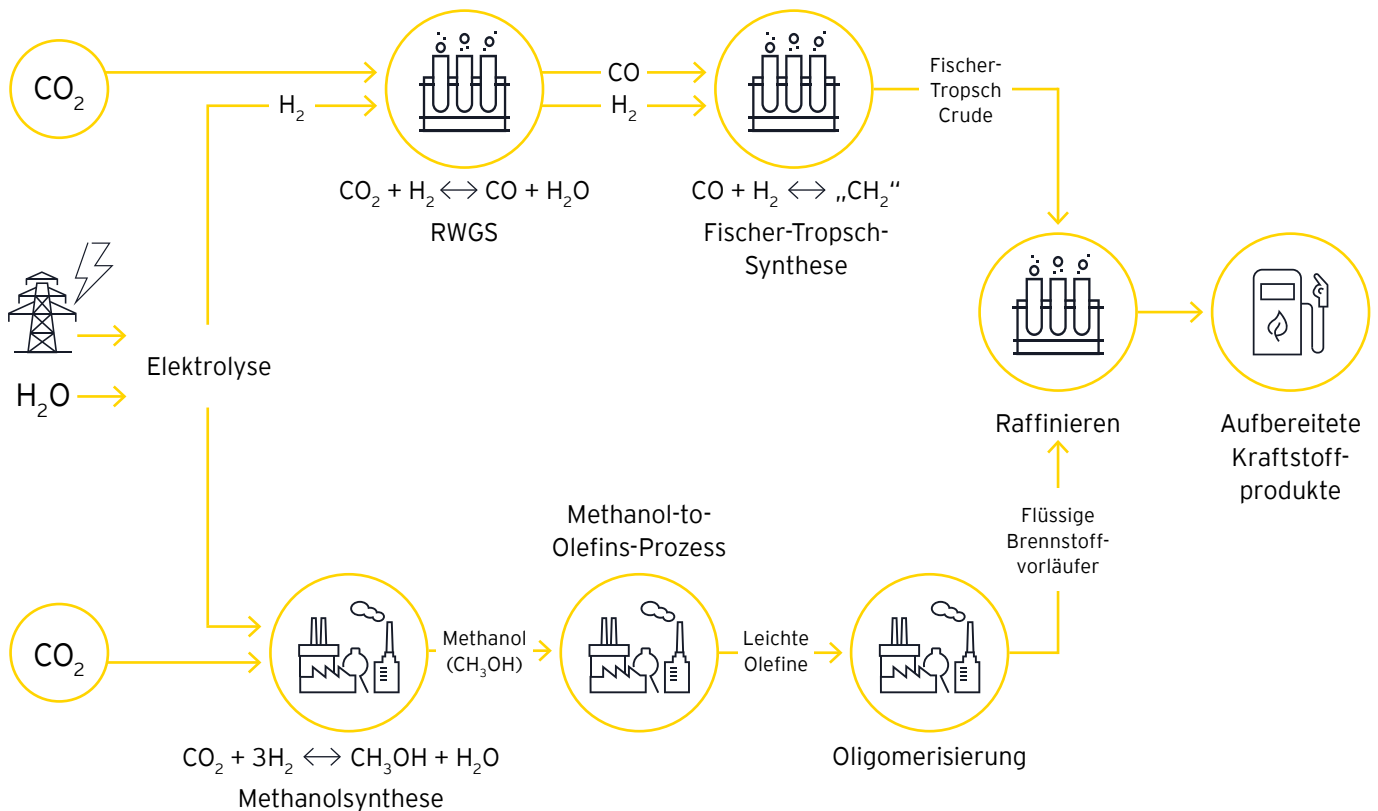


Die Verfügbarkeit von grüner Energie und biogenem CO<sub>2</sub> wird entscheidend für die Auswahl potenzieller Regionen für die SAF-Produktion sein.

Air France-KLM Group

**Abbildung 8**

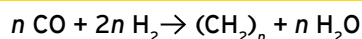
Schematische Darstellung der PtL-Prozesspfade über die  
1 | Fischer-Tropsch-Route (oberer Pfad) und über die  
2 | Methanolroute (unterer Pfad). RWGS: Reverse water gas shift.





## Fischer-Tropsch-Synthese

Bei der FTS handelt es sich um ein Verfahren zur Konversion von Synthesegas, einem Gemisch aus  $H_2$ , CO und mit geringeren Anteilen  $CO_2$ , in Produktgemische aus flüssigen und festen Kohlenwasserstoffen. Die Gesamtreaktion wird durch folgende Gleichung beschrieben:



Die gebildeten Kohlenwasserstoffe sind hier als  $(\text{CH}_2)_n$  ausgedrückt. Das Verhältnis von flüssigen zu festen Produkten kann je nach Prozessbedingungen variieren. FTS wurde bereits in den 1920er-Jahren von Franz Fischer und Hans Tropsch in Mülheim entwickelt, mit dem Ziel, Benzin aus Kohle zu produzieren, da Kohle durch Gasifizierung in Synthesegas überführt werden kann. Dem Zweck der Kohleverflüssigung dient die FTS in Südafrika auch heute noch, wo die Technologie aus Mangel eigener Erdölressourcen bei gleichzeitig großen Kohlevorkommen seit vielen Jahrzehnten in industriellem Maßstab betrieben wird. Da Synthesegas prinzipiell aber durch Gasifizierung vieler verschiedener fossiler wie biogener Rohstoffe zugänglich ist, sind das Interesse und das Anwendungspotenzial der FTS als Verfahren zur Produktion flüssiger Kohlenwasserstoffe im Kontext der SAF in den letzten 10 bis 15 Jahren stark gestiegen.

Technisch handelt es sich bei der FTS um einen heterogenkatalytischen Prozess, der bei erhöhten Temperaturen

(im Bereich 200–350 °C) und Drücken (bis etwa 25 bar) an Eisen- oder Kobaltkatalysatoren abläuft. An den Katalysatoren findet eine Kettenwachstumsreaktion statt, bei der über die Prozessbedingungen Einfluss auf die Produktverteilung (die Verteilung der Produkte mit verschiedenen Molekülmassen) genommen werden kann. Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass der Prozess nicht ein einzelnes chemisches Produkt, sondern durch den statistischen Charakter von Kettenwachstumsreaktionen immer ein Gemisch von Produkten liefert.

Das FT-Rohprodukt ist also ein Gemisch aus unverzweigten Kohlenwasserstoffen, das noch ungesättigte Verbindungen und auch Oxygenate<sup>e</sup> enthalten kann. Um aus dem FT-Rohprodukt (auch Fischer-Tropsch Crude genannt) SAF zu erhalten, ist eine Raffination erforderlich. Durch die Umsetzung mit  $H_2$  werden alle O-Atome aus dem Rohprodukt entfernt und alle Doppelbindungen gesättigt. Schließlich muss durch eine Isomerisierung<sup>f</sup> dafür gesorgt werden, dass das Produktgemisch nicht mehr nur unverzweigte Kohlenwasserstoffe enthält, sondern einen hohen Anteil an verzweigten Molekülen, und zwar zu einem möglichst hohen Anteil im gewünschten Bereich von Molekülmassen, also im Bereich von SAF. Die Isomerisierung ist wichtig, um zu gewährleisten, dass der Kraftstoff auch bei sehr niedrigen Temperaturen, wie sie in der Flughöhe von Passagierflugzeugen herrschen können, im

flüssigen Zustand verbleibt. Schließlich wird das Produktgemisch destillativ aufgearbeitet (fraktioniert), um die Kraftstofffraktionen voneinander zu trennen.

Bei der FTS ist es wichtig zu betonen, dass die Qualität des Produktgemischs (chemische Eigenschaften, Produktverteilung etc.) unabhängig vom eigentlichen Rohstoff ist. Das liegt darin begründet, dass der Rohstoff (Kohle, Erdgas oder eben biogene Rohstoffe wie Holz) zunächst gasifiziert, also in Synthesegas umgesetzt wird. Dieses Synthesegas ist der Feedstock für die FTS. Solange Zusammensetzung und Reinheit des Synthesegases adäquat eingestellt werden, ist es für die Synthese völlig unerheblich, aus welchem Rohstoff es hergestellt worden ist. Das ist relevant, weil SAF, das über die FTS hergestellt wird, nach ASTM D7566 in Gemischen mit fossilem Kerosin für die Nutzung in der Luftfahrt zugelassen ist. Das schließt alle Produktionspfade ein, die über die FTS laufen, unabhängig vom eigentlichen Rohstoff.

## Methanolsynthese

Im Prinzip wird bei der Methanolroute ebenso wie bei der FT-Route ein wasserstoffreiches Synthesegas heterogenkatalytisch zu einem flüssigen Zwischenprodukt umgesetzt, das dann chemisch weiter zu SAF prozessiert wird. Wie in Abbildung 8 vereinfacht und schematisch dargestellt, verläuft die Methanolroute prinzipiell über folgende Prozessschritte:  $CO_2$  wird mit  $H_2$  zu Methanol umgesetzt. Die Reaktion verläuft selektiv, es entstehen kaum ungewollte Nebenprodukte. Methanol wird dann in leichte Alkene (auch Olefine genannt) umgesetzt, hauptsächlich in Ethen und Propen. Diese gasförmigen Alkene werden anschließend zu flüssigen Alkenen, die bereits Verzweigungen enthalten, oligomerisiert. Schließlich werden die flüssigen Alkene zu gesättigten Kohlenwasserstoffen (Alkanen) hydriert und destillativ fraktioniert.

# FTS

<sup>e</sup> Organische Verbindungen, die neben Kohlen- und Wasserstoffatomen auch O-Atome enthalten sind

<sup>f</sup> Isomere sind chemische Verbindungen, die dieselbe atomare Zusammensetzung und dieselben Molekülmassen aufweisen, sich jedoch in ihrer räumlichen Struktur unterscheiden. Von Isomerisierung spricht man, wenn eine Verbindung in ein anderes Isomer umgewandelt wird. Dabei bleiben Zusammensetzung (Summenformel) und Molekulargewicht unverändert, aber die Molekülstruktur ändert sich. Im oben genannten Fall einer Isomerisierung werden unverzweigte Kohlenwasserstoffe in verzweigte Kohlenwasserstoffe umgesetzt.

Aus dieser vereinfachten Verfahrensbeschreibung ergeben sich folgende wichtige Unterschiede zur Fischer-Tropsch-Route:

- Der erste Prozessschritt, also die Verflüssigung, kann direkt durch Hydrierung von CO<sub>2</sub> erfolgen - es ist keine vorherige Konversion von CO<sub>2</sub> zu CO erforderlich. Diese Konversion (reverse water gas shift, kurz RWGS) nach der Gleichung  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$  läuft bei sehr hohen Temperaturen über 700 °C ab und ist sowohl technisch als auch energetisch aufwendig. Die FTS kann dagegen nicht direkt mit CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> erfolgen, sondern erfordert einen vorherigen RWGS-Prozess.
- Der Verflüssigungsschritt liefert nicht direkt ein Kohlenwasserstoffgemisch wie das Fischer-Tropsch Crude, sondern Methanol, also einen Alkohol. Dieses Zwischenprodukt stellt an sich bereits eine industriell hochrelevante Plattformchemikalie mit einem großen und vielseitigen bestehenden Markt dar. Zur SAF-Produktion ist jedoch noch eine mehrstufige Synthese (über Alkene und Oligomerisierung) nötig. Die Prozessierung von Methanol zu SAF ist also komplexer als die von Fischer-Tropsch Crude.

In beiden Fällen werden jedoch vergleichbare SAF-Produkte gewonnen. Im Fall der Methanolroute ist das Produkt jedoch noch nicht nach ASTM D7566 zugelassen. Dies ist ein weiterer Unterschied zur FT-Route. Es ist jedoch bereits ein Zulassungsverfahren von Methanol-basiertem SAF bei der ASTM anhängig. Es ist daher von einer Zulassung in naher Zukunft auszugehen.



### CO<sub>2</sub>-Quellen für E-SAF-Produktion

Alle PtL-Produktionsrouten beginnen mit der Bereitstellung der Ausgangsstoffe, nämlich CO<sub>2</sub> und Wasserstoff (H<sub>2</sub>). Während Wasserstoff auf erneuerbare Weise, wie oben erwähnt, vor allem durch Elektrolyse von Wasser gewonnen wird, also durch die elektrolytische Spaltung von Wasser in Wasser- und Sauerstoff, kann CO<sub>2</sub> aus verschiedenen Quellen bereitgestellt werden. Am einfachsten gelingt dies durch Extraktion aus industriellen Abgasströmen. Dies können Abgase von Fermentationsprozessen etwa zur Produktion von Ethanol sein. Auch in Biogasanlagen wird neben dem Zielprodukt Methan eine beträchtliche Menge CO<sub>2</sub> gebildet (Biogas enthält etwa 40 % CO<sub>2</sub>), welches bei der Biogasaufreinigung abgetrennt werden muss, bevor das Methan ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. Eine weitere Option sind Verbrennungsprozesse von biogenen oder auch fossilen Stoffen, bspw. in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen. Zementwerke werden ebenfalls oft als große CO<sub>2</sub> Emittenten genannt, wobei hier CO<sub>2</sub> sowohl durch die Verbrennung etwa von Erdgas zur Bereitstellung der benötigten Wärme freigesetzt wird als auch durch das Brennen von Kalk (Kalzinieren) gemäß der Gleichung



An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine wirklich erneuerbare SAF-Produktion nur möglich ist, wenn auch der Rohstoff CO<sub>2</sub> aus einer erneuerbaren Quelle stammt. Die Verbrennung fossiler Stoffe wie Erdgas oder Kohle zählt nicht dazu. Zwar

kann argumentiert werden, dass die Nutzung dieser Abgase gegenüber einer direkten Emission in die Atmosphäre vorteilhaft sei, doch trifft dies nur zu, solange die Verbrennungsprozesse (also etwa ein Kraftwerk) ohnehin laufen. Sollte die Laufzeit einer solchen Verbrennungsanlage hingegen durch die Nachnutzung des entstehenden CO<sub>2</sub> verlängert werden, handelt es sich nicht mehr um eine im Sinne der Nachhaltigkeit sinnvollen Nutzungskaskade.

Der Vorteil industrieller CO<sub>2</sub>-Punktquellen liegt in der vergleichsweise hohen CO<sub>2</sub> Konzentration: Je nach Prozess kann der CO<sub>2</sub>-Gehalt bei Punktquellen bei über 95 % liegen. Hier kann das CO<sub>2</sub> ohne großen Aufwand so weit aufgereinigt werden, dass es als Rohstoff in katalytischen Konversionsprozessen einsetzbar ist. Allerdings sind derartige Punktquellen nicht überall verfügbar, insbesondere nicht in Regionen, in denen erneuerbare Energien in hohem Maß und günstig gewonnen werden können, wie etwa in Wüsten oder entlegenen windreichen Küstenregionen. In diesen Fällen muss entweder eine CO<sub>2</sub>-Transportkette etabliert werden oder aber es kommt ein Verfahren zum Einsatz, bei dem das CO<sub>2</sub> direkt aus der Luft abgeschieden wird (Direct Air Capture, kurz DAC).

DAC hat den Vorteil, dass es unabhängig von Punktquellen prinzipiell überall auf der Welt eingesetzt werden kann. Aufgrund der geringen Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Luft ist der erforderliche technische Aufwand jedoch hoch.



## DAC – direkte Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft

Steigende CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre und die resultierende Erderwärmung sind Motivation für die Entwicklung technischer Ansätze zur Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Luft, zu dessen dauerhafter Entfernung durch Sequestrierung in geeigneten Gesteinsformationen oder zur Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff in der Produktion von Chemikalien, Materialien oder Kraftstoffen. Zu diesem Zweck können Pflanzen als natürliche CO<sub>2</sub>-Fänger dienen, die durch Photosynthese CO<sub>2</sub> assimilieren und den Kohlenstoff in Biomasse binden. Diese Biomasse kann dann als Rohstoff genutzt oder zur Sequestrierung in unterirdische Lager verbracht werden. Alternativ kann CO<sub>2</sub> auch auf technischem Wege aus der Luft abgeschieden werden – dieser Ansatz entspricht dem sogenannten Direct Air Capture (DAC). Die Herausforderung liegt dabei im niedrigen CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft: Auch wenn die Atmosphäre derzeit viel mehr CO<sub>2</sub> enthält als vor dem Zeitalter der Industrialisierung, so ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit etwa 425 ppm (0,04 %) (Mauna Loa Observatory, Hawaii) tatsächlich ziemlich gering. Trotz des dadurch bedingten hohen technischen Aufwands wird DAC von vielen als Schlüsseltechnologie gesehen, um CO<sub>2</sub> in großem Umfang nutzbar zu machen oder es langfristig aus der Atmosphäre zu entfernen, um die Erderwärmung auf ein beherrschbares Maß zu begrenzen. Der Grund dafür liegt vor allem in der prinzipiell hohen Skalierbarkeit von DAC, da die Technologie keine fruchtbaren Anbauflächen benötigt und CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre in praktisch unbegrenzter Menge vorkommt. Die Arbeitsprinzip von DAC besteht in der Ansaugung von Luft, dem eigentlich Einfang von CO<sub>2</sub> durch ein Sorbens (ein Stoff

oder ein Material, an dem das CO<sub>2</sub> gebunden wird), der Freisetzung des gebundenen CO<sub>2</sub> durch Regenerierung des beladenen Sorbens (typischerweise durch Erwärmen) und der erneuten Beladung des regenerierten Sorbens. Diesem Arbeitsprinzip folgend gibt es verschiedene spezifische technische Lösungen, z. B. flüssiges vs. festes Sorbens, aktive vs. passive Einsaugung von Luft usw., die von den unterschiedlichen DAC-Firmen entwickelt werden. DAC ist ein noch junges Geschäftsfeld, Pionierfirmen sind beispielsweise Climeworks (Schweiz) und Carbon Engineering (Kanada). Die erste und bislang größte industrielle DAC-Anlage wurde von Climeworks auf Island in 2021 in Betrieb genommen und entfernt jährlich 4000 Tonnen CO<sub>2</sub> zum Zweck der Sequestrierung aus der Atmosphäre. Eine deutlich größere DAC-Anlage wird derzeit in Texas basierend auf der Technologie von Carbon Engineering aufgebaut, die jährlich bis zu 500.000 Tonnen CO<sub>2</sub> abscheiden können soll. Technische DAC-Ansätze existieren also, sie wurden großtechnisch bereits demonstriert. Die zentrale Herausforderung auf dem Weg zur großflächigen Anwendung liegt im hohen technischen Aufwand und den daraus resultierenden hohen Kosten. Als Schwelle für einen ökonomisch attraktiven Preis für die industrielle Nutzung werden oft 100 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub> genannt. Solche Preise sind mit den aktuellen DAC-Anlagen jedoch noch nicht erreichbar, die Kosten liegen noch bei mehreren Hundert Dollar pro Tonne. Es wird jedoch eine deutliche Kostenreduktion im Zuge einer Lernkurve durch die zunehmende Industrialisierung der DAC-Technologie erwartet, sodass CO<sub>2</sub>-Preise von unter 100 US-Dollar pro Tonne realistisch erscheinen.

## 1.2 Technische Zulassung (ASTM) für Bio- und E-SAF

Die Bewertung und Zulassung von Bio- und E-SAF wird durch auf Branchenkonsens basierende Kraftstoffspezifikationen definiert und kontrolliert, die von der International Aviation Fuel Industry überwacht werden. Das von der Gemeinschaft der Flugkraftstoffhersteller entwickelte Verfahren nutzt das ASTM-Unterkomitee J, um die Auswertung von Daten und die Festlegung von Spezifikationskriterien für neue, nicht auf Erdöl basierende Drop-in-SAF zu koordinieren. Das Unterkomitee J hat zwei Normen herausgegeben, um diesen Prozess zu erleichtern: ASTM D4054 „Standard Practice for Qualification and Approval of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives“ und ASTM D7566 „Standard Specification

for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“. Diese Normen bauen auf den Lufttüchtigkeitsstandards der in den USA ansässigen Federal Aviation Administration (FAA) für die Konstruktion von Flugzeugen und Triebwerken auf, die den Kraftstoff als Betriebsbeschränkung und nicht als physischen Bestandteil des Produkts betrachten. Als Betriebsbeschränkung werden die zur Verwendung zugelassenen Flugkraftstoffe lediglich vom Triebwerks- und Flugzeughersteller (OEM) angegeben und nicht im Rahmen des Qualitätskontrollsystems des OEM erstellt. Dies erleichtert die Handhabung von Flugkraftstoff als fungible, d. h. leicht austauschbare Ware in einem Versorgungssystem, in dem jeder Kraftstoffhersteller jedes Flugzeug mit Kraftstoff versorgen kann.

Die ASTM D1655 beschreibt die Spezifikationen für herkömmliche Flugzeugkraftstoffe.<sup>23</sup> Hierauf aufbauend wurde

eine Norm für Flugzeugkraftstoffe entwickelt, die bis zu 50 Vol.-% synthetische Kohlenwasserstoffe, hergestellt mittels Blending, enthalten dürfen. Die Beimischung regelt die ASTM D7566.<sup>17</sup> Weitere Blendkomponenten sind in der Entwicklung und einige stehen bereits sehr hoch im Ranking des Fuel Readiness Level der Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI).<sup>24</sup> Dieses ist ein Maß für den Entwicklungsstand weiterer Kraftstofftypen. Verschiedene SAF wurden bereits entwickelt, wobei die bisher von ASTM zugelassenen Typen von nicht aus Erdöl gewonnenem Flugzeugkraftstoff in der folgenden Tabelle 5 gezeigt sind. Darin enthalten ist auch die maximale Beimischungsquote zum konventionellen Flugzeugkraftstoff („Blend Ratio“) und der Zeitpunkt der Zulassung („Approval in Year“).

**Tabelle 5**

Zeitlinie, Typen und Zumischungsgrenze zugelassener nicht erdölbasierter Flugzeugkraftstoffe

(Quelle: Fraunhofer Umsicht)

| Konversionsprozess                                                               | Feedstock                                                          | Blend Ratio | Zulassung | Betreiber TRL (7-9)                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Synthetisches paraffinisches Kerosin aus Fetten und Ölen (HEFA-SPK)              | Pflanzenöle und zugehörige Altöle und Fette, tierische Fette       | 50 %        | 2011      | Valero Energy Corp, World Energy Houston LLC, Honeywell UOP, Neste, Montana Renewables LLC (MRL), Chevron, ENI, TotalEnergies |
| Alcohol-to-Jet-synthetisches paraffinisches Kerosin (ATJ-SPK)                    | Synthesegas und Biomasse via Konversion zu Ethanol oder Isobutanol | 50 %        | 2016      | Gevo, Swedish Biofuels AB, LanzaTech Global                                                                                   |
| Fischer-Tropsch-hydroprozessiertes synthetisches paraffinisches Kerosin (FT-SPK) | Kohle, Erdgas, Biomasse                                            | 50 %        | 2009      | Fulcrum BioEnergy, Kaidi, Sasol, Shell                                                                                        |
| Synthetisches paraffinisches Kerosin plus Aromaten (FT-SKP/A)                    | Kohle, Erdgas, Biomasse                                            | 50 %        | 2015      | Sasol                                                                                                                         |
| Synthetisches Isoparaffine aus hydroprozessiertem fermentiertem Zucker (SIP)     | Biomasse für Zuckerherstellung                                     | 10 %        | 2014      | TotalEnergies                                                                                                                 |





| Konversionsprozess                                                                                                                                                | Feedstock                                                                                 | Blend Ratio                                               | Zulassung | Betreiber TRL (7-9)                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|
| Synthetisches Kerosin aus hydro-thermaler Umsetzung von Fettsäureestern und Fettsäuren (CHJ)                                                                      | Planzenöle, tierische Fette, Altspeiseöl (mit freien Fettsäuren)                          | 50 %                                                      | 2020      | Applied Research Associates (ARA)          |
| Synthetisches paraffinisches Kerosin aus hydroprozessierten Kohlenwasserstoffen, Estern und Fettsäuren (HC-HEFA)                                                  | Terpene der Alge <i>Botryococcus braunii</i>                                              | 10 %                                                      | 2018      | IHI corporation                            |
| Alcohol-to-Jet-synthetisches Kerosin mit Aromaten (ATJ-SKA)                                                                                                       | Synthesegas und Biomasse via Konversion zu C <sub>2</sub> - bis C <sub>5</sub> -Alkoholen | 50 %                                                      | 2023      | Swedish Biofuels AB, LanzaTech Global      |
| Co-Hydroprocessing von Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffen und O <sub>2</sub> -haltigen Intermediaten in einer konventionellen Erdölraffinerie (Co-Processed SAF) | Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe, coverwertet mit Rohöl                                 | 5 %                                                       | 2020      | Fulcrum BioEnergy                          |
| Co-Hydroprocessing von Estern und Fettsäuren in einer konventionellen Erdölraffinerie (Co-Processed SAF)                                                          | Kohlenwasserstoffe aus Fetten und Ölen, coverwertet mit Rohöl                             | 5 %, wobei auch 30 % technisch möglich sind <sup>25</sup> | 2020      | BP, TotalEnergies, Repsol, OMV, ENI, Preem |

In der Lieferkette wird Flugkraftstoff in der Nähe anderer Kraftstoffarten transportiert, wobei er einer möglichen Vermischung und Verunreinigung mit anderen, nicht für die Luftfahrt bestimmten Kraftstoffen wie Diesel und Benzin ausgesetzt ist. Da Flugzeugkraftstoff als Handelsware gehandelt wird, kann das Eigentum an Kraftstoffchargen auf dem Weg zum Flughafen mehrmals den Besitzer wechseln. In Anbetracht dieses Vertriebssystems und der möglicherweise wechselnden Beschaffenheit von Flüssigkraftstoffen zielen die FAA-Vorschriften auf den Endpunkt der Lieferkette, d. h. auf das Flugzeug, ab. Die Vorschriften verlangen vom Flugzeug- und Triebwerkshersteller die Angabe von Kraftstoffen, die für die Verwendung im Flugzeug zugelassen sind, und verpflichten den Flugzeugbetreiber oder die Fluggesellschaft, nur die vom Hersteller aufgeführten Kraftstoffe zu verwenden.

Aufgrund von Bedenken hinsichtlich der Versorgungssicherheit und der Umweltverträglichkeit von Erdöl gründete die Gemeinschaft der Flugkraftstoffhersteller im Jahr 2006 die CAAFI, um die Entwicklung und den Einsatz von SAF zu fördern. Eine der wichtigsten anfänglichen Entscheidungen der Organisatoren war die Beschränkung auf Drop-in-Flugkraftstoffe. Diese Kraftstoffe sind so definiert, dass sie im Wesentlichen die gleichen Eigenschaften und die gleiche Zusammensetzung aufweisen wie der aus Erdöl gewonnene Flugkraftstoff, der von der heutigen Flotte von Verkehrs- und Militärflugzeugen verwendet wird. Als im Wesentlichen identische Flugkraftstoffe gelten nur die SAF, die mit der bestehenden Flugzeugflotte und der Infrastruktur für den Flugkraftstoffvertrieb kompatibel sind. Daher ist für die Nutzung dieser Kraftstoffe keine besondere behördliche Genehmigung mehr erforderlich.

Der Qualifizierungsprozess für SAF beruht zunächst auf der technischen Überprüfung der Triebwerks- und Flugzeughersteller, um festzustellen, ob ein SAF für den Einsatz geeignet ist. Anschließend werden detailliertere Tests durchgeführt. Die ASTM D4054 beschreibt das Test- und Bewertungsprogramm, das von den Mitgliedern des ASTM-Unterausschusses für Flugkraftstoffe entwickelt wurde, um die Eigenschaften und die Leistung der SAF mit denen von aus Erdöl gewonnenen zu vergleichen. Wenn ein SAF im Wesentlichen mit dem aus Erdöl hergestellten Kraftstoffen identisch ist, kann er in die Spezifikation der ASTM D7566 aufgenommen werden.

Die ASTM D4054 ist als Leitfaden und nicht als Vorschrift gedacht. Sie liefert dem SAF-Hersteller Informationen über die für die Bewertung erforderlichen Tests und Eigenschaftsziele. Die D4054 stellt einen iterativen Prozess dar und erfordert, dass die SAF-Entwickler

Kraftstoffmuster bereitstellen, deren Eigenschaften, Zusammensetzung und Leistung messen und die Ergebnisse anschließend regelmäßig gemeinsam mit den wichtigsten Interessenvertretern der Flugkraftstoffindustrie sowie Triebwerks- und Flugzeugherstellern

überprüfen. Diese Überprüfungen führen in der Regel zu Fragen und Kommentaren, aus denen sich die Notwendigkeit zusätzlicher Tests ergeben kann. Die Prüfung umfasst vier Stufen (Tiers), die in Tabelle 6 beschrieben sind.<sup>26</sup>

**Tabelle 6**

Qualifizierungsprozess für SAF gemäß ASTM D4054<sup>26</sup>

|                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tier 1:<br/>Grundlegende<br/>Spezifikations-<br/>eigenschaften</b>                          | Die Prüfanforderungen der Stufe 1 sind in der Regel kostengünstig (ca. 5.000 US-Dollar, ASTM 2018) und erfordern weniger als 40 Liter SAF (0,03 Tonnen).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Tier 2:<br/>Gebrauchs-<br/>taugliche<br/>Eigenschaften</b>                                  | Die auf Stufe 1 geprüften Spezifikationseigenschaften stellen eine Teilmenge der Eigenschaften eines Flugkraftstoffs dar, die kontrolliert werden müssen, um einen sicheren und ordnungsgemäßen Flugzeug- und Triebwerksbetrieb zu gewährleisten. Diese Eigenschaften, die als FFP-Eigenschaften (Fit for Purpose) bezeichnet werden, werden bei herkömmlichen fossilen Flugkraftstoffen aus der Raffinerie nicht routinemäßig gemessen, da sie konstant sind. Bei Kraftstoffen, die aus alternativen Rohstoffen hergestellt wurden, müssen diese Eigenschaften aber gemessen werden. Diese auf Stufe 2 durchgeführten Tests kosten bis zu 50.000 US-Dollar und können bis zu 400 Liter (0,32 Mio. Tonnen) Kraftstoff erfordern (ASTM 2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Tier 3:<br/>Prüfung von<br/>Triebwerks-/<br/>Flugzeug-<br/>systemen und<br/>Komponenten</b> | Der Umfang der Tier-3- und Tier-4-Prüfungen basiert auf der Auswertung der Tier-1- und Tier-2-Daten. Aufgrund der Komplexität und der fortschrittlichen Technologie moderner Gasturbinen-triebwerke und Flugzeuge stützt sich der ASTM-Ausschuss bei der Festlegung des Testumfangs auf die Fachkenntnisse der Flugzeug- und Triebwerkshersteller. Tier-3- und Tier-4-Tests erfordern in der Regel den Einsatz spezieller OEM-Ausrüstung, -Anlagen und -Einrichtungen. Die für diese Tests benötigte Kraftstoffmenge kann je nach Art der erforderlichen Tests zwischen 1.000 und 60.000 Litern (0,79 und 47,58 Tonnen) variieren. Die Kosten belaufen sich auf bis zu 1,5 Mio. US-Dollar. Tier 3 umfasst Tests zur Kompatibilität mit Triebwerkelementen, Beschichtungen und Metallen sowie Kraftstoffsystemtests wie etwa die Abnahmeprüfung von Kraftstoffkomponenten unter kalten Betriebsbedingungen. Typische Tests beinhalten auch den Kaltstart, das Magerblasen in großer Höhe und bei niedriger Leistung sowie Messungen zur Temperaturverteilung am Turbinen-einlass und zu Gas- und Rauchemissionen. |
| <b>Tier 4:<br/>Triebwerkstests<br/>in großem<br/>Maßstab oder<br/>Flugtests</b>                | Triebwerkstests in großem Maßstab können erforderlich sein, um die Funktionsfähigkeit der Leistung, die Emissionen oder die langfristige Haltbarkeit beim Betrieb mit SAF zu bewerten. Diese Tests können bis zu 750.000 Liter (594,75 Tonnen) Kraftstoff erfordern und bis zu 1 Mio. US-Dollar kosten (ASTM, 2018). Emissionsprüfungen können in der Regel gleichzeitig mit anderen Triebwerkstests durchgeführt werden. Flugtests sind meist nicht erforderlich.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>ASTM D4054,<br/>Fast-Track-Ver-<br/>fahren</b>                                              | Es wurde vereinbart, dass den Herstellern neuer SAF, die in Bezug auf Zusammensetzung und Leistung in den Bereich eines typischen konventionellen Flugkraftstoffs fallen, nur reduzierte Prüfanforderungen auferlegt werden können. Diese wurden im September 2020 als Anhang A4 in die ASTM D4054 aufgenommen und werden als Fast-Track-Verfahren bezeichnet. Allerdings gehen die reduzierten Prüfanforderungen mit einer maximalen Beimischungsgrenze von 10 % einher.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

# Regulatorische Rahmenbedingungen

A woman with short grey hair, wearing a dark blazer over a light-colored top and a pearl necklace, is seated at a dark wooden desk in a library. She is looking towards the right. On the desk, there is a laptop, an open notebook, a pen, and a stack of books. A black desk lamp is positioned in front of her. The background consists of tall wooden bookshelves filled with books. The image is overlaid with large, semi-transparent white geometric shapes: a large triangle in the top left, a large circle in the top right, and a large triangle in the bottom left.



Zwar hat die EU mit der ‚ReFuelEU Aviation‘-Verordnung ab 2025 und darüber hinaus konkrete Mindestbeimischungsquoten für SAF in der EU zur Förderung des SAF-Hochlaufs vorgegeben, es bestehen jedoch erhebliche Zweifel, ob diese Ziele ohne weiter gehende politische Förderung auch erreicht werden. Damit Europa als Produktionsstandort für SAF attraktiv bleibt, müssen die regulatorischen Rahmenbedingungen investitionsfreundlich und langfristig verbindlich angepasst werden.

**Melanie Form,** Mitglied des Vorstands und Geschäftsführerin, Aireg

## Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

Im europäischen Raum gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen und politischen Initiativen, die darauf abzielen, das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Dieses Konzept der Klimaneutralität oder des „Netto-null“-Ziels ist ein wissenschaftliches Prinzip, das von der EU als zentrales Klimaziel im Rahmen des 2019 vorgestellten European Green Deal festgelegt wurde.<sup>27</sup> Dieser Deal ist eine Reaktion auf das Pariser Klimaabkommen und dessen Ziel, die weltweite Erwärmung auf maximal 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.<sup>28</sup> Das Hauptziel ist die nachhaltige Transformation der Wirtschaft der EU.

Um dieses Klimaziel zu erreichen, muss das Konzept der Klimaneutralität sinnvoll umgesetzt werden. Dies erfordert eine individuelle Dekarbonisierungsstrategie auf Staats-, Substaaten-, Un-

ternehmens- und Organisationsebene.<sup>29</sup> Die Reduktion von Treibhausgasemissionen und das Erreichen der Klimaneutralität basiert durchweg auf politischen Selbstverpflichtungen. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass Regierungen, Unternehmen und NGOs konkrete Maßnahmen ergreifen müssen, um ihre Ziele zu erreichen. Solche Ziele erfordern politische Rahmenbedingungen zur Nutzung kohlenstoffarmer Technologien und effektiver Emissionsvermeidungsstrategien sowie in vielen Fällen die Zusammenarbeit mit Bürgern.

Der Green Deal umfasst eine breite Palette von Maßnahmen, die alle Wirtschaftssektoren, auch die Luftfahrtindustrie, betreffen. Die EU stellt umfangreiche finanzielle Fördermittel bereit, beispielsweise für Forschung und Innovation in kohlenstoffarmer Luftfahrt, die Förderung der Nutzung von SAF und die Einrichtung des Europäischen Investitionsfonds zur Unterstützung klimafreundlicherer Unternehmen in der Luftfahrtindustrie.

Außerdem umfasst der EU Green Deal verschiedene Initiativen, darunter das EU ETS, die EU-Richtlinien für erneuerbare Energien (RED II und RED III) und die ReFuelEU Aviation Initiative. Diese Initiativen haben das Ziel, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, erneuerbare Energien zu fördern und die Luftfahrtindustrie auf einen nachhaltigen Kurs zu bringen. Sie beinhalten auch verbindliche Ziele und rechtliche Rahmenbedingungen zur Erreichung dieser Ziele bis 2030 und darüber hinaus. Das Ergebnis sollen attraktive Rahmenbedingungen für die Entwicklung von erneuerbaren Energiequellen (beispielsweise grüner H<sub>2</sub>) und deren Derivaten (z. B. E-Kraftstoffe) in der EU sein. Insbesondere die ReFuelEU Aviation Initiative zielt darauf ab, einen fairen Wettbewerb im nachhaltigen Luftverkehr zu gewährleisten und die Reduktion von Emissionen durch den Ausbau der Anwendung von SAF zu fördern. Die RefuelEU Aviation Initiative sieht ab 2025 verbindliche SAF-Quoten vor, die für Flugkraftstoff, der an EU-Flughäfen bereitgestellt wird, gelten.



Unter anderem gibt es für Fluggesellschaften in der EU Mechanismen, um die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen herbeizuführen. Zum Beispiel werden seit 2012 CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luftfahrtsektors in das EU ETS integriert. Bisher wurden im Flugsektor mithilfe dieses Systems 17 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart. Zudem besteht die Möglichkeit, Strafen zu verhängen, um Unternehmen zur Einhaltung ihrer Emissionsreduktionsziele zu verpflichten. Die Luftfahrtbranche strebt außerdem an, die „Green Premium“, den Preisunterschied zwischen herkömmlichem Kerosin und SAF, zu verringern.

Global gibt es eine Vielzahl von Ansätzen zur Reduzierung von Kohlenstoffemissionen, die von den politischen Präferenzen und vom Wohlstand des jeweiligen Landes abhängen. Die Schaffung eines global einheitlichen Kohlenstoffpreises wird durch variierende Preispolitiken und lokale Initiativen massiv erschwert.



Bei der Regulierung nachhaltiger Flugkraftstoffe bestehen noch etliche Hindernisse, was größere Investitionen in SAF verzögert oder verhindert. Damit sich Deutschland und Europa als attraktive SAF-Produktionsstandorte etablieren, muss sich das schnellstmöglich ändern. Die regulatorischen Rahmenbedingungen müssen industriefreundlich und langfristig verbindlich sein. Zudem müssen Investitionsanreize geschaffen und langfristige Förderprogramme eingeführt werden.

**Melanie Form**, Mitglied des Vorstands und Geschäftsführerin, Aireg

Bestehende Lücken in der Struktur müssen berücksichtigt werden, um eine vollständige Integration des Luftverkehrs in die Klimapolitik zu erreichen. Dazu gehören eine standardisierte Erfassung von Emissionsdaten aus dem Flugverkehr, die Einigung auf einen globalen Ansatz zur Emissionsreduktion sowie verbindliche Mechanismen, um diesen Ansatz durchzusetzen.

Fortschritte in der Technologieentwicklung und die Zusammenarbeit zwischen Regulierungsbehörden und Unternehmen könnten helfen, diese Herausforderungen zu bewältigen und eine kohlenstoffarme Luftfahrtindustrie zu schaffen.

Das nachfolgende Kapitel erörtert globale und europäische Luftfahrtvorgaben und -richtlinien sowie die Maßnahmen bei einer Verletzung. Außerdem werden Lücken in den aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen aufgezeigt und abschließend erklärt, warum eine CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion allein nicht ausreicht, um die Auswirkungen des Fliegens auf das Klima zu minimieren.

## 2.1 Regulatorische Rahmenbedingungen auf europäischer und globaler Ebene

Im europäischen Raum gibt es vielfältige Maßnahmen und politische Initiativen, um das Ziel von Net Zero bis 2050 zu erreichen. Eine wichtige Strategie der EU ist der European Green Deal, der 2019 von der EU-Kommission vorgelegt wurde. Dessen Ziel ist es, die Wirtschaft der EU nachhaltig zu transformieren. Die zentrale Zielsetzung ist das Erreichen der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050, wobei Forschung und Innovation für kohlenstoffarme Luftfahrt sowie die Förderung der Nutzung von SAF klar unterstützt werden.<sup>30</sup> Im EU Green Deal sind unter anderem die nachfolgenden Initiativen enthalten:

- **Europäisches Klimagesetz** mit dem Ziel, bis 2050 klimaneutral zu werden: Bis 2030 sollen die Emissionen bereits um mindestens 55 % gegenüber dem Stand von 1990 reduziert werden. Das Gesetz legt die rechtlichen Rahmenbedingungen fest, um diese Ziele zu erreichen.
- **Europäische Industriestrategie**, die die EU-Industrie in Bezug auf Wandel, Innovation und Wachstum im Hinblick auf die grüne und digitale Transformation unterstützt.<sup>30</sup> Sie hat Auswirkungen auf die industriellen Ökosysteme der EU, darunter die Luftfahrt-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie.<sup>31</sup>

- **„Fit for 55“-Paket** mit dem Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % zu reduzieren und Klimaneutralität zu erreichen: Es enthält konkrete Maßnahmen, Vorschläge und Gesetze. Teil davon ist die im September 2023 gegründete ReFuelEU Aviation Initiative, die Flugkraftstofflieferanten verpflichtet, Flughäfen zukünftig mit SAF zu beliefern. Ebenso wurde das EU ETS durch das „Fit for 55“-Paket reformiert.<sup>1</sup> Die Überarbeitung der RED II und die Entwicklung der RED III sind ebenfalls eine wichtige Initiative des „Fit for 55“-Pakets.<sup>32</sup>



**Die RefuelEU-Aviation-Verordnung** schreibt einen Mindestanteil an SAF ab 2025 und einen Mindestanteil an E-SAF ab 2030 vor, der auf EU-Flughäfen zur Verfügung gestellten Kraftstoff enthalten und schrittweise bis 2050 erhöht werden muss (bis auf einen SAF-Anteil von mindestens 70 % im Jahr 2050).<sup>33</sup> Es wird angestrebt, dass 2050 das SAF-Vorkommen auf Flughäfen mehr als die Hälfte an Kraftstoff ausmacht und vermehrt direkte Flugrouten wie auch Anreizmaßnahmen von SAF im EU-Handelssystem etabliert werden.<sup>34</sup> Die aktuellen Anteile (siehe Abbildung 9) sind seit 1. Januar 2024 wirksam. Es ist zu beachten, dass hier angenommen wird, dass bei fehlender Spezifizierung des zu tankenden SAF davon ausgegangen wird, dass Bio-SAF genutzt wird. Da Bio-SAF derzeit noch kostengünstiger und in größeren Mengen verfügbar ist, ist dessen Nutzung gegenüber E-SAF wahrscheinlicher.<sup>34</sup>

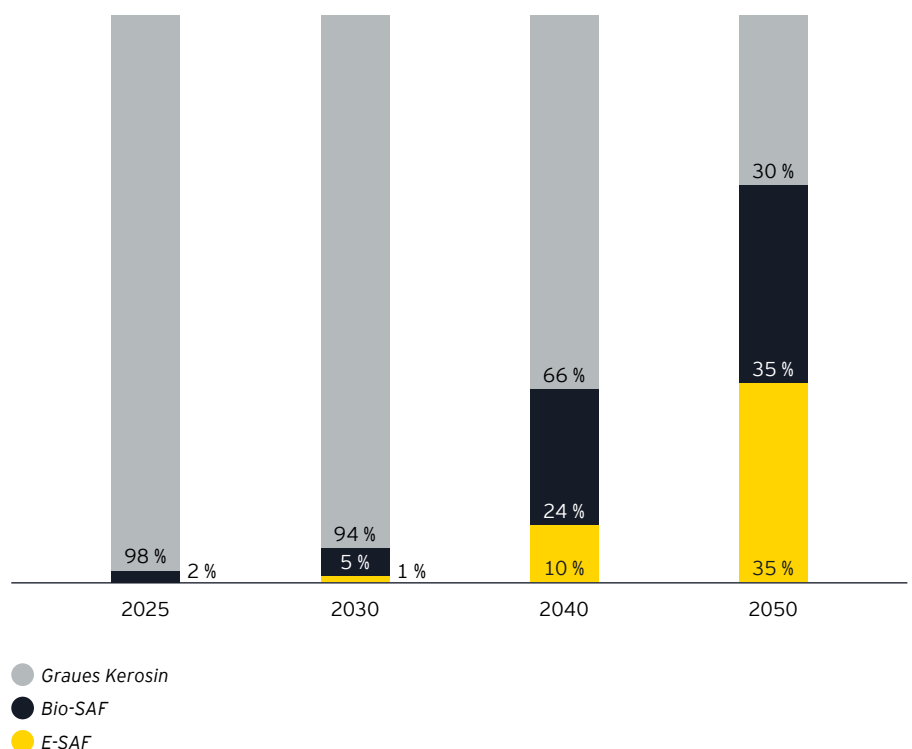
“

Es wird eine Herausforderung für die Luftfahrtunternehmen sein, die RefuelEU-Quoten zu erfüllen. Dies führt dazu, dass einige Akteure versuchen, diese Quoten abzuschaffen. Wir erkennen jedoch die Notwendigkeit dieser Quoten und hoffen auf deren langfristigen Erhalt. SAF-Quoten sind für die Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors unabdingbar.

**Dr. Mark Misselhorn**, Chief Executive Officer, Capphenia GmbH

**Abbildung 9**

SAF-Anteile am Flugverkehrskraftstoff (nach RefuelEU)<sup>35</sup>



Die ReFuelEU-Verordnung zielt auch darauf ab, die gängigen Tankpraktiken in Europa zu verändern. Flugzeugbetreiber tanken oft größere Mengen an Kraftstoff als nötig, um teures Nachtanken im Ausland zu vermeiden, was zu höherem Emissionsausstoß führt. Um dem entgegenzuwirken, verpflichtet die Regelung Flugzeugbetreiber ab Januar 2023 sicherzustellen, dass die jährlich an einem bestimmten EU-Flughafen aufgenommene Menge an Flugtreibstoff mindestens 90 % der jährlich betankten Menge entspricht.<sup>35</sup> Dadurch müssen Flugzeugbetreiber ihre Flugzeuge auf europäischen Flughäfen entsprechend oft wiederbetanken, so dass Kostensparmaßnahmen durch übermäßiges Auftanken im Ausland nicht mehr sinnvoll sind.

Werden die SAF-Quoten nicht erreicht, müssen die Beteiligten Geldstrafen zahlen. Diese werden an die EU-Investitionsfazilität für die grüne Transition überwiesen, um die Forschung und Innovation im SAF-Sektor zu unterstützen.<sup>36</sup>

“  
Die 2 %-Quote der RefuelEU Aviation Initiative ist ein positiver Anfang, doch eine ambitioniertere Anfangsquote von 5 % wäre wünschenswert gewesen. Angesichts der begrenzten Marktverfügbarkeit ist eine niedrigere Quote allerdings nachvollziehbar.

**Jan Eike Blohme-Hardeggen**, Leiter der Umweltabteilung, Flughafen Hamburg

Für **Luftfahrtkraftstoffzulieferer** sind die Mindeststrafen wie folgt festgelegt: Sie entsprechen dem Doppelten der Differenz zwischen dem Preis für SAF und dem Preis für herkömmliches Kerosin pro Tonne, multipliziert mit der Menge an Luftfahrtkraftstoff, die nicht der Quote entspricht.<sup>37</sup>

**Mindeststrafe =**

$2 \times [\text{Preis SAF (pro Tonne)}]$

$- \text{Preis konventionelles Kerosin (pro Tonne)}$

$\times \text{Menge an Flugtreibstoff, die nicht der Quote entspricht (pro Jahr)}$

Für **Flugzeugbetreiber** beträgt die Mindeststrafe das Zweifache des jährlichen Durchschnittspreises von Luftfahrtkraftstoff pro Tonne multipliziert mit der jährlichen Menge, die nicht getankt wurde. Bei EU-Flughäfen sollten die Strafen von den Mitgliedstaaten definiert und strukturiert werden.<sup>37</sup>

**Mindeststrafe =**

$2 \times [\text{durchschnittlicher Preis}$

$\text{konventionelles Kerosin (pro Jahr)}$

$\times \text{Menge nicht getanktes SAF (pro Jahr)}$

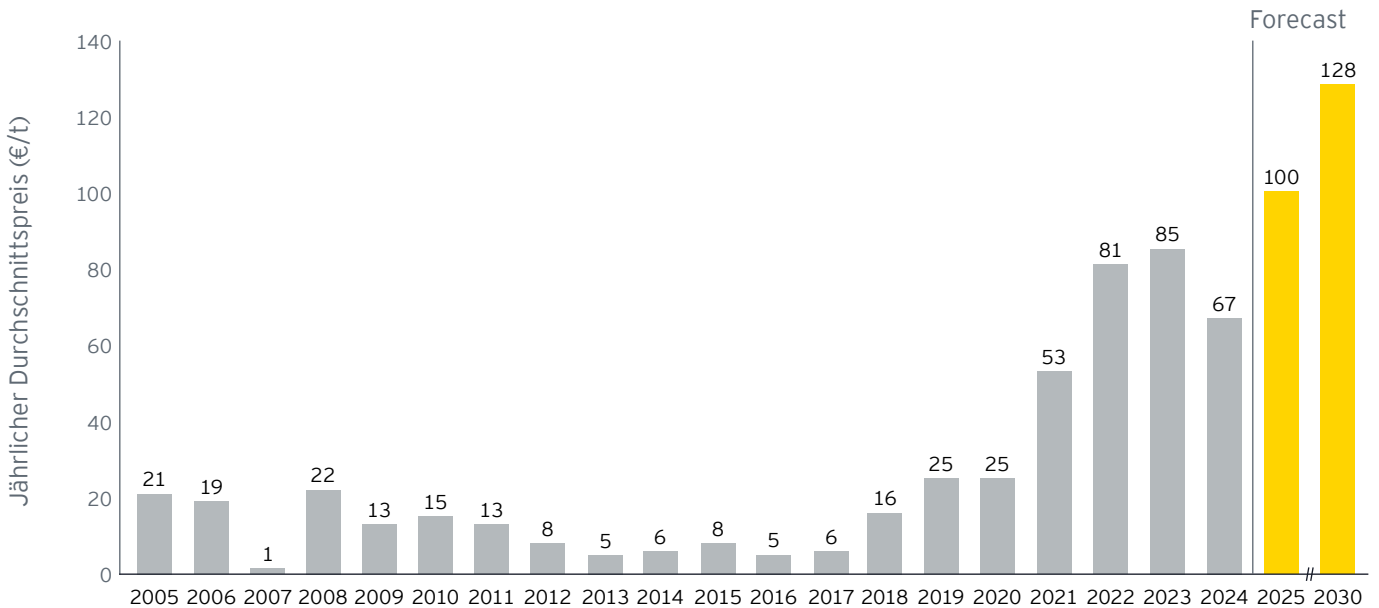


Das **EU ETS** dient dazu, die Emissionen in verschiedenen Industrie- und Energiesektoren zu reduzieren, indem Unternehmen der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie Emissionsrechte kaufen und verkaufen können. Seit 2012 sind auch die Fluggesellschaften in den Emissionshandel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten einbezogen, wobei alle Fluggesellschaften, die in Europa operieren, ihre Emission überwachen, offenlegen und verifizieren müssen. Fluggesellschaften erhalten eine festgelegte Anzahl CO<sub>2</sub>-Zertifikate, die es ihnen erlaubt, entsprechende Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen zu kompensieren. Sollte eine Fluggesellschaft das ihr zugeteilte Emissionskontingent der Zertifikate übersteigen, ist sie gezwungen, zusätzliche Zertifikate zu erwerben. Andernfalls drohen ihr finanzielle Sanktionen. Seit 2017 beschränkt sich der Anwendungsbereich des ETS auf Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR). Zuvor erstreckte er sich auch auf Flüge von und zu Flughäfen im EWR. Bisher hat das EU ETS dazu beigetragen, die Emissionen im Luftfahrtsektor um 17 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr zu reduzieren.<sup>38</sup>

Der Handel mit Emissionsrechten erfolgt entweder nach dem „Cap and Trade“- oder dem „Baseline and Credit“-System. Beim „Cap and Trade“-Ansatz wird eine feste Emissionsobergrenze festgelegt und die Emissionszertifikate werden entweder versteigert oder nach bestimmten Kriterien kostenlos zugeteilt. Das „Baseline and Credit“-System hingegen setzt keine starre Grenze für Emissionen fest, sondern schafft Anreize für Verursacher, ihre Emissionen über die erwarteten Reduktionspflichten hinaus zu senken. Sie können dadurch Gutschriften erwerben und diese wiederum an andere Unternehmen verkaufen, die sie benötigen, um die für sie geltenden Vorschriften einzuhalten.<sup>39</sup>

**Abbildung 10**

Übersicht über die Preissteigerung pro Zertifikat<sup>41</sup>



Das EU ETS basiert auf dem „Cap and Trade“-System. Es schafft daher wirtschaftliche Anreize für Unternehmen und Staaten, Gutschriften zu verkaufen und dadurch Emissionen einzusparen, was sich im Umkehrschluss positiv auf die Umwelt auswirkt. Der Preis für die Zertifikate bildet sich frei am Markt. Durch Verknappung bzw. Begrenzung der Anzahl verfügbarer Zertifikate können politische Entscheidungen den Preis beeinflussen. Die Preise hängen somit von politischen Maßnahmen und Vorschriften zur Emissionsreduzierung und der Wettbewerbsfähigkeit erneuerbarer Energiequellen ab.<sup>40</sup> Es wird erwartet, dass der Preis für Emissionszertifikate steigt. Durch das „Fit for 55“-Paket und die Energiekrise als Folge des derzeitigen Russland-Ukraine-Konflikts lag der EU-Kohlenstoffpreis von Zertifikaten im Jahr 2022 bei ungefähr 82 Euro/Tonne (~ 81 US-Dollar/Tonne) CO<sub>2</sub>. Es wird geschätzt, dass die Preise für Kohlenstoffzertifikate in der EU auf über 100 Euro/Tonne (~ 103 US-Dollar/Tonne) CO<sub>2</sub> ab 2025 steigen werden. Diese Erhöhung wird

durch die verstärkte politische Klimapolitik (Net-Zero-Emissionshandel) der EU mitgetragen.<sup>41</sup>

Der Preis pro Zertifikat steigt gemäß dieser Prognose stetig an und erreicht im Jahr 2030 über 120 Euro (~ 123 US-Dollar). Diese Preise sind sehr stark vom CO<sub>2</sub>-Markt abhängig. Eine CO<sub>2</sub>-Preisprognose hängt zusätzlich von diversen Faktoren (Wirtschaftswachstum, Regierungspolitik, technologischer Fortschritt, Kosten alternativer Energiequellen) ab, sodass diese Prognose mit Vorsicht betrachtet werden muss.

Abbildung 11 stellt Prognosen zur Preisentwicklung für grünes CO<sub>2</sub> dar. Dabei werden drei Szenarien unterschieden, die deutlich machen, dass strengere Klimapolitiken zu deutlich höheren CO<sub>2</sub>-Preisen führen.

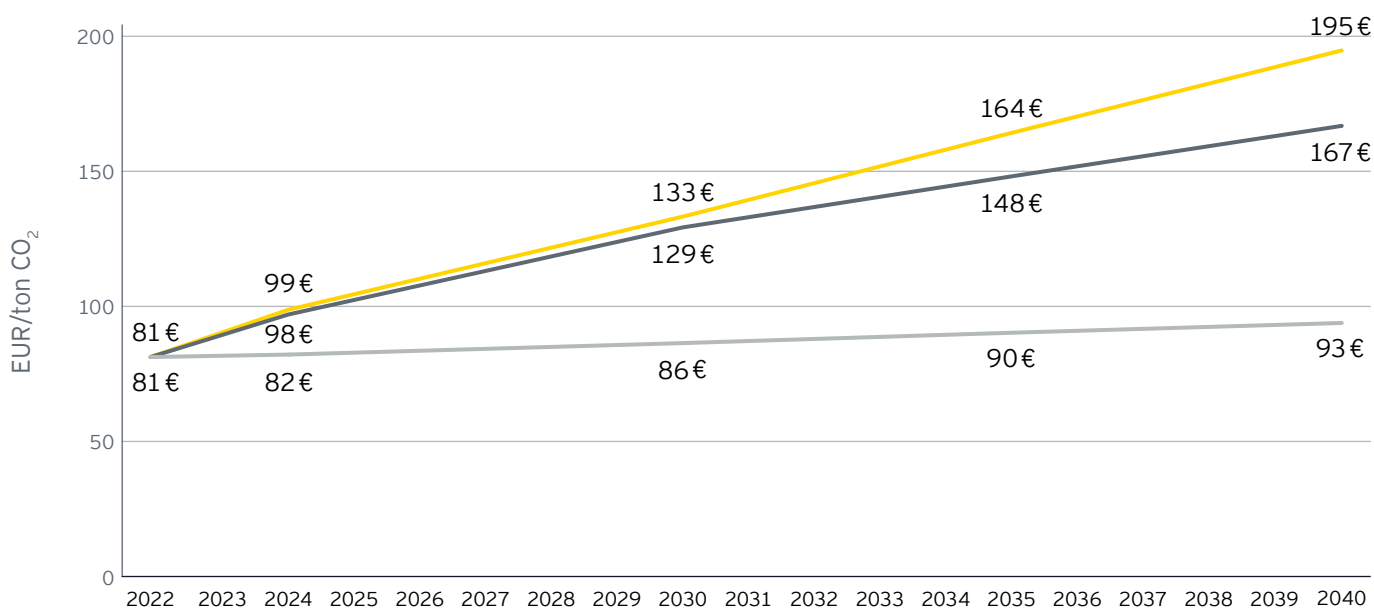
Es wird angenommen, dass Länder ohne Kohlenstoffbepreisung eine Vielzahl von Ansätzen zur Reduzierung von Kohlenstoffemissionen heranziehen. Diese hängen von den politischen Präferenzen und dem Wohlstand des Landes ab.<sup>41</sup>





**Abbildung 11****EU-CO<sub>2</sub>-Preisprognose**

(Quelle: IEA)



● Szenario Net-Zero-Emissionen bis 2050

● Szenario nach internationalen Selbstverpflichtungen von Industriestaaten

● EU Regularien



Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (RED II) der EU aus dem Jahr 2018 zielt darauf ab, bis 2030 32 % des Energieverbrauchs aus erneuerbaren Energien zu decken. Sie schreibt einen Verbrauch von Biokraftstoffen (inkl. Bio-SAF) und Biogas vor.<sup>42</sup> Das in Anhang IX, Teil A (ohne „Cap“ versehene Rohstoffquellen) und Teil B (mit „Cap“ versehene Rohstoffquellen) enthaltene Verzeichnis der Biokraftstoff-Rohstoffe muss durch die EU-Kommission regelmäßig im Hinblick auf die Ergänzung von Rohstoffen, die den in Artikel 28 Absatz 6 genannten Kriterien entsprechen, überprüft werden.<sup>43</sup> Die neuen Rohstoffquellen sollen es erlauben, mehrere Millionen Tonnen SAF zu produzieren, ohne jedoch gänzlich neue Produktionsanlagen bauen zu müssen. Dies betrifft insbesondere HEFA/HVO und ATJ sowie das Co-Processing. Seit März 2024 gibt es eine Regelung betreffend die speziell für SAF neu im

Anhang I, Teil A zugelassenen Rohstoffe. Diese wurde im April 2024 in Deutschland bereits in nationales Recht umgesetzt und gilt ab Juli 2024.<sup>44</sup>



Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (RED III/2023) der EU wurde als Überarbeitung der RED II entwickelt. Um das Emissionssenkungsziel von 55 % bis 2030 zu erreichen, wurde beschlossen, dass der Anteil an erneuerbaren Energien bis 2030 auf 42,5 % des EU-Gesamtenergieverbrauchs angehoben wird. Mitgliedstaaten müssen bis 2030 entweder eine Verringerung der Treibhausgasintensität im Verkehrssektor um 14,5 % durch die Nutzung erneuerbarer Energien erreichen oder einen Anteil von mindestens 29 % erneuerbare Energien am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor vorweisen.

Ein Teilziel von 5,5 % fortschrittliche Biokraftstoffe (im Allgemeinen nicht auf Nahrungsmitteln basierend) und erneuerbare Kraftstoffe nichtbiologischen Ursprungs (hauptsächlich grüner H<sub>2</sub> und E-Kraftstoffe) für den Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor wird ebenfalls festgelegt. Im Rahmen dieses Ziels ist ein Mindestanteil von 1 % erneuerbare Kraftstoffe nichtbiologischen Ursprungs an der Versorgung des Verkehrssektors mit erneuerbaren Energien im Jahr 2030 vorgeschrieben.<sup>45</sup> Die Richtlinie muss innerhalb von 18 Monaten nach Inkrafttreten in nationales Recht umgesetzt werden.<sup>46</sup> Dennoch müssen die Bestimmungen der Richtlinie von den Mitgliedstaaten, vorbehaltlich einzelner Regelungen, bis zum 21. Mai 2025 in nationales Recht umgesetzt werden.<sup>47</sup> Ab Sommer 2025 wird das EU-Ökolabel für Flüge weiterhin freiwillig vergeben.<sup>48</sup>

Ziel ist es, den ökologischen Fußabdruck der Luftfahrt zu reduzieren, indem vertrauenswürdige, verständliche, zuverlässige und einheitliche Informationen Passagiere beeinflussen, nachhaltige Flugoptionen zu wählen. Hierbei wurde auf bereits existierende Standards (EU ETS, ReFuelEU), Daten und Best Practices aufgebaut und Transparenz, Vereinfachung, Ganzheitlichkeit und Freiwilligkeit als Basis genommen.<sup>49</sup> Folgende drei Label-Kategorien werden definiert: „Flight Label“, „Airline Label“ und „Aircraft Label“.<sup>50</sup>

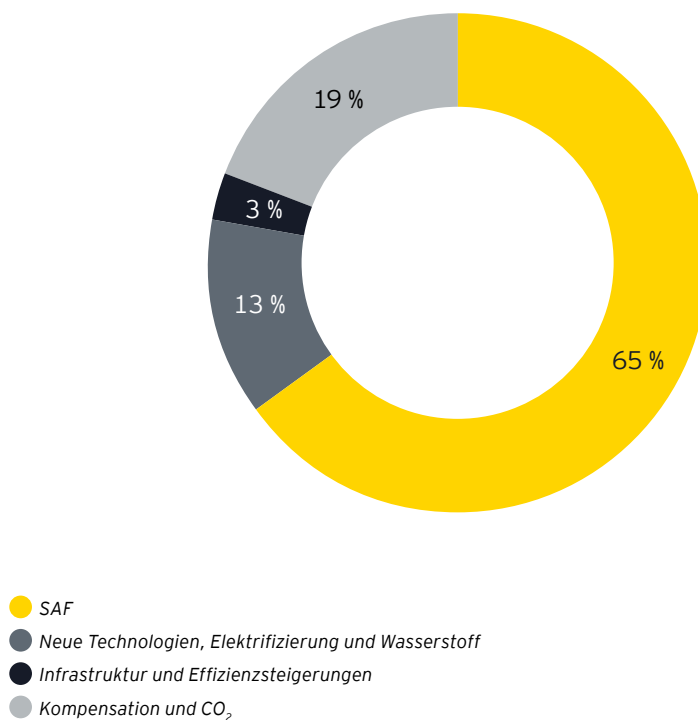
■ **Emissions Reduction Roadmap** der IATA. Die IATA stellt internationale Standards für viele Bereiche des Luftverkehrs auf, einschließlich Sicherheits- und Betriebsstandards, Flugbuchungen und Reiseagenturpraktiken, wie auch Maßnahmen zur Emissionsreduktion von Luftfahrtunternehmen. Die IATA entwickelt eine eigene Strategie, um das globale Netto-null-Ziel des Luftfahrtsektors bis 2050 zu erreichen, wobei SAF etwa 65 % zur notwendigen Emissionsreduktion beitragen soll (siehe Abbildung 12). Die Strategie ist nicht verpflichtend, sondern hat empfehlenden Charakter.

■ Langfristig zielt die IATA darauf ab, sich von Kompensationsmaßnahmen (Offsetting<sup>g</sup>) zu entfernen und stattdessen verstärkt auf die Nutzung von SAF zu setzen. Die IATA unterstreicht die Notwendigkeit einer engen Zusammenarbeit zwischen Industrie und Regierungen, um Klimaneutralität zu erreichen.<sup>51</sup> Sie empfiehlt im Rahmen der Energy and New Fuels Infrastructure Net Zero Road Map eine Skalierung der SAF-Produktion auf über 400 Mio. Tonnen/Jahr, um das Net-Zero-Ziel der Branche zu erreichen.<sup>52</sup>

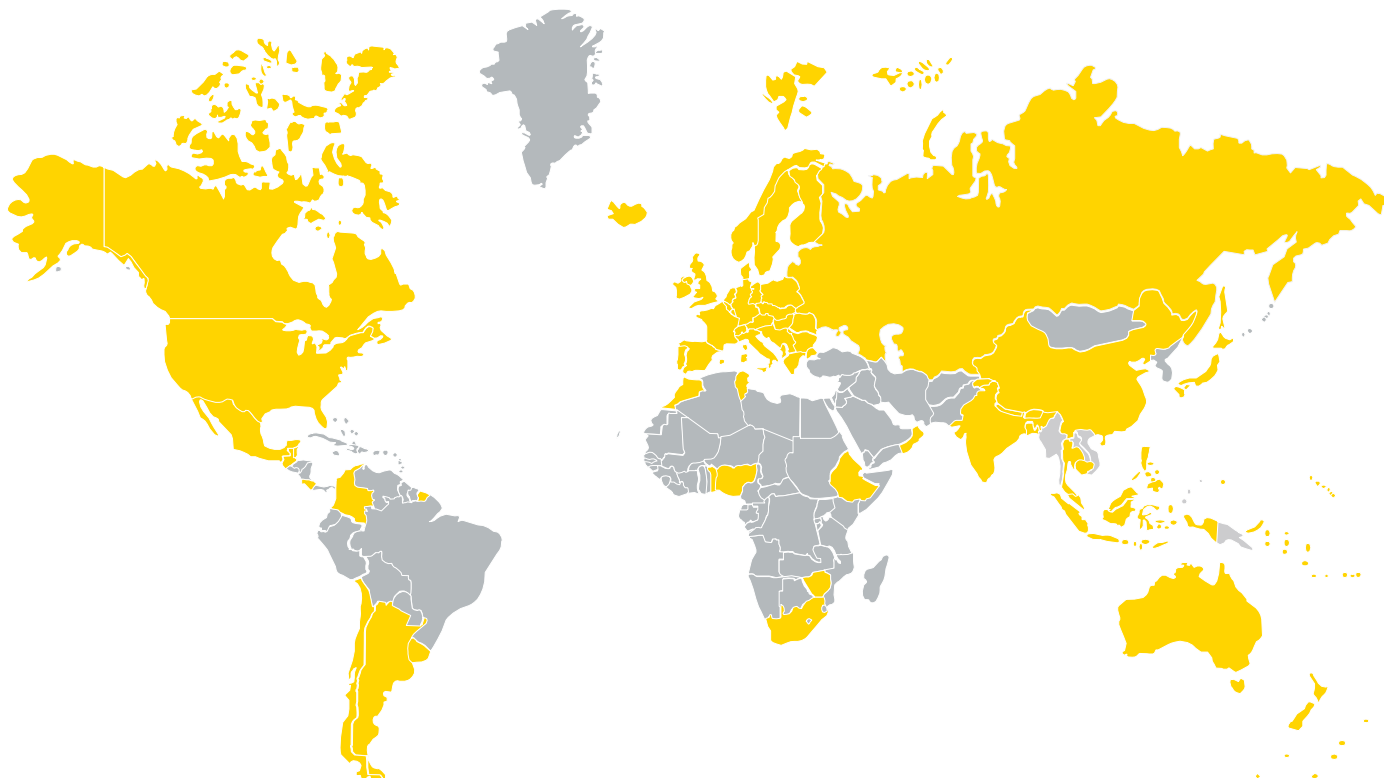
Auf internationaler Ebene sind beispielhaft mitunter folgende regulatorische Mechanismen definiert:

■ **Sustainable Aviation Fuel Certificate (SAFc)** und Clean Skies for Tomorrow (CST). Das SAFc-System, entwickelt von der CST-Initiative des WEF, zielt darauf ab, Emissionen im Luftfahrtsektor zu reduzieren, indem es die Nutzung von SAF fördert. Das System ermöglicht es Reisenden und Unternehmen, Emissionsreduktionen zu beanspruchen, indem sie die Kostenprämie für SAF übernehmen. Ursprünglich auf Geschäftsreisen ausgerichtet, soll das SAFc die Nachfrage nach SAF anregen und zusätzliche Mittel für dessen Produktion generieren. Das System ist an das „Book & Claim“-Verfahren angelehnt, das sicherstellt, dass Flugkraftstoff zu einem Flughafen geliefert wird, der dem Produktionsstandort am nächsten gelegen ist, das Zertifikat aber an anderen Orten gültig gemacht wird.<sup>50</sup>

**Abbildung 12** Strategische Net-Zero-Ziele der IATA  
(Quelle: IATA)



<sup>g</sup> Unter Offsetting versteht man die Kompensation der Menge CO<sub>2</sub>, die man verursacht, durch die Förderung erneuerbarer Energien oder die Finanzierung nachhaltiger Initiativen. Die Finanzierung nachhaltiger Initiativen wird oftmals durch den Erwerb sogenannter Zertifikate in die Wege geleitet, wobei Unternehmen spezifische Zertifikate kaufen. Offsetting ist ein umstrittenes Konzept, da nicht gewährleistet ist, ob die Maßnahmen der Initiativen überhaupt notwendig sind. Des Öfteren kommt es vor, dass Unternehmen Zertifikate für Initiativen erwerben, die überhaupt keiner Bedrohung ausgesetzt sind. Dadurch droht die Gefahr, letztendlich Greenwashing und keine wirkliche CO<sub>2</sub>-Kompensation zu betreiben.

**Abbildung 13**Überblick über etablierte nachhaltige Strategien im Rahmen des Pariser Abkommens<sup>53</sup>

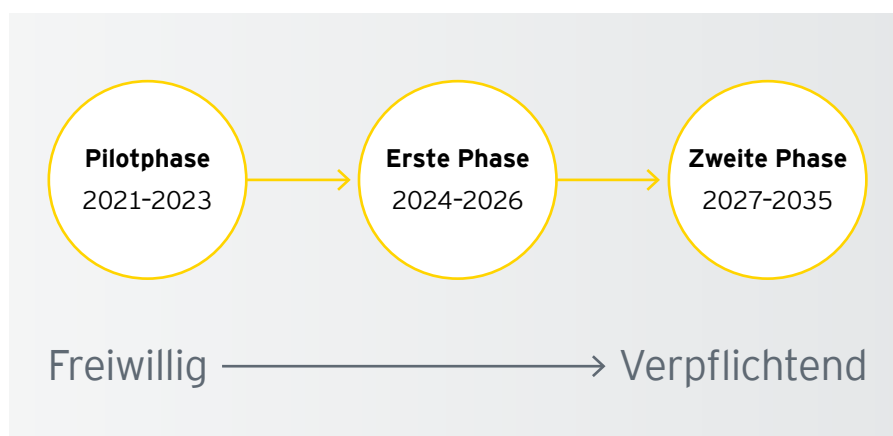
■ **Nationale Nachhaltigkeitsstrategien:** Insgesamt 75 Länder haben bereits nachhaltige langfristige Strategien im Rahmen des Pariser Abkommens entwickelt und kommuniziert, um die Treibhausgasemissionen zu beschränken. Die grau hinterlegten Länder haben noch keine Angaben gemacht (Abbildung 13). Diese strategischen Ziele beziehen sich oftmals auch auf den Flugverkehr.

■ **Green Premium** als Preisdifferenz zwischen dem herkömmlichen Kerosin- und dem SAF-Preis:<sup>54</sup> Diese Differenz wird von Fahrgästen gezahlt. Es gibt einige Maßnahmen, wodurch das Green Premium verringert bzw. verhindert werden kann. Durch die Ausweitung der SAF-Technologien können zum einen Produktionskosten verringert und zum anderen der Zugang zu mehr Rohstoffen und Anlagen an verschiedenen Orten geschaffen werden. Des Weiteren können durch Regulierungen die Mehrkosten fair auf alle Beteiligten aufgeteilt werden.<sup>55</sup>

Auf globaler Ebene gibt es ebenfalls verschiedene Emissionshandelssysteme, zum Beispiel:

■ **Internationales Luftverkehrsabkommen - ICAO CORSIA** (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Das ICAO-CORSIA-System ist ein weltweites Emissionshandelssystem für den

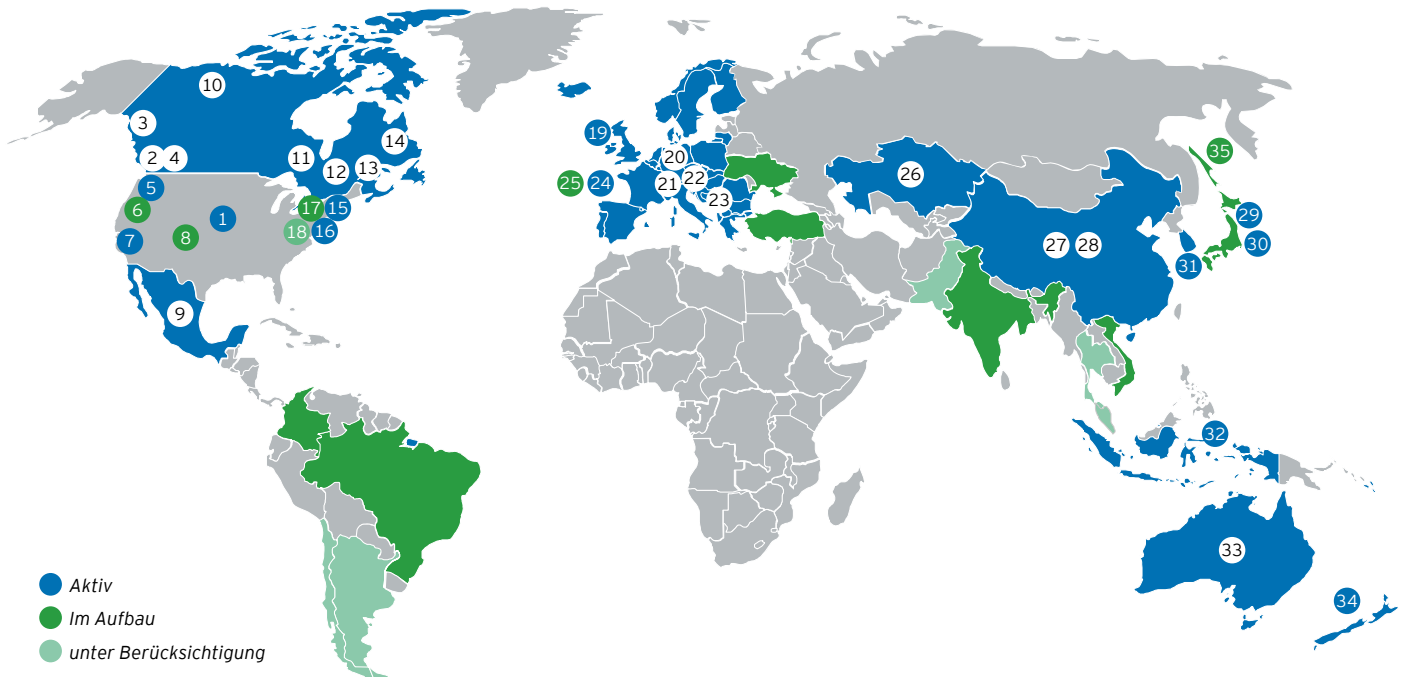
Luftverkehr. Das System wurde 2016 vereinbart und ist seit 2021 verpflichtend für große Luftfahrtunternehmen. Die Teilnehmenden müssen eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Kauf von Emissionsrechten ausgleichen, die aus anderen Sektoren als der Luftfahrtbranche stammen.

**Abbildung 14**CORSIA-Systemübersicht<sup>56</sup>

## Abbildung 15

Übersicht über globale ETS-Systeme, die bereits in Kraft getreten oder noch in Entwicklung bzw. in Erwägung sind

(Quelle: International Carbon Action Partnership)



- 1 | Regionale Treibhausinitiative: Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New York, Rhode Island, Vermont
- 2 | British Columbia Output-Preissystem
- 3 | Alberta-Vorschriften zu Technologieinnovation und Emissionsreduzierung
- 4 | Saskatchewan Output-basiertes Leistungsstandardsprogramm
- 5 | Washington ETS-System
- 6 | Oregon-Klimaschutzprogramm
- 7 | Kalifornisches ETS-System
- 8 | USA - Colorado Treibhausgasemissionen und Energiemanagement
- 9 | Mexikanisches ETS-System
- 10 | Kanadisches föderales Preissystem
- 11 | Ontario-Programm für Emissionsleistungsstandards

- 12 | Das Emissionshandelssystem von Quebec
- 13 | New Brunswick Emissionshandelssystem
- 14 | Emissionsnormen für Neufundland und Labrador
- 15 | Massachusetts Grenzwerte für Emissionen aus der Stromerzeugung
- 16 | New York
- 17 | Pennsylvania
- 18 | Maryland
- 19 | UK ETS (für die Luftfahrt ist der Start ab 2026)
- 20 | Deutsches Nationales ETS
- 21 | Schweiz ETS
- 22 | Österreichischer Nationaler ETS
- 23 | Montenegro ETS

- 24 | EU ETS
- 25 | EU-Emissionshandelssystem für Gebäude und Straßenverkehr („EU ETS 2“)
- 26 | Kasachstan ETS
- 27 | China ETS
- 28 | China-Piloten: Beijing, Chongqing, Fujian, Guangdong, Hubei, Shanghai, Shenzhen, Tianjin
- 29 | Saltana ETS
- 30 | ETS von Tokio
- 31 | ETS-System der Republik Korea
- 32 | Indonesiens wirtschaftlicher Wert des Emissionshandelssystems
- 33 | Australiens Safeguard-Mechanismus
- 34 | Neuseeland ETS
- 35 | Russische Föderation - Sachalin

■ **UK Emissions Trading Scheme:** Dieses Cap-and-Trade-System wurde 2021 eingeführt. Unternehmen können benötigte oder überflüssige Emissionen im Rahmen einer Auktion handeln. Außerdem werden kostenlose Zertifikate für stationäre Anlagen angeboten, die in der UK ETS Aviation Allocation Table bis 2025 festgelegt sind.<sup>57</sup>

■ **USA Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI):** Das RGGI-Programm ist ein Emissionshandelssystem, bei dem den teilnehmenden Kraftwerken und Energieversorgern eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub>-Emissionsrechte zur Verfügung gestellt wird. Die Unternehmen (auch Fluggesellschaften) müssen dann entweder ihre Emissionen reduzieren, um Emissionsrechte einzusparen,

oder sie können Emissionsrechte auf einem zentralen Markt kaufen oder verkaufen, um ihre Ziele zu erreichen.

■ Weitere nationale ETS-Systeme sind in Abbildung 15 dargestellt. Weltweit sind 36 ETS-Systeme in Kraft getreten, 14 befinden sich noch in Entwicklung und acht werden derzeit in Erwägung gezogen.<sup>58</sup>



In den USA wurde 2021 ein Gesetz entworfen, das darauf abzielt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Luftfahrt zu reduzieren:

■ **Sustainable Skies Act:** Im Mai 2021 führte der US-Kongress das Gesetz „Sustainable Skies Act“ ein, um Anreize für die Verwendung von SAF zu erhöhen. Den beteiligten SAF-Mischunternehmen wird eine Förderung von 1,50 US-Dollar pro Gallone gewährt, vorausgesetzt sie können eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von mindestens 50 % nachweisen. Die Förderung wird bis zu einem Höchstbetrag von 2 US-Dollar pro Gallone erhöht, unter der Bedingung, dass noch höhere Emissionsreduktionen erreicht werden. Das Gesetz schreibt zudem vor, dass förderfähige SAF die umfassenden Nachhaltigkeitskriterien der ICAO einhalten müssen, um den Umweltschutz zu gewährleisten. Ein weiterer Vorschlag sieht einen Zuschuss von 1 Mrd. US-Dollar vor, verteilt auf fünf Jahre, um die Anzahl der SAF-Produktionsanlagen in den USA zu erhöhen. Zu den Maßnahmen zählt unter anderem eine geplante Steuergutschrift für SAF, die darauf abzielt, Kosten zu senken und die heimische SAF-Produktion schnell zu erhöhen. Zudem werden fortlaufende Finanzierungsmöglichkeiten zur Unterstützung von SAF-Projekten und Kraftstoffproduzenten entwickelt, einschließlich der Einführung einer neuen „SAF Grand Challenge“, um die heimische Produktion von SAF zu steigern.<sup>59</sup>

■ **Inflation Reduction Act (IRA):** Es handelt sich um eine umfassende Gesetzgebung, die verschiedene Aspekte der US-Wirtschaft adressiert, einschließlich Defizitreduzierung, Energiesicherheit, Klimawandel und

Gesundheitswesen. In Bezug auf den Luftfahrtsektor bietet der IRA Steueranreize und Zuschüsse, um die heimische Produktion zu fördern, gut bezahlte Arbeitsplätze zu schaffen und widerstandsfähigere Lieferketten aufzubauen. Eine der bedeutenden Bestimmungen des Gesetzes ist der Fokus auf SAF, um die Emissionen im Luftfahrtsektor zu reduzieren.

Obwohl verschiedene regulatorische Rahmenbedingungen für die CO<sub>2</sub>-Reduktion im Luftverkehr geschaffen wurden, bestehen weiterhin Herausforderungen, die angegangen werden müssen, um eine vollständige Integration des Sektors in die Klimapolitik zu erreichen. Folgende Lücken können zukünftig ausgebessert werden:

■ Fluggesellschaften sind derzeit nicht überall verpflichtet, die Emissionen internationaler Flüge zu erfassen und in ihren Berichten offenzulegen. Dies führt zu einem Mangel an transparenten Daten und zur Schwierigkeit des Vergleichs zwischen Unternehmen. Eine Standardisierung der Erfassung von Emissionen und Berichten könnte dazu beitragen, die Transparenz und Vergleichbarkeit zwischen Unternehmen zu erhöhen.

■ Ein gemeinsamer globaler Ansatz zur Regulierung von Emissionen durch den Luftverkehrssektor existiert bisher noch nicht und Regulierungen variieren zwischen Ländern. Eine vollständige Integration des Sektors in globale Klimaabkommen könnte dazu beitragen, die notwendigen Maßnahmen zu ergreifen, um die Emissionen zu reduzieren und die Klimaziele zu erreichen.

■ Auf internationaler Ebene besteht die Schwierigkeit, durchsetzbare internationale Vereinbarungen über CO<sub>2</sub>-Reduktionen zu erreichen, insbesondere im Hinblick auf Kooperationen mit Ländern, die andere politische und wirtschaftliche Interessen verfolgen. Eine vorausschauende und sensible Diplomatie ist in diesem Zusammenhang erforderlich, um angemessene Maßnahmen für die CO<sub>2</sub>-Reduktion und eine kohlenstoffarme Luftfahrt zu vereinbaren.

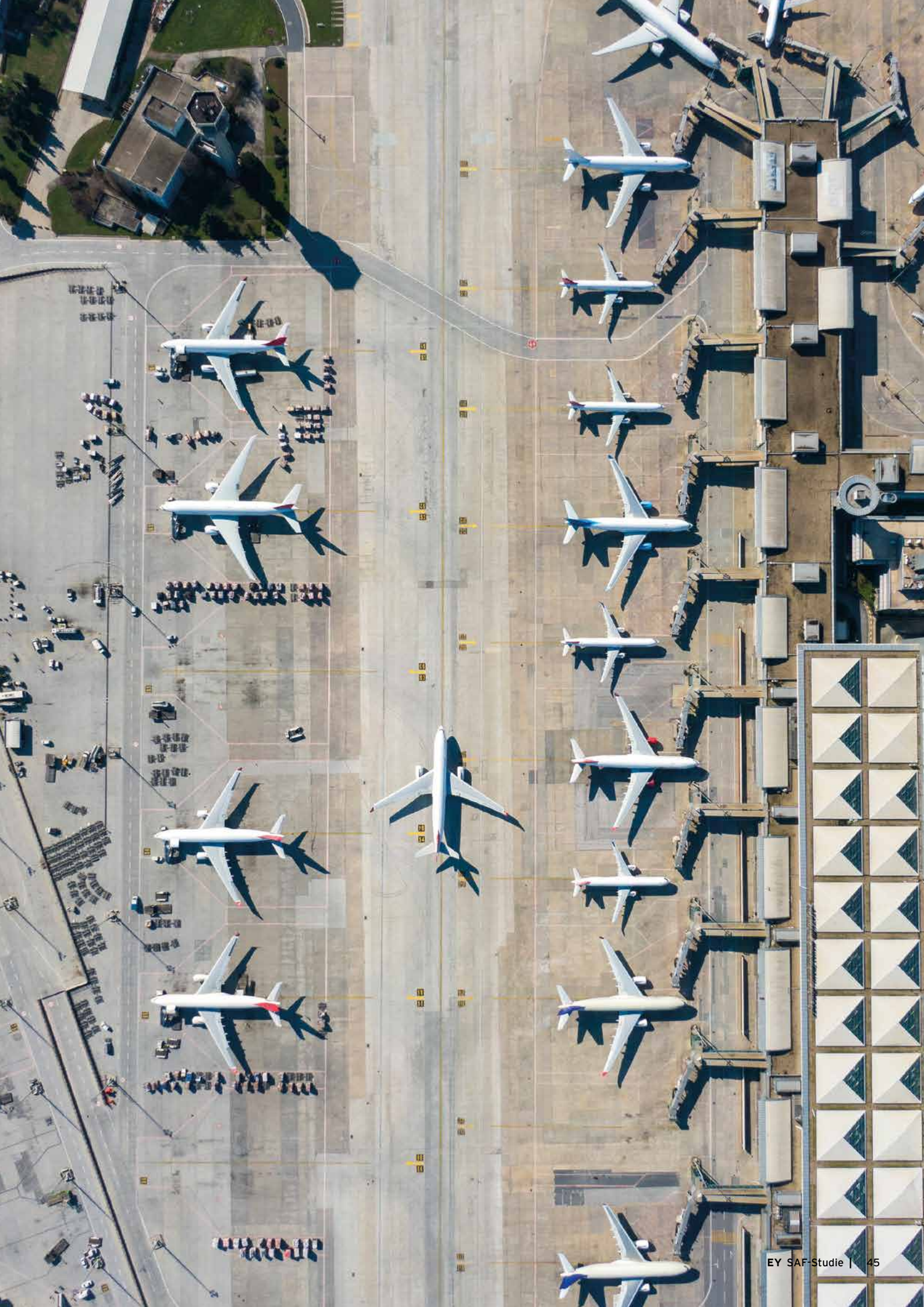
Die Fortschritte in der Technologieentwicklung und die enge Zusammenarbeit zwischen den Regulierungsbehörden und den Unternehmen könnten dazu beitragen, diese Herausforderungen zu überwinden und eine kohlenstoffarme Luftfahrtindustrie zu schaffen.



Bei Regulierungen wie RefuelEU mangelt es an Klarheit. Es bleibt unklar, inwieweit Airlines Einfluss auf die Lieferung von SAF unter der Beimischverpflichtung haben, da Lieferanten selbst bestimmen dürfen, wann, wo und wie sie ihre Verpflichtung erfüllen.

**Henrik von Storch**, Director Global Sustainable Aviation Fuels, DHL Express







A photograph of three business professionals in a modern office setting. Two women and one man are seated around a dark table, engaged in a discussion. The man, on the right, is wearing a blue suit and white shirt, and is holding a pen. The two women are on the left, one with her back to the camera and another with her hair in a bun. They are in front of large windows that offer a view of a city skyline. The image is overlaid with large, semi-transparent white circular shapes. The title 'Nachfrage und Abnehmer' is written in bold yellow text across the middle of the image.

# Nachfrage und Abnehmer

## Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

Die Nachfrage nach SAF wird maßgeblich durch regulatorische Maßnahmen bestimmt. Dies umfasst sowohl finanzielle Anreize als auch vorgeschriebene Mindestverwendungsmengen und wirkt sich somit positiv auf die Nachfrage nach SAF aus. Auf europäischer Ebene spielen wie bereits beschrieben die ReFuelEU-Initiative, das EU ETS und die RED II und III eine entscheidende Rolle für die Nachfrage.

Die EU- und globale Regularien beeinflussen die Verwendung von SAF, da die Quotenverpflichtung für die Verwendung verschiedener Kraftstoffarten dazu führt, dass die Anbieter die kostengünstigste Option wählen, um ihre Quoten zu erfüllen. Dies kann die Entscheidung für den Vertrieb von SAF beeinflussen, insbesondere in Deutschland, wo es Treibhausgasquoten gibt.

Die EU-Reformen führen in dem von EY erstellten Szenario zu einem Wachstum der europäischen SAF-Nachfrage auf insgesamt 73 Mio. Tonnen im Jahr 2050, mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 11 % im Zeitraum von 2030 bis 2050. Neben dieser prognostizierten Steigerung des absoluten SAF-Bedarfs ist aufgrund der individuellen Zielsetzungen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen seitens der Fluggesellschaften zudem international mit einer deutlichen Steigerung des Anteils von SAF am gesamten Flugzeugkraftstoffbedarf zu rechnen. Innerhalb des europäischen Raums wird die prognostizierte SAF-Nachfrage von 73 Mio. Tonnen voraussichtlich knapp 60 % des Gesamtverbrauchs von Kerosin entsprechen.<sup>60</sup>

Außereuropäische staatliche Regularien und Ziele wie beispielsweise Kanadas Aviation Climate Action Plan und Indiens Ziel einer SAF-Verwendungsquote tragen ebenfalls zu einer steigenden

“

Die Airlines sind aufgrund der Risikoabwägung dazu getrieben, sich um die Sicherung von SAF zu bemühen. Dies ist auch durch die potenziellen zukünftigen Strafen motiviert. Vor diesem Hintergrund haben wir kürzlich unser erstes Offtake Agreement über die nächsten zehn Jahre mit einer Airline abgeschlossen.

**Dr. Mark Misselhorn**, Chief Executive Officer, Caphenia GmbH

globalen Nachfrage bei. Japan setzt sich darüber hinaus das Ziel, bis 2030 10 % des Kraftstoffs im Luftfahrtsektor durch SAF zu ersetzen.<sup>61</sup> Global betrachtet sind langfristige Ziele für 2040 und 2050 in vielen Ländern nicht klar definiert. Primär sind Ziele aber bis 2030 etabliert.

Die Prognose für das Jahr 2030 sieht ein globales SAF-Angebot (laut laufender Projekte, Projekte im Bau und Projekte in der FEED-Phase) von ca. 15,5 Mio. Tonnen vor<sup>62</sup>, was einem Anteil von 6 % am globalen Kerosinbedarf entspricht<sup>63</sup>. Der aktuelle Marktpreis für verfügbares SAF aus biogenen Reststoffen liegt derzeit dreifach bis fünfmal über dem Preis für fossiles Kerosin.<sup>64</sup> Der Preis kann sich auch aufgrund der hohen Nachfrage und Konkurrenz auch weiter ändern. Heutzutage stehen Sektoren wie die Luftfahrt in Konkurrenz um SAF-ähnliche Kraftstoffe mit anderen Verkehrssektoren wie zum Beispiel der Schifffahrt oder dem Automobilsektor (hier insbesondere E-SAF). Allerdings wird E-SAF aufgrund der teuren CO<sub>2</sub>-Abscheidungs-technologien und der Abhängigkeit von grünem H<sub>2</sub> noch nicht stark nachgefragt.

Dennoch schließen viele Fluggesellschaften Abnahmeverträge ab, um sich das Produkt (derzeit hauptsächlich Bio-SAF) zu sichern. Diese Lieferverträge bieten sowohl den Fluggesell-

schaften als auch den Produzenten Sicherheit bezüglich der zukünftigen SAF-Nachfrage und Produktion. Zudem gibt es weiter greifende Kollaborationen: Fluggesellschaften wie Qatar Airways, Delta und United Airlines gründeten beispielsweise die sogenannte First Movers Coalition. Hierbei handelt es sich um eine Allianz von 96 Mitgliedern, die das Ziel hat, die Interessen der Abnehmer zu bündeln und gleichzeitig Produzenten zu unterstützen.

Die Investitionen, die bis 2050 zu einer Deckung des SAF-Bedarfs nötig wären, werden auf kumulierte 1,00-1,45 Billionen US-Dollar geschätzt.<sup>65</sup> Um diese Investitionen zu ermöglichen, ist eine hohe Sicherheit seitens der Produzenten erforderlich, die auch durch langfristige Lieferverträge gewährleistet werden kann.

Dieses Kapitel beleuchtet die aktuelle und bis 2050 prognostizierte SAF-Nachfrage. Die EY-Prognose beleuchtet nationale Dekarbonisierungsziele, insbesondere für den Luftfahrtsektor, und daraus folgende Vorhersagen für die benötigten Mengen SAF. Außerdem wird untersucht, weswegen die Luftfahrt bezüglich der Bereitstellung von SAF in Konkurrenz mit anderen Sektoren steht und welche Schritte nötig sind, um eine Deckung der prognostizierten Nachfrage zu ermöglichen.



## 3.1 Existierende und prognostizierte SAF-Nachfrage

Derzeit lässt sich eine steigende Nachfrage nach SAF beobachten. Dieser Anstieg wird durch politische Regularien und freiwillige Verpflichtungen der Fluggesellschaften getrieben und wird sich in den kommenden Jahren weiter verstärken. Um die Dekarbonisierung der Luftfahrt voranzutreiben, ist es wichtig, diese zukünftige Nachfrage zu decken.

Auf globaler Ebene haben sich viele große Fluggesellschaften ambitionierte Dekarbonisierungsziele gesetzt. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Dekarbonisierungsstrategien ist die zunehmende Nutzung von SAF. Abbildung 16 zeigt die angestrebten SAF-Anteile ausgewählter Fluggesellschaften. So planen unter anderem Delta Airlines und American Airlines im nordamerikanischen Raum, Air France-KLM im europäischen Raum und die australischen Qantas Airways, bis zum Jahr 2030 10 % ihres Flugkraftstoffbedarfs durch SAF zu decken. In Asien und Südamerika strebt zum Beispiel Singapore Airlines an, im selben Zeitraum einen Anteil von 5 % SAF zu erreichen.

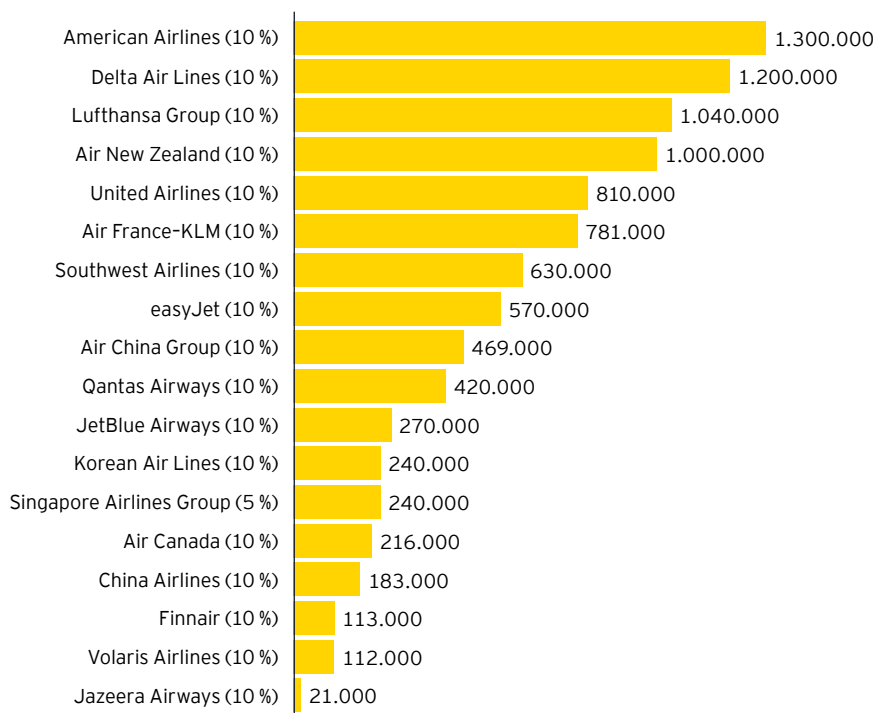
Basierend auf einer Analyse existieren der politischer Regularien zum Einsatz von SAF und nationalen Dekarbonisierungsambitionen hat EY eine Prognose für die Entwicklung der globalen SAF-Nachfrage über die nächsten Jahrzehnte erstellt. Dieses Modell basiert auf historischen globalen Verbrauchsdaten für Kerosin der U.S. Energy Information Administration (IEA). Die Vorhersage dafür, welcher Anteil dieses Bedarfs auf SAF entfallen wird, basiert auf einer umfänglichen Datenanalyse nationaler Zielsetzungen weltweit. Sofern vorhanden sind diese analysierten Daten direkte Regularien, die den zukünftigen SAF-Anteil des Kerosinverbrauchs vorgeben.

**Abbildung 16**

Angestrebter Anteil von SAF am gesamten Kraftstoffbedarf ausgewählter Fluggesellschaften

(Quelle: Airline-Berichte, EY-Prognosen und Interviews. Stand Dezember 2025)

SAF Selbstverpflichtungen der Airlines



Dies ist beispielsweise für die EU-Mitgliedstaaten der Fall, in denen bis 2030 ein SAF-Anteil von 6 % im Rahmen der RefuelEU Aviation vorgesehen ist. Langfristig soll die SAF-Quote in der EU bis 2040 34 % und bis 2050 sogar 70 % betragen. Global gesehen existieren in den meisten Staaten allerdings keine solchen spezifischen Regularien. In Abwesenheit konkreter Ziele zur Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors liegen dieser Prognose allgemeine nationale Dekarbonisierungsziele zugrunde. In diesen Fällen basiert der prognostizierte SAF-Anteil auf der Annahme, dass das allgemeine Ziel zur Emissionsreduktion auf den Luftfahrtsektor übertragbar ist. Das Prognosemodell berücksichtigt, dass es neben dem Einsatz von SAF auch andere Maßnahmen gibt, um die Emissionen der Luftfahrt zu senken. Die aktuelle Forschung legt nahe, dass beispielsweise durch Flugroutenoptimierungen um die 20 % an Emissionen auch eingespart werden können.<sup>66</sup>

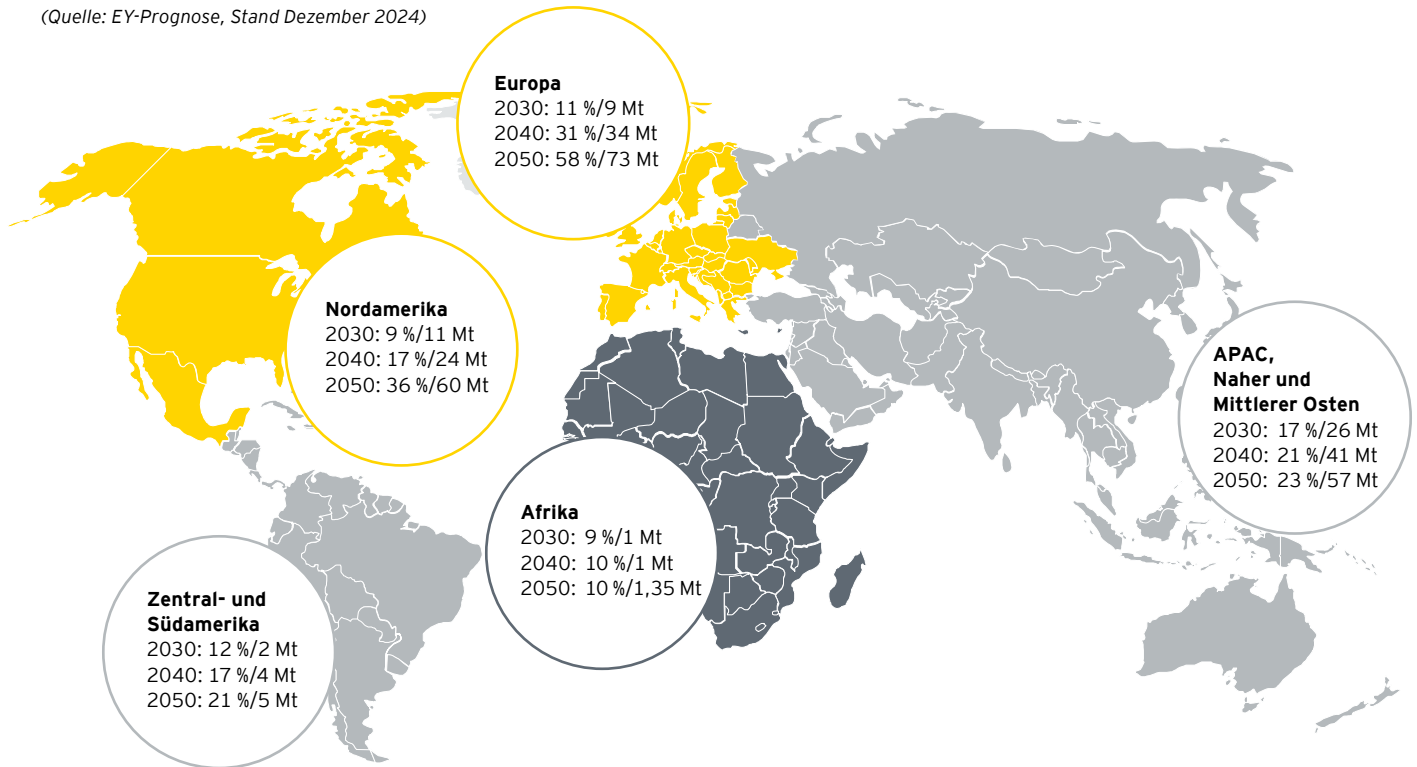
Es ist zudem zu beachten, dass die im Rahmen der Prognose getroffenen Annahmen, bedingt durch den langen Prognosezeitraum, hohen Unsicherheiten unterliegen. Diese Annahmen könnten insbesondere durch zukünftige Änderungen der SAF-Produktionskosten, der Effizienz und der regulatorischen Rahmenbedingungen stark beeinflusst werden. Daher können im Verlauf von SAF-Projekten Veränderungen gegenüber dem prognostizierten Szenario auftreten.

Die Ergebnisse der Prognose zur globalen SAF-Nachfrage bis 2050 sind in Abbildung 17 visualisiert. Es wird ein starker Anstieg der absoluten SAF-Nachfrage erwartet, mit einer globalen durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 7 % zwischen 2030 und 2050. Dies entspricht einem Anstieg der weltweiten Nachfrage von 49 Mio. Tonnen im Jahr 2030 auf 104 Mio. Tonnen im Jahr 2040, bis hin zu 196 Mio. Tonnen im Jahr 2050.

## Abbildung 17

Prognostizierte SAF-Nachfrage nach Region (in %) des gesamten Kerosinbedarfs und absolute SAF-Mengen

(Quelle: EY-Prognose, Stand Dezember 2024)



Für den **europäischen Raum<sup>h</sup>** lässt sich in diesem Prognoseszenario, wie in Abbildung 18 dargestellt, eine beinahe exponentielle Tendenz beobachten: Während der SAF-Anteil des Kerosinverbrauchs 2023 noch bei 0,2 % lag, wird für 2030 bereits ein Anteil von 10,6 % erwartet, was einer Gesamtmenge von 9,3 Mio. Tonnen SAF entspricht. Für 2040 wird ein SAF-Anteil von 31,4 % prognostiziert. Bis Mitte des Jahrhunderts könnte dann bereits über die Hälfte des europäischen Kerosinbedarfs durch SAF gedeckt werden, was einer Gesamtnachfrage von 73,1 Mio. Tonnen entspricht. Diese Entwicklung spiegelt eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 11 % zwischen 2030 und 2050 und damit den stärksten Anstieg der SAF-Nachfrage im Vergleich mit anderen Regionen.

<sup>h</sup> Zum europäischen Raum zählen hier neben der EU die Länder Großbritannien, Norwegen und Türkei, die nationale SAF-Targets formuliert haben.

Die prognostizierte absolute Nachfrage von 73 Mio. Tonnen bis 2050 im europäischen Raum entspräche dem größten Verbrauch im Gegensatz zu anderen Regionen, gefolgt von Nordamerika mit einer absoluten Nachfrage von voraussichtlich 60 Mio. Tonnen SAF im Jahr 2050.

Der zweitgrößte Anstieg der SAF-Nachfrage wird in Nordamerika erwartet, mit einer prognostizierten durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von knapp 9 %. Ein deutlich geringeres, aber dennoch relevantes Wachstum in der SAF-Nachfrage lässt sich in anderen Regionen der Welt prognostizieren.

Sowohl in Zentral- und Südamerika als auch in der Region Asien-Pazifik (APAC) und dem Nahen und Mittleren Osten wird zwischen 2030 und 2050 ein jährliches Wachstum von ungefähr 4 % erwartet. Schlusslicht ist der afrikanische Kontinent mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von knapp 2 %. Dort wird der geringste Verbrauch erwartet, der Anstieg der SAF-Nachfrage wird von 8,5 % im Jahr 2030 auf 10,3 % im Jahr 2050 prognostiziert. Dies entspricht einer absoluten Nachfrage von 0,95 Mio. Tonnen (2030) beziehungsweise 1,35 Mio. Tonnen (2050).

Die oben beschriebenen Wachstumsraten ergeben in der APAC-Region und dem Nahen und Mittleren Osten eine absolute prognostizierte Nachfrage von 26 Mio. Tonnen im Jahr 2030, 41 Mio. Tonnen im Jahr 2040 und 57 Mio. Tonnen im Jahr 2050. Trotz ähnlicher Wachstumsraten wird die absolute Nachfrage in Zentral- und Südamerika mit jeweils 2 Mio., 3,7 Mio. und 5 Mio. Tonnen in demselben Zeitraum deutlich geringer ausfallen.

## 3.2 Wichtige Sektoren als Key-Abnehmer

Wie im ersten Kapitel für die verschiedenen Prozessrouten bereits erläutert entsteht in den Raffinerieprozessen nicht nur SAF, sondern gleichzeitig auch andere Arten nachhaltiger Kraftstoffe. Diese anderen Kraftstoffe sind kein reines Abfallprodukt der SAF-Produktion, sondern können zum Antrieb anderer Verkehrsmittel, beispielsweise von Lastkraftwagen und Schiffen, genutzt werden. Auch für andere Industriezweige wie beispielsweise den Chemiesektor kann eine Verwendung solcher Stoffe interessant sein. Das Mengenverhältnis der verschiedenen Endprodukte zueinander kann in der Produktion beeinflusst werden.<sup>67</sup> Angesichts des globalen Ziels, die CO<sub>2</sub>-Emissionen im gesamten Verkehrssektor zu reduzieren, kann es aus diesem Grund kurz- bis mittelfristig zu einem möglichen Wettbewerb zwischen dem Luftverkehr und anderen Teilen des Verkehrssektors wie zum Beispiel der Schifffahrt um die Bereitstellung von SAF (insbesondere E-SAF) kommen.

In den letzten Jahren lag der Fokus des Raffinerieprozesses von Biomasse auf der Gewinnung von Diesel und Benzin für den Straßentransport. Erst in der jüngsten Vergangenheit sind auch Bio-SAF und Schiffsdiesel verstärkt ins Blickfeld gerückt. Die Gründe hierfür sind relativ hohe Preise und begrenzte Produktionskapazitäten. Um eine Dekarbonisierung der Luftfahrt voranzutreiben, wäre eine zukünftige Beeinflussung der Mengenverhältnisse der Endprodukte zugunsten der Luftfahrt, also eine Priorisierung der Produktion von Bio-SAF, notwendig.<sup>68</sup>

E-SAF werden derzeit noch nicht stark nachgefragt, da die Technologie für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung relativ teuer ist und die Produktion stark von der Verfügbarkeit von grünem H<sub>2</sub> abhängt. Genau wie bei der Produktion von Bio-Kraftstoffen können allerdings auch hier in derselben Prozessroute Kraftstoffe verschiedener Art hergestellt werden. Diese können ebenfalls von diversen Verkehrsmitteln genutzt werden. Aktuelle Studien zufolge wäre eine vorteilhafte Mengenverteilung, die die Dekarbonisierung der Luftfahrt begünstigt, eine Produktion von 50 % E-SAF, 25 % E-Diesel und



25 % E-Naphtha (Rohbenzin, dient als Grundprodukt unter anderem zur Herstellung von Flugzeugkraftstoff). Die Einschätzung dieser Verteilung basiert sowohl auf technischen, produktionsbedingten Gesichtspunkten als auch auf einer Berücksichtigung alternativer Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und entsprechender Effizienzgesichtspunkte.<sup>69</sup>

In der EU regelt beispielsweise die Richtlinie RED III im Gegensatz zu RED II nun auch den Einsatz von Schiffsdiesel und Flugzeugkraftstoff. Die finalen Effekte dieser Regularien auf die Produktion und Verwendung von SAF in Konkurrenz mit anderen Endprodukten hängen vom Bedarf und vom erzielbaren Preis in verschiedenen Anwendungsgebieten ab. Zur Erfüllung der Quotenverpflichtungen, die in der RED-III-Richtlinie festgelegt sind, können verschiedene nachhaltige Kraftstoffarten angerechnet werden. Neben Bio-SAF gehört hierzu seit April 2024 in Deutschland auch E-SAF, vorausgesetzt dieser wurde mithilfe erneuerbarer Energie produziert.<sup>44</sup> SAF und andere Kraftstoffe konkurrieren daher miteinander. Es ist zu erwarten, dass Vertreiber die Entscheidung zu

Mengenverhältnissen so treffen, dass die eigene Quote auf kostengünstigste Weise erfüllt werden kann. In Deutschland wird daher, bedingt durch die THG-Quote, hauptsächlich der für die Verbraucher kostengünstigste Kraftstoff vertrieben. In anderen EU-Staaten könnte dies abhängig von der spezifischen nationalen Umsetzung der Richtlinie allerdings anders sein.<sup>69</sup> Auch andere Faktoren wie zum Beispiel die nationale Nachfrage nach den individuellen Arten erneuerbarer Kraftstoffe und der Grad direkter Elektrifizierung von Verkehrsmitteln beeinflussen das Verhältnis der Produktion von SAF zu anderen Kraftstoffen.<sup>70</sup>

Trotz des bestehenden Potenzials zur Steigerung der E-Fuel-Produktion in der Zukunft ist die Verfügbarkeit von Bio-SAF ein wesentlicher Faktor für die Deckung der künftigen Nachfrage. Um Bio-SAF einen Vorteil in der Konkurrenz mit anderen nachhaltigen Kraftstoffen zu verschaffen, könnten sich beispielsweise weitere Richtlinien oder politische Anreize eignen. Zusätzlich ist zu beachten, dass der Einsatz bisher weiterhin auf ein maximales Verhältnis von Bio-SAF zu konventionellem Kraftstoff von 50 % beschränkt ist.<sup>71</sup>

Basierend auf technischen Faktoren, der Verfügbarkeit von Rohstoffen, Produktionskosten und den Effekten auf die Dekarbonisierung des gesamten Verkehrssektors lässt sich analysieren, welche Arten von Kraftstoff unter verschiedenen Prozessrouten priorisiert werden sollten, um ein möglichst vorteilhaftes Gesamtergebnis zu erzielen. Abbildung 19 gibt einen Überblick über eine mögliche Priorisierung. Es ist allerdings zu beachten, dass alle aufgeführten Kraftstoffarten weitere Entwicklung und Skalierung benötigen, um auf eine wirtschaftliche Weise zur erforderlichen Dekarbonisierung beizutragen.

**Abbildung 19** Priorisierung verschiedener Kraftstoffe für die Verwendung im Transportsektor<sup>72</sup>

|                |                                  | Verkehrsmittel              |                             |                     |                             |                           |                     |                             |                     |
|----------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
|                |                                  | Luftfahrt                   |                             | Seefahrt            |                             | Straßenverkehr (Personen) |                     | Straßenverkehr (Schwerlast) |                     |
| Treibstoffart  |                                  | Kurzstrecke                 | Langstrecke                 | Kurzstrecke         | Langstrecke                 | Kurzstrecke               | Langstrecke         | Kurzstrecke                 | Langstrecke         |
| Biotreibstoffe | z. B. FT-SPK-SAF und Flüssiggase | Priorisierung wünschenswert | Priorisierung wünschenswert | gute Eignung        | Priorisierung wünschenswert | begrenzte Eignung         | begrenzte Eignung   | begrenzte Eignung           | begrenzte Eignung   |
|                | z. B. ATJ-SPK SAF und Bio-Diesel | Priorisierung wünschenswert | Priorisierung wünschenswert | gute Eignung        | Priorisierung wünschenswert | begrenzte Eignung         | begrenzte Eignung   | begrenzte Eignung           | begrenzte Eignung   |
|                | z. B. HEFA SAF und HVO-Diesel    | keine Priorisierung         | begrenzte Eignung           | keine Priorisierung | begrenzte Eignung           | keine Priorisierung       | keine Priorisierung | keine Priorisierung         | keine Priorisierung |
| E-Treibstoffe  | z. B. PtL SAF und E-Benzin       | Priorisierung wünschenswert | Priorisierung wünschenswert | gute Eignung        | Priorisierung wünschenswert | keine Priorisierung       | begrenzte Eignung   | begrenzte Eignung           | mittlere Eignung    |





## Sobald die Produktion von E-SAF in großem Maßstab effizient funktioniert, ist davon auszugehen, dass die Nachfrage nach Biokraftstoffen sinken wird.

**Jan Eike Blohme-Hardeggen**, Leiter der Umweltabteilung, Flughafen Hamburg

Zur Dekarbonisierung des Transportsektors sind die Erhöhung der Energieeffizienz, die Elektrifizierung und die Nutzung von H<sub>2</sub> und seinen Derivaten entscheidend. Die direkte Elektrifizierung aus erneuerbaren und anderen kohlenstoffarmen Ressourcen gilt als die beste Option für die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs und ist auch für die Binnenschifffahrt und den Kurzstreckenseeverkehr geeignet. Engpässe in der Lieferkette und geopolitische Fragen im Zusammenhang mit kritischen Materialien stellen jedoch eine Herausforderung für diesen Ansatz dar.

Biokraftstoffe, insbesondere Drop-in-Biokraftstoffe, sind bis zur jeweiligen Beimischungsgrenze in hohem Maße mit bestehenden fossilen Kraftstoffen kompatibel und haben ein wettbewerbsfähiges Kostenprofil, vor allem auf kurze Sicht. Ihre Verfügbarkeit ist jedoch begrenzt, wenn man sich auf nachhaltige Rohstoffe konzentriert. Zusätzlich zu der ohnehin schon begrenzten Verfügbarkeit gibt es außerdem eine konkurrierende Nachfrage nach biogenem Kohlenstoff aus anderen Sektoren wie dem Baugewerbe und der chemischen Industrie. Aufgrund dieser Knappheit sollten bei der Verwendung von Biokraftstoffen solche Verkehrsmittel priorisiert werden, bei denen eine anderweitige Dekarbonisierung schwierig ist. Hierzu zählen hauptsächlich die Luft- und die Seefahrt.

E-Fuels stehen vor Herausforderungen insbesondere in Bezug auf Kosten, technologische Bereitschaft und Energieeffizienz. Dies begrenzt ihren kurzfristig möglichen Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Es wird jedoch erwartet, dass auch E-SAF längerfristig eine relevante Rolle spielen wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Kombination verschiedener Kraftstoffe für eine erfolgreiche Dekarbonisierung des Verkehrssektors, insbesondere der Luftfahrt, nötig sein wird. Dies ist begründet in der unterschiedlichen technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit der Produktionsprozesse für verschiedene

Verkehrsträger und in der Notwendigkeit, Kosten, Energie, Ressourcenverfügbarkeit und Effizienz in Einklang zu bringen. Die Entwicklung neuer Infrastruktur, technischer Normen sowie weiterer Forschungs- und Demonstrationsmaßnahmen ist von entscheidender Bedeutung, um den Übergang zu nachhaltigen Kraftstoffen zu unterstützen und bis 2050 Net Zero im Verkehrssektor zu erreichen.<sup>72</sup>

Laut einer Studie, die vom Ausschuss für Verkehr und Tourismus (TRAN Committee) des Europäischen Parlaments in Auftrag gegeben wurde, müssten die Ausgaben für erneuerbare Kraftstoffe zur Erreichung des Net-Zero-Ziels der EU wie folgt priorisiert werden: Im Jahr 2030 ist zu erwarten, dass ein Großteil der Gesamtinvestitionen nach wie vor in fossile Kraftstoffe fließen wird. Dennoch wird vermutet, dass die Investitionen in Biokraftstoffe, zu denen unter anderem Bio-SAF zählt, ein Niveau von ungefähr 40 Mrd. US-Dollar erreichen werden. Investitionen in H<sub>2</sub> und andere nachhaltige energiebasierte Kraftstoffe (wie z. B. E-SAF) werden zu diesem Zeitpunkt vermutlich noch keine relevante Größenordnung erreichen. Dieses Bild muss sich bis 2050 stark ändern, um Net Zero zu erreichen: Die Autoren der Studie prognostizieren, dass Investitionen in fossile Kraftstoffe gestoppt werden, während bei Investitionen in H<sub>2</sub> und andere nachhaltige energiebasierte Kraftstoffe ein Anstieg auf ungefähr 150 Mrd. US-Dollar erwartet wird. Die Investitionen in Biokraftstoffe werden in diesem Zeitraum vermutlich auf 60 Mrd. US-Dollar ansteigen.<sup>72</sup>

Neben der Luftfahrt handelt es sich auch bei der **Schifffahrt** um einen tendenziell schwierig zu dekarbonisierenden Sektor. Eine direkte Elektrifizierung ist hier bedingt durch die Limitationen bei der Stromspeicherung ungeeignet. Im Jahr 2019 wurden innerhalb der EU etwa 46 Mio. Tonnen Schiffskraftstoff verbraucht. Um die Ziele der FuelEU-Maritime-Regulierung einzuhalten, ergibt sich resultierend aus diesem Verbrauch eine zukünftige Nachfrage nach SAF-ähnlichen erneuerbaren Kraftstoffen für den Schifffahrtsbereich in Höhe von etwa 1 Mio. Tonnen im Jahr 2034.<sup>72</sup>

Im Gegensatz zu den in der Luftfahrt verwendeten SAF besteht in der Schifffahrt nicht die Notwendigkeit einer Zertifizierung des verwendeten Kraftstoffes aus denselben Prozessrouten. Aus diesem Grund kann neben E-Methanol auch E-Ammoniak eingesetzt werden.<sup>73</sup> Allerdings müssen die Schiffsmotoren dafür ausgelegt sein, u. a. mittels sogenannter Dual Fuel Engines, die sowohl mit (biogenem) Schiffsdiesel als auch zusätzlich z. B. noch mit Methanol betrieben werden können.<sup>74</sup> E-Ammoniak wird neben H<sub>2</sub> eine zentrale Rolle dabei spielen, den Schifffahrtsektor zu transformieren. Diese Transformation ist notwendig, um das durch die Internationale Schifffahrtsorganisation definierte Ziel einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 50 % bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Kurzfristig wird erwartet, dass LNG und Biokraftstoffe eine wichtige Rolle bei der Verringerung der Verwendung von Heizöl und Marine Gasoil (MGO) spielen werden.

Auch der **Straßentransport** konkurriert mit der Luftfahrt um die Bereitstellung der jeweiligen nachhaltigen Kraftstoffe, da innerhalb derselben Prozessrouten nicht nur die Herstellung von SAF, sondern auch diejenige von Bio- oder E-Benzin möglich ist. Unter Betrachtung der gesamten Verkehrssektors wäre für eine erfolgreiche Dekarbonisierung allerdings eine Priorisierung von SAF über Kraftstoffe für Pkw und Lkw wünschenswert. Dies liegt daran, dass im Automobilsektor auch eine direkte Elektrifizierung technisch und wirtschaftlich umsetzbar ist.

Die Wahl des passenden Kraftstoffs für das jeweilige Transportmittel hängt in hohem Maße von Faktoren wie dem Angebot, der Motorentechnologie, der Netto-Umweltleistung und der wirtschaftlichen Tragfähigkeit ab. Die entscheidenden Faktoren werden vermutlich die Produktionskosten und die Verfügbarkeit sein. Zudem müssen bei der Wahl eines alternativen Kraftstoffs logistische, infrastrukturelle und sicherheitstechnische Aspekte berücksichtigt werden.<sup>75</sup>

### 3.3 Sicherung des Produkts – Überblick über bestehende Kooperationen

Die Steigerung der Nachfrage nach SAF ist unter anderem durch den derzeit hohen Preisaufschlag gegenüber fossilem Kerosin mit zahlreichen Schwierigkeiten verbunden. Dies liegt daran, dass es für Fluggesellschaften aus Wettbewerbsgesichtspunkten bedingt durch die momentan existierende Diskrepanz zwischen SAF und konventionellem Kerosin häufig nicht sinnvoll ist, finanzielle Ressourcen für SAF aufzuwenden. Um diesen Herausforderungen angemessen zu begegnen, wurde während der COP26 und COP27 die First Movers Coalition gegründet. Das Ziel dieser



Um die erforderlichen SAF-Mengen zu sichern, gehen wir langfristige Verträge ein. Derzeit verhandeln wir Verträge mit einer Laufzeit von acht bis zwölf Jahren. Zusätzlich haben wir in innovative Projekte in den USA und den Niederlanden investiert, um die Forschung zu unterstützen und die Entwicklung neuer Technologien voranzutreiben. E-Fuel-Projekte sind ebenfalls ein Schwerpunkt unserer Unterstützung; derzeit sind beispielsweise elf Projekte in Frankreich in Entwicklung, bei einigen davon führen wir aktive Gespräche mit dem Ziel, ihre Geschäftsgrundlage zu stärken.

**Air France-KLM Group**

Allianz ist es, die Interessen der Abnehmer von Dekarbonisierungstechnologien zu bündeln und durch die Abgabe von Verpflichtungen der Mitglieder zusätzliche Sicherheit für die Produzenten zu schaffen. Zu diesen Dekarbonisierungstechnologien gehört auch die Entwicklung von SAF. Derzeit umfasst die First Movers Coalition 96 Mitglieder, unter anderem aus der Luftfahrtindustrie.<sup>76, 77</sup>

Zur Sicherung der Produktion visieren viele Fluggesellschaften unter anderem das Schließen langfristiger Lieferverträge mit derzeitigen und möglichen zukünftigen Produzenten von SAF an. Diese Lieferverträge bieten zum einen den Fluggesellschaften Sicherheit dahin gehend, dass sie ihren zukünftigen prognostizierten SAF-Bedarf abdecken können, und zum anderen auch den Produzenten, indem sie

sicherstellen, dass die von ihnen produzierten SAF-Mengen abgenommen werden. Bei einer überwiegenden Anzahl der derzeit geschlossenen Lieferverträge handelt es sich allerdings um reine Memoranda of Understanding, die lediglich Absichtserklärungen über die zukünftige Abnahme von SAF sind und damit rechtlich nicht verbindlich sind.

Dennoch können diese Übereinkünfte dem Ausbau von Partnerschaften zwischen SAF-Produzenten und Abnehmern, dem Unterstreichen der eigenen Nachhaltigkeitsziele und der Erhöhung der Sicherheit für Produzenten dienen. Mögliche weitere Arten der Kooperation ergeben sich durch die Eigenkapitalbeteiligung von Fluggesellschaften an Start-ups im SAF-Bereich, wobei diese Kooperationen im Wesentlichen zur Unterstützung der technologischen Forschung angestrebt werden.

Zur Abdeckung des enormen prognostizierten Anstiegs der SAF-Nachfrage sind hohe Investitionen in Produktionsanlagen erforderlich. Um den erforderlichen Anstieg der Anzahl Produktionsanlagen um 5.000 bis 7.000 Stück bis 2050 zu gewährleisten, ergäbe sich ein kumulierter Investitionsbedarf in Höhe von 1 bis 1,5 Billionen US-Dollar. Dies entspricht einem jährlichen globalen Investitionsbedarf in Höhe von 6 bis 10 % der aktuellen jährlichen Investitionen in die Öl- und Gasinfrastruktur. Dieser Investitionsbedarf sollte aus Sicht der Fluggesellschaften hauptsächlich durch die Ölindustrie gedeckt werden. Die Investitionen in zukünftige Produktionsanlagen

können zudem insbesondere durch den Abschluss von Lieferverträgen gesichert werden.<sup>67</sup>

Global arbeiten viele Fluggesellschaften und Flughäfen mit Unternehmen wie z. B. Shell zusammen, um den Ausbau der SAF-Produktionskapazitäten voranzutreiben. Beispielhaft für solche Kooperationen sind unter anderem United Airlines, die eine Partnerschaft mit zwei weiteren Unternehmen schlossen. Diese Kooperationspartner sind spezialisiert in Technologie- und Infrastrukturentwicklung für nachhaltige Energiequellen. Diese Partnerschaft unter dem Namen Blue Blade Energy hat die Form eines Joint Ventures und

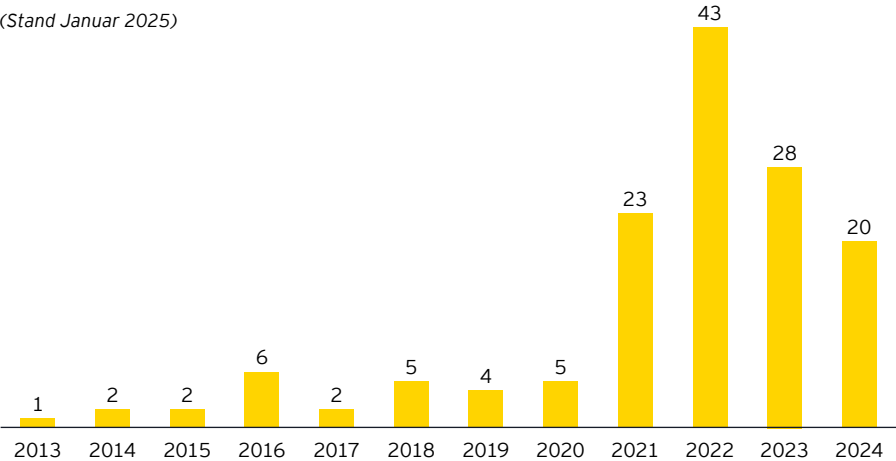
soll es der Fluggesellschaft ermöglichen, im Jahr 2028 50.000 Flüge mittels SAF durchzuführen.<sup>78</sup> Zudem schloss United Airlines einen Liefervertrag über die zukünftige Lieferung von 4,5 Mio. Tonnen SAF mit dem Start-up Alder Renewables (Tabelle 7).<sup>79</sup> Auch Delta AirLines hat in Nordamerika mit DG Fuels, einem Unternehmen, das plant, 3,8 Mrd. US-Dollar in eine Produktionsanlage zur Herstellung von SAF mittels FTS zu investieren, eine ähnliche Partnerschaft abgeschlossen.<sup>80, 81</sup>

In Abbildung 20 sind die weltweit abgeschlossenen Abnehmerverträge im Zeitraum von 2013 bis 2024 dargestellt.

**Tabelle 7**  
Beispiele globaler Lieferverträge der vergangenen Jahre mit den höchsten Volumina (Stand Januar 2025)

| Name               | Datum       | Produzent        | SAF-Volumen<br>(Mio. Tonnen) | Vertragsdauer<br>(in Jahren) |
|--------------------|-------------|------------------|------------------------------|------------------------------|
| United Airlines    | 09.09.2021  | Alder Renewables | 4,5                          | 20                           |
| OneWorld           | 20.03.2022  | Gevo             | 3,0                          | 5                            |
| United Airlines    | 13.09.2023  | Cemvita          | 3,0                          | 20                           |
| United Airlines    | 30.06.2015  | Fulcrum          | 3,4                          | 10                           |
| Southwest Airlines | 03.11.2023  | USA BioEnergy    | 2,6                          | 20                           |
| Delta              | 22.03.2022  | Gevo             | 1,6                          | 7                            |
| American Airlines  | 22.07.2022  | Gevo             | 1,5                          | 5                            |
| AirBP              | 01.11.2016  | Fulcrum          | 1,5                          | 10                           |
| Shell              | Januar 2025 | ECB/Omega Green  | 0,8                          | n. a.                        |

**Abbildung 20**  
Anzahl der jährlich neu verkündeten Lieferverträge weltweit<sup>82, 83</sup>  
(Stand Januar 2025)



In Deutschland hat unter anderem die Lufthansa eine Partnerschaft mit dem etablierten deutschen Chemieunternehmen HCS Group geschlossen, das ab 2026 60.000 Tonnen SAF pro Jahr produzieren soll. Dabei soll der SAF in Form von AtJ, basierend auf biologischen Restmaterialien der Land- und Forstwirtschaft, bereitgestellt werden. Weiterhin plant die Lufthansa in den kommenden Jahren, bis zu 250 Mio. US-Dollar zusätzlich in die Beschaffung von SAF zu investieren.<sup>84, 85</sup>

Nachfolgend eine Übersicht (Tabelle 8) über weitere bestehende SAF-Lieferverträge nur in Deutschland:

**Tabelle 8**  
Übersicht über die großen Lieferverträge deutscher Unternehmen  
(Stand Januar 2025)

| Name            | Datum      | Produzent    | SAF-Volumen<br>(Mio. Tonnen) | Vertragsdauer<br>(in Jahren) |
|-----------------|------------|--------------|------------------------------|------------------------------|
| Lufthansa       | 01.08.2022 | Shell        | 1,8                          | 7                            |
| Lufthansa       | 13.09.2022 | OMV          | 0,8                          | 8                            |
| DHL Express     | 21.03.2022 | Neste        | 0,6                          | 5                            |
| DHL Express     | 19.10.2023 | World Energy | 0,5                          | 7                            |
| Lufthansa       | 07.08.2016 | Gevo         | 121,1                        | 5                            |
| Lufthansa       | 01.08.2023 | HCS Group    | 0,06                         | 1                            |
| Lufthansa Cargo | 04.10.2021 | Atmosfair    | 0,0001                       | 5                            |

Die oben genannten Kooperationen und Lieferverträge umfassen derzeit nur Bio-SAF. Für E-SAF ist die Anzahl Lieferverträge bedingt durch die derzeit noch existierende technologische Unsicherheit und fehlende Kommerzialisierung der Technologie deutlich beschränkter. Dennoch gibt es auch hier vereinzelte Bemühungen. Beispielsweise im europäischen Raum das Unternehmen Norsk e-Fuel zu nennen, das entsprechende Übereinkünfte bezüglich E-SAF mit den Fluggesellschaften Norwegian Air Shuttle und Cargolux schließen konnte. Norsk e-Fuel ist ein Start-up, das zu seinen Anteilseignern unter anderem den deutschen Hersteller von Elektrolysesystemen Sunfire und den Schweizer Anbieter von CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien Climeworks zählt.<sup>86, 87</sup>

Beim Abschluss von Lieferverträgen ergeben sich mehrere kritische Parameter, die es zu beachten gilt. So sollten Lieferverträge neben weiteren Bedingungen insbesondere Angaben zu den

Produzenten und Abnehmern, dem zum Einsatz bestimmten Flughafen, dem Produktionsvolumen und zum notwendigen Zeithorizont enthalten. Zur Vermeidung von Risiken, die durch Preisschwankungen auftreten können, sollten die Fluggesellschaften entsprechende Absicherungstransaktionen auf den globalen Finanzmärkten durchführen.

Wie bereits beschrieben spielen für den erfolgreichen Einsatz von SAF und die Umsetzung von Lieferverträgen die Betankungsmöglichkeiten an Flughäfen eine zentrale Rolle. Haben Fluggesellschaften an den für sie relevanten Flughäfen keinen Zugang zur notwendigen Infrastruktur (siehe Kapitel 5), so beeinflusst dies ihre Möglichkeiten zur SAF-Nutzung. In diesen Fällen gibt es dennoch die Möglichkeit, über sogenannte „Book & Claim“-Systeme Lieferverträge mit Produzenten einzugehen, auch ohne den SAF physisch zu tanken. Betroffene Fluggesellschaften können Verträge mit SAF-

Produzenten abschließen und diesen die Preisdifferenz zwischen SAF und fossilem Kerosin zahlen. Dies ermöglicht es der jeweiligen Fluggesellschaft, den bezahlten SAF auf die eigene CO<sub>2</sub>-Bilanz zu verrechnen. Die jeweilige Menge SAF wird dann zum Marktpreis fossilen Kerosins physisch anderweitig verkauft und von einem Abnehmer getankt, auf dessen CO<sub>2</sub>-Bilanz der SAF keinen positiven Einfluss hat. Zusätzlich können durch dieses System nicht nur Fluggesellschaften, sondern auch andere Unternehmen, die keine eigenen Flüge durchführen, von CO<sub>2</sub>-Einsparungen mittels SAF profitieren. Ein Beispiel für solche Lieferverträge bietet der Produzent Neste, der es ermöglicht, dass Unternehmen das entsprechende Green Premium zwischen SAF und konventionellem Kerosin bezahlen und sich die dadurch entstehenden Emissionsreduktionen auf ihre CO<sub>2</sub>-Bilanz gutschreiben lassen. Die so durch Dritte bezuschussten SAF werden dann an andere Fluggesellschaften als finale Abnehmer verkauft.<sup>88</sup>





# **Globale Produktionskapazität**



Wir gehen davon aus, dass die Produktion von E-SAF vor 2030 wirtschaftlich noch nicht tragfähig sein wird und erst nach diesem Zeitpunkt an Bedeutung gewinnen dürfte. Bis dahin wird die Luftfahrtindustrie voraussichtlich auf die Produktion von Bio-SAF angewiesen sein.

**Jan Eike Blohme-Hardeggen**, Leiter der Umwelta Abteilung, Flughafen Hamburg

## Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

Die globale Produktion von SAF hat in den letzten Jahren gemäß Daten der IATA ein exponentielles Wachstum verzeichnet. Von 2019 bis 2022 stieg das Produktionsvolumen von 0,02 Mio. Tonnen auf 0,24 Mio. Tonnen an.<sup>89</sup> Die IATA geht davon aus, dass die SAF-Produktion im Jahr 2025 2,1 Millionen Tonnen oder 0,7 % der gesamten Düsentreibstoffproduktion erreichen wird.<sup>90</sup>

Dabei werden verschiedene Produktionsmethoden verwendet, wobei HEFA/HVO der dominierenden Ansatz ist. Jedoch zeigen auch FT und ATJ ein signifikantes Potenzial für die SAF-Produktion. Die Produktion von E-SAF ist im Vergleich zu Bio-SAF bisher weniger verbreitet, hauptsächlich aufgrund der hohen Kosten für Inputs wie erneuerbare Energien, grünen H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> (inkl. Technologie).

Obwohl bereits über 264 Projekte für die SAF-Produktion angekündigt wur-

den, bleibt das aktuelle Produktionsniveau von SAF vergleichsweise niedrig, da der Implementierungsstatus solcher Projekte relativ unklar ist. Die meisten Projekte sind in Nordamerika geplant, gefolgt von Europa und Asien. Derzeit befinden sich 39 Produktionsstätten weltweit in Betrieb, einschließlich neun Demonstrationsanlagen. In Deutschland befinden sich zwei dieser aktiven Anlagen: eine Bio-SAF, die den Treibstoff mittels Co-Processing-, und eine E-SAF, die ihn mittels PtL-Technologie herstellt.<sup>91</sup>

Eine differenzierte Betrachtung des SAF-Potenzials nach Arten zeigt verschiedene Wachstumsperspektiven. E-SAF könnte aufgrund sinkender Kosten für H<sub>2</sub>, Elektrolysen und DAC-Technologien stark wachsen, insbesondere in Gebieten mit geringen Biomasseressourcen. Es wird erwartet, dass dieses Wachstum schneller voranschreitet als das anderer nachhaltiger Kraftstoffe, insbesondere wenn erneuerbare Energiequellen wie Wind und Solarenergie verfügbar sind.

Der Ausbau der Verfügbarkeit von H<sub>2</sub> ist entscheidend, um den steigenden

Bedarf an SAF zu decken und die Ziele zur Dekarbonisierung der Luftfahrtindustrie zu erreichen. Dies erfordert nicht nur eine Steigerung der Produktion insgesamt, sondern auch den Übergang von grauem zu grünem H<sub>2</sub>, der aus nachhaltigen Elektrizitätsquellen produziert wird.

Für Bio-SAF wird von 2030 bis 2035 ein stärkerer Zuwachs erwartet, sowohl global als auch in Europa und Deutschland. Der Anteil der angekündigten Jahresproduktion von SAF „Made in Germany“ wird bis 2030 voraussichtlich 1,5 Mio. Tonnen betragen. Dies entspricht einer durchschnittlichen Anlagengröße von 75.000 Tonnen pro Jahr in Deutschland im Jahr 2030.

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die aktuellen und zukünftigen Möglichkeiten zur SAF-Produktion. Diese werden parallel zur Nachfrageprognose in Kapitel 3 nach Regionen differenziert. Abschließend werden Nachfrage und Produktionspotenzial zueinander in Verhältnis gesetzt und entstehende Produktionslücken analysiert.

## 4.1 Globale Produktionspotenziale

Für die kommenden Jahre wird ein globaler Anstieg der SAF-Produktion prognostiziert. Insgesamt wurden laut ICAO von mehr als 150 Produzenten in 53 Ländern über 264 Projekte für erneuerbare Kraftstoffe angekündigt, die eine Gesamtkapazität von 65,4 Mio. Tonnen erneuerbarer Kraftstoffe, erreichen sollen.<sup>64</sup>

Abbildung 23 weiter unten zeigt die geografische Verteilung der bereits existierenden und der geplanten Produktionsstätten, die potenziell in der Lage sind, SAF herzustellen. Es sollte

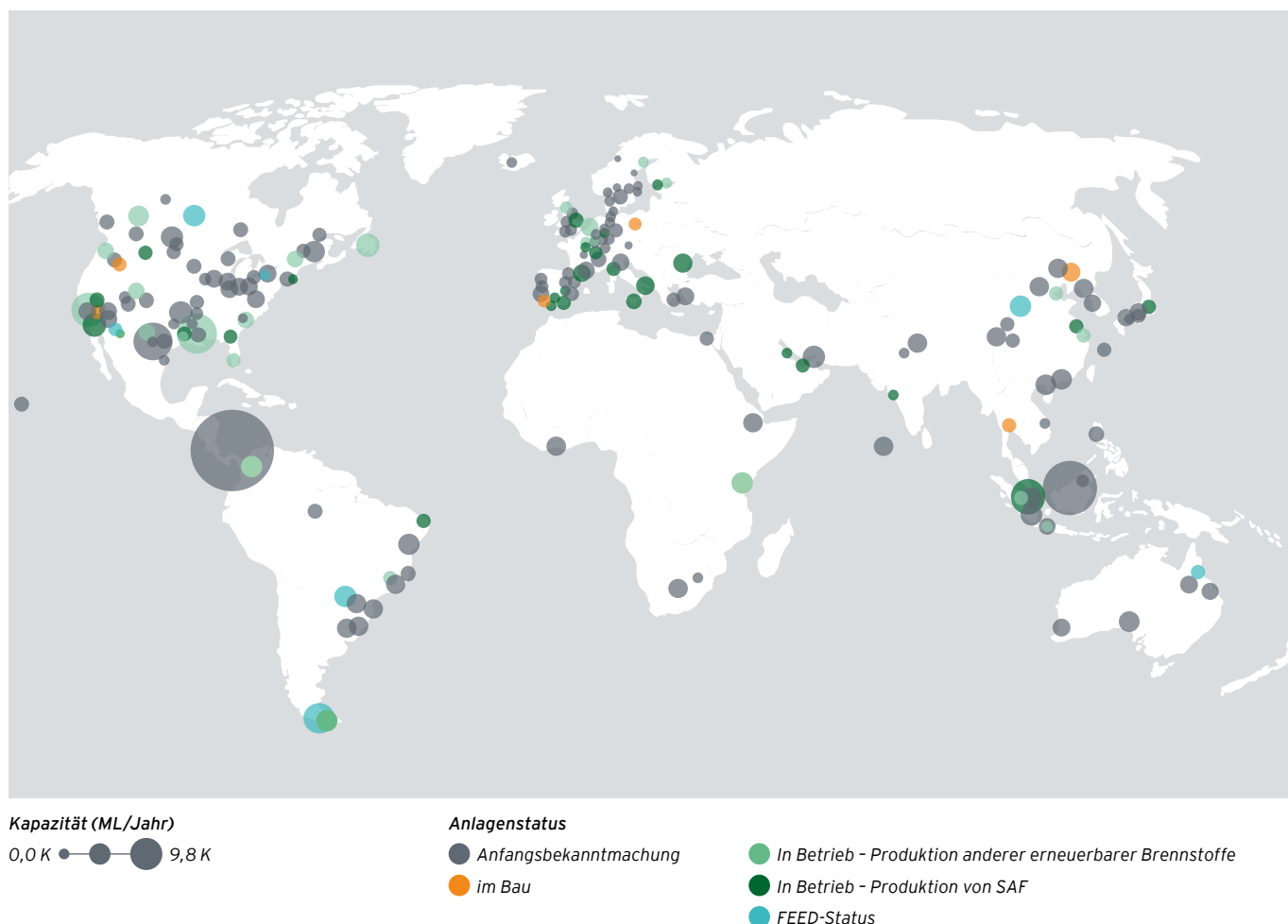
jedoch berücksichtigt werden, dass sowohl der erfolgreiche Abschluss dieser Projekte als auch das tatsächliche Ausmaß der SAF-Produktion nicht zuverlässig prognostiziert werden können. Es handelt sich also bei allen im Folgenden angegebenen Zahlen um potenzielle Maximalmengen. Die meisten der ausstehenden Projekte (234 Anlagen) sind bislang nur angekündigt worden, ein kleinerer Anteil befindet sich bereits in der Bauphase (12 Anlagen) oder im Front-End Engineering Design (FEED) (18 Anlagen). Für einen Teil dieser Anlagen, die die Produktion noch nicht aufgenommen haben, gibt es auch noch keine Ankündigungen bezüglich des erwarteten Produktionsvolumens. Diese sind

von den im Folgenden präsentierten Produktionsvolumina also ausgenommen. 39 Produktionsanlagen für SAF befinden sich weltweit bereits in Betrieb. Die Mehrzahl der geplanten Produktionsstätten liegt in Nordamerika: 72 Anlagen in den USA und 28 in Kanada. In Europa sind 76 Anlagen in der Planungsphase. Ergänzend dazu sind insbesondere in Ost- und Südostasien (vor allem in Japan, Malaysia und China) sowie in Südamerika (vor allem in Brasilien) einige Planungen zu erkennen. Auf dem afrikanischen Kontinent sind bisher hingegen nur 11 Anlagen vorgesehen. Die meisten Ankündigungen wurden im Jahr 2024 veröffentlicht.<sup>64</sup>

### Abbildung 21

Übersicht über die Produktionsanlagen für nachhaltigen Kraftstoff in Planung<sup>64</sup>

(Stand Januar 2025)





Bis 2030 könnte ein Volumenzuwachs um 14 Mio. Tonnen SAF in Nordamerika, um 9,5 Mio. Tonnen in Europa und um 9,9 Mio. Tonnen in der APAC-Region und dem Nahen und Mittleren Osten erreicht werden.<sup>64</sup> Insgesamt soll nicht nur eine Vielzahl neuer SAF-Projekte hinzukommen, sondern es wird auch eine zunehmende geografische Ausbreitung der Produktion vorausgesagt.

Insbesondere entstehen Projekte in Nord- und Südamerika, Australien, Europa, Saudi-Arabien und Südasien. Des Weiteren werden generell vermehrt Projekte in Nordamerika, Europa und Asien erwartet. Da die SAF-Produktion lediglich einen Anteil der möglichen Produktion in diesen Anlagen ausmacht, steht sie, wie Kapitel 3.2 beschrieben, in einem Wettbewerbsverhältnis mit

der Produktion beispielsweise von nachhaltigem Diesel oder Naphtha.<sup>92</sup>

Tabelle 9 zeigt ausgewählte Produktionswerke mit hohem Produktionsvolumen für Bio-SAF weltweit. Es fällt auf, dass diese Anlagen insbesondere auf die HEFA-Verfahrensrouten spezialisiert sind und sich vorwiegend in Europa, Asien und Nordamerika befinden.

**Tabelle 9**

Ausgewählte Produktionswerke mit einem hohen potenziellen Produktionsvolumen für Bio-SAF (aktiv, in Bau, angekündigt)<sup>64</sup>

| Unternehmen     | Land       | Maximales SAF-Volumen | Fertigstellung | Prozesse      | Status      |
|-----------------|------------|-----------------------|----------------|---------------|-------------|
| Neste Oil       | Singapur   | 2,7 Mio. Tonnen/Jahr  | 2023           | HEFA          | Aktiv       |
| World Energy    | USA        | 0,93 Mio. Tonnen/Jahr | Aktiv (k. A.)  | HEFA          | Aktiv       |
| Total           | Frankreich | 0,5 Mio. Tonnen/Jahr  | 2019           | HEFA          | Aktiv       |
| ENI             | Italien    | 0,5 Mio. Tonnen/Jahr  | 2021           | HEFA          | Aktiv       |
| Total           | Frankreich | 0,08 Mio. Tonnen/Jahr | 2024           | HEFA          | Aktiv       |
| Cepsa           | Spanien    | 0,5 Mio. Tonnen/Jahr  | 2026           | HEFA          | In Bau      |
| Azure           | Kanada     | 0,9 Mio. Tonnen/Jahr  | 2027           | HEFA          | FEED        |
| ECB Omega Green | Paraguay   | 0,9 Mio. Tonnen/Jahr  | 2022           | HEFA          | FEED        |
| SGP BioEnergy   | Panama     | 7,9 Mio. Tonnen/Jahr  | 2026           | k. A.         | Ankündigung |
| Sarawak State   | Malaysia   | 4,6 Mio. Tonnen/Jahr  | 2030           | k. A. (Algen) | Ankündigung |
| Grön Fuels      | USA        | 3,0 Mio. Tonnen/Jahr  | 2025           | FT-SPK        | Ankündigung |



Für die Herstellung von E-SAF spielt H<sub>2</sub> eine zentrale Rolle. Hierbei ist es essenziell, dass es sich um grünen, also aus erneuerbaren Energien hergestellten H<sub>2</sub> handelt. Derzeit ist neben technologischen Grenzen auch die beschränkte Verfügbarkeit dieses grünen H<sub>2</sub> ein Grund für die geringe E-SAF-Produktionsmenge. Aufgrund der womöglich sinkenden Kosten für grünen H<sub>2</sub> und DAC-Technologien stuft das WEF das Potenzial von CO<sub>2</sub>-basiertem E-SAF allerdings als hoch ein. Es wird erwartet, dass die Produktion von E-SAF im kommenden Jahrzehnt schneller wachsen wird als die Herstellung anderer nachhaltiger Kraftstoffe. PtL soll zur Diversifizierung der SAF-Produktion beitragen, insbesondere in Gebieten mit geringfügigen Biomasseressourcen. Für die Produktion von E-SAF ist es zwingend notwendig, dass erneuerbare Energiequellen, hauptsächlich Wind- und Solarenergie, zur Verfügung stehen. Besonders dünn besiedelte, nicht landwirtschaftlich nutzbare Gebiete, zum Beispiel in Chile, im Mittleren Osten, in Nordafrika oder in Australien, wären optimale Standorte für die Produktion von E-SAF.

Nach Angaben des WEF ist die Produktion an sonnenreichen Standorten aus Kosteneffizienzgesichtspunkten sinnvoll. In Wüstengebieten beispielsweise könnte die Produktion von E-SAF um 25 % günstiger sein als in Europa.

“

Wir nutzen ein fortschrittliches Verfahren zur Herstellung von SAF und nachhaltigen Treibstoffen auf der Basis von Biomethan und CO<sub>2</sub>. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt im geringeren Energieverbrauch. Mit der Capphenia-Methode können wir eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von bis zu 92 % erreichen. Zusätzlich beziehen wir Wasserstoff sehr kosteneffizient, da er im Vergleich zur Wasserelektrolyse mit deutlich weniger Energie produziert wird.

Dr. Mark Misselhorn, Chief Executive Officer, Capphenia GmbH

Schon durch die Nutzung von lediglich 1-2 % der Landfläche in vier Wüstenregionen könnte der vollständige Bedarf an Flugzeugkraftstoff für das Jahr 2030 gedeckt werden.<sup>93</sup>

Laut Agora kann infolge der geplanten Inbetriebnahme zahlreicher Produktionsstätten ab dem Jahr 2026 eine jährliche Herstellung von etwa 137.000 Tonnen E-SAF erwartet werden. Dies wird insbesondere durch die Umstellung von FT-Anlagen auf die Produktion von CO<sub>2</sub>-basiertem SAF ermöglicht. Tabelle 10 gibt einen

Ausblick auf zwei existierende wie auch auf weitere vorgesehene E-SAF-Projekte, die bis zum Jahr 2027 den Betrieb aufnehmen sollen.<sup>75</sup>

Im Gegensatz zu E-SAF weisen unsere Prognosen für Bio-SAF bis 2030 global einen stärkeren Zuwachs auf, der eine Höhe von fast 34,7 Mio. Tonnen bei voller Kapazitätsauslastung der Anlagen erreichen könnte. Ähnliche Erwartungen gelten auch für Europa, wo man einen Anstieg auf 6,7 Mio. Tonnen bis 2030 erwarten kann.<sup>64</sup>

**Tabelle 10** Ausgewählte existierende und angekündigte E-SAF-Projekte mit ihren jeweiligen potenziellen Produktionsvolumina<sup>64</sup>

| Unternehmen     | Land        | Maximales SAF-Volumen                 | Fertigstellung | Prozesse        | Status      |
|-----------------|-------------|---------------------------------------|----------------|-----------------|-------------|
| Atmosfair       | Deutschland | 0,0004 Mio. Tonnen/Jahr               | 2022           | Power-to-Liquid | aktiv       |
| AirCompany      | USA         | 0,6797 Mio. Tonnen/Jahr <sup>94</sup> | 2022           | Power-to-Liquid | aktiv       |
| Synerko         | Niederlande | 0,1000 Mio. Tonnen/Jahr               | 2027           | Power-to-Liquid | angekündigt |
| SAF+ Consortium | Kanada      | 0,0800 Mio. Tonnen/Jahr               | 2028           | Power-to-Liquid | angekündigt |
| Twelve          | USA         | 0,0002 Mio. Tonnen/Jahr               | 2025           | Power-to-Liquid | Bauphase    |

# E-SAF-Projekt

## 4.2 Globale Produktionspotenziale

Obwohl weltweit ein deutlicher Trend zu ansteigenden SAF-Produktionsmengen zu beobachten ist, gibt es in der Geschwindigkeit und im Ausmaß dieses Hochlaufs regionale Unterschiede. Diese sind zusammengefasst in der unten stehenden Karte (Abbildung 22) zu erkennen.

“

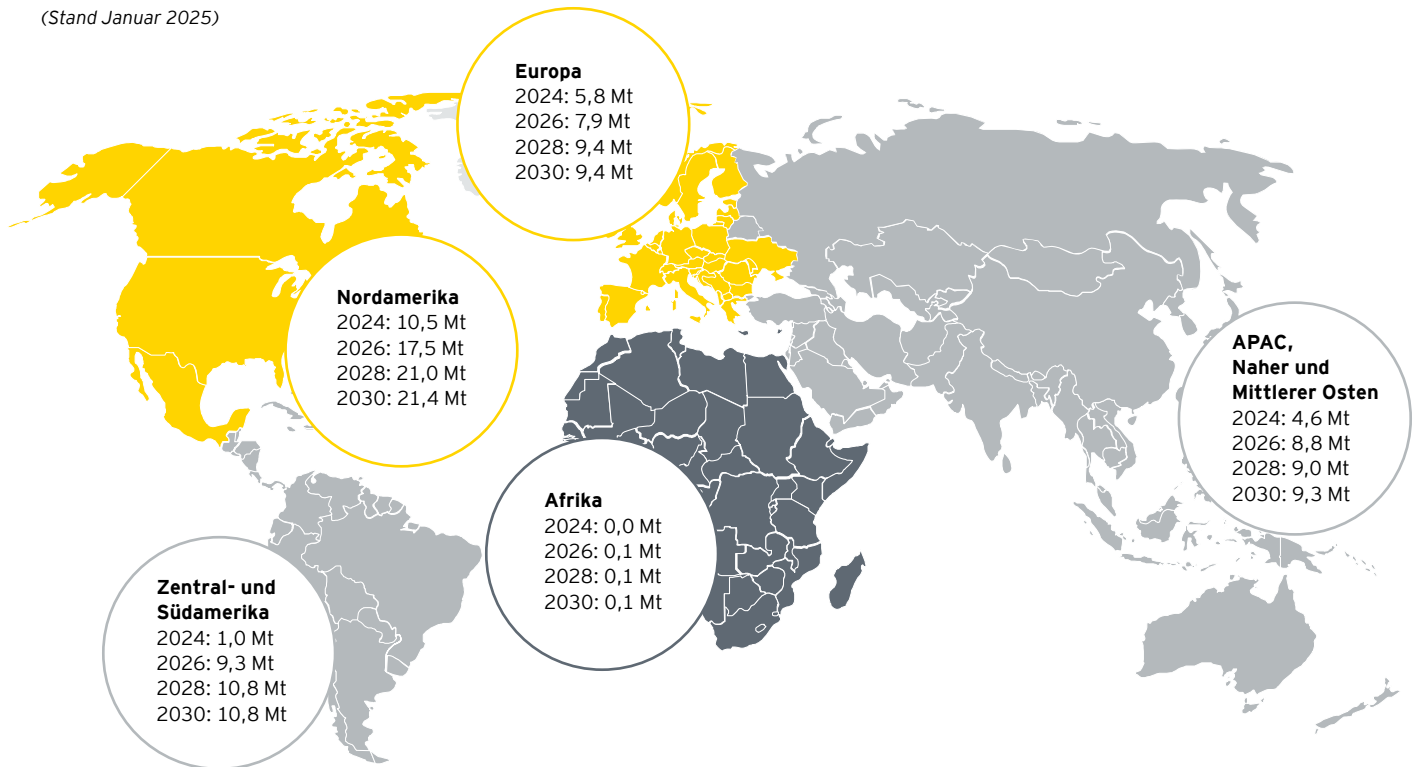
Regionen mit reichlichen Ressourcen zur Herstellung von grünem Wasserstoff werden für die SAF-Produktion immer wichtiger. Das lässt sich bereits deutlich an den Standorten aktueller Projekte erkennen.

**Melanie Form**, Mitglied des Vorstands und Geschäftsführerin, Aireg

### Abbildung 22

Maximale SAF-Produktionspotenziale in bereits existierenden oder angekündigten Anlagen bis 2030<sup>64</sup>

(Stand Januar 2025)



Es fällt auf, dass die mit Abstand größte Produktionsmenge in Nordamerika, insbesondere in den USA, erwartet wird. Im globalen Vergleich sehr schwach sind die erwarteten Produktionskapazitäten auf dem afrikanischen Kontinent und in Zentral- und Südamerika. In den restlichen

Regionen bewegen sich die möglichen Produktionsmöglichkeiten bis 2030 mit um die 10 Mio. Tonnen in derselben Größenordnung. Unterschiede sind hier allerdings in der Wachstumsrate und der Geschwindigkeit des Produktionsausbaus zu erkennen.

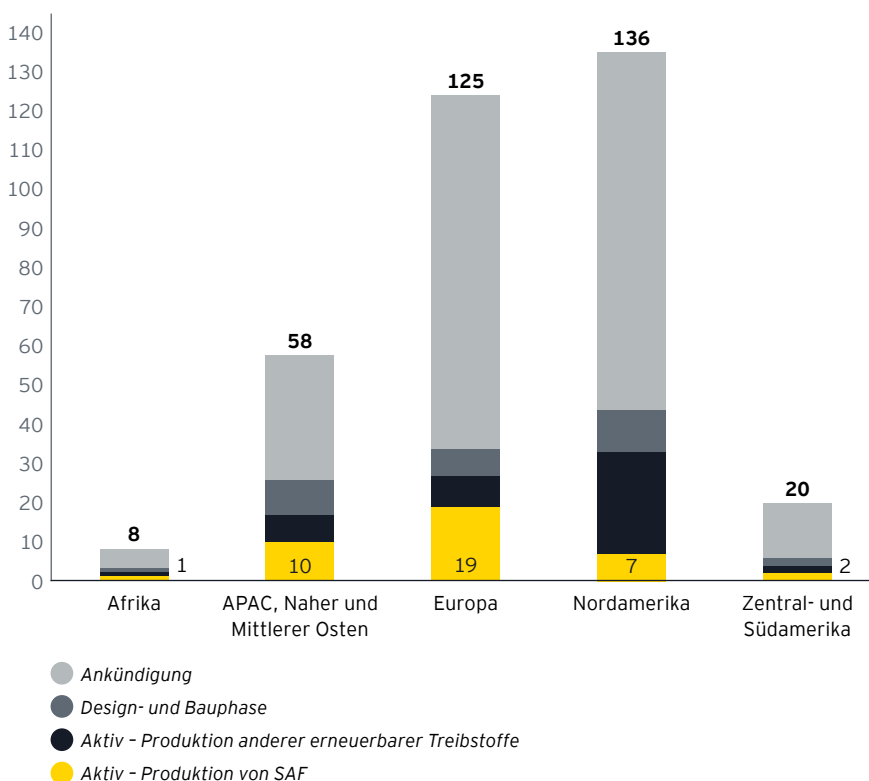
Die Karte zeigt die maximale Produktionsmöglichkeit, diese hängt jedoch in der Realität stark von politischen Entscheidungen und Regierungen ab. Es bleibt somit unklar, inwieweit beispielsweise verschiedene Feedstocks, die für Bio- oder E-SAF relevant sind, priorisiert werden.

Abbildung 23 veranschaulicht die Anzahl der SAF-Projekte, die bis zum Jahr 2050 geplant oder bereits in Betrieb genommen wurden. Die Zahl der aktiven Anlagen wird derzeit von Europa, Nordamerika und Asien gleichermaßen dominiert. Allerdings wird ersichtlich, dass in Europa und Nordamerika das größte Potenzial für den Neubeziehungsweise Ausbau von Anlagen besteht, während Asien bezüglich des Wachstums eine geringere Präsenz aufweist.<sup>64</sup> Auch unter Betrachtung der prognostizierten potenziellen Produktionsvolumina bis zum Jahr 2030 zeigt sich ein ähnliches Bild.

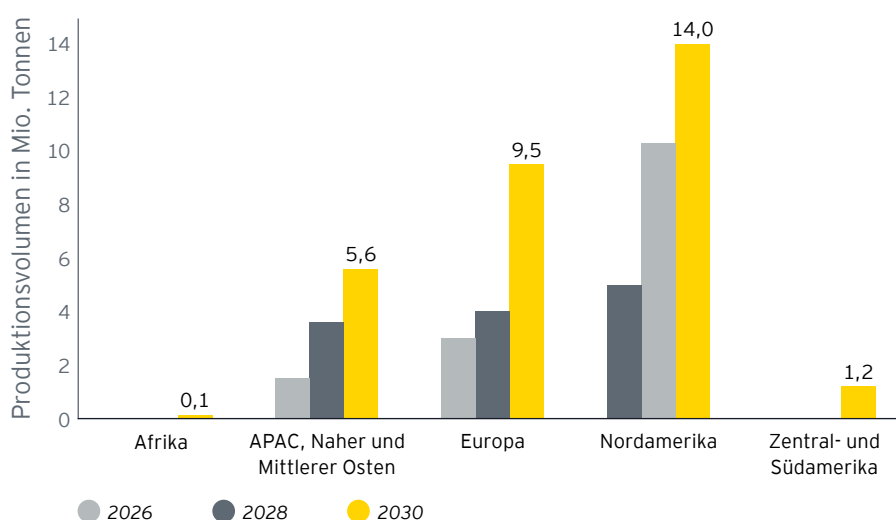
Im direkten Vergleich der einzelnen Länder zeigt sich eine deutliche Dominanz der USA in der Anzahl sowohl der bereits existierenden als auch der geplanten SAF-Produktionsanlagen. Wie Abbildung 25 verdeutlicht, finden sich hier mit 7 existierenden und weiteren 93 geplanten Anlagen die mit Abstand meisten Produktionsstätten. Diese Anzahl macht in etwa ein Drittel der weltweit existierenden und geplanten SAF-Produktionsstätten aus. An zweiter Stelle, wenn auch mit großem Abstand, befindet sich Vereinigtes Königreich mit insgesamt 34 existierenden oder geplanten Anlagen.

**Abbildung 23**Anzahl und Grad der Umsetzung von SAF-Projekten nach Kontinent<sup>64</sup>

(Stand Januar 2025)

**Abbildung 24**Angekündigte potenzielle SAF-Produktionsvolumina nach Kontinent (2026-2030)<sup>64</sup>

(Stand Januar 2025)



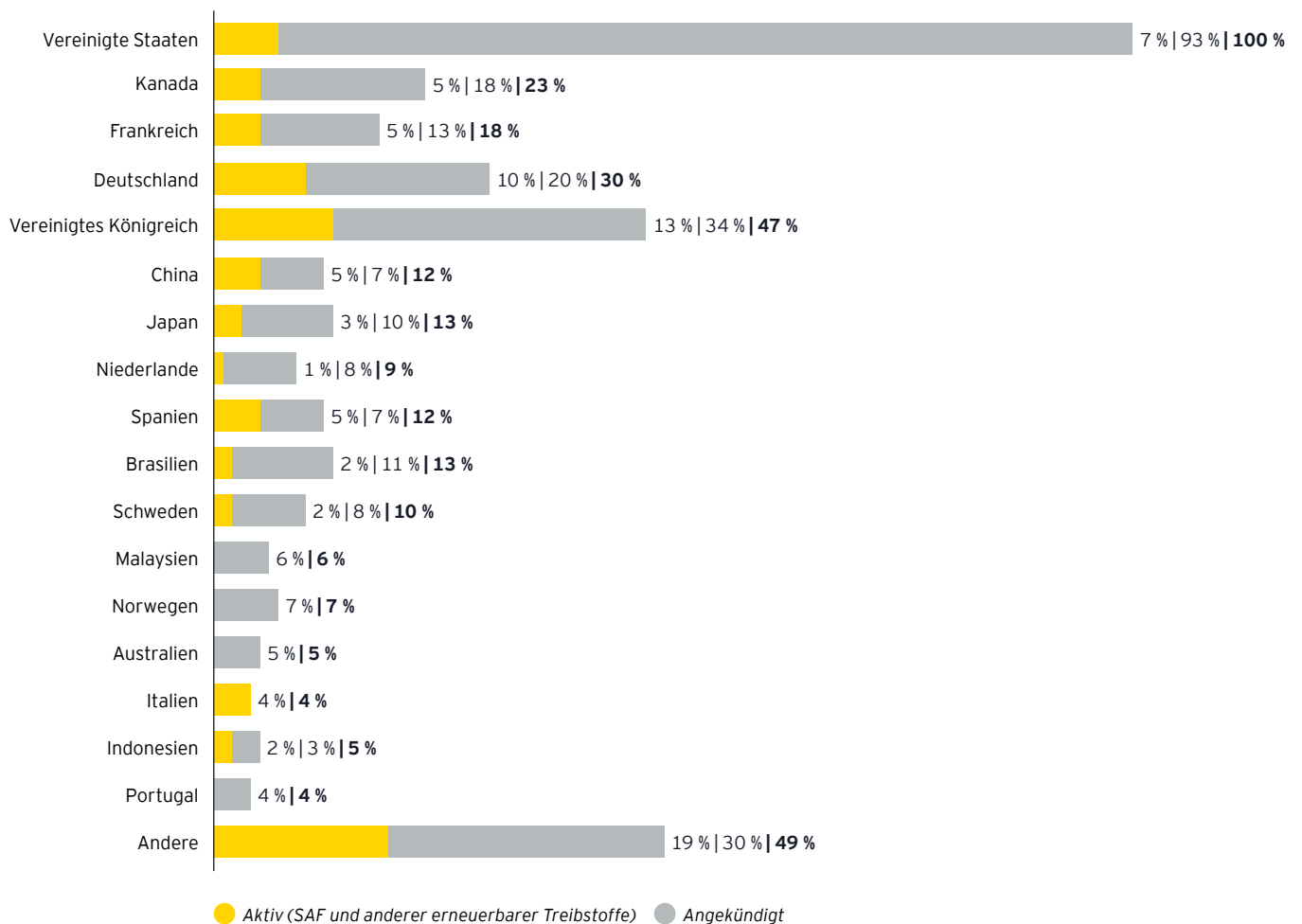


Die Erprobung der Technologien in kleineren Projekten konzentriert sich hauptsächlich auf Europa, wo das erforderliche Fachwissen und die technische Infrastruktur vorhanden sind. Die strategische Umsetzung dieser Technologie in größeren Projekten in Entwicklungsländern wird sinnvoll sein, sobald die notwendige Infrastruktur dort etabliert ist.

**Bernhard Dietrich**, Leiter CENA Hessen | Hessen Trade & Invest GmbH

#### Abbildung 25

Anzahl der SAF-Projekte nach Ländern; Länder mit drei oder weniger Projekten zusammengefasst unter „Andere“<sup>64</sup>  
(Stand Januar 2025)





### Nordamerika

Die USA verfügen über optimale Voraussetzungen, um die Produktion von SAF hochzufahren. Dies spiegelt sich auch in den derzeit bereits vergleichsweise hohen Produktionsvolumina wider. Die gute Eignung beruht unter anderem auf der umfangreichen Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen, die für den Anbau von Biomasse genutzt werden können. Zudem ist nach Angaben des WEF die Akzeptanz für Rohstoffe, die potenziell mit der Lebensmittelproduktion konkurrieren, in den USA größer als in Europa. Des Weiteren ist erneuerbare Energie in einigen Bundesstaaten, etwa in Texas und Kalifornien, zu günstigen Preisen verfügbar. Allerdings ergibt sich ein Problem dadurch, dass die regulatorischen Rahmenbedingungen in den USA vornehmlich Biodiesel gegenüber SAF begünstigen. Dadurch sind die meisten bestehenden Anlagen für erneuerbare Kraftstoffe auf die Produktion von Biodiesel ausgerichtet. Ein entscheidender Grund für diese Entwicklung ist das Beimischungsmandat für Biodiesel im Rahmen der RFS (Federal Renewable Fuel Standards), das für den Straßen-transport gilt.<sup>95</sup>

LanzaTech ist ein Unternehmen in den USA, das sich auf die Herstellung von E-SAF spezialisiert hat. Es verwendet innovative Technologien zur Umwandlung industrieller Abgase in Alkohole, die anschließend zu SAF weiterverarbeitet werden. Diese Alcohol-to-Jet-Technologie wurde in Kooperation mit dem US-Energieministerium und dem Pacific Northwest National Laboratory entwickelt. LanzaTech will nach Inbetriebnahme 10 % der weltweiten SAF-Produktionskapazität beitragen und die doppelte Menge der bisherigen SAF-Produktion der Vereinigten Staaten bereitstellen.<sup>96</sup>

An weiteren beispielhaften Produktionsprojekten lässt sich in den USA unter anderem World Energy nennen. Dies war das erste Unternehmen auf globaler Ebene, das mit der Produktion von SAF begann. Im Jahr 2022 war World Energy an dem ersten Net-Zero-Flug beteiligt.<sup>97</sup> Im darauf folgenden Jahr realisierte das Unternehmen gemeinsam mit Gulfstream Aerospace Corp. den ersten Transatlantikflug mit 100 % SAF, wobei ausschließlich reines HEFA-SAF verwendet wurde, das keine zusätzlichen Aromaten oder anderen Zusätze enthielt.<sup>98</sup> Das ambitionierte Ziel von World Energy ist es, bis 2030 jährlich 1 Mrd. Gallonen (ca. 3 Mio. Tonnen) SAF zu produzieren.<sup>100</sup>

Auch in Kanada erlebt die SAF-Produktion einen erheblichen Aufwind und bringt Voraussetzungen wie die ausreichende Verfügbarkeit von Biomasse mit. Bei Priorisierung der verfügbaren Biomassemenge für den Luftverkehrssektor könnte der Gesamtbedarf Kanadas im Jahr 2030 gedeckt werden.<sup>99</sup>

### Europa

Auch wenn Europa hinsichtlich seines Produktionsvolumens sowohl heute als auch in Zukunftsprognosen deutlich hinter Nordamerika zurückbleibt, so wird dennoch eine ähnliche Anzahl

Produktionsanlagen erwartet. Den Ankündigungen der Produzenten zufolge könnte Europa bis zum Jahr 2030 knapp 20 % der globalen SAF-Produktion beitragen. Es wird erwartet, dass die Produktionskapazitäten für SAF in Europa bis 2030 auf 9,5 Mio. Tonnen ansteigen könnten, was durch die Planung und den Bau zahlreicher neuer SAF-Produktionsstätten getrieben wird.

Auch in Deutschland wird ein starker Anstieg der maximalen potenziellen Produktion prognostiziert, wie die Abbildungen unten zeigen. Während es im Jahr 2024 nur eine Produktion von 0,01 Mio. Tonnen gab, könnte die Kapazität bis 2030 auf 1,53 Mio. Tonnen SAF ansteigen.

Beispielhaft sind in Europa einige Projekte und Kollaborationen zu nennen, die maßgeblich zu einem Anstieg des SAF-Angebots beitragen könnten. Ein besonders großes Produktionsvolumen strebt Alitalo, ein Projekt in Zusammenarbeit von Velocys, British Airways und Shell, an. Dieses Projekt umfasst die erste kommerzielle Anlage im Vereinigten Königreich, die Abfall in Flugkraftstoff umwandelt. Die Anlage in Immingham soll ab 2027 jährlich mehr als 500.000 Tonnen Abfall zu 48.000 Tonnen SAF und anderen Transportbrennstoffen verarbeiten.<sup>100</sup>



**Die Produktionskapazitäten in Deutschland hätten durch politische Anreize gestärkt werden müssen. Durch das Ausbleiben solcher Förderungen haben wir mehrere Jahre verloren, sind aber nun auf dem richtigen Weg, den Rückstand aufzuholen.**

**Jan Eike Blohme-Hardegen**, Leiter der Umweltabteilung, Flughafen Hamburg

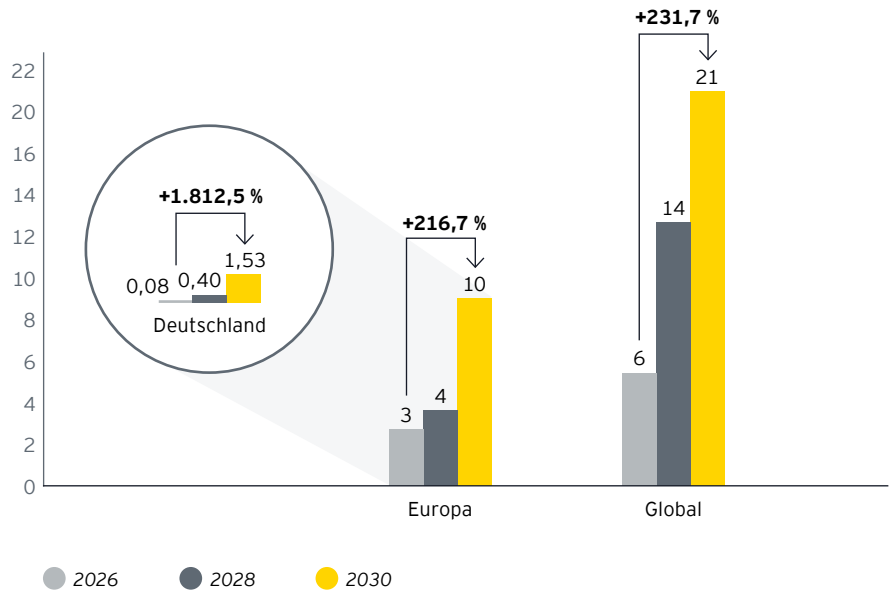
Im Bereich E-SAF strebt Norsk e-Fuel den Bau Europas erster kommerziell skalierbarer Anlage für auf H<sub>2</sub> basierende SAF in Norwegen (Herøya, Porsgrunn) an. Mit einem Schwerpunkt auf PtL-Technologie und der ausschließlichen Verwendung von 100 % erneuerbare Energien zielt das Unternehmen darauf ab, eine Vorreiterrolle in der umweltfreundlichen Kraftstoffproduktion zu übernehmen. Norsk e-Fuel ist ein Konsortium, das aus vier Partnern besteht. Darunter befindet sich die Climeworks AG, ein Pionier in der Technologie zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Atmosphäre. Die jährliche Produktionskapazität beträgt 8000 Tonnen. Diese Kapazität soll bis zum Jahr 2026 auf 80.000 Tonnen hochskaliert werden.<sup>101</sup>

Trotz dieser positiven Erwartungen steht der Ausbau der SAF-Verfügbarkeit in Europa vor Herausforderungen. Die hohe Bevölkerungsdichte in der Region limitiert generell die Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen. Diese Hindernisse werden durch einen allgemeinen Mangel an Biomasserohstoffen in Europa verstärkt, was die Produktionskapazität für Bio-SAF zusätzlich limitiert. Die Verfügbarkeit und die Kosten erneuerbarer Energiequellen – insbesondere von Solar- und Windenergie – sind ebenfalls einschränkende Faktoren in Europa. Daraus folgernd antizipiert das WEF, dass neben der Ausweitung der Produktionskapazitäten auch der Import von SAF eine bedeutende Stellung einnehmen wird. Europäische Produzenten und Abnehmer erwarten laut WEF, dass eine intensive Zusammenarbeit sowohl innerhalb Europas als auch auf internationaler Ebene für die Deckung des SAF-Bedarfs unabdingbar sein wird.<sup>97</sup>

**Abbildung 26**

Vergleich erwarteter potenzieller Produktionskapazitäten an SAF bis 2030 in Mio. Tonnen (weltweit, Europa, Deutschland)<sup>64</sup>

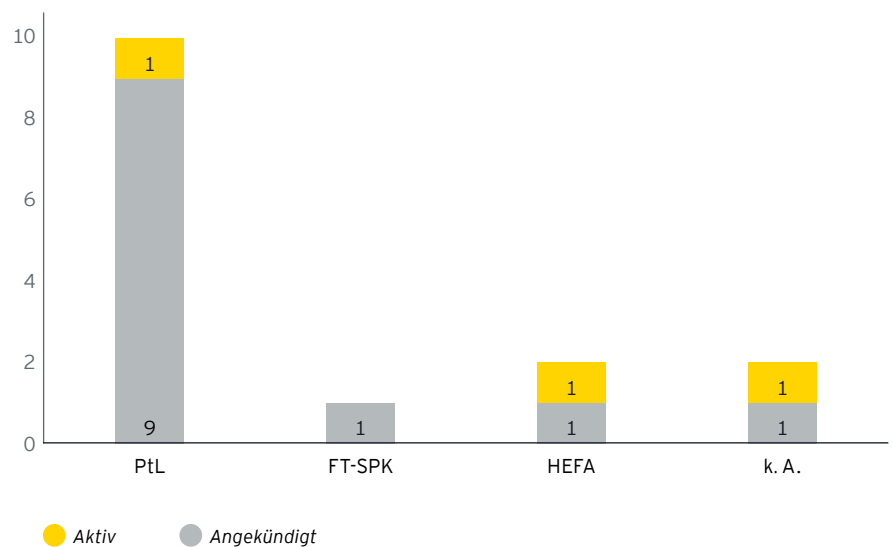
(Stand Januar 2025)



**Abbildung 27**

Anzahl der SAF-Projekte in Deutschland nach Aktivitätsstatus und Produktionstechnologie<sup>64</sup>

(Quelle: Argus SAF Produktionskapazität, Stand Januar 2025)



# Kapazität



## Afrika

In Afrika wird bisher noch keine SAF-Produktion betrieben. Eine Herausforderung bei der Etablierung der SAF-Produktion auf dem Kontinent besteht darin, tragfähige Versorgungsketten für Rohstoffe aufzubauen. Schwierigkeiten bereiten dabei insbesondere die mangelhafte Infrastruktur, begrenzte Raffineriekapazitäten und unzureichende regulatorische Rahmenbedingungen, die zu Verzögerungen bei Projekten und steigenden Kosten führen können.

Dennoch birgt die SAF-Produktion in Afrika großes Potenzial, unter anderem aufgrund einer hohen Verfügbarkeit geeigneter Biomasse wie beispielsweise Abfällen.<sup>102</sup> Daher plant die EU, Machbarkeitsstudien und Zertifizierungen bezüglich der SAF-Produktion in elf afrikanischen Ländern mit einem Budget von 4 Mio. Euro (~ 4,32 Mio. US-Dollar) zu unterstützen. Der Aufbau lokaler Produktionskapazitäten für SAF wird langfristig dazu beitragen, die Kosten zu senken. Bereits jetzt treiben Unternehmen wie Eni aus Italien, Sasol aus Südafrika, Linde aus Deutschland und Topsoe aus Dänemark Investitionen in SAF und Biokraftstoffe in Afrika voran. Ein Umweltmanager der Afrikanischen Zivilluftfahrtkommission geht davon aus, dass die SAF-Produktion innerhalb der nächsten Jahre in mindestens zwei afrikanischen Ländern starten wird, mit Aussichten auf eine Ausweitung auf ein drittes Land. Als wahrscheinliche Kandidaten für diese Entwicklung nennt er Kenia, Südafrika und Äthiopien.<sup>103</sup>

## Zentral- und Südamerika

Auch wenn in Zentral- und Südamerika bisher nach Afrika die geringste Menge SAF produziert wird, hat die Region dennoch Potenzial für einen starken zukünftigen Zuwachs. Die einflussreiche Biokraftstoffindustrie Brasiliens beispielsweise bietet eine starke Grundlage für die Bio-SAF-Produktion. Bereits jetzt ist das Land führend in der Produktion von Biokraftstoffen für andere Verkehrsmittel. Es ist zu erwarten, dass sich diese starke Position auch auf die Produktion von SAF ausweiten wird.<sup>104</sup> Beispielhaft ist hier Brasil Bio-Fuels zu nennen. Das Unternehmen betreibt bereits mehrere Produktionsanlagen zur Gewinnung erneuerbarer Kraftstoffe und plant bis 2026 die Eröffnung einer weiteren Anlage. In dieser Anlage sollen bis zu 0,4 Mio. Tonnen Kraftstoff pro Jahr produziert werden, darunter auch SAF mittels des HEFA-Verfahrens.<sup>105</sup>

## APAC, Naher und Mittlerer Osten

Auch in der Asien-Pazifik-Region sowie im Nahen und Mittleren Osten wird die SAF-Produktion zunehmend ausgebaut. Hier herrscht eine bedeutende Präsenz potenzieller Rohstofflieferanten und Raffinerien. Dies macht die Region zu einem vielversprechenden Standort für die SAF-Produktion. Insgesamt hat die Asien-Pazifik-Region laut der Air Transport Action Group die weltweit höchste Verfügbarkeit an SAF-Rohstoffen mit einem hohen Anteil an industriellen Abgasen.<sup>106</sup>

Singapur beispielsweise gilt als eines der wenigen Länder, die ein etabliertes, operierendes System in der SAF-Produktion besitzen. Produktionsanlagen werden hier von Unternehmen wie Neste, dem größten Lieferanten von SAF weltweit, betrieben.<sup>107</sup>

Außerdem werden sich Länder mit einer starken landwirtschaftlichen und Biokraftstoffbasis wie China, Malaysia und Thailand vermutlich als wichtige Rohstofflieferanten für die SAF-Produktion aufstellen.<sup>108</sup>

Auch Australien zeichnet sich durch sein vielfältiges Spektrum an Rohstoffen und Grundmaterialien als Land mit außergewöhnlichem Potenzial für SAF aus. Es werden bedeutende Mengen an Tierfett, Speiseöl und Rapssaat in die EU, nach Singapur und in die USA exportiert, wo diese häufig zu nachhaltigen Biokraftstoffen verarbeitet werden. Diese Rohstoffe könnten in Zukunft auch für die lokale Produktion von SAF genutzt werden. Darüber hinaus verfügt Australien über ein enormes Potenzial zur Erzeugung erneuerbarer Energien und von grünem H<sub>2</sub>. Auf einem Areal von 6.500 Quadratkilometern ist im Nordwesten Australiens der Aufbau von Wind- und Solaranlagen geplant. Erreicht das Projekt seine volle Kapazität, ist die Generierung von 26 GW Gesamtleistung und die Produktion von jährlich 4,5 Mio. Tonnen grünem H<sub>2</sub> möglich. Bisher gibt es in Australien keine PtL-Aktivitäten. Dies könnte sich mit einer erhöhten Verfügbarkeit von grünem H<sub>2</sub> allerdings drastisch ändern.

## 4.3 Bestehende Produktionslücken und mögliche Lösungen

Es ist zu erwarten, dass der limitierende Faktor bei der großflächigen Verbreitung von SAF nicht das Interesse oder die Nachfrage, sondern die Verfügbarkeit sein wird.<sup>109</sup> Bereits jetzt wird sämtlicher produzierter SAF auch eingesetzt, die Nachfrage der Fluggesellschaften übersteigt sogar die aktuelle Verfügbarkeit.<sup>110</sup> Experten befürchten, dass sich langfristig eine deutliche Versorgungslücke für SAF ergeben könnte.<sup>111, 92</sup> Angesichts der Produktionskapazität wird sich unter Beibehaltung der aktuellen Geschwindigkeit des Kapazitätsausbaus die prognostizierte Nachfrage von 104 Mio. Tonnen im Jahr 2040 und 195 Mio. Tonnen 2050 vermutlich nicht decken lassen. Diese Einschätzung lässt sich

allerdings noch nicht mit konkreten Daten verifizieren, da Pläne für zukünftige Produktionsanlagen noch nicht über 2030 hinausgehen. Aus diesem Grund können das Angebot und die daraus folgende Lücke zur Nachfrage langfristig noch nicht genau vorhergesagt werden.

Mittelfristig, für das Jahr 2030, wird eine weltweite Gesamtnachfrage von 49 Mio. Tonnen SAF prognostiziert.<sup>112</sup> Den Ankündigungen zum geplanten Bau und zur Inbetriebnahme von Anlagen, die erneuerbare Kraftstoffe wie zum Beispiel SAF produzieren sollen, zufolge wird die maximal mögliche Produktionskapazität für SAF im selben Jahr bei ungefähr 30,4 Mio. Tonnen liegen.<sup>64</sup> Eine Deckung der erwarteten Nachfrage wäre demnach im Jahr 2030 theoretisch noch möglich. Es ist allerdings zu beachten, dass die maximale Produktionskapazität, wie in Kapitel 3.1 erläutert, nur dann erreicht werden kann, wenn die Produktion von SAF über diejenige von anderen Kraftstoffen

priorisiert wird. Unter den existierenden regulatorischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen ist dies leider noch nicht der Fall. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass es ohne neue regulatorische Anreize zur SAF-Produktion auch im Jahr 2030 schon zu einer Versorgungslücke kommen wird, wenn auch zu einer kleineren, als sie für die folgenden Jahrzehnte entstehen könnte. Das WEF beispielweise kommt in einem Bericht zu dem Schluss, dass 2030 möglicherweise nur ein Drittel der SAF-Nachfrage gedeckt werden kann.<sup>97</sup>

Die Hauptgründe für das begrenzte Angebot sind technologische Limitationen, insbesondere bei der Herstellung von E-SAF, eine begrenzte Verfügbarkeit von Biomasse als Rohstoff für Bio-SAF sowie die allgemein hohen Kosten der SAF-Produktion. Außerdem hat auch die Konkurrenz mit anderen erneuerbaren Kraftstoffen, die in denselben Prozessrouten gewonnen werden, einen signifikanten Effekt.

### Abbildung 28

Mögliche Nachfrageerfüllung unter maximaler Auslastung der SAF-Produktionskapazitäten 2030

(Quelle: EY, Stand Januar 2025)

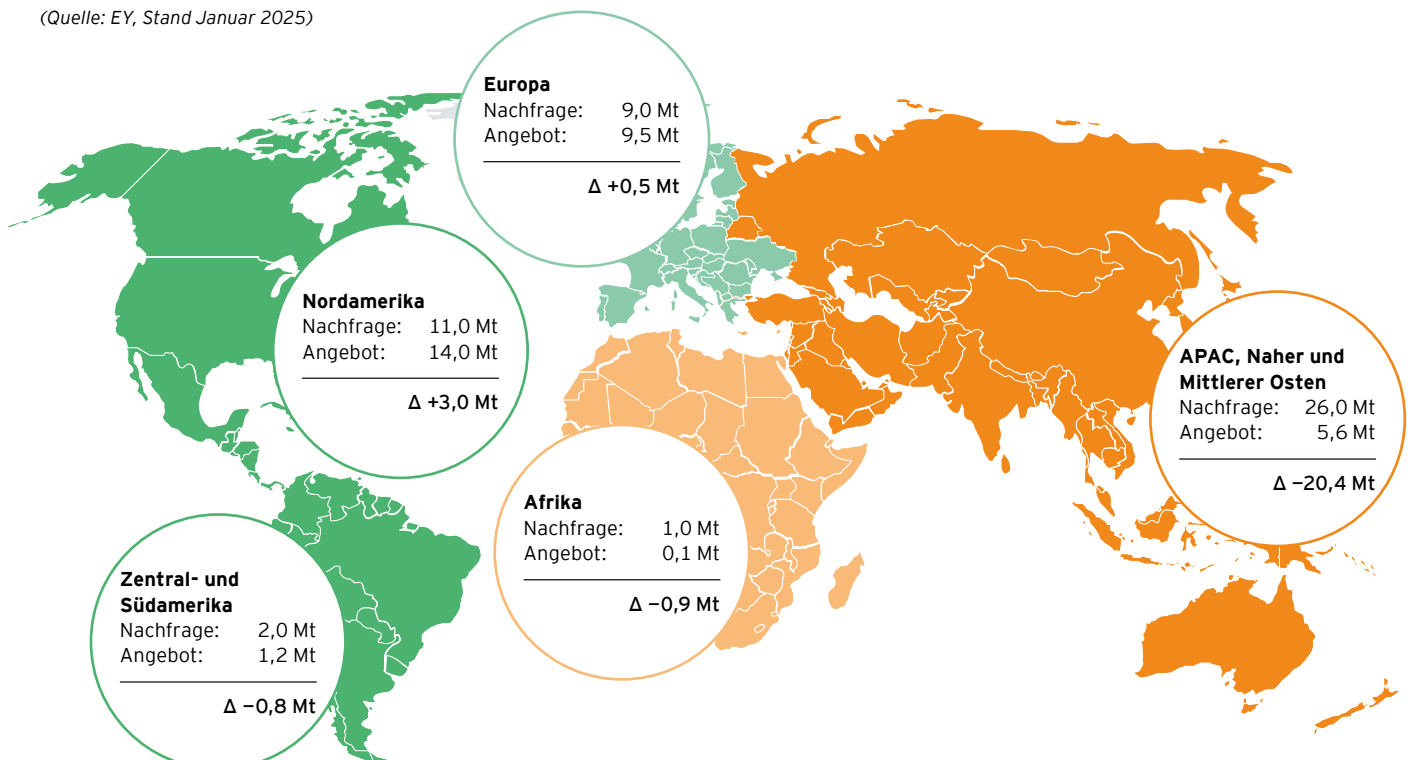




Abbildung 28 veranschaulicht die regionalen Unterschiede in der Nachfrageerfüllung beziehungsweise in den zu erwartenden Produktionslücken im Jahr 2030. Bei der Interpretation der dargestellten Daten ist zu beachten, dass es sich bei dem Angebot um die maximal mögliche Produktionsmenge handelt. Da diese, wie bereits erläutert, allerdings vermutlich nicht erreicht wird, handelt es sich hier um eine sehr optimistische Darstellung.

Unter maximaler Auslastung der SAF-Produktionskapazitäten könnte es bis 2030 sowohl in Nord- als auch in Zentral- und Südamerika einen SAF-Überschuss von insgesamt 2,2 Mio. Tonnen geben. Auch in Europa wäre theoretisch eine Deckung des prognostizierten Bedarfs von 9 Mio. Tonnen mit einem leichten Produktionsüberschuss möglich. Da es allerdings wahrscheinlich ist, dass diese maximalen Produktionskapazitäten nicht ausgereizt werden, wird erwartet, dass dieser Überschuss in allen drei Regionen nicht eintreten wird. Experten vermuten, dass Europa beispielsweise auch zukünftig auf SAF-Importe angewiesen sein wird, um den eigenen Bedarf zu decken.<sup>97</sup>

In Afrika zeigen die Prognosen, dass eine Deckung der Nachfrage selbst unter maximaler Produktionsmenge nicht möglich wäre. Auch wenn dem Kontinent eine im globalen Vergleich sehr geringe Nachfrage von 1 Mio. Tonnen prognostiziert wird, kann die Produktion mit einem möglichen Volumen von 0,1 Mio. Tonnen nicht mit dem Wachstum mithalten. Eine noch schlechtere Aussicht ergibt sich für die Asien-Pazifik-Region und den Nahen und Mittleren Osten. Hier wird die SAF-Pro-

duktion bei einem Volumen von unter 5,6 Mio. Tonnen bleiben. Die Nachfrage hingegen könnte im Jahr 2030 bereits 26 Mio. Tonnen erreichen, was zu einer beachtlichen Produktionslücke von knapp 20,4 Mio. Tonnen SAF führen würde.

Eine konkrete Vorhersage der tatsächlichen globalen oder regionalen SAF-Produktionsvolumina ist aufgrund der mangelhaften Datenlage leider unmöglich. Eine detaillierte EY-Analyse der punktuell verfügbaren Daten lässt allerdings darauf schließen, dass die tatsächliche SAF-Produktion deutlich unter der Maximalkapazität zurückbleiben wird. Dies deckt sich mit den Einschätzungen anderer Experten. Von 21 SAF-Projekten, die 80 % der angekündigten Produktionskapazitäten ausmachen, gibt es für nur acht Stück Daten, die darauf schließen lassen, wie viel der maximalen Produktionskapazität auf die Herstellung von SAF entfallen wird. Einen Überblick über diese Daten liefert Abbildung 29. Wie zu erkennen ist, gibt es zwischen den Projekten starke Schwankungen bezüglich des Anteils der Produktionskapazität, der auf SAF entfallen soll. Einige der geplanten Produktionsanlagen werden vermutlich vorrangig andere erneuerbare Kraftstoffe produzieren, sodass die zu erwartende SAF-Menge nur etwa 20 % der maximalen Produktionskapazität entsprechen wird. Es ist zu erwarten, dass diese acht Anlagen im Schnitt eine SAF-Menge in Höhe von 62 % der maximalen SAF-Produktionskapazität herstellen werden. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Zahl aufgrund der mangelhaften Datenlage nicht repräsentativ oder generalisierbar ist. Sollte sich zeigen, dass sich dieser

Trend global über den Großteil der angekündigten SAF-Projekte zieht, so wäre zu erwarten, dass bereits 2030 nicht mehr nur die Asien-Pazifik-Region, der Nahe und Mittlere Osten und Afrika ihren SAF-Bedarf nicht mehr aus eigener Produktion decken könnten. Auch für Europa könnte sich dann ein ähnliches Bild ergeben und selbst die amerikanischen Kontinente könnten ihren SAF-Bedarf 2030 unter solchen Umständen vermutlich nur noch knapp decken.

Um die zukünftig erwartete Gesamtnachfrage langfristig vollständig zu decken, müsste es weltweit zu einem exponentiellen Wachstum der SAF-Produktion kommen.<sup>113</sup> Dazu ist es nötig, sowohl die maximale Produktionskapazität durch den Bau neuer Anlagen zu erhöhen als auch die Produktion von SAF gegenüber derjenigen anderer nachhaltiger Kraftstoffe zu priorisieren, um eine Ausreizung dieser maximalen Kapazität zu erreichen.

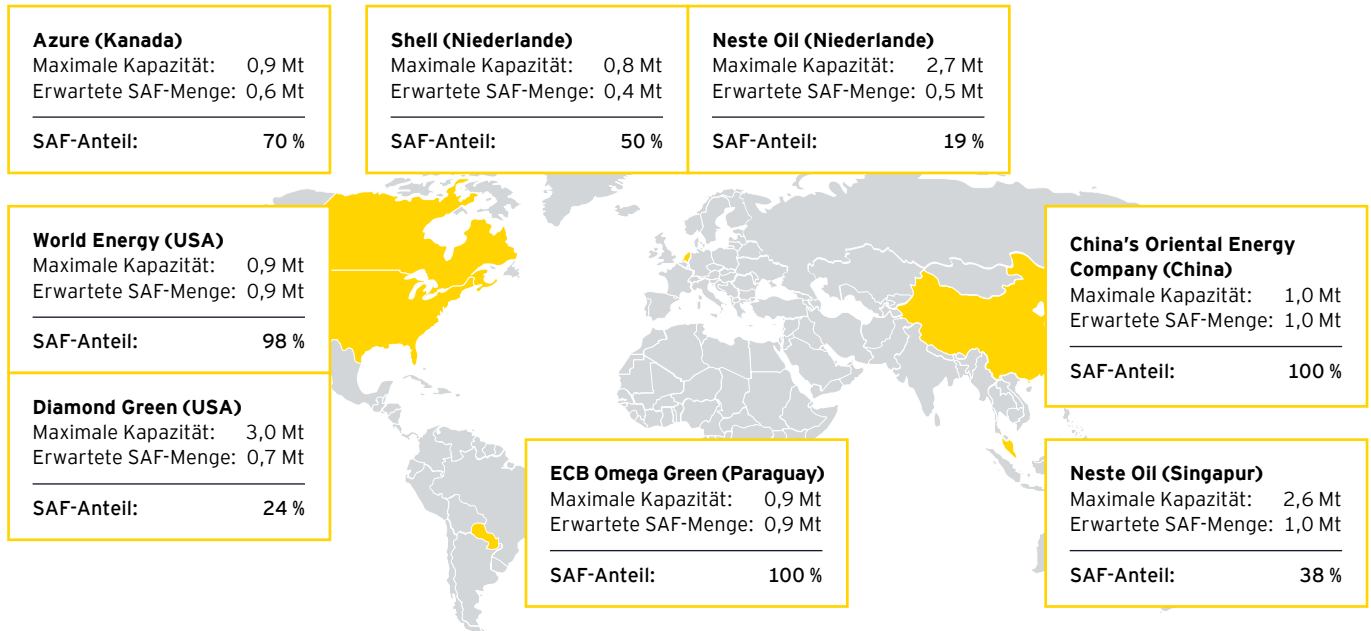
Eine solche Priorisierung von SAF kann entweder durch vom Markt geschaffene Anreize oder durch staatliche Regulierungen herbeigeführt werden.<sup>114</sup> Für die Ausweitung der Kapazitäten sind hohe Investitionen in Produktionsanlagen erforderlich. Um den prognostizierten Bedarf zu decken, wäre ein Anstieg der Anzahl der Produktionsanlagen um 5.000 bis 7.000 Stück bis 2050 nötig. Hierfür würde sich ein kumulierter Investitionsbedarf in Höhe von 1,0 bis 1,5 Billionen US-Dollar ergeben. Dies entspräche einem jährlichen globalen Investitionsbedarf in Höhe von 6 bis 10 % der aktuellen jährlichen Investitionen in die Öl- und Gasinfrastruktur.<sup>67</sup>

# Produktions

## Abbildung 29

Vergleich der maximal möglichen SAF-Produktionsanteile und dem tatsächlich angekündigten Volumen für ausgewählte Produktionsanlagen

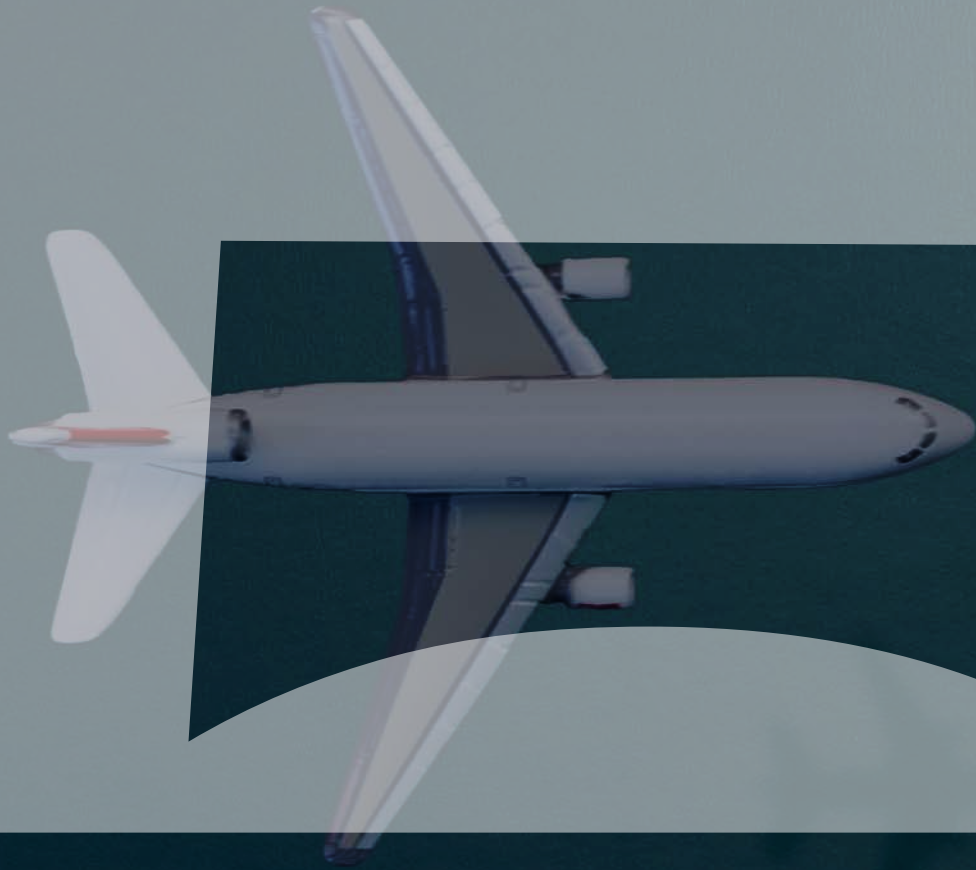
(Quelle: EY, Stand April 2024)



Das WEF identifiziert fünf konkrete Maßnahmen, die für eine erfolgreiche globale Skalierung der SAF-Produktion und -Projekte notwendig wären:<sup>97</sup>

- **Schnelle technologische Entwicklung:** Es sind vermehrte Investitionen in Forschung und Weiterentwicklung der Produktionstechnologien nötig, um einen Produktionshochlauf zu wettbewerbsfähigen Preisen zu ermöglichen. Hier ist aufgrund der langen Planungs- und Entwicklungszeit von Produktionsanlagen ein besonders zeitnahes Handeln und Aufwenden der benötigten Ressourcen essenziell.
- **„Net-Zero-Korridore“:** Für einen effizienten Hochlauf ist es essenziell, spezialisierte Infrastruktur für den Handel und Transport von SAF zwischen den Hauptproduzenten und den Abnehmern zu errichten. Diese sogenannten Net-Zero-Korridore sollten Gebiete, die eine hohe Verfügbarkeit von Rohstoffen bieten, mit solchen, die zur Produktion besonders geeignet sind, sowie mit den Abnehmern verbinden.
- **Partnerschaften und Kollaborationen:** Bereits jetzt zeigt sich, dass Zusammenarbeit ein essenzieller Faktor ist, um den Ausbau von SAF voranzutreiben. Dies muss in Zukunft noch weiter forciert werden, um Interessen zu bündeln und langfristige Planungssicherheit zu gewährleisten. Auch die Mitarbeit des Finanzsektors in Form der Bereitstellung von Finanzierungsmöglichkeiten ist hier wichtig.

- **Regulatorik und Anreize:** Die günstigen Preise für fossile Kraftstoffe machen es unwahrscheinlich, dass Marktdynamiken allein für eine ausreichende Attraktivität der SAF-Produktion sorgen. Aus diesem Grund braucht es regulatorische Anreize, die entweder fossile Kraftstoffe weniger attraktiv machen (z. B. Steuern oder Strafzahlungen) oder SAF attraktiver machen oder sogar vorschreiben (z. B. die SAF-Quoten in der EU). Außerdem kann die Schaffung neuer staatlicher Finanzierungsmöglichkeiten die SAF-Produktion ankurbeln, indem für eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit gesorgt wird. Hierbei ist auch eine internationale Abstimmung notwendig, um eine Verlagerung der Aktivitäten in Länder mit weniger strikten Vorgaben („Carbon Leakage“) zu verhindern.
- **Standardisierung von „Book & Claim“-Systemen:** Um die zuverlässige und eindeutige Anrechnung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch SAF-Nutzung sicherzustellen, sind einheitliche Systeme notwendig. Dies gilt insbesondere für die in Kapitel 3.3 erläuterten Lieferverträge, bei denen in Abwesenheit geeigneter Infrastruktur eine Partei SAF käuflich erwirbt und auf die eigene Bilanz anrechnet, aber eine andere Partei den Kraftstoff tatsächlich physisch tankt.



# Notwendige Logistik und Infrastruktur





# Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

Der SAF-Anteil an der weltweiten Flugzeugkraftstoffverwendung lag laut IATA im Jahr 2024 bei lediglich 0,3 %.<sup>116</sup> Dies ist größtenteils auf die noch hohen Preisaufschläge und die begrenzten Produktionskapazitäten für Bio-SAF zurückzuführen. Um die Produktion von SAF auszuweiten, müssen sowohl die Produktions- als auch die Distributionsinfrastruktur ausgebaut werden. Um SAF wettbewerbsfähig herzustellen und zu vertreiben, sind erhebliche Investitionen in die Infrastruktur erforderlich. Durch eine gezielte Entwicklung und Modernisierung der Infrastruktur kann die Produktion nachhaltiger Kraftstoffe, inklusive SAF, effizienter und nachhaltiger gestaltet werden.

Aufgrund der starken Ähnlichkeit zwischen gemischtem SAF und konventionellem Kerosin kann die bereits vorhandene Distributionsinfrastruktur weiterhin genutzt werden. Die Produktionsinfrastruktur hingegen erfordert Anpassungen. Zurzeit ist die SAF-spezifische Infrastruktur entlang der globalen Lieferkette noch sehr limitiert, sodass es wahrscheinlich erscheint, dass auf existierende Infrastruktur von herkömmlichem Jet Fuel zurückgegriffen wird, um Kosten und Zeitaufwand zu minimieren.<sup>116</sup>

Im Kontext der SAF-Logistik sind die jeweils geltenden Vorschriften und Standards von zentraler Bedeutung. Es wird auf die neueste Fassung der ASTM D7566 verwiesen, die die Qualitätsprüfung von SAF vor dem Mischen regelt, sowie auf die ASTM D1655, die für die Qualitätsprüfung der fertigen Flugzeugkraftstoffmischung zuständig ist. Zusätzlich sind die Richtlinien der Joint Inspection Group (JIG) - insbesondere JIG 1, JIG 2 und EI/JIG 1530 - hervorzuheben, die für die Qualitätssicherung und die Betriebsstandards entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Flugzeugkraftstoffen maßgeblich sind. Diese Normen spielen eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung der Infrastruktur und gewährleisten die Einhaltung höchster Qualitäts- und Sicherheitsstandards.<sup>115</sup>

SAF werden üblicherweise an anderen Standorten als herkömmliches Kerosin hergestellt. In den Raffinerien werden die SAF in separaten Tanks aufbewahrt, die sich in ihrer Konstruktion nicht von denen für herkömmlichen Flugzeugkraftstoff unterscheiden. Eine Koordination mit den Raffinerien ist entscheidend, um die Pipeline-Über-

führung des SAF zum Flughafen zu gewährleisten.<sup>116</sup> Die Wertschöpfungskette für SAF lässt sich in die folgenden Hauptphasen unterteilen<sup>116</sup>:

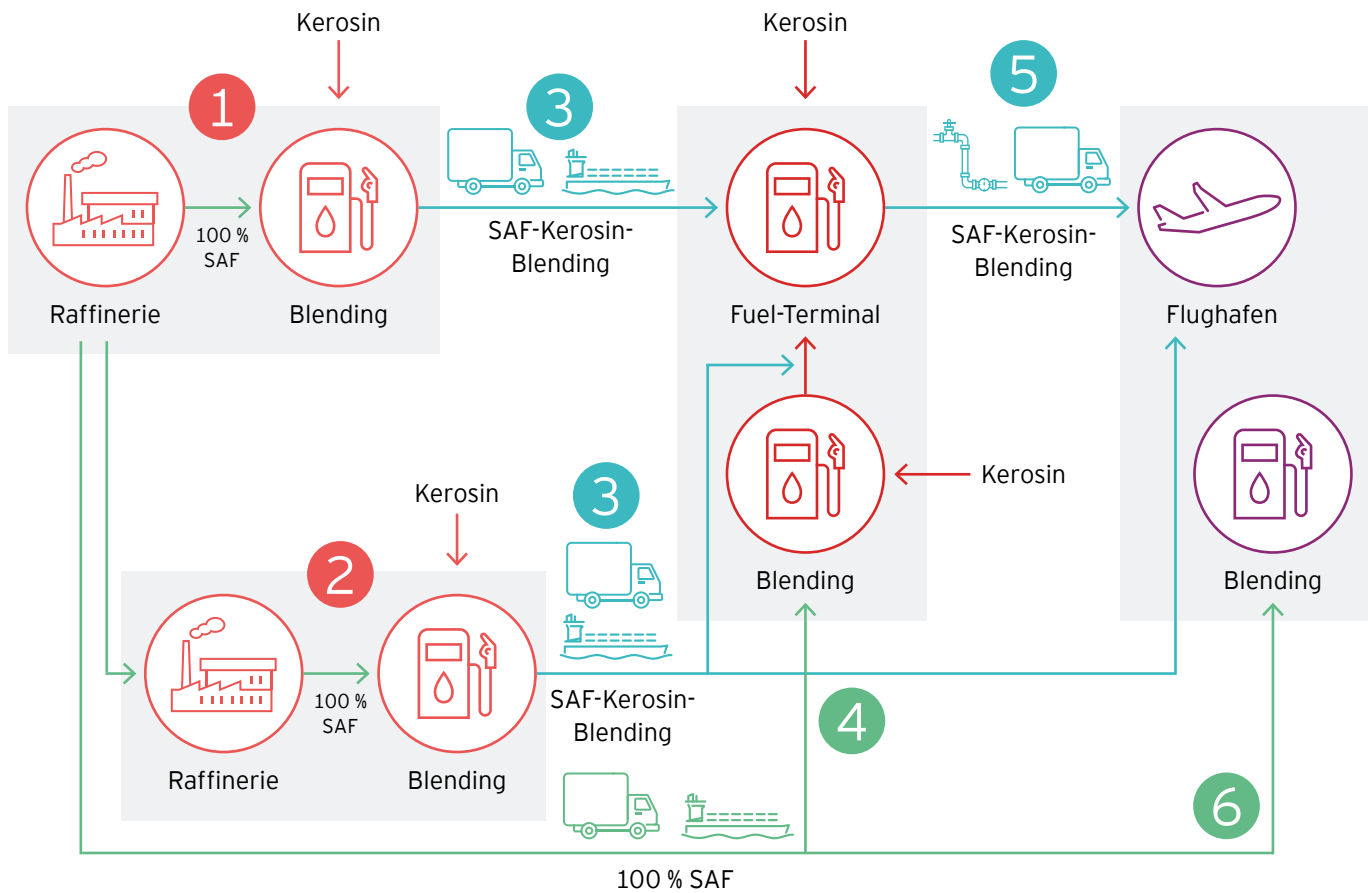
- 1 | **Herstellung des Ölintermmediats und möglicherweise direkte Produktion von SAF in der Raffinerie oder**
- 2 | **Transport des Ölintermmediats in eine weitere Raffinerie zur Produktion von SAF**
- 3 | **Blending direkt an der Produktionsstätte bei Vorhandensein von SAF-Infrastruktur und konventionellem Kerosin oder**
- 4 | **Weiterleitung zu einem Zwischenstandort (z. B. Kraftstoffterminal) bei fehlendem Zugang zu konventionellem Kerosin oder zu Blending-Infrastruktur**
- 5 | **Transport des SAF zum Flughafen**
- 6 | **eventuell auch Blending direkt am Flughafen**





**Abbildung 30**

Allgemeine SAF-Infrastruktur entlang der Lieferkette (Darstellung nach ICA)



Die Produktionsinfrastruktur für Bio-SAF umfasst relevante Prozesse wie die Rohstoffquellenfindung, die Sammlung, Lagerung und Verarbeitung von Biomasse, den Transport sowie den Raffinerungs- und Produktionsprozess. Die Produktion der Biomasse wird in die fünf Schritte

- 1 | Ernte und Sammlung von Biomasse,
- 2 | Vorbehandlung,
- 3 | Transport,
- 4 | Umwandlung zu Flüssigtreibstoff und
- 5 | finale Verwendung unterteilt, wobei jeder dieser Schritte für die Produktion von Bio-SAF von Bedeutung ist.<sup>117</sup>

Die Produktion von E-SAF basiert auf dem Zugang zu erneuerbarer Energie. Dies kann beispielsweise in Ländern wie Chile, Südafrika und Marokko aufgrund besonders günstiger geografischer Bedingungen deutlich kostengünstiger sein als in Deutschland und anderen europäischen Ländern. Die Ausweitung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien kann jedoch eine zusätzliche Herausforderung darstellen, insbesondere in Bezug auf die Verfügbarkeit ausreichender Landflächen.<sup>118</sup> Neben der Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen bedarf es innovativer Technologien für die Elektrolyse und CO<sub>2</sub>-Abscheidung zur E-SAF-Herstellung. Die Elektrolysekapazität muss weltweit hochgefahren werden, um den ansteigenden Bedarf an H<sub>2</sub> zu decken. Es werden drei Elektrolysemethoden

unterschieden, die mit unterschiedlichen Anforderungen an die Infrastruktur einhergehen: die alkalische Elektrolyse, die Polymermembran-Elektrolyse und aufstrebende Technologien wie die Festoxid-Elektrolyse.<sup>119</sup> Die Inbetriebnahme einer Vielzahl DAC-Anlagen zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre oder von Infrastruktur zur indirekten Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus biogenen Quellen ist ebenfalls unerlässlich.

Die Vermischung von SAF und herkömmlichem Kerosin kann entweder an den Produktionsstätten oder direkt an den Flughäfen erfolgen, wobei derzeit die Vermischung in der Raffinerie oder beim SAF-Hersteller bevorzugt wird (siehe Abbildung 30). Die Auswahl der Vermischungsoption hängt von den vorhandenen Einrichtungen,

den Kosten und der Komplexität ab. Beide Ansätze bieten Vor- und Nachteile in Bezug auf Kosten, Kontrolle und Komplexität. Das Blending von SAF und herkömmlichem Kerosin kann mittels unterschiedlicher Modelle erfolgen. Bei der Segregation werden herkömmliches Kerosin und SAF getrennt zum Flughafen transportiert. Durch Mass Balance werden SAF und Kerosin gemischt und im Anschluss gemeinsam transportiert. Das „Book & Claim“-Modell (virtuell) ermöglicht die Bescheinigung von Nachhaltigkeitsanforderungen des Flugzeugkraftstoffs über Zertifikate, die erworben werden können. Dabei ist keine physische Trennung von SAF und Kerosin notwendig.<sup>120</sup>

Die Kerninfrastruktur an Flughäfen für die Bereitstellung von SAF ist von entscheidender Bedeutung, um die Integration und Nutzung von SAF zu erleichtern. Da SAF mit bestehender Infrastruktur kompatibel ist, können viele bereits vorhandene Einrichtungen genutzt werden. Die Kerninfrastruktur besteht aus folgenden Komponenten:

**1 | Logistik und Transport:** Die Logistik umfasst den Transport von SAF von den Produktionsstätten zu den Flughäfen. Dies kann über verschiedene Transportmittel wie Pipelines, Lkw, Züge oder Schiffe erfolgen.

**2 | Lagerung und Tanksystem:** Die Lagerung von SAF an Flughäfen erfordert entsprechende Tanksysteme. Die Möglichkeit, SAF getrennt von herkömmlichem Kerosin zu lagern, ermöglicht eine bessere Kontrolle über die Kraftstoffqualität. Es besteht auch die Option, beide Kraftstoffarten in getrennten Tanks zu lagern und sie erst vor dem Betanken der Flugzeuge zu mischen.

Die verschiedenen Transportmöglichkeiten bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile:

- Der Lkw-Transport erweist sich als flexibel und kostengünstig für kleinere Mengen, erfordert jedoch zusätzliche Infrastruktur für größere Volumina.
- Der Zugtransport ermöglicht den Transport größerer Mengen, erfordert jedoch eine vorhandene Bahninfrastruktur.
- Der Schiffstransport eignet sich für den Transport großer Mengen, erfordert jedoch Hafeninfrastruktur in der Nähe der Flughäfen.
- Der Pipeline-Transport ist durch niedrige Betriebskosten eine kostengünstige Transportform, erfordert jedoch spezielle Genehmigungen und Investitionen in die Infrastruktur.

Die Entscheidung für eine Transportmethode hängt von verschiedenen Faktoren wie Kosten, Verfügbarkeit von Infrastruktur und Umweltauswirkungen ab.

In diesem Kapitel wird die zentrale Infrastruktur, die für die Herstellung von SAF erforderlich ist, eingehend betrachtet. Es wird ein besonderes Augenmerk auf die unterschiedlichen Merkmale und Anforderungen der Produktionsinfrastrukturen für Bio- und E-SAF gelegt. Darüber hinaus wird die Infrastruktur auf der Abnehmerseite beleuchtet, die für beide SAF-Typen identisch ist und somit eine gemeinsame Basis für die Distribution und Nutzung bietet.



## 5.1 Kerninfrastruktur auf Produzentenseite

SAF können im Allgemeinen mit derselben Infrastruktur und Logistik von der Produktionsseite zu den Abnehmern transportiert werden wie herkömmliche Flugzeugkraftstoffe. Oft werden SAF jedoch nicht am gleichen Standort produziert, weshalb sie meist per Lastwagen, Bahn oder Schiff zum Endverbraucher befördert werden. SAF wird in den Raffinerien in separaten Tanks gelagert und nicht vermischt, wobei sich diese Tanks im Allgemeinen nicht in ihrer Bauweise unterscheiden. Der Flugzeugkraftstoff wird dann meistens über Pipelines zum Flughafen geleitet, wobei Absprachen mit den Raffinerien notwendig sind, um den Transport von SAF zu ermöglichen.<sup>118</sup> Die wesentlichen Unterschiede liegen in den Produktionsmethoden und Anlagen. Für Bio-SAF muss die Produktionsinfrastruktur hinsichtlich der Rohstoffquellenfindung, des Transports sowie des Raffinerungs- und Produktionsprozesses ausgebaut werden.

Nach Schätzungen der DEPA2050-Studie werden weltweit 5.000 bis 7.000 Raffinerien benötigt, um die erforderlichen Mengen an SAF zu produzieren.

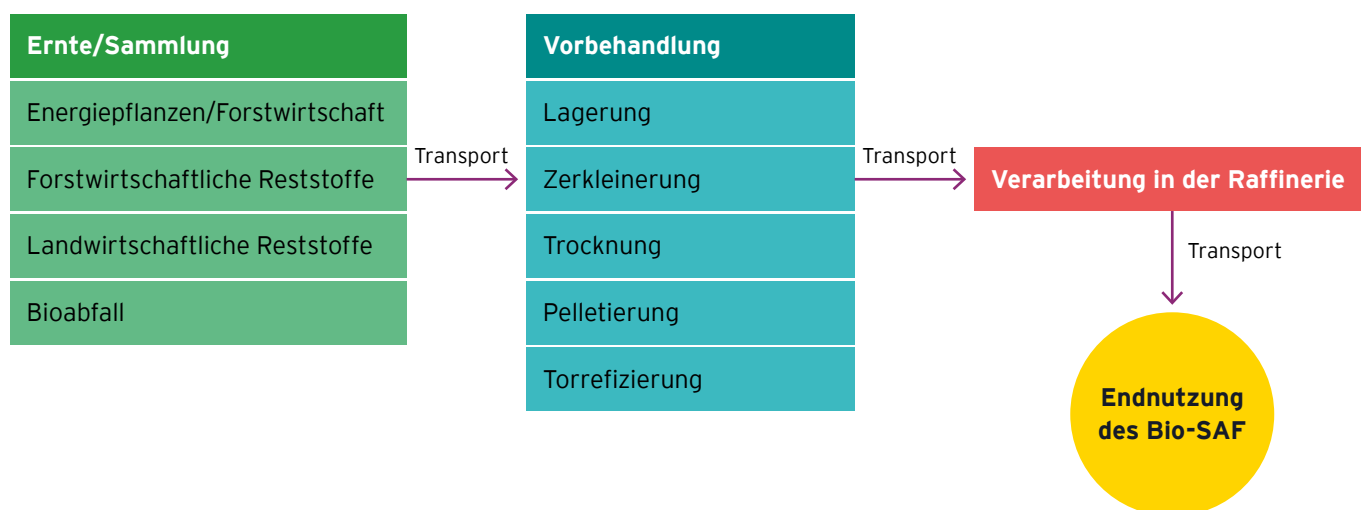
Neben Raffinerien sind entsprechende Infrastrukturen für die Sammlung, Lagerung und Verarbeitung von Biomasse erforderlich. Hier spielen das Abfallmanagement und die Vorbereitung relevanter Biomassen eine zentrale Rolle. Die Produktion von Biomasse und deren Logistik umfassen eine Vielzahl von Komponenten, die die Umwandlung der primären Biomassequellen in finale Produkte für die Bioenergie beinhalten. Die IEA unterteilt diesen Prozess in fünf Phasen (siehe Abbildung 31):

- 1 | Ernte und Sammlung von Biomasse (Ernteprozesse, Kollektion)
- 2 | Vorbehandlung (Lagerung, Zerkleinerung, Trocknung, Pelletierung, Torrefizierung)
- 3 | Transport (mittels Lkw, Bahn und Schiff)
- 4 | Umwandlung zu Flüssigkraftstoff
- 5 | finale Verwendung

Im Anschluss an die Ernte und Sammlung von Biomasse der ersten und zweiten Generation (1) wird diese einem Vorbehandlungsprozess unterzogen (2). Dieser Prozess beinhaltet die Umwandlung von fester Biomasse, um Kosten zu reduzieren und die Effizienz des Transports sowie der Verwendung zu optimieren, mit dem Ziel, die Energiedichte des Ausgangsmaterials zu erhöhen. Zunächst wird die Biomasse zu einem temporären Lagerplatz transportiert. Potenzielle Verdichtungsprozesse sind die Ballenformung und Zerkleinerung. Die Ballenformung, insbesondere beim Stroh, dient der Minimierung der Transport- und Lagerungskosten aufgrund der ursprünglich niedrigen Energiedichte des Strohs. Zerkleinerungsprozesse schließen das Hacken, Mahlen und Schreddern mit ein. Ein weiterer Behandlungsschritt ist das Trocknen der Biomasse, um die Transportkosten zu reduzieren. Die Reduzierung des Feuchtigkeitsgehalts steigert nicht nur die Verbrennungseffizienz, sondern verhindert auch das Wachstum von Pilzen. Technologien zum Trocknen des Materials sind unter anderem Drehrohtrockner, Wirbelschichttrockner und dampfbetriebene

**Abbildung 31**

Biomasseproduktion und -logistik<sup>119</sup>



Trockner. Weitere Vorbehandlungsschritte umfassen die Pelletierung zur Verdichtung der Biomasse und die Torrefizierung, bei der die Biomasse unter Ausschluss von O<sub>2</sub> auf 200–300 °C erhitzt wird. Die Torrefizierung führt zum Aufbrechen der faserigen Struktur, um der Biomasse kohleähnliche Eigenschaften zu verleihen. Die Lagerung der Biomasse ist aufgrund der saisonalen Produktion und des Ziels, eine kontinuierliche Versorgung zu gewährleisten, notwendig. Die Lagerung unterstützt die Lufttrocknung der Biomasse. Regelmäßiges Umwälzen kann das hohe Brandrisiko durch bakterielle Aktivität minimieren.<sup>119</sup> Die Transportkosten sind aufgrund der niedrigen Energiedichte der Biomasse im Vergleich zu fossilen Brennstoffen oft hoch. Daher ist es oft sinnvoll, die Bioraffinerieanlage in der Nähe eines Biomasse-sammelortes zu platzieren. Der Transport (3) mittels Lkw wird für kurze Distanzen (< 100 km) genutzt, um Flexibilität beim Erreichen mehrerer kleiner Produktionsstätten zu ermöglichen. Der Transport per Bahn wird für längere Überlanddistanzen eingesetzt. Der Schifftransport (Trockenmassentransporter oder Tanker für flüssige Biokraftstoffe) eignet sich für lange Distanzen und große Mengen und erweist sich als der günstigste und am wenigsten energieintensive Transportmodus.<sup>119</sup> Nach der Vorbereitung des Zwischenprodukts wird die Biomasse, je nach angestrebter Konversionsroute wie in Abbildung 2 bis Abbildung 7 (Kapitel 1.1.1) gezeigt zu SAF weiterverarbeitet (4), sodass das SAF dann für den Endverbrauch zur Verfügung steht (5).

Für die Produktion von **E-SAF** sind erneuerbare Energien, die mit Sonnen- oder Windanlagen erzeugt werden können, sowie Elektrolyse- und CO<sub>2</sub>-Technologien erforderlich. Die bestehende Infrastruktur der konventionellen Flugzeugkraftstoffproduktion kann für die Herstellung von E-SAF weiter-

genutzt werden. Dies umfasst auch Verteilungs- und Betankungsinfrastrukturen wie Tanklager, Tanklastwagen, Pipelines und Tankstellen.<sup>121</sup> Wenn es um die Erzeugung erneuerbarer Energie geht, ist es wichtig, vor allem Regionen zu betrachten, in denen ausreichend Produktionskapazität vorhanden und eine erweiterte Flächennutzung für die Stromerzeugung möglich ist.

Um E-SAF gemäß der ReFuelEU-Aviation-Unterquote in Deutschland und Europa herstellen zu können, müssen bis 2032 noch folgende Schritte erfolgen:

- Identifizierung neuer Produktionsstandorte und Verfügbarkeit von Flächen
- Bereitstellung zusätzlicher Elektrolysekapazitäten von 0,9 bis 1,8 GW (die installierte Elektrolysekapazität lag 2022 bei etwa 1,4 GW)
- Erhöhung der Stromkapazität aus erneuerbaren Energien

Um beispielsweise das EU-Ziel von 2 % E-SAF im Jahr 2032 zu erreichen, wäre eine Fläche von etwa 195 Quadratkilometern für Photovoltaikanlagen erforderlich. Für die Implementierung von Onshore-Windparks wäre sogar eine noch größere Flächennutzung erforderlich – geschätzte 430 Quadratkilometer, um die erforderlichen Abstände zwischen den Anlagen einzuhalten und Verschattungseffekte zu vermeiden, was die Effizienz des Windparks maximieren würde.<sup>75</sup> Bezüglich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gibt es verschiedene Szenarien. Allein in Deutschland müssten etwa 7,5 Terawattstunden (7.500 GWh) produziert werden, um die 2 %-Regelung für das Jahr 2032 zu erfüllen.

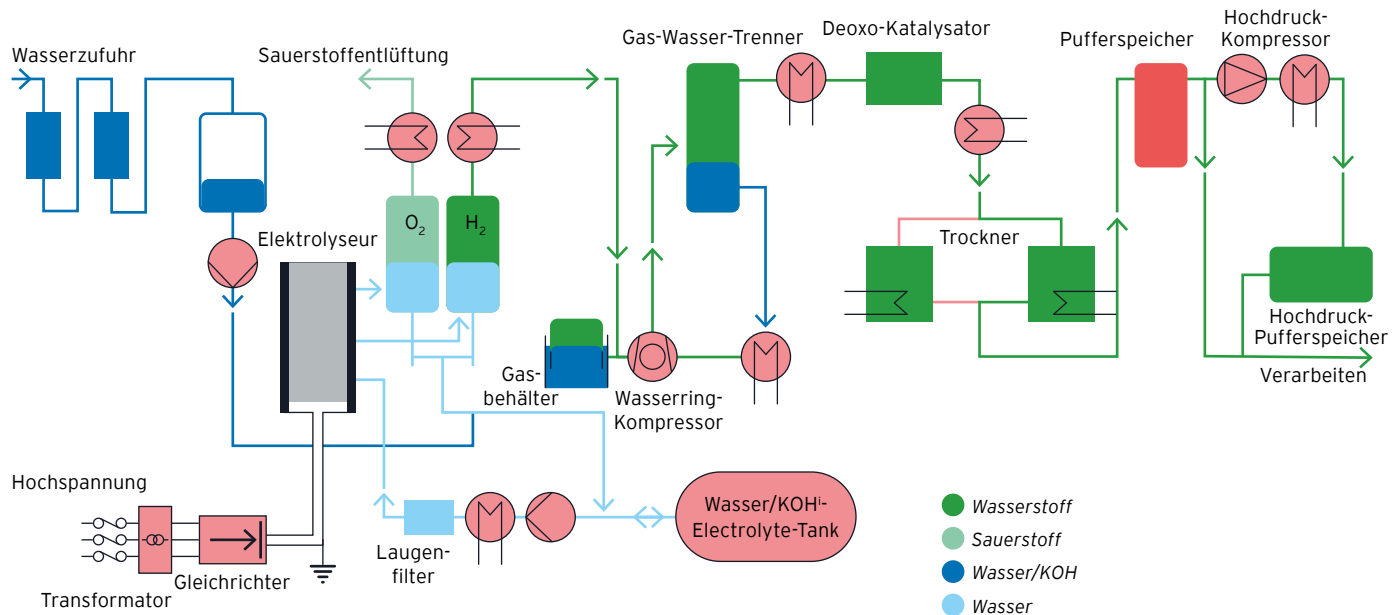
Die aus Solar- und Windenergie generierte elektrische Leistung weist ein volatiles Profil auf, für die Herstellung von E-SAF ist jedoch eine kontinuierli-

che Verfügbarkeit erforderlich. Aus diesem Grund ist es wahrscheinlich, dass PtL-Anlagen H<sub>2</sub>-Speicher als Puffer für kurzfristige Schwankungen integrieren werden. Möglichkeiten zur H<sub>2</sub>-Speicherung umfassen Druckbehälter, Speicherleitungen und Salzkavernen. Langfristig werden technisch-wirtschaftliche Überlegungen darüber entscheiden, ob H<sub>2</sub> gespeichert oder ob nachfolgende Umwandlungsprozesse so gestaltet werden, dass sie einen flexiblen Betrieb entsprechend der Lastanforderungen ermöglichen.<sup>121</sup>

Die zentrale Umwandlung von erneuerbarer Energie in chemische Energie erfolgt durch Elektrolyse, einen Prozess, bei dem Wasser in H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> gespalten wird. Es gibt wie bereits erwähnt verschiedene Elektrolysemethoden, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an die Infrastruktur stellen: alkalische Elektrolyse, Polymermembran-Elektrolyse und aufstrebende Technologien wie die Festoxid-Elektrolyse.<sup>121</sup>

Die alkalische Elektrolyse ist die am weitesten verbreitete Technologie innerhalb der Gruppe der Niedertemperatur-elektrolyseure.<sup>75</sup> Dabei wird eine flüssige alkalische Lösung aus Natrium- oder Kaliumhydroxid als Elektrolyt verwendet, die schon seit vielen Jahren kommerziell verfügbar ist. In einer typischen industriellen Konfiguration kommen elektrokatalysatorbeladene Elektroden zum Einsatz. Ein Diaphragma aus festem, porösem Oxid ermöglicht den Ionentransport von OH<sup>-</sup> zwischen den Elektroden, wobei das Diaphragma auch die Trennung der erzeugten H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gase ermöglicht. Für die Elektrolyse gibt es zwei Haupttypen von Zellen: die einfache Tankzelle (unipolar) und die Filterpresszelle (bipolar). Die Elektrolyse findet in einem Temperaturbereich von 50 bis 80 °C und bei Drücken bis zu 30 bar statt.<sup>122</sup>



**Abbildung 32**Systemdesign der alkalischen Elektrolyse<sup>123</sup>

In den letzten Jahren hat sich die Polymerelektrolytmembran-(PEM-)Elektrolyse aufgrund ihrer höheren Lastflexibilität im Vergleich zu anderen Niedertemperaturelektrolysetechnologien etabliert<sup>75</sup>. Dabei wird ein fester Polymerelektrolyt genutzt. Die Systeme arbeiten bei Drücken von 20 bis 40 bar und bei einer Temperaturspanne zwischen 50 und 80 °C und somit unter ähnlichen Bedingungen wie bei der alkalischen Elektrolyse. Das Systemdesign ist im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse einfacher und kompakter

und ermöglicht den Betrieb bei höheren Stromdichten. Aufgrund der aggressiven oxidativen Bedingungen und der hohen Spannungen sind titanbasierte Materialien, Edelmetallkatalysatoren und Schutzbeschichtungen erforderlich. Die PEM-Elektrolyseure sind somit im Vergleich zu alkalischen Elektrolyseuren kostspieliger.<sup>125</sup> Das System birgt den Vorteil, dass es unter verschiedenen Drücken arbeiten kann, was die Kosten senkt und die Systemkomplexität und den Wartungsaufwand minimiert.<sup>125</sup>

Die Festoxid-Elektrolyse (SOEC), auch als Hochtemperatur-Elektrolyse bekannt, zeichnet sich durch hohe Effizienzwerte aus. Eine Art der SOEC ist die Co-Elektrolyse, bei der neben Wasserdampf auch CO<sub>2</sub> als Edukt zum Einsatz kommt und Synthesegas gebildet wird. Bislang wurden SOEC-Systeme lediglich in kleineren Demonstrationsanlagen umgesetzt.<sup>75</sup>

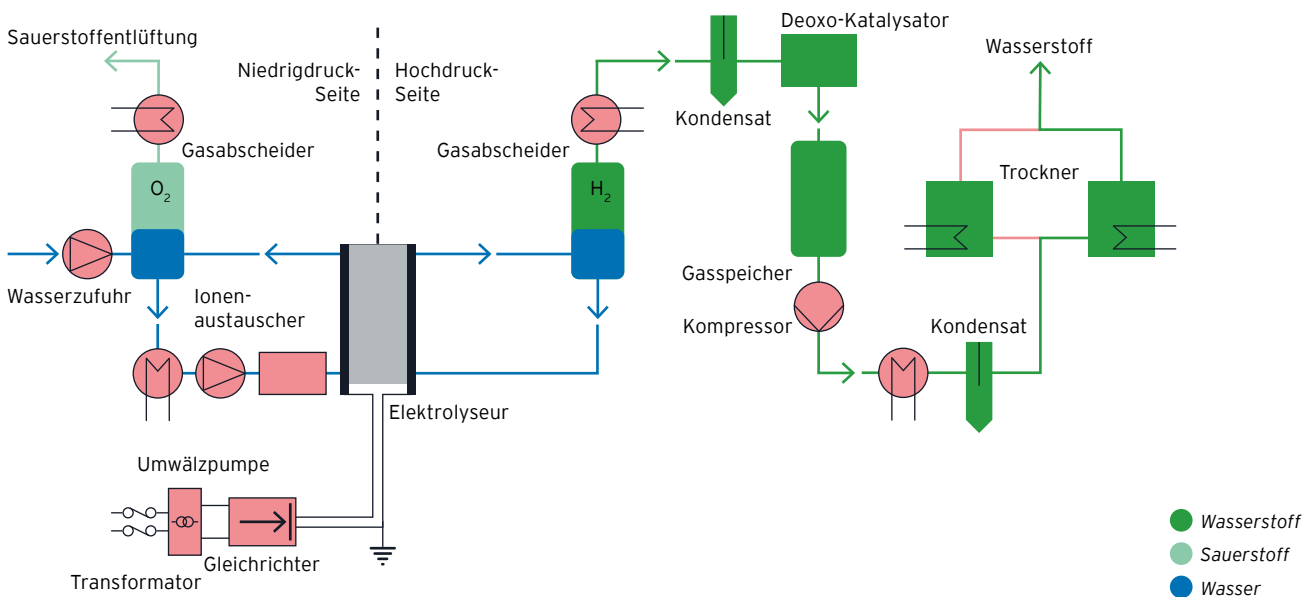
Festoxid-Elektrolyseure arbeiten bei hohen Temperaturen (700-850 °C). Unter diesen kinetischen Voraussetzungen ist der Gebrauch günstiger Nickelelektroden möglich. Die SOEC kann mit Anlagen kombiniert werden, die Wärme erzeugen, was den Vorzug bietet, dass die erforderliche Wärme für die Wasserverdampfung aus externen Quellen stammen kann, zum Beispiel aus Abwärme von industriellen Prozessen oder von konzentrierten Solarkraftwerken. Insbesondere die

# Elektrolyse

i Potassium hydroxide

**Abbildung 33**

Systemdesign der PEM-Elektrolyse<sup>125</sup>

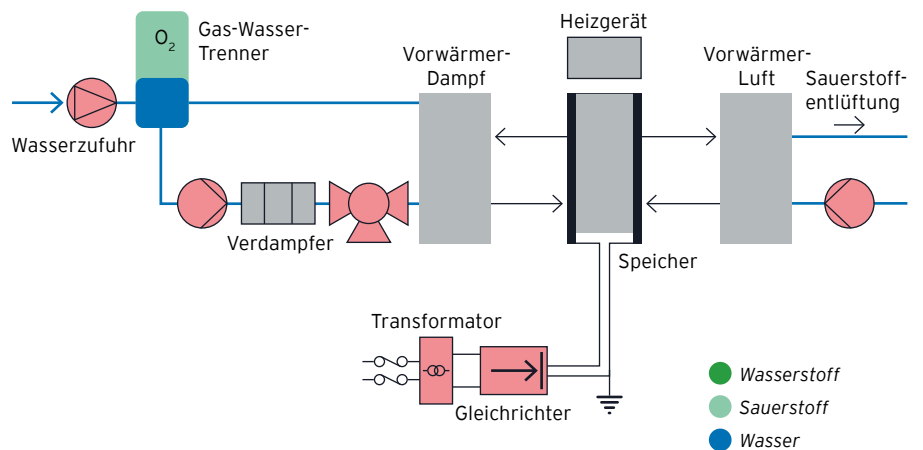


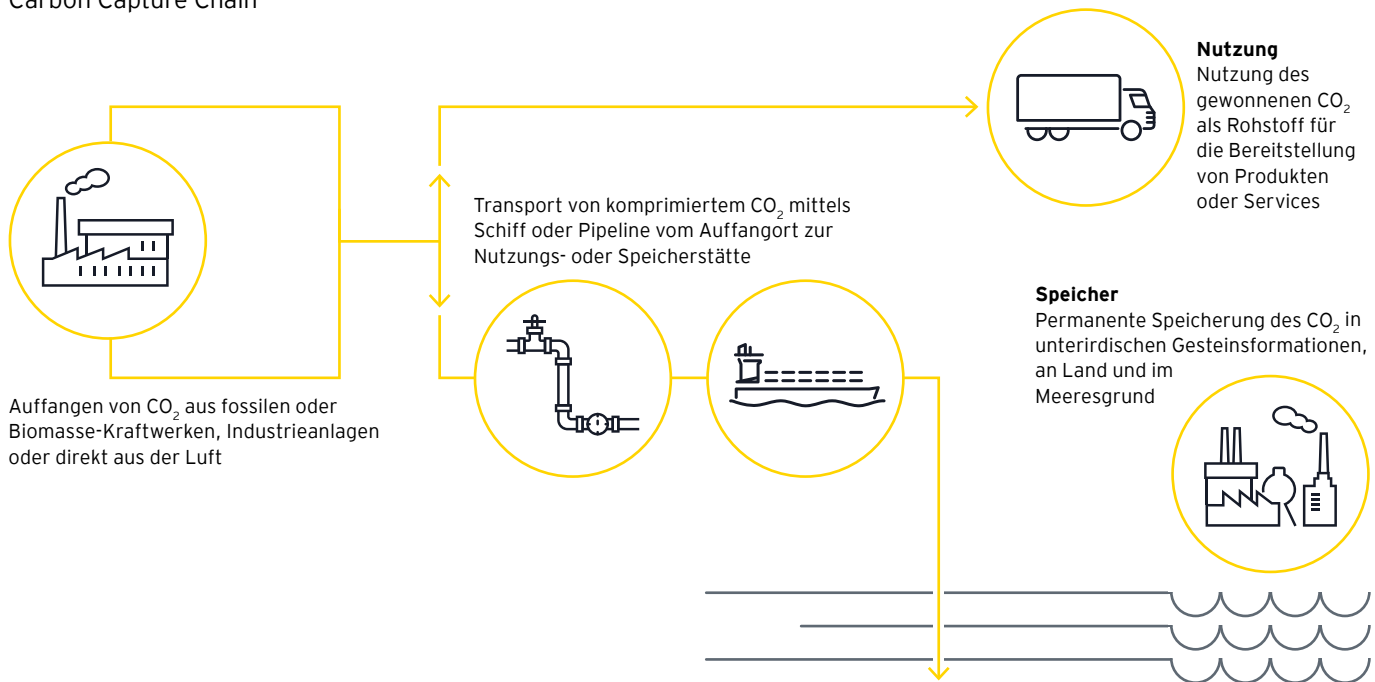
Verbindung von SOEC mit konzentrierten Solaranlagen erscheint vielversprechend, da diese sowohl elektrische Energie als auch die notwendige Wärme bereitstellen können.<sup>125</sup> Auf diese Weise hat die SOEC das Potenzial, den Energieverbrauch erheblich zu reduzieren, indem sie beispielsweise die Abwärme von Prozessen wie der Fischer-Tropsch-Synthese nutzt.<sup>121</sup>

Des Weiteren wird nachhaltiges CO<sub>2</sub> als Rohstoff benötigt, um E-SAF herzustellen. Um das Ziel der E-SAF-Quote von 2 % in Deutschland gemäß der Re-fuelEU Aviation Regulation bis zum Jahr 2032 zu erreichen, werden insgesamt 1 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> benötigt. Dies erfordert die Inbetriebnahme zusätzlicher 250 DAC-Anlagen, die jeweils eine jährliche Produktionskapazität von ungefähr 4.000 Tonnen aufweisen. Diese Anlagen sind erforderlich, um den Kohlenstoff entweder direkt aus der Atmosphäre oder aus biogenen Quellen zu gewinnen.<sup>75</sup>

**Abbildung 34**

Systemdesign der SOEC<sup>125</sup>



**Abbildung 35**Carbon Capture Chain<sup>75</sup>

Eine andere Möglichkeit ist die indirekte Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Biomasse. Pflanzen entziehen während des Photosyntheseprozesses CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, das dann in nachfolgenden Verarbeitungsprozessen – wie der Verbrennung von Biomasse oder der Produktion von Biogas bzw. Bioethanol – freigesetzt wird.

Im Gegensatz dazu erfolgt die direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch den Einsatz von Ventilatoren, die die Luft durch ein Sorptionsmittel leiten. Dieses Sorptionsmittel bindet das CO<sub>2</sub> und ermöglicht dessen Abtrennung von den übrigen Luftkomponenten. Nach der Adsorption wird das CO<sub>2</sub> durch Zuführung thermischer Energie vom Sorptionsmittel gelöst.<sup>75</sup> Schließlich wird das Produkt komprimiert, um per Schiff oder Pipeline zum Verbraucher oder zum Ort der Lagerung transportiert zu werden.

Das CO<sub>2</sub> wird entweder direkt für die Synthese von E-SAF verwendet (Direct Air Capture with Carbon Usage) oder zur langfristigen Lagerung im Boden verpresst (Direct Air Capture with Carbon Storage).<sup>75</sup> Der gesamte Carbon-Capture-Prozess ist in Abbildung 35 dargestellt.

Bevor Bio- oder E-SAF mit Kerosin (JET-A1) gemischt werden, müssen sie zunächst gemäß der Standard-spezifikation ASTM D7566 geprüft werden. Das reine SAF kann problemlos vom Hersteller kontrolliert werden, wobei die Qualität, etwa der Aromaten- und Schwefelgehalt, vom herkömmlichen Kerosin abweicht.

Für eine optimale Mischung müssen daher sowohl das herkömmliche Kerosin als auch das reine SAF getestet werden. Es sind Vorversuche erforderlich, um die endgültige SAF-Kerosin-

Mischung gemäß ASTM-Norm (siehe Details in Kapitel 1.2) zu bewerten. Abschließend muss die Endmischung erneut getestet und gemäß ASTM D1655 als Flugzeugkraftstoff zertifiziert werden. Dieser Prozess erfordert in der Regel zwei zusätzliche Tanks (für SAF und die Endmischung), Infrastruktur und Systeme für den Kraftstofftransfer sowie ein Labor zur Überprüfung und Zertifizierung des Kraftstoffs.

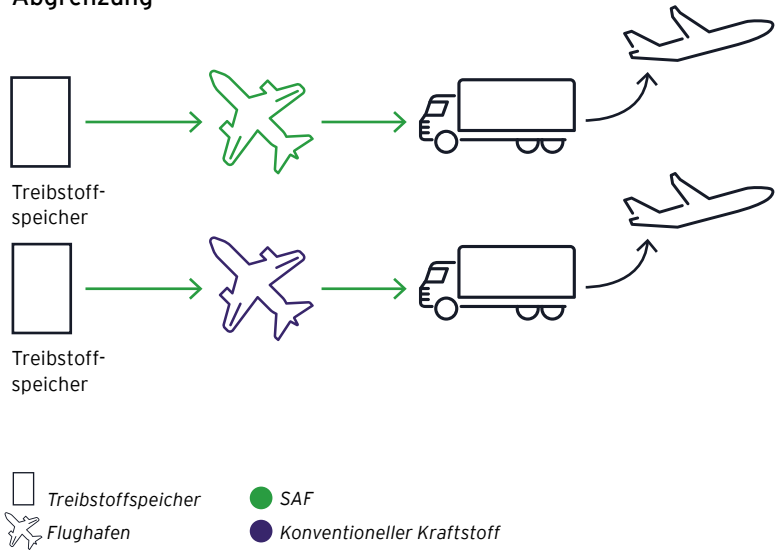
Weiterhin ist eine mechanische oder hydrodynamische Vermischung erforderlich, da andernfalls aufgrund des Dichteunterschieds ein inhomogenes Gemisch entstehen könnte.

i Potassium hydroxide

Verschiedene SAF-Typen können nach drei Modellen gemischt werden:

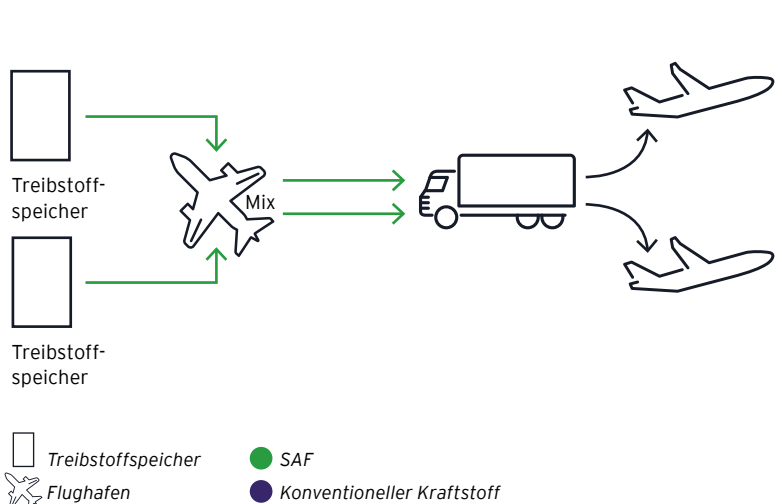
■ **Segregation** beschreibt eine physische Trennung von konventionellem Flugzeugkraftstoff und SAF vom Produktionsort bis zum Flughafen. Diese Methode ist nur dann sinnvoll, wenn sich die Kraftstoffproduktionsanlage in der Nähe des Flughafens befindet.<sup>122</sup> Die Trennung ist jedoch aus technischer Sicht nicht notwendig, da sogenannte Drop-in-Flugzeugkraftstoffe mit erdölbasiertem Flugzeugkraftstoff kompatibel sind und keine Leistungseinbußen verursachen. Folglich würde die Segregation aufgrund des Bedarfs an zusätzlicher Infrastruktur eher zu zusätzlichen Kosten führen. Mit einem Kraftstoff, der nach ASTM 1655 zertifiziert ist, ist keine Kraftstofftrennung erforderlich und Flughäfen können SAF wie jeden anderen Flugzeugkraftstoff behandeln.<sup>124</sup>

#### Abgrenzung



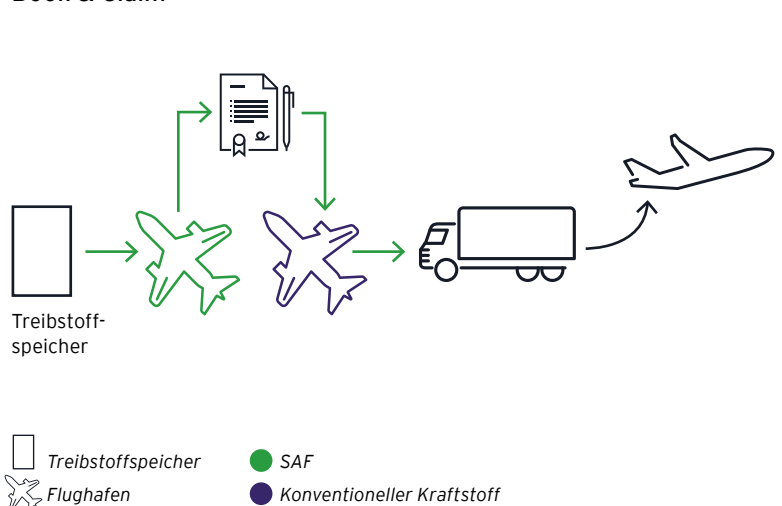
■ **Mass Balance** ermöglicht das Mischen von zertifiziertem SAF mit nicht zertifiziertem Kerosin innerhalb der bestehenden Infrastruktur für Transport, Lagerung und Distribution. Über den gesamten Verlauf der Lieferkette wird der Anteil des zertifizierten Flugzeugkraftstoffs kontinuierlich überwacht, um sicherzustellen, dass lediglich die ursprünglich transportierte Menge an zertifiziertem Flugzeugkraftstoff zur Endabrechnung kommt. Mit der Massenbilanz können die zertifizierten Bestandteile des Kraftstoffs durch jede Phase der Lieferkette verfolgt werden. Diese lückenlose Überprüfbarkeit erweitert außerdem die Möglichkeit, die Herkunft von Roh- und Kraftstoffen nachzuweisen, was weitere Kriterien der Nachhaltigkeit unterstützt.<sup>122</sup>

#### Massenbilanz



■ Das „**Book & Claim**“-Verfahren (allerdings nur virtuell) bescheinigt die Nachhaltigkeitsmerkmale einer spezifischen Menge von Flugzeugkraftstoff unmittelbar nach dessen Herstellung. Diese Zertifikate können dann an Kreditkäufer weiterveräußert werden, die ihrerseits Anspruch auf Gutscheine für SAF erheben dürfen. Ein bedeutender Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sich der zertifizierte Flugzeugkraftstoff nahtlos in die vorhandene Versorgung mit Kerosin integrieren lässt, ohne dass es einer getrennten Infrastruktur für Transport oder Verteilung bedarf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das zertifizierte und das nicht zertifizierte Kerosin keiner physischen Separierung bedürfen.<sup>122</sup>

#### Book & Claim







Damit der Markthochlauf von SAF gelingen kann, muss sichergestellt werden, dass die Produktion die Beimischungsverpflichtungen erreicht und idealerweise sogar übertrifft. Dabei können praktische Mechanismen wie Book & Claim zur einfachen, transparenten und glaubwürdigen Anrechnung der Nutzung von SAF beitragen.

**Melanie Form**, Mitglied des Vorstands und Geschäftsführerin, Aireg

Die individuelle Vermischung von entweder Bio- oder E-SAF mit JET-A1 kann an einem Tanklager (und einem Flughafen) oder an einer Produktionsstätte erfolgen (siehe Abb. 1-7 in Kapitel 1.1.1):

#### 1 | Vermischung an einem Tanklager mit folgenden Vor- und Nachteilen:

##### **Vorteile:**

- größere Kapazitäten und Platzverfügbarkeit zum Mischen
- umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit Bio-SAF vorhanden
- mögliche Nutzung der verfügbaren Infrastruktur zum Be- und Entladen von Kraftstoff sowie der nachgelagerten Infrastruktur zum Flughafen
- industrieller Betrieb als geeigneter Standort
- Lieferung des finalen Produkts an mehrere Flughäfen möglich
- weniger Lastkraftwagen erforderlich
- geringere Transportkosten
- Vereinfachung der Kraftstofflieferkette
- Erhöhung der Sichtbarkeit und Präsenz von SAF gegenüber Flughafenmitarbeitenden

##### **Nachteile:**

- SAF-spezifische Kraftstoffversorgung und Flughafeninfrastruktur zur Aufnahme, Lagerung und Mischung des Kraftstoffs und hierfür angepasste Infrastruktur des Tanklagers erforderlich
- Mangel an verfügbarem Platz und Kapazitäten, die notwendig sind, um die zu erwartende Zunahme der SAF-Nutzung bis 2050 bewältigen
- effizientes und transparentes Buchhaltungssystem nötig, um die Kraftstofflieferungen an verschiedene Flughäfen nachzuverfolgen
- Transportbeschränkungen: Transport von 100 % SAF durch Pipelines derzeit nicht möglich, sodass spezielle Lastkraftwagen für den SAF-Transport notwendig sind
- Flughafentanks verhältnismäßig klein
- Zertifizierung des Kraftstoffs zwingend auf dem Flughafen, was mit Herausforderungen wie Vorschriften für die Vermischung vor Ort und mangelndem Fachwissen über Zertifizierungsanforderungen einhergeht
- höhere Verkehrsüberlastung am Boden durch größere Anzahl Transportbewegungen

#### 2 | Vermischung an einer Produktionsstätte mit folgenden Vor- und Nachteilen:

##### **Vorteile:**

- professionelle Erfahrung und Expertise im Umgang mit verschiedenen Kohlenwasserstoffprodukten, einschließlich Bio-SAF
- unterschiedliche Transportmöglichkeiten

##### **Nachteile:**

- nur für große Mengen an Flugkraftstoffen geeignet, da sich auch die Qualitätskontrolle nur für große Mengen rentiert
- unabhängiges Tanklager und separate Pipelines für Jetfuel A1 erforderlich, da dieses nicht durch die Pipelines einer Raffinerie gepumpt werden darf
- möglicherweise große Transportstrecken des SAF aufgrund der Distanz zwischen Raffinerien und Bio-SAF-Einrichtungen
- Bio-SAF-Lagerung an der Produktionsstätte muss ermöglicht werden
- Erforderlichkeit von Verkehrsmitteln zur Verteilung des Produkts (z. B. Lkw, Bahnverbindungen usw.): So haben sich Unternehmen wie Neste, Altens und TRAPIL beispielsweise in Europa zusammenschlossen, um erstmals 3,5 Mio. Liter (2.800 Tonnen) Bio-SAF durch eine europäische Pipeline zu transportieren (z. B. NATO-Pipeline). Durch den Transport über die 192 Kilometer lange Pipeline wurden die Treibhausgasemissionen im Vergleich zur konventionellen Tankwagenlogistik um 92 % CO<sub>2</sub>-Äquivalente reduziert. Die Pipeline verläuft zwischen dem Hafen von Le Havre im Nordwesten Frankreichs und der Stadt Gennevilliers in der Nähe von Paris.<sup>125</sup>

## 5.2 Kerninfrastruktur an Flughäfen

Dadurch, dass mit JET-A1 normgemäß vermischtes SAF mit der bestehenden Infrastruktur von Flughäfen kompatibel ist, kann ein Teil der bereits vorhandenen Einrichtungen genutzt werden. An Flughäfen ist die Infrastruktur für Bio- und E-SAF somit identisch. Zur Kerninfrastruktur gehören

- Logistik und Transport sowie
- Lagerung und Tanksystem.

Wie bereits erwähnt können gemischte Flugkraftstoffe entweder über Pipelines, Lkw, Zug oder Schiff transportiert oder direkt am Flughafen produziert werden. Die Lagerung kann sowohl getrennt als auch gemeinsam erfolgen. Oftmals werden große Mengen Bio-SAF oder dessen bis 50 % angereicherte Blends per Zug und kleine Mengen per Lkw transportiert, da die Produktionsstätten meist abseits liegen. Herkömmliches Kerosin wie auch generell SAF-Blends mit bis zu 50 % SAF werden in der Regel per Pipeline transportiert. Die Entscheidung für eine Transportmethode hängt von verschiedenen Faktoren wie Kosten, Verfügbarkeit von Infrastruktur und Umweltauswirkungen ab.

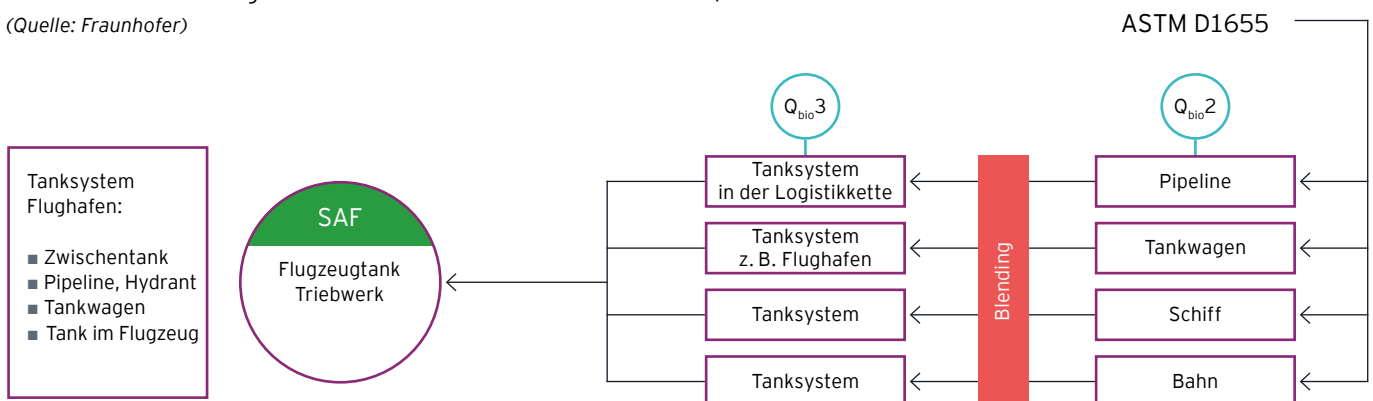
Verschiedene **Transportmöglichkeiten** bringen unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich:<sup>116</sup>

- Der **Transport per Lkw** eignet sich insbesondere für kleinere Mengen SAF, da er eine hohe Flexibilität und Zuverlässigkeit bietet. In diesen Fällen ist er praktisch und kostengünstig, da er keine aufwendigen Lade- oder Entladeinfrastrukturen benötigt. Bei größeren Volumina an SAF könnten jedoch zusätzliche transportinfrastrukturelle Maßnahmen erforderlich sein, etwa die Errichtung von Bereitstellungsflächen oder die Erschließung von Zufahrtsstraßen, was zusätzliche Kosten verursacht. Des Weiteren bestehen Hürden in Form von Begrenzungen der Entladekapazität und spezifischen Kompatibilitätsanforderungen seitens der Flughäfen.
- Im Gegensatz dazu ermöglicht der **Transport via Zug** das Bewegen größerer Mengen Flugzeugkraftstoff. Allerdings setzt der Schienentransport eine vorhandene Bahninfrastruktur voraus, die die SAF-Raffinerien mit den Mischstationen verbindet. Dies kann bedeuten, dass erst in die Entwicklung solcher Schienenwege investiert werden muss, bevor ein effektiver Transport gewährleistet ist.

- **Der Transport per Schiff** ermöglicht ebenfalls den Transport großer Mengen Flugzeugkraftstoff. Allerdings ist die Abwesenheit von Hafeninfrastrukturen in der Nähe vieler Flughäfen eine Herausforderung. Zudem erfordert die Erschließung neuer Wasserstraßen einen umfangreichen Ausbau. Infolgedessen eignet sich diese Transportart hauptsächlich für Raffinerien oder Terminals, die bereits über einen Wasserzugang verfügen.
- **Pipelines** bieten durch ihre niedrigen Betriebskosten und oft bereits vorhandene Infrastruktur an Flughäfen ein erhebliches Potenzial. Allerdings besteht das Problem, dass derzeit der Transport von reinem SAF in Multiprodukt-Pipelines nicht gestattet ist. Demzufolge ist die Nutzung von Pipelines nur in einigen Ländern möglich und oft ausschließlich für zertifiziertes SAF gestattet. Ein weiterer Nachteil sind die hohen Kapitalkosten für den Bau neuer Infrastruktur. Auch die Notwendigkeit, SAF in die bestehende Pipeline-Sequenzierung anderer Kohlenwasserstoffe zu integrieren, ist insbesondere bei geringen Mengen SAF wirtschaftlich nicht sinnvoll.<sup>116</sup>

**Abbildung 36** Überblick über die allgemeine Infrastruktur für SAF-Blends und/oder fossiles Jetfuel

(Quelle: Fraunhofer)



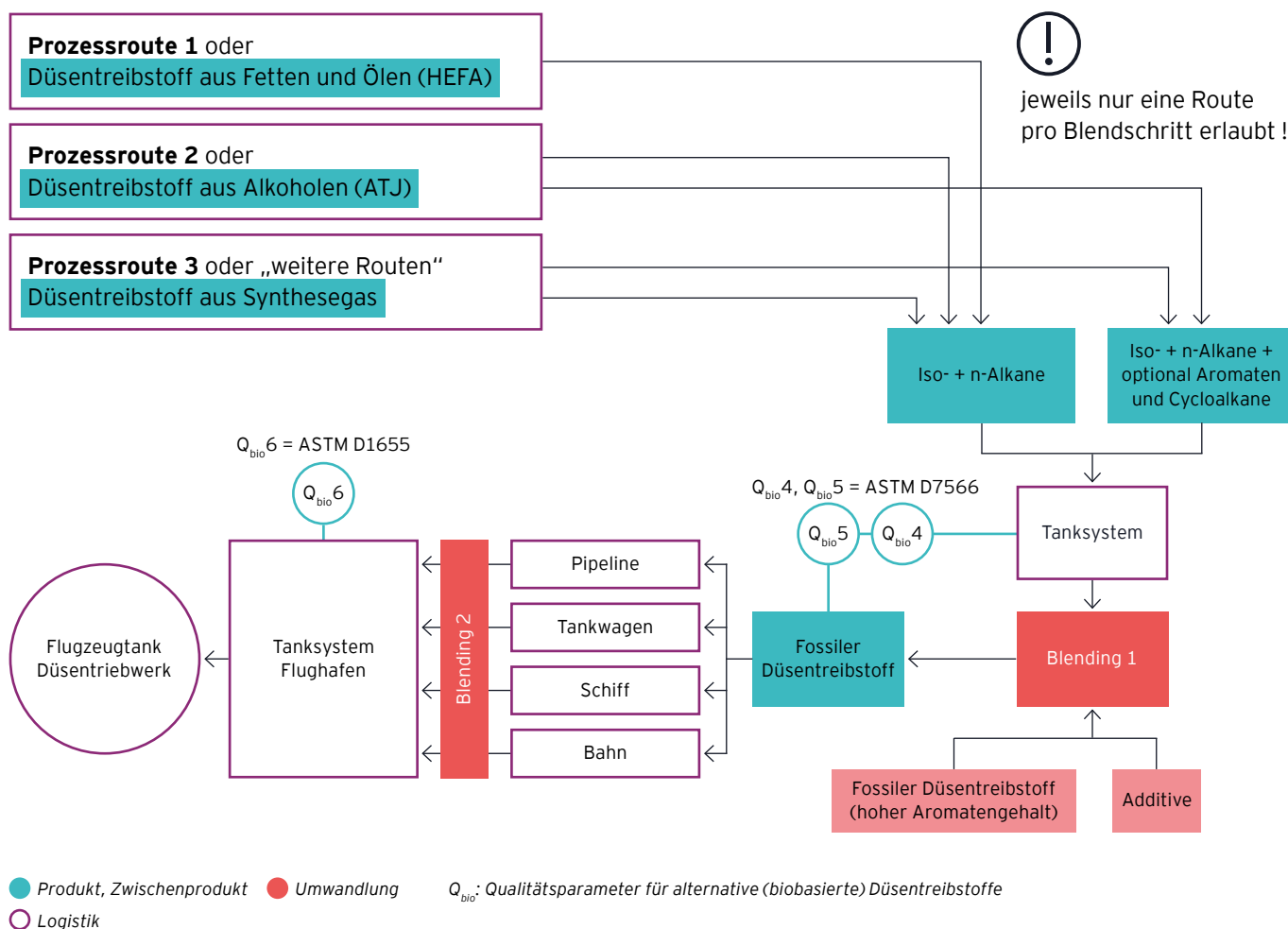
$Q_{\text{bio}}$ : Qualitätsparameter für SAF

● Produkt, Zwischenprodukt    ● Umwandlung  
○ Logistik

**Abbildung 37**

Struktur und Route für SAF-Transport

(Quelle: Fraunhofer)



“

Die Umstellung auf Wasserstoff als Flugzeugantrieb erfordert Änderungen in der Flughafeninfrastruktur. Bis circa 2040 ist die Versorgung per Lkw und Anhänger machbar. Anschließend erfordert der gestiegene Bedarf den Einsatz von Kryo- und Kugeltanks zur Speicherung.

**Jan Eike Blohme-Hardegen**, Leiter der Umweltabteilung,  
Flughafen Hamburg

Der Transport von SAF-Blends kann beispielsweise über die NATO- und/ oder das Trans-European-Transport-Network-(TEN-T-) Pipeline-System erfolgen, das derzeit für den Transport von Kerosin genutzt wird.

Seit 2023 ist ein Transport von SAF-Blends über die NATO-Pipeline möglich, die den Flughafen Brüssel normalerweise mit Kerosin versorgt. Der Flughafen Brüssel ist der einzige belgische Flughafen, der über die NATO-Pipeline vollständig mit Kerosin versorgt wird. Für dieses Projekt kaufte die Brussels Airlines über 2 Mio. Liter (1.586 Tonnen) geblendeten Flugkraftstoff mit 38 % SAF-Anteil. Der Transport über Pipelines kann langfristig eine erhebliche Reduktion der Treibhausgasemissionen ermöglichen.<sup>126, 127</sup>

Laut Vertretern von Flughäfen übernehmen viele europäische Flughäfen nicht die Verantwortung für die Infrastruktur des Kraftstofftransports. Daher unterstützen sie die neue Regulierung bezüglich der SAF-Mengen auf Flughäfen nicht und betonen, dass diese Probleme in die Regulierung einbezogen und stattdessen die SAF-Lieferketten verbessert werden sollten. Ein Beispiel hierfür ist das „Book & Claim“-Modell.

Neben den Transportmöglichkeiten sollte auch eine entsprechende **Lagerung** für SAF an Flughäfen sichergestellt werden. Dazu müssen die Lagerkapazitäten in der EU erhöht werden, was durch den Bau neuer Kraftstofflager erreicht werden kann.<sup>53</sup>

Eine erste Option zur Lagerung ist die separate Speicherung von SAF und herkömmlichem Kerosin (Jet-A1). Das Vermengen beider Kraftstoffe erfolgt dann in einem dritten Tank, bevor der gemischte Flugkraftstoff in das Flugzeug gelangt. Durch die separate Lagerung kann die SAF-Qualitätssicherung

leichter durchgeführt werden, jedoch gestaltet sich die Bestandsaufnahme aufgrund der unterschiedlichen Dichten der beiden Kraftstoffe und des ständigen Auffüllens und Entleerens des Tanks als herausfordernd. Die Lagerung in getrennten Tanks und der Transport zu den Flugzeugen mittels Betankungsfahrzeugen können für Flughäfen ohne separate Infrastruktur zu erhöhten Kosten und Komplexität führen. Dieser Ansatz bietet jedoch eine transparente Lieferung und ermöglicht eine präzise Kontrolle der verwendeten Kraftstoffmengen.

Eine alternative Methode besteht darin, SAF mittels Massenbilanz in denselben Tanks wie herkömmliches Kerosin zu lagern. Da SAF oft in einer Mischung von 30–45 % mit JET-A1 an Flughäfen geliefert wird, wird es in diesen Lagertanks weiter verdünnt, bevor es zum Betanken von Flugzeugen verwendet wird. Diese Herangehensweise reduziert die Notwendigkeit für separate Infrastruktur und kann die Kosten senken.<sup>128</sup>

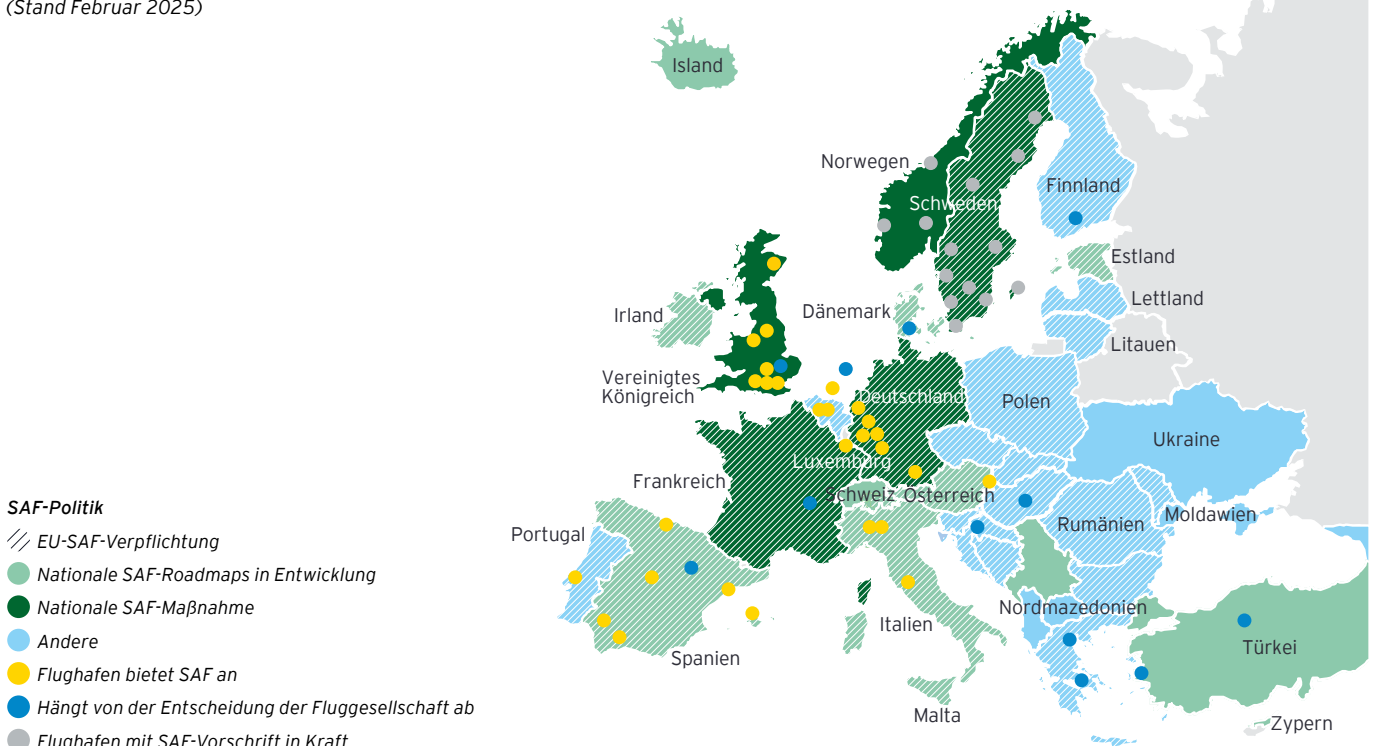
Derzeit sind Flughäfen in der Regel nicht für das Mischen von Kraftstoffen ausgerüstet. Daher wären Investitionen in Ausrüstung, qualifiziertes Personal und gegebenenfalls auch entsprechende Laboreinrichtungen für Analytik und Software erforderlich. Zusätzlich wären Versicherungen notwendig und es müssten CoA-Dokumente (Certificate of Analysis) erstellt werden. Ein möglicher Lösungsansatz könnte die Errichtung einer neuen Produktionsstätte (Greenfield- oder Brownfield-Site) in der Nähe des Flughafens sein. Dies würde jedoch zusätzliche Kosten verursachen, da umfangreiche Tests durchgeführt werden müssten.

In Europa gibt es bereits einige Flughäfen, die SAF und die zugehörige Infrastruktur bereitstellen. Wie die untenstehende Karte (Abbildung 38) verdeutlicht, bieten zum Beispiel in Deutschland die Flughäfen Hamburg, Frankfurt, München und Köln-Bonn regelmäßig eine Betankung mit SAF an.

## Abbildung 38

Überblick über den Einsatz von SAF an europäischen Flughäfen<sup>129</sup>

(Stand Februar 2025)





A low-angle, upward-looking photograph of several modern skyscrapers with glass facades. The buildings converge towards the top of the frame. Overlaid on the image are three large, semi-transparent circular shapes in shades of light blue and white, arranged in a pattern that suggests a stylized 'S' or a series of overlapping arcs.

# Finanzierung und Kosten



Da SAF mindestens doppelt so teuer ist wie herkömmlicher Flugzeugtreibstoff und 30 % der Kosten einer Fluggesellschaft ausmacht, wird die Finanzierung zu einem sehr relevanten Thema.

**Air France-KLM Group**

## Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

Die Defossilisierung der Luftfahrtindustrie hängt davon ab, dass Fluggesellschaften SAF in ausreichenden Volumina beschaffen können. Dazu müsste das SAF-Angebot um ein Vielfaches erhöht werden und zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung stehen.

Momentan beträgt der Preis von SAF noch etwa das 1,5 bis 6-Fache des Preises von konventionellem Kerosin.<sup>130</sup> Das liegt daran, dass manche Technologien nicht effizient sind und für Bio-SAF relevante Rohstoffe je nach Region relativ teuer sein können. Dies spiegelt sich auch im EY-internen Kalkulationsmodell des Mindestverkaufspreises auf der Basis der Levelized Cost von Bio-SAF (LCO für Bio-SAF) für HEFA und E-SAF (LCO E-SAF) auf der Methanolroute wider.

Laut EY-Kalkulationen beträgt der Mindestverkaufspreis für das Bio-SAF-Gemisch bestehend aus Bio-SAF, Bio-HVO und Bio-Naphtha global ca. 2.680 US-Dollar/Tonne, der für E-SAF ca. 4.880 US-Dollar/Tonne. Im Allgemeinen ist entweder Bio-SAF oder Bio-HVO das teurere Produkt, abhängig von der Marktnachfrage und dem Ver-

kaufsvolumen, während Bio-Naftha billiger ist. Zum Vergleich: Der durchschnittliche globale Kerosinpreis liegt Mitte Juli 2024 bei etwa 820 US-Dollar/Tonne.<sup>131</sup>

Im Zeitverlauf wird der Mindestverkaufspreis für E-SAF jedoch aufgrund technologischer Fortschritte und niedriger Energiepreise sinken, wodurch die Attraktivität im Vergleich zu Kerosin steigen wird. Der Mindestverkaufspreis für Bio-SAF ist zwar zum aktuellen Zeitpunkt die günstigere nachhaltige Alternative, aufgrund verschiedener Faktoren wie möglicher Ressourcenknappheiten etc. steigt er jedoch im Zeitverlauf und überschreitet ab Mitte der 2030er-Jahre sogar den Mindestverkaufspreis von E-SAF.

Um die Transformation der globalen Luftfahrt zu Emissionen von netto null bis zum Jahr 2050 zu ermöglichen, sind globale Investitionen in den SAF-Infrastrukturausbau in einer Gesamthöhe von 1,00-1,45 Billionen US-Dollar erforderlich. Dies entspricht 6 % der jährlichen Investitionen in fossile Treibstoffe und Gase.<sup>67</sup> Jährlich werden laut IATA bis 2050 ungefähr 48 Mrd. US-Dollar aufgewendet werden müssen.

Mittels ausreichender Finanzmittel, stabiler Politik und Regulatorik können die notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden, um aktuelle und

zukünftige technologische Innovationen sowie den Ausbau der Produktionskapazitäten zu bewältigen. Entsprechende Finanzmittel können aus privaten und öffentlichen Quellen kommen. Typische Investitionsstrukturen sind mitunter öffentlich-private Partnerschaften, CO<sub>2</sub>-Kompensationsprogramme, innovative Finanzierungsmodelle wie grüne Anleihen, Nachhaltigkeitskredite und Risikokapital, das insbesondere für risikoreiche Projekte und Phasen erforderlich ist. Weltweit stehen zahlreiche öffentliche Fördermittel zur Verfügung, die auch zur Finanzierung von SAF-Initiativen herangezogen werden können. Die geografische Verteilung dieser Finanzierungsprogramme variiert, wobei insbesondere in Europa, Nordamerika und einigen APAC-Regionen relevante Finanzierungsquellen identifiziert wurden. Dennoch sind zusätzliche staatliche Förderungen erforderlich, um die zukünftige Skalierung von SAF zu ermöglichen.

Mit der fortschreitenden Entwicklung des SAF-Marktes gewinnen private Investitionen zunehmend an Bedeutung. Derzeit verzeichnen private Investitionen in SAF-Projekte weltweit einen Anstieg, bedingt durch das wachsende Interesse und die Zunahme globaler SAF-Rahmenbedingungen. Typische private Finanzierungsinstrumente umfassen Bankdarlehen und Anleihen, einschließlich Green Bonds.



Eine angemessene Bankfähigkeit und eine entsprechende Skalierbarkeit von SAF-Projekten sind entscheidend für deren erfolgreiche Finanzierung. Die Bankfähigkeit hängt von der wirtschaftlichen Rentabilität des Projekts, der Effizienz und Zuverlässigkeit der Technologie, der Verfügbarkeit und den Schwankungen von Rohstoffen, staatlichen Förderungen, Subventionen und gesetzlichen Rahmenbedingungen ab. Zudem sind feste Abnahmeverträge zur Minimierung des Absatzrisikos, die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsfaktoren, Strategien zur Risikominimierung und ein kompetentes Team wichtige Aspekte für eine erfolgreiche Bankfähigkeit. Die Skalierbarkeit von SAF-Initiativen, also die Fähigkeit eines Projekts, seine Kapazitäten zu erweitern, basiert auf Faktoren wie Technologie, Wirtschaftlichkeit, Infrastruktur, Regulierung und Nachhaltigkeit.

Voraussetzungen für die aktuellen wie auch für die Zukunft ermittelten Mindestverkaufspreise für Bio- und E-SAF und für die Erhöhung der Skalierbarkeit und der technologischen Reife sind u. a. die Bereitschaft von Investoren, in SAF-Projekte zu investieren, und die Bankfähigkeit der Projekte.

Dieses Kapitel widmet sich somit zunächst den Grundlagen, den damit verbundenen Herausforderungen und Notwendigkeiten für die Finanzierung von SAF-Projekten. Es erfolgt eine detaillierte Analyse verschiedener Finanzierungsinstrumente, die für die Realisierung dieser Projekte von Bedeutung sind. Zusätzlich bietet das Kapitel eine umfassende Übersicht über die prognostizierte Preisentwicklung von Bio- und E-SAF für den globalen Raum und die Regionen APAC, EU und USA für den Zeitraum von 2024 bis 2050, gestützt auf fundierten internen Kalkulationen.

## 6.1 Entwicklung der SAF – Kostenstruktur und Verkaufspreise

Zur Berechnung des Marktpreises für Bio-SAF und E-SAF hat EY in seinen internen Berechnungen folgende Finanzkennzahlen berücksichtigt:

- CapEx
- Produktionskapazität und Rohstoffversorgung
- OpEx
- LCoH

Diese Information ist auch für potenzielle Investoren wichtig, die in Bio- und E-SAF-Anlagen investieren möchten.

LCoH dient der Berechnung der Kosten pro produzierter E-SAF- oder Bio-SAF-Einheit während der gesamten Lebensdauer der Produktionsanlage:

$$\text{Levelized Cost} = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{(\text{CAPEX}_t + \text{OPEX}_t + \text{Interests}_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{(\text{Production in units}_t)}{(1+r)^t}}$$

$r$  = gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten

$t$  = Zeit

$N$  = Lebensdauer der Produktionsanlage

Unter LCoH-Berechnungen von E-SAF und Bio-SAF wurden auch zeitliche Entwicklungen (2024, 2030, 2040 und 2050) und regionale Unterschiede in der EU, USA und der APAC-Region betrachtet.

Um den Produzenten einen angemessenen Gewinn zu ermöglichen, der für Reinvestitionen, Risikoabsicherung und die Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit notwendig ist, wurde eine Gewinnmarge von 5 % zu den jeweiligen LCO für beide SAF hinzugefügt, die den Mindestverkaufspreis (Minimum Selling Price) festlegt.

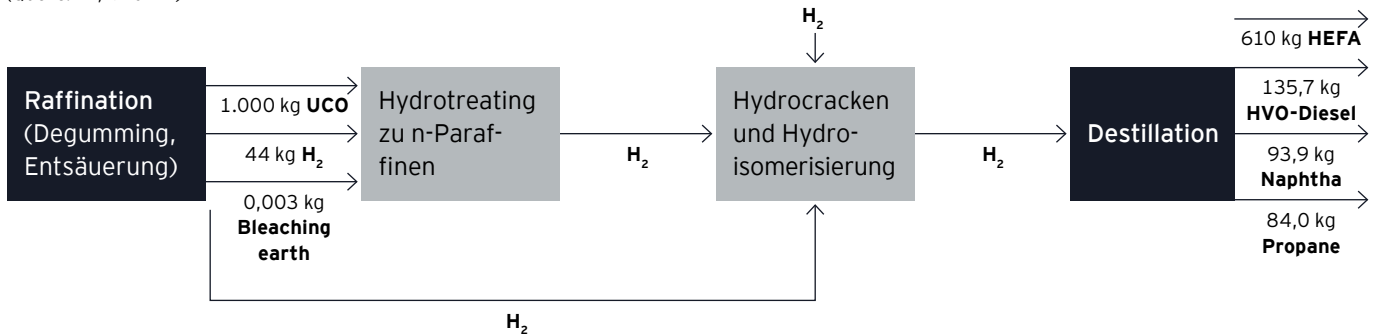
Die LCO für Bio-SAF wurden basierend auf der HEFA-Route (Prozessroute 1) berechnet, da diese Prozessroute bisher am ausgereiftesten ist.



**Abbildung 39**

Betrachtete HEFA-Route für die LCO- und Preiskalkulationen

(Quelle: EY, MVaK<sup>132</sup>)



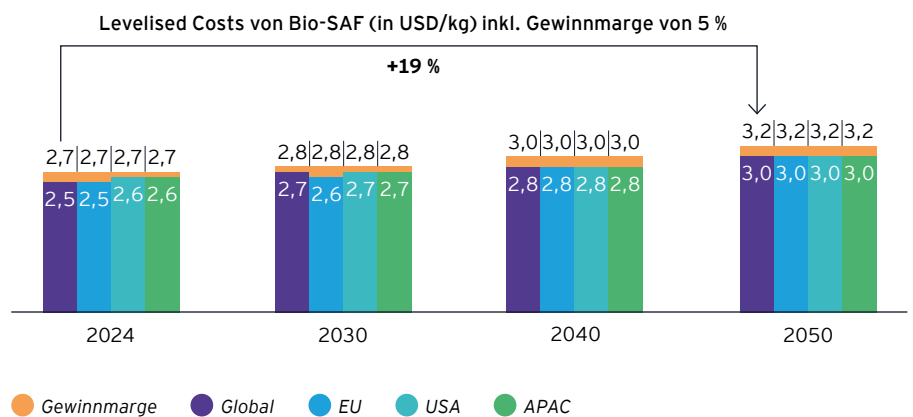
Das betrachtete HEFA-basierte SAF ist in diesem Fall ein Premiumprodukt und wird im Herstellungsprozess ausschließlich mit grünem Dampf (aus Biomethan) produziert.

Detaillierte Annahmen werden in Anhang II erläutert.

Die LCO für E-SAF wurden auf der Basis der Methanol-Route kalkuliert. Hier wird auch ein Premiumprodukt betrachtet.

**Abbildung 40**

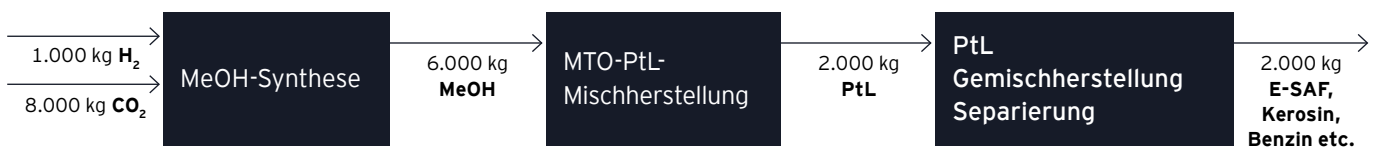
LCO für Bio-SAF (LCO für Bio-SAF) inkl. Gewinnmarge in US-Dollar pro Kilogramm



**Abbildung 41**

Betrachtete Methanol-Route für die LCO- und Preiskalkulationen

(Quelle: EY)

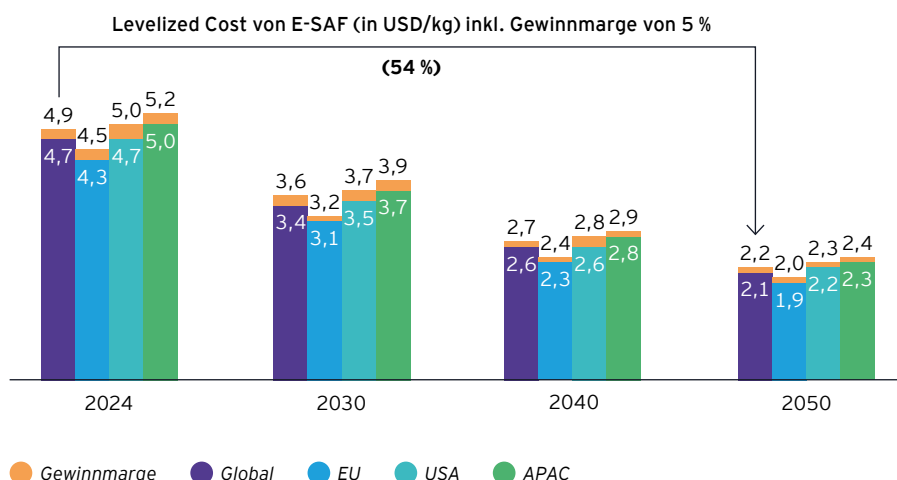


# Kalkulation



**Abbildung 42**

LCO von E-SAF inkl. Gewinnmarge in US-Dollar pro Kilogramm



Wie in den Abbildungen 40 und 42 zu sehen liegen die LCO für Bio-SAF (im Folgenden jeweils ohne Gewinnmarge) nach unseren Berechnungen zum aktuellen Zeitpunkt global bei etwa 2,5 US-Dollar pro Kilogramm (~ 2.550 US-Dollar/Tonne) und diejenigen für E-SAF um ca. 80 % höher bei 4,7 US-Dollar pro Kilogramm (~ 4.650 US-Dollar/Tonne).

In der Europäischen Union belaufen sich im Jahr 2024 die LCO für Bio-SAF aufgrund niedrigerer Energiepreise in

Europa auf 2,5 US-Dollar pro Kilogramm (~ 2.530 US-Dollar/Tonne) und diejenigen für E-SAF auf 4,3 US-Dollar pro Kilogramm (~ 4.360 US-Dollar/Tonne).

Die Preise in den Vereinigten Staaten und in der APAC-Region sind im Vergleich zur EU aufgrund von höheren Energiekosten deutlich höher. Konkret belaufen sich die Kosten für Bio-SAF in beiden Regionen auf 2,6 US-Dollar pro Kilogramm (~ 2.560 US-Dollar/Tonne). Für E-SAF liegen sie in den

USA bei 4,7 US-Dollar pro Kilogramm (4.730 US-Dollar/Tonne) und in der APAC-Region bei 5,0 US-Dollar pro Kilogramm (4.970 US-Dollar/Tonne).

Insgesamt liegen die aktuellen Kosten für Bio-SAF also unabhängig von der Region deutlich unter denen für E-SAF.

Dies liegt an der im Vergleich zur E-SAF-Produktion ausgeprägteren technologischen Reife und Skalierung aufgrund der seit mehreren Jahren weltweit existierenden kommerziellen HVO-Diesel-Produktionsanlagen, bei denen HEFA bisher immer als Nebenprodukt hergestellt wurde. Auf HEFA-SAF ausgerichtete Produktionsanlagen nutzen also im Wesentlichen dieselben Prozesse wie Anlagen, die auf die Produktion von HVO-Diesel spezialisiert sind. Der Hauptunterschied zwischen diesen Anlagentypen liegt in den Mengen und der Art der verwendeten Rohstoffe. Für Investoren ist derzeit Bio-SAF wegen der niedrigen Produktionskosten deutlich interessanter. Im Zeitverlauf kann sich diese Situation jedoch ändern.

Die zunehmende Technologieentwicklung und Skalierung der E-SAF-Produktion führt zu sinkenden Produktionskosten von E-SAF und geringeren CapEx entsprechender Produktionsanlagen in allen Regionen, was auch in Abbildung 42 zu sehen ist.

“

Derzeit sind die relativen Produktionskosten von PtL-SAF noch deutlich höher als die von biogenem SAF. Dennoch bietet PtL-SAF langfristig ein sehr großes Potenzial, um die Klimawirkung des Luftverkehrs maßgeblich zu reduzieren.

**Melanie Form**, Mitglied des Vorstands und Geschäftsführerin, Aireg

Auch der erwartete technologische Fortschritt und die daraus resultierenden geringeren Preise bei der Herstellung von grünem Wasserstoff sorgen für einen Rückgang der LCO für E-SAF. Sinkende Kosten für erneuerbare Energien haben aufgrund des vergleichsweise hohen Energiebedarfs bei der Produktion von E-SAF ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die insgesamt sinkenden LCO für E-SAF.

Bei den LCO für Bio-SAF ist eine gegenläufige Entwicklung zu beobachten. Aufgrund möglicher Ressourcenbeschränkungen, z. B. durch mögliche Einschränkungen hinsichtlich der erlaubten zu verwendenden Biomasse, und steigender Rohstoffpreise, z. B. durch Verknappung und fehlende Verfügbarkeit benötigter Rohstoffe aufgrund von Naturkatastrophen, Missernten oder Landnutzungskonflikten oder durch eine erhöhte Nachfrage nach Rohstoffen, auch durch andere Industriezweige (z. B. Lebensmittelindustrie, Schifffahrt, Chemie), erhöhen sich die LCO für Bio-SAF. Auch regulatorische Anforderungen (siehe Kapitel 2) sowie das zunehmende Bewusstsein für den Klimaschutz bei gleichzeitig fehlenden preislich dem mittels der HEFA-Route produzierten Bio-SAF ähnlichen und nachhaltigen Alternativen führt zu steigenden LCO für Bio-SAF.

Im Vergleich zu anderen Prozessrouten ist anzunehmen, dass die Nachfrage nach SAF aus HEFA und die LCO für Bio-SAF stärker steigen, da bei der Produktion von HEFA als Hauptprodukt auch HVO-Diesel, Propan und Naphtha als Nebenprodukte entstehen, mit denen in bereits bestehenden Märkten (z. B. Biodiesel, Chemie, Pharma etc.) zusätzliche Gewinne generiert werden können und die Bankfähigkeit somit erhöht ist.

Diese Entwicklungen führen dazu, dass die Angleichung von LCO für Bio-SAF und für E-SAF weltweit etwa im Jahr 2038 erreicht wird, ähnlich wie in den USA. In der EU ist Zeitpunkt bereits für das Jahr 2035 prognostiziert und in der APAC-Region tritt diese Preisangleichung schätzungsweise um das Jahr 2040 ein. Danach liegen die LCO für Bio-SAF regionsunabhängig über denen für E-SAF.

“

Es ist anzunehmen, dass die Bereitschaft zum Kauf von biomassebasiertem SAF in der Logistik und bei Unternehmen auch bei steigenden Preisen bestehen bleiben wird, da ihr Ziel die Verringerung der Scope-3-Emissionen ist. Im Gegensatz dazu zeigen sich Passagiere preissensitiv, was teilweise auf einen Mangel an Informationen über SAF zurückzuführen ist. Fluggesellschaften sehen sich daher mit der Herausforderung konfrontiert, Preiserhöhungen nur schwer an die Kunden weitergeben zu können.

**Bernhard Dietrich**, Leiter CENA Hessen, Hessen Trade & Invest GmbH

Im Jahr 2050 liegen die LCO für Bio-SAF global bei 3,0 US-Dollar pro Kilogramm (~ 3.330 US-Dollar/Tonne) und diejenigen für E-SAF um ca. 30 % niedriger bei etwa 2,1 US-Dollar pro Kilogramm (~ 2.140 US-Dollar/Tonne) (siehe Abbildungen 40 und 42).

In der Europäischen Union werden sich die LCO für Bio-SAF 2050 auf ebenfalls etwa 3,0 US-Dollar pro Kilogramm (~ 3.020 US-Dollar/Tonne) belaufen und diejenigen für LCO E-SAF, auch wieder aufgrund niedrigerer Energiepreise in Europa, lediglich auf 1,9 US-Dollar pro Kilogramm (~ 1.890 US-Dollar/Tonne).

In den USA und in der APAC-Region sind ähnliche Trends im Jahr 2050 erkennbar (siehe Abbildungen 40 und 42).

Insgesamt steigen die LCO für Bio-SAF zwischen 2024 und 2050 um etwa 19 %, während die LCO für E-SAF im gleichen Zeitraum um 53-56 % sinken.

Für Investoren und Kunden ist je nach Region bis etwa Mitte bzw. Ende der 2030er-Jahre Bio-SAF interessanter, danach werden wahrscheinlich, basierend auf unseren Berechnungen und Annahmen, Investitionen in E-SAF-Anlagen bevorzugt.

## 6.2 Finanzierungsquellen

Um bis zum Jahr 2050 die angestrebten Mengen SAF bereitstellen zu können, wird eine Investitionssumme von 1,00-1,45 Billionen US-Dollar erforderlich sein. Der jährliche finanzielle Bedarf beläuft sich laut der Air Transport Action Group (ATAG) auf etwa 48 Mrd. US-Dollar.<sup>133</sup> Zum Vergleich: Die jährlichen Ausgaben für Erdgas und Erdöl liegen derzeit bei 420 Mrd. US-Dollar.<sup>134</sup> Die Verfügbarkeit finanzieller Mittel auf globaler Ebene spielt eine entscheidende Rolle. Während diese im öffentlichen Sektor in der Regel begrenzt sind, könnte der private Sektor potenziell beträchtliche Summen bereitstellen. Laut Schätzungen des Financial Stability Board verfügt der globale private institutionelle Sektor derzeit über Vermögenswerte von etwa 225 Billionen US-Dollar, eine Summe, die sich bis 2050 mehr als verdoppeln könnte. Eine solche Zunahme der verfügbaren Mittel könnte, wenn zunehmend in SAF finanziert wird, zu einer signifikanten Beschleunigung in der Produktion inklusive Infrastrukturentwicklung und Nutzung von SAF führen.<sup>67</sup>

Typische Investitionsstrukturen zur Finanzierung von SAF-Projekten sind

- 1 | öffentlich-private Partnerschaften, die auf kooperativen Investitionstätigkeiten durch Regierungen, Industriebeteiligte und Finanzinstitutionen basieren. Diese Art der Finanzierung nutzt sowohl öffentliche Mittel als auch das Fachwissen des privaten Sektors. Dies ermöglicht eine Streuung des Risikos, das während der SAF-Skalierung entsteht, und eine Bündelung finanzieller Mittel zur Umsetzung größerer Vorhaben. Des Weiteren greifen Luftfahrtunternehmen zunehmend auch auf
- 2 | CO<sub>2</sub>-Kompensationsprogramme zurück, um SAF-Projekte zu finanzieren. Diese ermöglichen es Unternehmen, ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auszugleichen. Der Einsatz
- 3 | innovativer Finanzierungsmodelle, einschließlich grüner Anleihen und Nachhaltigkeitskredite, bietet den entscheidenden Vorteil, dass sie bei Erfüllung bestimmter Umweltleistungskriterien zu bevorzugten Konditionen erhältlich sind. Letztendlich wird durch
- 4 | Risikokapital und wirkungsorientierte Investoren zusätzliche Finanzierung vorangetrieben, da diese sowohl zielgerichtet als auch in innovative und möglicherweise risikoreiche Projekte investieren, die von traditionellen Finanzierungsquellen gemieden werden.<sup>135</sup>

Beim Aufbau initialer SAF-Projekte wird in der Regel auf Eigen- wie auch auf Fremdkapital zurückgegriffen, wobei sich das Verhältnis je nach Projektphase unterscheiden kann. Während die Finanzierungskosten für ein erstes Projekt aufgrund der höheren Risiken tendenziell höher sind, ist es wahrscheinlich, dass sie für nachfolgende Projekte sinken werden. Für die Entwicklung von SAF-Projekten kommen sowohl private als auch öffentliche Finanzierungsinstrumente zum Einsatz. Insbesondere in der Anfangsphase sind öffentliche Finanzierungen von essenzieller Bedeutung. Mit fortschreitender Reife des SAF-Marktes gewinnen private Investitionen an Bedeutung. Privates Kapital lässt sich insbesondere dann leichter mobilisieren, wenn Projekte genügend Einnahmen generieren, um bestehende Verpflichtungen zu erfüllen und eine attraktive Rendite für die Investitionen zu erwirtschaften.<sup>136</sup>

**Private Investitionen** im SAF-Sektor nehmen weltweit aufgrund des steigenden Interesses an SAF und der Unterstützung des Marktes durch globale politische Rahmenwerke zu.



Die hohen Kosten verhindern derzeit noch Fortschritte bei neuen Technologien – insbesondere im Bereich PTL. Um dieses Problem zu lösen, wäre eine zielgerichtete Unterstützung nötig: Für die ersten Anlagen muss dies eine Kombination aus CapEx- und OpEx-Förderung sein, um sowohl beim Produzenten als auch bei der Airline einen First Mover Disadvantage zu vermeiden.

---

**Henrik von Storch**, Director Global Sustainable Aviation Fuels, DHL Express

Nach Angaben der ICAO zählen zu den typischen privaten Finanzierungsinstrumenten Bankdarlehen und Anleihen, unter anderem auch Green Bonds. Bankdarlehen spielen bei der Finanzierung von SAF-Projekten eine wichtige Rolle, bergen jedoch das Risiko, dass Kreditnehmer bei zu hoher Risikobelastung zahlungsunfähig werden könnten. Kredite werden als Teil der Betriebskosten inklusive Zinsen über einen langen Zeitraum hinweg zurückgezahlt. Eine zusätzliche Herausforderung stellen die oft fehlenden Kreditbewertungen für Projekte dar, besonders in Entwicklungsländern. Dies kann entweder zu einer Zurückhaltung der Banken bei der Finanzierung oder zu erhöhten Zinsforderungen führen, um sich gegen das Risiko eines Zahlungsausfalls abzusichern. Wertpapiere wiederum bieten eine langfristige Finanzierungsmöglichkeit, die an den erwarteten Cashflow des Projekts angepasst wird. Sie sind handelbar und eröffnen somit weitere Möglichkeiten für Investitionen und Renditen.<sup>137</sup>

Folgende Vorteile können mit privaten Investitionen in SAF erzielt werden:

- SAF-Portfolios können institutionelle Investoren bei der Erreichung der Ziele in Bezug auf grüne Energie und eine Netto-null-Wirtschaft unterstützen. Weiterhin bieten SAF-Investitionen geografische Diversifikationsvorteile, da sie in Ländern erfolgen können, in denen das bisherige Engagement der Anleger in anderen Vermögenswerten begrenzt ist.
- SAF-Projekte bieten zunehmend attraktive Risiko-Ertrags-Verhältnisse und stetige Cashflows, die vom privaten institutionellen Sektor bevorzugt werden. Grund für diese Entwicklung sind die Verbesserung des regulatorischen und politischen Umfelds durch die nationalen Regierungen, das Ergreifen von Maßnahmen zur Minderung von übermäßigem Risiko durch den öffentlichen Sektor und das Wachstum des SAF-Marktes.
- SAF kann eine wichtige Rolle als Anlageklasse spielen, da es die Gesamtrendite eines Portfolios stabilisieren kann. Zum einen korreliert die Rendite von SAF-Investitionen nicht mit Aktien oder Anleihen und kann folglich die Gesamtvolatilität des Portfolios minimieren. Zum anderen kön-

nen SAF-Investitionen geografische Diversifikationsvorteile mit sich bringen, indem Investitionen in Ländern erfolgen, in denen Akteure bisher nicht engagiert sind.

- Globale Investitionen in SAF bieten Zukunftssicherheit, insbesondere im Hinblick auf die Einführung naturbasierter Finanzinstrumente wie z. B. des Globalen Biodiversitätsrahmenwerks und der Taskforce für naturbezogene Finanzinformationen (TNFD). Die Integration solcher Mechanismen in das Feld der umweltfreundlichen Investments macht effektive regenerative und wiederherstellende SAF-Initiativen als langfristige, zukunftsichere und bankfähige Investitionsmöglichkeiten für die Zukunft immer attraktiver.
- Das staatliche Engagement in SAF bietet interessante Kooperationsmöglichkeiten und langfristige Potenziale für Investoren. In Bezug auf die Investition in Entwicklungsländern besteht zudem die Option von Co-Investitionen mit staatlichen Akteuren wie beispielsweise nationalen Entwicklungsbanken, aber auch multinationalen Entwicklungsbanken wie der Weltbank und dadurch die Option des Erhalts von Finanzmitteln zu günstigeren Optionen im Vergleich zum privaten Kapitalmarkt.<sup>133</sup> ►





Wie bereits erwähnt spielen öffentliche Fördermittel für Investoren wie auch für Produzenten eine entscheidende Rolle und beeinflussen maßgeblich die Marktentwicklung. Staatliche Finanzierungen können auch die Skalierung der globalen SAF-Produktion ermöglichen, insbesondere bei der Finanzierung von Technologieentwicklungen. Mittel des öffentlichen Sektors tragen dazu bei, Risiken privater Investitionen zu minimieren, indem sie die Kapazitäten in Technologie und Operation erhöhen, Vorfinanzierungen mit hohem Risiko und hohen Kosten tragen, höhere Kreditkosten subventionieren und die Entwicklung von Regulierungsprogrammen vorantreiben.<sup>137</sup> Insbesondere Europa und Nordamerika verfügen über eine Vielzahl von Finanzierungsprojekten mit zahlreichen Förderprogrammen, die sowohl die

Entwicklung von Bio-SAF als auch von E-SAF vorantreiben. Auch in ausgewählten Ländern der APAC-Region konnten wir eine signifikante Anzahl Förderinitiativen identifizieren, die sich auf die Unterstützung von SAF konzentrieren.

Im Gegensatz dazu ist in Lateinamerika nur eine begrenzte Anzahl Förderprogramme zu verzeichnen. Die geringste Aktivität im Bereich der Projektförderung besteht derzeit in Afrika, wo es hauptsächlich internationale Programme (u. a. ICAO European Union Assistance Program, ICAO Act SAF) gibt, die speziell auf die Förderung von SAF-Projekten auf dem Kontinent ausgerichtet sind. Die Entwicklung von Biokraftstoffen und Biorohstoffen in Afrika ist in hohem Maße von der finanziellen Unterstützung ausländi-

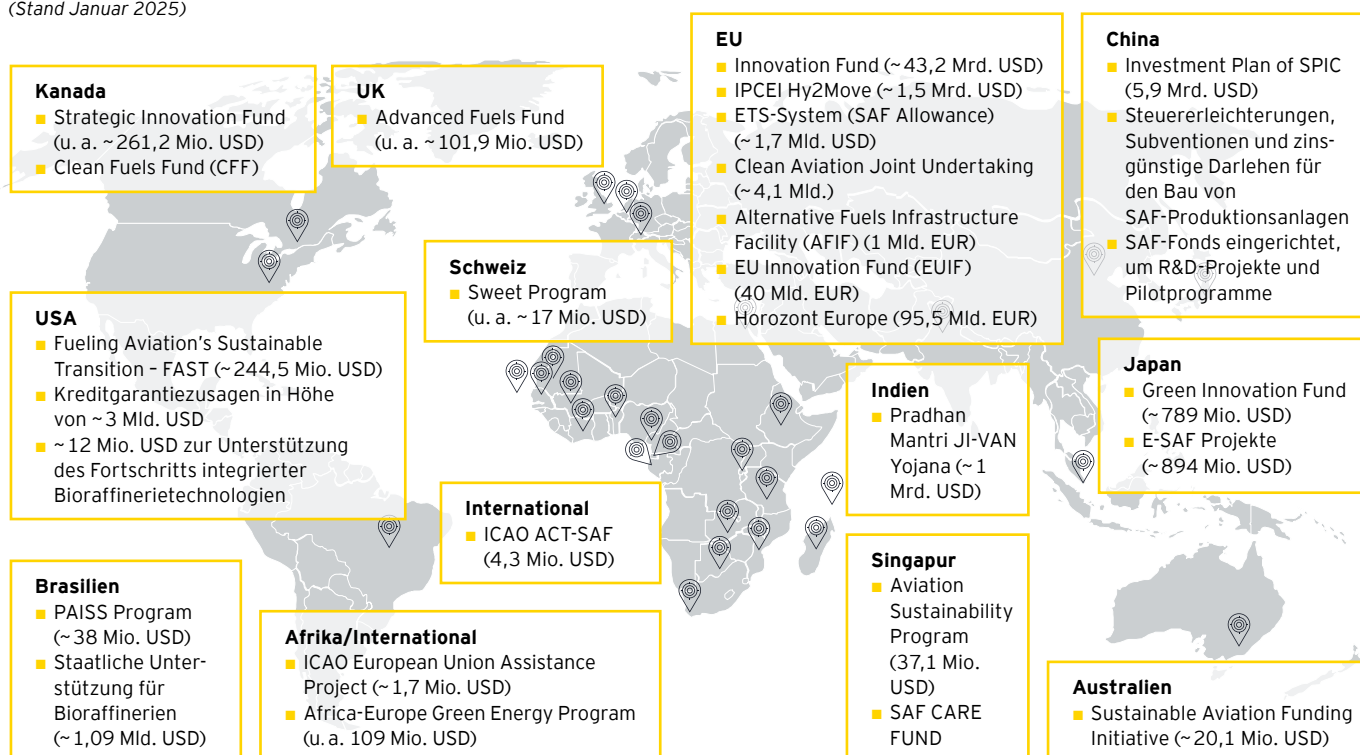
scher Regierungen, Entwicklungsbanken und staatlicher Unternehmen abhängig.<sup>138</sup>

Die in Abbildung 41 dargestellten Regionen zeigen attraktive Standorte, in denen Fördermittel verfügbar sind oder vergeben wurden. Zudem werden bestehende staatliche Förderprogramme präsentiert. Die ausgewählten Projekte unterstützen nicht nur den Ausbau von SAF, sondern auch den von E- und Biokraftstoffen. Obwohl Förderprogramme, die sich ausschließlich auf H<sub>2</sub> konzentrieren, hier nicht aufgeführt sind, können sie dennoch einen bedeutenden Beitrag zur Förderung von E-SAF leisten. Es ist zu berücksichtigen, dass die Karte nur eine Auswahl an Förderprogrammen darstellt und kein vollumfängliches Bild ermöglicht.

#### Abbildung 43

Darstellung einer Auswahl globaler staatlicher Förderprojekte von SAF, E-Kraftstoffen und Biokraftstoffen<sup>i,j</sup>

(Stand Januar 2025)



Anhang I bietet einen detaillierten Überblick über die globalen öffentlichen Förderinitiativen für SAF.

<sup>i</sup> Es muss hervorgehoben werden, dass die in diesem Kontext erwähnten Projekte lediglich eine Auswahl repräsentativer Initiativen darstellen. Zudem ist zu beachten, dass die Transparenz und Sichtbarkeit von Förderinitiativen in manchen Regionen geringer sein kann als in anderen.

<sup>j</sup> Die Umrechnung von Euro in US-Dollar erfolgt auf der Basis unseres EY-Preismodells. Die Umrechnung von länderspezifischen Währungen wird auf der Grundlage der Währungskurse zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Projekte durchgeführt.

## 6.3 Bankfähigkeit und Skalierbarkeit von SAF-Projekten

Bankfähigkeit und Skalierbarkeit sind entscheidende Faktoren für die erfolgreiche Finanzierung und Umsetzung von SAF-Projekten.

Die Bankfähigkeit eines Projekts bezeichnet dessen Fähigkeit, die Kriterien von Sicherheit und Rentabilität für eine Finanzierung durch Kreditinstitute zu erfüllen. Für SAF-Projekte, die unter die Kategorie der erneuerbaren Projekte fallen, sind die folgenden Elemente ausschlaggebend: Projektbereitschaft und vollumfängliche Planung müssen vorhanden sein, um das Projekt für finanzielle Verhandlungen zu qualifizieren. Darüber hinaus trägt das Projekt durch Abnahmeverträge und solide finanzielle Modellierungen zur Vertrauensbildung der Investoren bei. SAF-Projekte sollten ein erfahrenes Team mit Expertise und Erfolgen in der Vergangenheit mitbringen. Des Weiteren müssen Projekte über eine umfassende Risikoanalyse verfügen, die sowohl projekt- als auch länderspezifische Risiken berücksichtigt. Sie sollten mit übergeordneten Rahmenwerken wie den SDGs, ESG-Regularien und länderspezifischen Prioritäten vereinbar sein. Diese nichtfinanziellen Faktoren werden von Investoren zunehmend in Betracht gezogen.<sup>139</sup> Im Rahmen dieses Teilkapitels liegt der Schwerpunkt auf der finanziellen Unterstützung von Start-ups und Unternehmen in den Frühphasen. Die Förderung durch Venture-Capital-Investitionen richtet sich nach der aktuellen Marktlage der Luftfahrtindustrie, die von neuen technologischen Entwicklungen, regulatorischen Anpassungen und sich verändernden Verbraucherpräferenzen geprägt wird.



Die **Skalierbarkeit** bezieht sich auf die Fähigkeit eines Projekts, seine Kapazitäten effizient zu erweitern, um den wachsenden Bedarf an zukünftig erforderlichem SAF zu decken. Sie ist entscheidend, um die zukünftigen SAF-Ziele und die Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors zu erreichen. Zur Beurteilung der Skalierbarkeit von E- und

Bio-SAF werden in diesem Kapitel die fünf Dimensionen Technologie, Wirtschaftlichkeit, Infrastruktur, Regularien und Nachhaltigkeit betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass sich die Faktoren für Bio- und für E-SAF unterscheiden, was eine differenzierte Analyse erfordert.

“

Wir sehen die finanzielle Herausforderung in einer deutlich steigenden Kostenbasis, die eine Anpassung des Geschäftsmodells der Fluggesellschaften erfordern wird. Aus operativer Sicht erwarten wir weniger Schwierigkeiten. Ein Motoren-Upgrade könnte notwendig sein, um höhere SAF-Beimischungen zu ermöglichen.

Air France-KLM Group

### 6.3.1 Bankfähigkeit

Eine ausreichende Bankfähigkeit zeigt, dass ein Projekt zu konkreten Ergebnissen und Rentabilität führen kann, und ist somit ausschlaggebend für die Sicherung der notwendigen finanziellen Unterstützung.<sup>139</sup> Die Bankfähigkeit von SAF-Projekten hängt von verschiedenen Faktoren ab, die Investoren und Kreditgeber berücksichtigen, um das Risiko und die Rentabilität dieser Projekte zu bewerten. Hier sind einige Schlüsselfaktoren:

- Wirtschaftliche Rentabilität des Projekts: Dazu gehören eine solide Kosten-Nutzen-Analyse, Wettbewerbsfähigkeit gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen und potenzielle Einnahmequellen wie CO<sub>2</sub>-Zertifikate.
- Ausgereifte Technologie zur Herstellung von SAF: Die Technologie muss verlässlich und erprobt sein.
- Verfügbarkeit und Schwankungen von Rohstoffen: Die Preisvolatilität von Rohstoffen kann die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen.
- Staatliche Förderungen, Subventionen oder gesetzliche Rahmenbedingungen: Diese können den Einsatz von SAF begünstigen und die Bankfähigkeit erheblich verbessern.
- Feste Abnahmeverträge mit Fluggesellschaften oder anderen Abnehmern: Hier geht es um die Sicherung stabiler Einnahmen und die Minimierung des Absatzrisikos.
- Erfüllung von Umwelt- und Sozialstandards: Solche Projekte sind attraktiver für Investoren, die Wert auf Nachhaltigkeit legen.
- Erfahrenes und kompetentes Team: Dieses erhöht das Vertrauen der Investoren.
- Verfügbarkeit von Strategien zur Minimierung und Handhabung von Risiken, einschließlich technischer, finanzieller und marktbezogener Risiken

Die Investitionen für die SAF-Skalierung können in der Initialphase der Projekte durch Venture Capital und in späteren Phasen der industriellen Skalierung in großem Maßstab durch Fremdkapital aus dem Bankensektor, Kapital vonseiten des Private-Equity-Sektors oder durch den öffentlichen Kapitalmarkt im Rahmen eines Initial Public Offering (IPO) erfolgen. Eine ausreichende Bankfähigkeit ist unerlässlich, um diese Investitionen zu ermöglichen und die Umsetzung von SAF-Projekten erfolgreich voranzutreiben.

**Venture-Capital-Investitionen** sind eine der zentralen Finanzierungsformen für Start-ups, Unternehmen in frühen Entwicklungsphasen und aufstrebende Firmen mit hohem Wachstumspotenzial. Dieses Kapital wird typischerweise von Private-Equity-Investoren bereitgestellt.<sup>140</sup>

Im Luftfahrtsektor ermöglicht Venture Capital die Bereitstellung finanzieller Ressourcen für innovative Ideen und Technologien, einschließlich SAF-Projekten. Bedingt durch die inhärenten Risiken von SAF-Projekten und neuen technologischen Entwicklungen spielt Venture Capital eine entscheidende Rolle bei der Finanzierung. Investoren bewerten vor der Risikokapitalinvestition Faktoren wie Marktnachfrage, Wettbewerb und Skalierbarkeit, um die Risiken zu minimieren und die Rendite zu maximieren. Die Zusammenarbeit spielt eine zentrale Rolle im Venture-Capital-Sektor der Luftfahrtindustrie. Investoren suchen oft strategische Partnerschaften mit Branchenexperten, Luftfahrtunternehmen und Forschungseinrichtungen. Dies fördert den Zugang zu Fachwissen und Ressourcen und erhöht die Erfolgchancen der finanzierten Unternehmen.<sup>141</sup>

Die Analyse vergangener Transaktionen zeigt, dass neben Finanzinvestoren auch Fluggesellschaften eine wichtige Rolle bei der Finanzierung von Start-ups im Bereich SAF spielen. Ein Beispiel für entsprechende Transaktionen ist die Investition von 30 Mio. US-Dollar durch Southwest Airlines im Februar 2024 in das Start-up LanzaJet, die SAF-Sparte von LanzaTech.<sup>142</sup> Des Weiteren beteiligte sich United Airlines mit ihrem Corporate Venture Capital Fund an einer Finanzierungsrunde in Höhe von 22 Mio. US-Dollar zur Unterstützung des Start-ups OXCCU im Jahr 2023. Dieses von Wissenschaftlern und Technologen der Oxford-Universität gegründete Start-up plant die Produktion von SAF aus CO<sub>2</sub>.<sup>143</sup> Ein weiteres Beispiel ist die Beteiligung von Wizz Airlines und zwei weiteren Airlines an einer Finanzierungsrunde von Clean-Joule, einem auf Bio-SAF spezialisierten Start-up, im Jahr 2023 im Umfang von 50 Mio. US-Dollar.<sup>144</sup>

United Airlines hat zudem einen eigenen Corporate Venture Capital Fund, den Sustainable Flight Fund, aufgelegt. Dieser Fonds, der 200 Mio. US-Dollar durch United Airlines und seine Unternehmenspartner sowie zusätzlich 450.000 US-Dollar von Kunden umfasst, unterstützt gezielt Start-ups, die sich auf die Forschung, Produktion und Technologie von SAF spezialisieren.<sup>145</sup>

Im Zeitraum von 2010 bis 2021 konnten zwei Phasen von Venture-Capital-Investitionen hinsichtlich Bio-SAF beobachtet werden. Innerhalb der ersten fünf Jahre gelang es vielen Unternehmen, Risikokapital in großem Umfang zu gewinnen, insbesondere für die Produktion von Biokraftstoffen aus Algen, mitunter mit Bio-SAF als möglichem Endprodukt. Eine Produktion in großem Maßstab und wettbewerbsfähige Preise blieben jedoch aus und viele Unternehmen gingen insolvent.

Ein Anstieg des durchschnittlichen Volumens der Förderung auf Bio-SAF spezialisierter Start-ups konnte dann in der zweiten Phase im Zeitraum von 2016 bis 2021 verzeichnet werden. Im Jahr 2021 wurden weltweit ungefähr 1.800 Mio. US-Dollar in Bio-SAF-Start-ups investiert, 2015 waren es nur 700 Mio. US-Dollar (vgl. Abb. 57).<sup>146</sup>

Diese Entwicklung des Transaktionsvolumens weist sowohl auf einen Anstieg der Bewertungen ähnlicher Start-ups im Zeitverlauf hin als auch auf die höhere Anzahl spätphasiger Start-ups, die mithilfe von Venture Capital weitere Finanzmittel für die Skalierung ihres Produktionsprozesses einsammeln konnten.

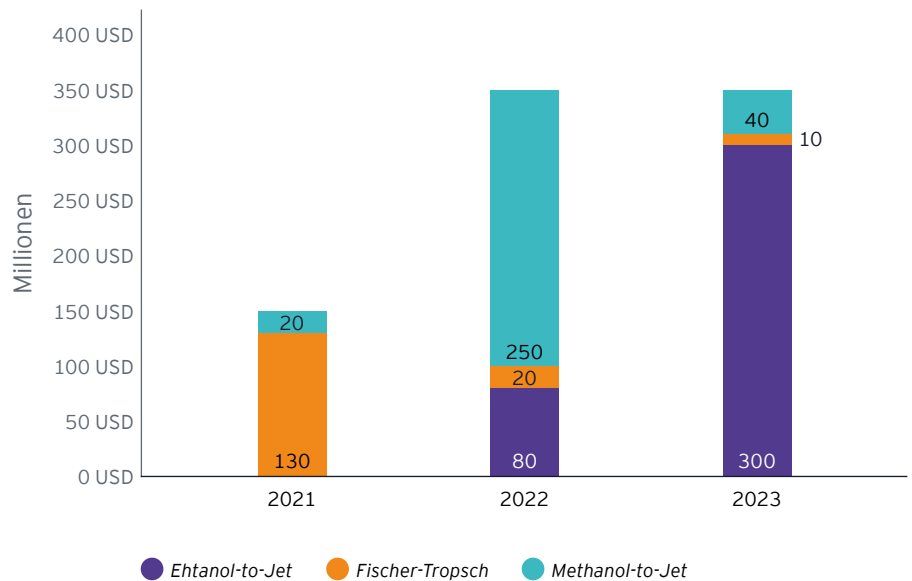
Venture Capital-Investitionen, differenziert nach SAF-Produktionsrouten, zeigen einen deutlichen Anstieg der Investitionen in die Ethanol-to-Jet-Projekte. Diese verzeichneten einen Anstieg um etwa 80 Mio. US-Dollar im Jahr 2022 auf fast 300 Mio. US-Dollar im Jahr 2023. Im Gegensatz dazu sind die FT- und Methanol-to-Jet Produktionswege von einer Abnahme an Venture-Kapital-Aktivitäten geprägt (siehe Abbildung 42).<sup>147</sup>

Laut Bloomberg belief sich das globale Finanzierungsvolumen von Climate-Tech-Unternehmen, das 2023 in Form von Risikokapital und Private Equity zur Verfügung gestellt wurde, auf 51 Mrd. US-Dollar. Dies entspricht einem Rückgang der Finanzierungsaktivitäten um 12 % im Vergleich zum Vorjahr. Das Finanzierungsvolumen für Climate-Tech-Start-ups zeigt eine deutliche Krisenresilienz in Bezug auf die Finanzierungsaktivitäten, im Gegensatz zum branchenunabhängigen Gesamtfinanzierungsvolumen, das im gleichen Zeitraum um insgesamt 27 % zurückging. Der größte Anteil der Gesamtfinanzierung im Climate-Tech-Umfeld ist dabei Unternehmen, die auf Geschäftsmodelle zur Senkung der Emissionen im Energie- und Transportsektor fokussiert sind, zuzurechnen. Trotz des nur marginalen Rückgangs des Finanzierungsvolumens durch Risikokapital im Climate-Tech-

**Abbildung 44**

Venture-Capital-Investitionen in SAF-Produktionsrouten (2021-2023)<sup>147</sup>

(Stand April 2024)



Umfeld ergeben sich Schwierigkeiten durch die Abnahme der traditionellen Börsengänge. Start-ups versuchen, mögliche Unterbewertungen ihrer Aktien durch IPOs zu vermeiden. Die Reduktion der Perspektiven eines Exits insbesondere in Form von IPOs erweist sich für Investoren, die beim Ausstieg aus ihren Investitionen Schwierigkeiten begegnen, als problematisch. Verbleiben Zinsen langfristig auf einem hohen Niveau, können Anleger Schwierigkeiten haben, Gewinne zu erzielen und ihre Portfolios erfolgreich zu verlassen. Die Batteriehersteller Northvolt und Envision AESC sowie der Energieversorger Redaptive führten in der Vergangenheit große Investitionsrunden durch, mit der Erwartung zukünftiger Börsengänge.<sup>148</sup>

In Bezug auf das Einwerben von Corporate Venture Capital können sich Start-ups auch zukünftig zunutze machen, dass zahlreiche Industriezweige an der Dekarbonisierung ihres Geschäftsmodells arbeiten. Dies wird bei Betrachtung der Risikokapitalaktivitäten dieser Unternehmen deutlich: So stellten unter anderem Accelor-Mittal und BASF LanzaTech Kapital im Rahmen einer Finanzierungsrunde mit einem kumulierten Volumen in Höhe

von 115 Mio. Euro (~ 120,75 Mio. US-Dollar) zur Verfügung.<sup>149</sup> Auch vonseiten konventioneller Kerosinproduzenten sind Bestrebungen erkennbar, Investitionen in SAF zu tätigen. So investierte Shell neben anderen Energieunternehmen in LanzaTech.<sup>150</sup>

Um den Geschäftsbereich nachhaltiger Kraftstoffe auszubauen, übernahm Shell zudem im Jahr 2022 den etablierten indonesischen Anbieter nachhaltiger Kraftstoffe EcoOils, der entsprechende Flugzeugkraftstoffe mittels HEFA-Verfahren aus Altölen produziert.<sup>151</sup> In Bezug auf die deutsche Start-up-Landschaft im SAF-Bereich ist unter anderem das Start-up INERATEC zu nennen, das im Jahr 2024 eine Finanzierung in Höhe von 129 Mio. US-Dollar durch verschiedene Venture Capital Funds, teils durch die Corporate Venture Capital Funds von Safran, Engie und Samsung, erhalten hat. INERATEC stellt Reaktoren zur Synthese flüssiger Kraftstoffe (sogenannter Synfuels) aus nichtfossilen Rohstoffen her. Seine patentierte Technologie und der eigene Produktionsprozess sollen eine hohe Skalierbarkeit und Effizienz ermöglichen.<sup>152, 153</sup>



All diese Partnerschaften, Investitionen und Akquisitionen der letzten Jahre tragen zur Schaffung eines aktiven Marktes für Wagniskapital bei. Dieser ist für die Entwicklung von SAF-Projekten in frühen Phasen und für Start-ups aus dem SAF-Bereich unentbehrlich.<sup>154</sup>

**Finanzierungen durch Banken** spielen bei der Finanzierung von SAF-Produktionskapazitäten eine zentrale Rolle, da die Finanzierung von Investitionen mittels Fremdkapital deutlich günstiger ist als diejenige mittels Eigenkapital. Im Gegensatz zu Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sind Banken gewillt, Kredite für Investitionen in Produktionsanlagen bereitzustellen, da technologische Risiken in Bezug auf den Produktionsprozess deutlich geringer sind und darüber hinaus die Option einer Verwertung der Produktionsanlage besteht.<sup>155</sup>

Eine Herausforderung besteht jedoch darin, dass Banken bei zu hohem Risiko bei der Kreditvergabe zurückhaltend sind. Da sie generell weniger Erfahrungen mit SAF-Projekten gesammelt haben, müssen sie sich auf Bonitätseinschätzungen verlassen, um das Kreditrisiko zu bewerten. Diese Informationen sind möglicherweise nicht in ausreichendem Umfang für Projekte im SAF-Bereich verfügbar. Öffentliche Institutionen wie Regierungen und multinationale Entwicklungsbanken können möglicherweise einen Teil dieses Risikos im Vorfeld abschätzen und somit Banken vor Risiken schützen und die Zinsen niedrig halten.<sup>136</sup>

Da die HEFA-Technologie in Bezug auf ihre Skalierung keine technologischen Risiken aufweist, kann der Ausbau der entsprechenden Produktionskapazität durch Fremdkapital von Banken finanziert werden. Mit zukünftigen technologischen Entwicklungen ist auch eine Ausweitung der Finanzierungsaktivitäten auf andere SAF-Produktionsprozesse zu erwarten. Dennoch spielen Banken auch bei der Entwicklung von Technologien, die noch keine ausreichende technologische Reife für eine Finanzierung durch Banken aufweisen, eine entscheidende Rolle: Sie können als Vermittler zwischen potenziellen Investoren und Unternehmen fungieren.<sup>155</sup>

Eine kommerzielle Bank mit vielfältigen Aktivitäten in SAF-Projekten ist die Bank of America, die bis 2030 die Produktion und Nutzung von 3,8 Mrd. Liter (3 Mio. Tonnen) SAF durch Mobilisierung von 2 Mrd. US-Dollar unterstützt.<sup>156</sup>

Im Februar 2024 unterzeichnete die Cathay United Bank Singapore einen Green Trade Loan mit dem Unternehmen Apeiron, das sich auf die Beschaffung von UCO für die Produktion von SAF spezialisiert hat.<sup>157</sup>

Des Weiteren investiert die Canada Infrastructure Bank 8,4 Mio. US-Dollar in das Unternehmen Azure, das bis 2027 den Start seiner SAF-Produktion plant. Dies ist ein Beispiel für die Unterstützung eines SAF-Projekts im FEED.<sup>158</sup>

Finanzierungsaktivitäten durch Entwicklungsbanken sind entscheidend, um insbesondere in Entwicklungsländern den Ausbau von SAF-Projekten zu fördern. Die Asian Development Bank unterstützt mit dem Green Climate Fund, dem weltweit größten Klimafonds, Entwicklungsländer bei der Umsetzung ihrer national festgelegten Beitragsziele. Im Zeitraum von 2020 bis 2023 mobilisierte der Fonds 10 Mrd. US-Dollar in über 100 Ländern.<sup>159</sup>

**IPO-Aktivitäten** sind eine weitere Möglichkeit zum Einwerben zusätzlichen Kapitals. Neben der Kapitalbeschaffung ermöglichen öffentliche Kapitalmärkte eine erhöhte Sichtbarkeit und Glaubwürdigkeit des Unternehmens, was wiederum die Marktpresenz steigert. Ein IPO ermöglicht zusätzlich eine Exit-Option für Investoren und damit die Mobilisierung von Kapital für neue Projekte.

Öffentlich gehandelte SAF-Optionen können zukünftig an Bedeutung gewinnen. In der Vergangenheit haben Unternehmen wie Gevo und LanzaTech diese Finanzierungsmöglichkeit genutzt. LanzaTech hat seinen IPO im Jahr 2022 mittels einer SPAC-Konstruktion (Special Purpose Acquisition Company) erfolgreich vollzogen. Dabei sammelte das Unternehmen bei einer Bewertung von etwa 2,2 Mrd. US-Dollar rund 275 Mio. US-Dollar ein. Dieser Betrag setzt sich aus einem Investment in Höhe von 125 Mio. US-Dollar durch verschiedene Investoren, darunter BASF und ArcelorMittal, sowie 150 Mio. US-Dollar zusammen, die das Akquisitionsvehikel durch seinen IPO generierte.<sup>160</sup>

Es ist jedoch eine deutlich negative Entwicklung der Aktienkurse bei nicht etablierten Unternehmen wie beispielsweise Gevo und LanzaTech zu erkennen (siehe Abbildung 43). Diese Entwicklung resultiert im Falle von Gevo im Wesentlichen aus Verzögerungen bei der Produktionsausweitung und der geringen Aussagekraft der derzeit noch niedrigen Umsätze für Prognosen zur zukünftigen Geschäftsentwicklung.<sup>161</sup> Im Vergleich zu Gevo eröffnete LanzaTech die weltweit erste ATJ-SAF-Produktionsanlage im Januar 2024 in den USA. Die Anlage soll bis zu 10 Mio. Gallonen SAF und nachhaltigen Diesel pro Jahr produzieren.<sup>162</sup>

Ein weiteres Beispiel ist das Unternehmen NEXT Renewable Fuels Inc., das trotz eines gescheiterten Börsengangs im Jahr 2023 einen erneuten IPO plant. Ursache für den Misserfolg des zuvor geplanten IPO mit einem SPAC war der Abschwung des SPAC-Marktes.<sup>163</sup>

Bei Neste ist eine negative Entwicklung des Aktienkurses zu beobachten, die sich im Wesentlichen mit den im Feb-

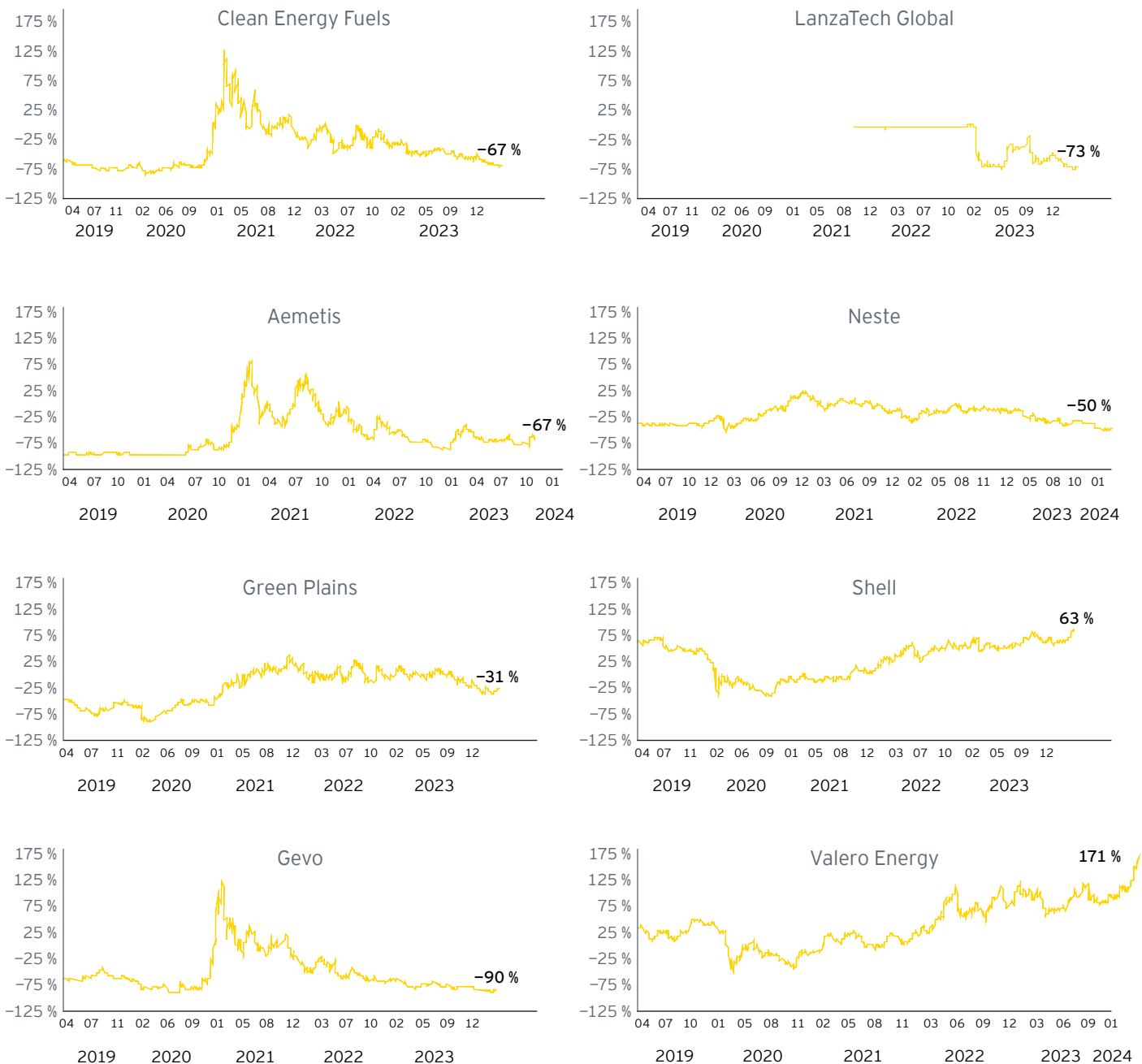
ruar 2024 veröffentlichten Gewinnmargen erklären lässt, die deutlich geringer als erwartet ausfallen. Für das Jahr 2024 erwartet das Unternehmen ein Verkaufsvolumen von nachhaltigen Kraftstoffen in Höhe von 4,4 Mio. Tonnen, mit dessen Verkauf eine Marge in Höhe von 600 bis 800 US-Dollar pro Tonne erzielt werden soll. Diese für das Jahr 2024 anvisierte Marge liegt deutlich unterhalb derjenigen des ver-

gangenen Jahres in Höhe von 863 US-Dollar pro Tonne. Ursachen dafür sind eine deutliche Zunahme der Konkurrenz und eine Reduzierung von Steuervorteilen bei der Verwendung nachhaltiger Kraftstoffe. Neste plant, bis Mitte der 2030er-Jahre sämtliche bestehenden Raffinerien in Anlagen zur Produktion von nachhaltigen Kraftstoffen umzuwandeln.<sup>164</sup>

## Abbildung 45

Verlauf der Kurse ausgewählter Unternehmen in der SAF-Produktion

(Stand April 2024)



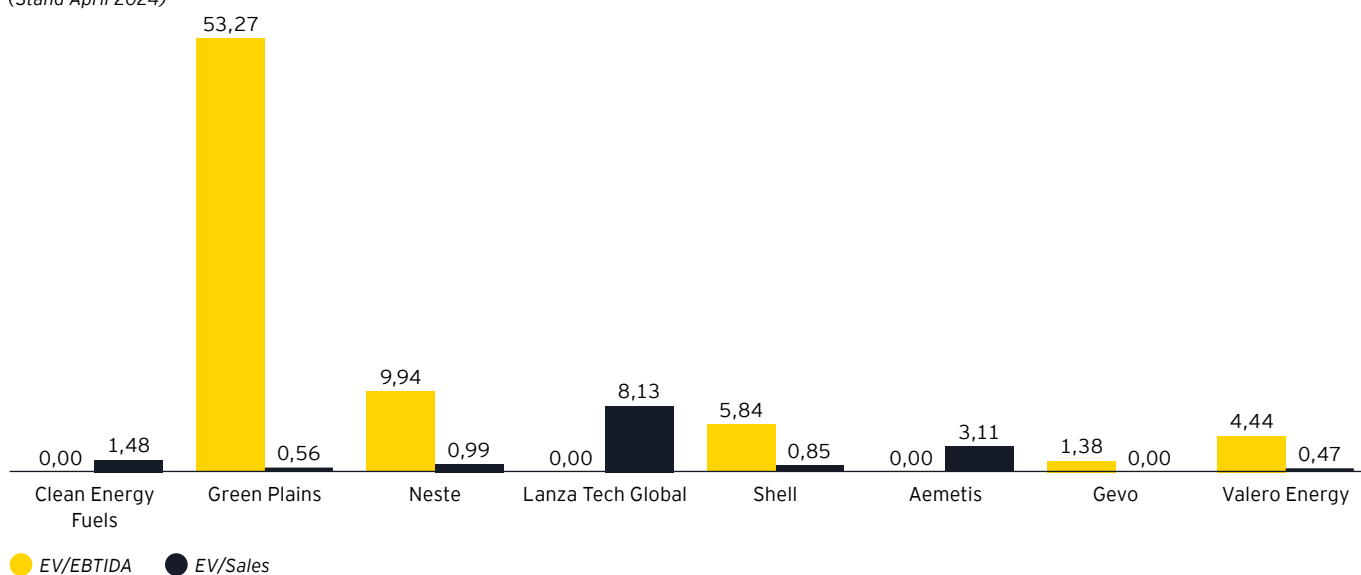
**Tabelle 11**Ausgewählte Finanzkennzahlen in Mio. US-Dollar für SAF<sup>165</sup>

(Stand April 2024)

|                    | Umsatz* | EBITDA* | Nettoeinkommen* | Marktkapitalisierung** | Gesamter Unternehmenswert** |
|--------------------|---------|---------|-----------------|------------------------|-----------------------------|
| Clean Energy Fuels | 425     | (33)    | (100)           | 538                    | 656                         |
| Green Plains       | 3.296   | 35      | (93)            | 1.303                  | 1.779                       |
| Neste              | 22.926  | 2.286   | 1.433           | 17.277                 | 20.251                      |
| Lanza Tech Global  | 63      | (98)    | (134)           | 485                    | 412                         |
| Shell              | 254.623 | 37.168  | 15.568          | 181.652                | 214.696                     |
| Aemetis            | 187     | (30)    | (46)            | 183                    | 610                         |
| Gevo               | 17      | (63)    | (66)            | 151                    | (49)                        |
| Valero Energy      | 139.001 | 14.659  | 8.835           | 54.651                 | 63.398                      |

**Abbildung 46**Geschäftswert (EV)/EBITDA und EV/Sales - Multiplikatoren für das Fiskaljahr bis 31. Dezember 2023 (12 Monate)<sup>165</sup>

(Stand April 2024)



Die **Private-Equity-Finanzierung** spielt mit einer zunehmenden Etablierung des SAF-Herstellungsprozesses eine immer größere Rolle. Eine deutliche Ausweitung der Involvierung von Private-Equity-Investoren in die Finanzierung von SAF-Produzenten ist zu erwarten.

Ein Beispiel für eine Private-Equity-Investition im SAF-Umfeld ist die Be-

teiligung von Macquarie an SkyNRG im Jahr 2023, bei der 175 Mio. Euro (~ 189 Mio. US-Dollar) investiert wurden. SkyNRG plant bis 2030 den Bau einer SAF-Produktionsanlage in Europa und den USA in Kooperation mit verschiedenen Partnern wie KLM und Boeing. Das Unternehmen hat bereits langfristige Lieferverträge über ein Gesamtvolumen von 4 Mrd. Euro (~ 4,32 Mrd. US-Dollar) abgeschlossen. Es wurde

bereits vor 14 Jahren gegründet und produzierte SAF für den ersten SAF-betriebenen Flug im Jahr 2011. Dies unterstreicht die langwierigen Entwicklungsprozesse, mit denen Start-ups im SAF-Umfeld konfrontiert werden, sowie die Bedeutung signifikanter kommerzieller Erfolge, um Private-Equity-Investoren gewinnen zu können. Macquarie hat bereits in der Vergangenheit Investitionen in aufstrebende, innovative

\* Zeitraum Fiskaljahr bis 31. Dezember 2023 (12 Monate)

\*\* ungefährender Zeitraum April bis Mai 2024



Technologien im grünen Bereich getätigt. Dies verdeutlicht die zentrale Bedeutung von Private-Equity-Investoren, die auf Investitionen im Energie- und Infrastrukturmilieu spezialisiert sind, für die zukünftige Abdeckung des notwendigen Investitionsbedarfs. SkyNRG hat zusätzlich die Plattform „Fly on SAF“ entwickelt, die es Fluggästen ermöglicht, die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihres Fluges durch den Erwerb einer entsprechend berechneten Menge SAF zu kompensieren.<sup>166</sup>

Darüber hinaus wurde im Jahr 2024 eine Private-Equity-Finanzierung des Unternehmens Velocys durch Wachstumsinvestoren wie Carbon Direct Capital, Lightrock, GenZero und Kibo Investments im Umfang von 40 Mio. US-Dollar angekündigt. Velocys ist ein Unternehmen, das seit 20 Jahren an der Entwicklung von SAF-Technologien arbeitet, wobei es seinen Kunden Technologien zur SAF-Herstellung zur Verfügung stellt.<sup>167</sup> Diese Investitionen dienen der Beschleunigung der Auslieferung von Velocys-Technologien an Kundenprojekte, dem Ausbau der technologischen Führungsposition des Unternehmens, der Skalierung der Produktionskapazitäten sowie der Erweiterung der Expertise des Velocys-Teams.<sup>168</sup>

Gleichzeitig stellen Sovereign Wealth Funds (Staatsfonds) eine interessante Finanzierungsquelle für Unternehmen im SAF-Umfeld dar, wobei die Anzahl Transaktionen noch nicht signifikant ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bankfähigkeit von SAF-Projekten maßgeblich davon abhängt, dass es gelingt, gleichgesinnte Investoren mit einem starken Engagement für nachhaltige Luftfahrt zusammenzubringen. Durch die Bündelung von finanziellen Ressourcen und Expertise können SAF-Projekte effektiv von der Entwicklungsphase in die Phase der industriellen Skalierung überführt werden.<sup>155</sup>

## Aktuelle Herausforderungen bei der SAF-Produktion umfassen technologische Schwierigkeiten, Finanzierungsfragen und die Einhaltung der von der EU festgelegten Kriterien.

**Bernhard Dietrich**, Leiter CENA Hessen, Hessen Trade & Invest GmbH

### 6.3.2 Skalierbarkeit

SAF hat großes Potenzial, die Zukunft der Luftfahrt zu gestalten, vorausgesetzt eine großflächige und kostengünstige Anwendung kann gewährleistet werden.<sup>169</sup> Die größte Herausforderung, um dieses Potenzial ausschöpfen zu können, liegt in der Skalierbarkeit.<sup>169</sup> Diese gilt als erfolgskritischer Faktor für die Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors und ist unabdingbar, um die prognostizierten Versorgungslücken (siehe Kapitel 4.3) zu schließen. Um die SAF-Nachfrage zu decken, müssen die Produktionskapazitäten deutlich stärker ausgebaut werden als laut bisherigen Projektankündigungen geplant.<sup>56</sup>

Eine erfolgreiche Skalierung der SAF-Produktion und -Verwendung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Es lassen sich fünf Bereiche definieren, die die Skalierbarkeit maßgeblich beeinflussen:

- **Technologie:** Noch sind die Produktionstechnologien für SAF nicht vollständig ausgereift. Insbesondere die PtL-Technologie muss weiterentwickelt werden, damit auch die Herstellung von E-SAF auf industrieller Ebene möglich ist. Diese Weiterentwicklung wird größere Produktionsmengen nicht nur überhaupt erst ermöglichen, sondern sie durch Kostensenkungen auch wirtschaftlich nachhaltiger machen.<sup>56</sup> Hier kommt es auf schnelle Fortschritte

an. Ein unmittelbares Handeln ist aufgrund der langen Planungs- und Entwicklungszeiten von SAF-Projekten essenziell.<sup>97</sup>

- **Infrastruktur:** Für einen effizienten Hochlauf ist es notwendig, spezialisierte Infrastruktur für den Handel und Transport von SAF zwischen den Hauptproduzenten und den Abnehmern zu errichten. Diese sogenannten Net-Zero-Korridore sollten Gebiete, die eine hohe Verfügbarkeit von Rohstoffen bieten, mit solchen, die zur Produktion besonders geeignet sind, und mit den Abnehmern verbinden.<sup>97</sup>
- **Wirtschaftlichkeit:** Dies betrifft sowohl die Produktion als auch die Verwendung von SAF. Beides muss wirtschaftlich sein, um langfristig eine Durchsetzung zu ermöglichen. Auf der Abnehmerseite muss die Kostendifferenz zwischen SAF und herkömmlichen Kerosin geschlossen werden, das „Green Premium“ muss abgeschafft werden. Auf der Produktionsseite muss Profitabilität sichergestellt werden. Das heißt allerdings nicht nur, dass die Herstellung von SAF kein Verlustgeschäft sein darf; vielmehr muss sie darüber hinaus auch mindestens genauso profitabel sein wie die Produktion anderer erneuerbarer Kraftstoffe, die in denselben Anlagen möglich ist. Nur so kann die maximale Produktionskapazität auch ausgeschöpft werden.<sup>56</sup>



■ **Regulatorik:** Die günstigen Preise für fossile Kraftstoffe machen es unwahrscheinlich, dass Marktdynamiken allein für eine ausreichende Attraktivität der SAF-Produktion sorgen werden. Aus diesem Grund braucht es regulatorische Anreize, die entweder fossile Kraftstoffe weniger attraktiv (z. B. Steuern oder Strafzahlungen) oder SAF attraktiver machen beziehungsweise die SAF-Nutzung sogar vorschreiben (z. B. die SAF-Quoten in der EU). Außerdem kann die Schaffung neuer staatlicher Finanzierungsmöglichkeiten die SAF-Produktion ankurbeln, indem für eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit gesorgt wird.<sup>97</sup> Es sind sowohl nationale als auch länderübergreifende Regularien nötig, um dem internationalen Charakter der Luftfahrt gerecht zu werden. Eine internationale Abstimmung ist notwendig, um eine Verlagerung der Geschäftsaktivitäten von Fluggesellschaften in Länder mit weniger strikten Vorgaben (das sogenannte Carbon Leakage) zu verhindern.<sup>56</sup>

Ein besonders wichtiger regulatorischer Aspekt ist die Standardisierung von „Book & Claim“-Systemen: Um die zuverlässige und eindeutige Anrechnung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch SAF-Nutzung sicherzustellen, sind einheitliche Systeme notwendig. Dies gilt insbesondere für die in Kapitel 3.3 erläuterten Lieferverträge, bei denen in Abwesenheit geeigneter Infrastruktur eine Partei SAF käuflich erwirbt und auf die eigene Bilanz anrechnet, aber eine andere den Kraftstoff tatsächlich physisch tankt.<sup>97</sup>

“

Ein regulatorischer Rahmen ist essenziell für die Investitionssicherheit. Die Politik muss zusätzliche Finanzierungsinstrumente schaffen, um die durch technische, regulatorische und Marktrisiken entstehende Finanzierungslücke zu schließen. Bisher kann der Investor diese Kosten nicht allein tragen.

Dr. Mark Misselhorn, Chief Executive Officer, Caphenia GmbH

Regularien spielen auch eine wichtige Rolle, um die anderen Voraussetzungen zur Skalierung von SAF zu schaffen und eine verstärkte Verwendung zu forcieren.<sup>56</sup> Ein Beispiel hierfür sind die Vorgaben und Mandate in der ReFuelEU-Regulierung, die die Verwendung eines bestimmten SAF-Anteils auf Flügen vorschreiben. Auf der anderen Seite gibt es auch bereits politische Mittel, die Anreize zur Produktion von SAF schaffen. Hierzu gehören beispielsweise Steuererleichterungen, die mit dem Sustainable Skies Act in den USA eingeführt wurden und die die Wirtschaftlichkeit der SAF-Produktion erhöhen. Eine stetige, vorausschauende und berechenbare Unterstützung durch die Politik ermöglicht langfristige Planungssicherheit für Produzenten und Abnehmer, unter anderem indem eine langfristig hohe Nachfrage gesichert wird.<sup>97</sup>

■ **Nachhaltigkeit:** Auch wenn seine Verwendung immer einen Beitrag zur Dekarbonisierung leistet, so ist SAF dennoch nicht automatisch in jeder Hinsicht nachhaltig. Das liegt daran, dass es neben dem Klimawandel auch andere wichtige Aspekte gibt, die zu berücksichtigen sind (siehe Kapitel 7). Hierzu gehören bei SAF insbesondere Biodiversität und Landnutzung sowie die sozialen Auswirkungen der Produktion. Insbesondere ist es wichtig, dass für Bio-SAF ausreichend nachhaltige Rohstoffe wie beispielsweise Abfallmasse anstelle lebensmittelgeeigneter Pflanzen zur Verfügung stehen und genutzt werden. Bei E-SAF ist die Herkunft des benötigten CO<sub>2</sub> ebenso von Bedeutung wie die Nutzung ausschließlich erneuerbarer Energie und von grünem H<sub>2</sub>. Um hier Glaubwürdigkeit und Transparenz zu schaffen, spielen Zertifikate eine wichtige Rolle.<sup>56</sup>

# Nachhaltig

Wie insbesondere der Aspekt der Regulatorik bereits gezeigt hat, überschneiden sich diese fünf Bereiche und hängen teilweise stark voneinander ab. Aus diesem Grund ist ein ganzheitlicher Ansatz notwendig, um SAF erfolgreich zu skalieren.<sup>169, 56</sup> Bei einem ganzheitlichen Ansatz kann unter anderem eine Kollaboration der verschiedenen Beteiligten (Flughäfen, Fluggesellschaften, Produzenten usw.), wie man sie zum Beispiel in Form der zuvor diskutierten Lieferverträge oder der bereits gegründeten Allianzen sehen kann, Unterstützung leisten.<sup>56, 169</sup> Dies muss in Zukunft noch weiter fokussiert werden, um Interessen zu bündeln und langfristige Planungssicherheit zu gewährleisten. Außerdem sind signifikante Investitionen notwendig, um die oben genannten Voraussetzungen für eine Skalierung zu erfüllen.<sup>97</sup> Insbesondere die Forschung und die Weiterentwicklung von Produktionstechnologien sollten hierbei fokussiert werden. Laut WEF ist insbesondere die Schaffung weitreichender Forschungs- und Entwicklungsprogramme essenziell, um technologischen Fortschritt zu ermöglichen.<sup>170</sup>

Unter Berücksichtigung all dieser Voraussetzungen halten Experten eine ausreichende Skalierung, um die Dekarbonisierungsziele zu erreichen, für möglich, sofern alle nur möglichen Maßnahmen getroffen werden. Insbesondere die regulatorische Unterstützung wird über Erfolg und Misserfolg entscheiden.<sup>169</sup> Bei der Beurteilung des Skalierungspotenzials muss allerdings zwischen E- und Bio-SAF differenziert werden. Kurz- und mittelfristig liegt das größere Potenzial für eine Skalierung bei Bio-SAF. Dies liegt an der fortgeschritteneren technologischen Ausreifung und der derzeit guten Verfügbarkeit von Biomasse als Rohstoff. Außerdem weist Bio-SAF unter anderem deswegen verglichen mit E-SAF einen niedrigeren Preis auf.

Langfristig allerdings hat – vorausgesetzt es werden die Herausforderungen hinsichtlich des nötigen technologischen Fortschritts überwunden – E-SAF das größere Potenzial für eine Skalierung auf die für die Luftfahrt benötigten Mengen, bei gleichzeitig maximiertem Dekarbonisierungspotenzial. Zu diesen Herausforderungen gehören die Verfügbarkeit von ausreichend grünem H<sub>2</sub> zu Preisen, die eine wirtschaftliche Produktion ermöglichen, und ausreichende Speichermöglichkeiten für erneuerbare Energien. Außerdem ist die Entwicklung von DAC-Technologie und anderen nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Quellen notwendig, um eine Gewinnung von CO<sub>2</sub> auf industriellem Niveau zu ermöglichen. Sind all diese Aspekte gegeben, hat E-SAF aufgrund der nahezu unbegrenzten Verfügbarkeit der für die Produktion benötigten Stoffe ein immenses Skalierungspotenzial.

zual.<sup>171</sup> E-SAF erfordert außerdem in der Herstellung deutlich weniger Landnutzung, weswegen es auch, abgesehen vom Klimaeffekt, in der Regel nachhaltiger ist als Bio-SAF.<sup>172</sup> Dies gilt logischerweise nur unter der Bedingung der Verwendung erneuerbarer Energien und von grünem H<sub>2</sub>. Das deutsche Unternehmen atmosfair, das in einer PtL-Anlage im Emsland E-SAF produziert, geht sogar so weit zu sagen, dass E-SAF die einzige langfristig nachhaltige Kraftstoffoption für den Flugverkehr ist. Dies begründet das Unternehmen mit dem zwangsläufig sehr großen Biomassebedarf bei einer Skalierung von Bio-SAF, der substanzielle landwirtschaftliche Anbauflächen benötigt. Ein Interessenkonflikt mit der Lebensmittelversorgung wäre hier bei ausreichender Produktion zur Deckung des globalen Gesamtbedarfs langfristig unvermeidbar.<sup>171</sup>

“

**Obwohl Biomasse heute verfügbar ist, wird ihre Verfügbarkeit in Zukunft begrenzt sein. Es ist unwahrscheinlich, dass das Angebot ausreichen wird, um die steigende Nachfrage zu decken. Zudem wird biomassebasiertes SAF auch in Zukunft möglicherweise nicht vollständig CO<sub>2</sub>-neutral sein.**

**Bernhard Dietrich**, Leiter CENA Hessen | Hessen Trade & Invest GmbH

keit





# ESG-Auswirkungen auf globale SAF-Projekte





## Einleitung und Zusammenfassung des Kapitels

Ein signifikanter Treiber für den Einsatz von SAF ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Dabei ist entscheidend, dass der Einsatz und die Produktion von nachhaltigen Kraftstoffen einen ganzheitlichen Ansatz berücksichtigen, der eine ökonomische Tragfähigkeit wie auch umwelttechnische und soziale Verträglichkeit integriert. Der Einsatz von SAF birgt neben weitreichenden Chancen und Potenzialen für Gesellschaft, Umwelt und Regulatorik auch Risiken, die gesteuert werden müssen. Das Management umweltrelevanter, sozialer und ökonomischer sowie regulatorischer Auswirkungen ist von großer Bedeutung für die erfolgreiche und nachhaltige SAF-Entwicklung und Produktion.<sup>173</sup> Die Notwendigkeit einer effektiven Steuerung wird durch die Problematik von Kompromissen zwischen verschiedenen ESG-Aspekten bekräftigt.<sup>174</sup>

Dies erfordert die Entwicklung innovativer und fundierter Rahmenbedingungen, die eine nachhaltige Projektentwicklung ermöglichen und das

Ausschöpfen von Potenzialen und Chancen von SAF-Projekten fördern.

Im Bereich Umwelt sollten generell Maßnahmen zur Minimierung des Energieverbrauchs, der Wassernutzung und des Flächenbedarfs in Betracht gezogen werden. Speziell für Bio-SAF sind nachhaltige Anbaumethoden, die Auswahl geeigneter Anbauflächen, die Optimierung des Abfallmanagements und die Diversifizierung der Rohstoffe wichtige Themen. E-SAF erfordert die Schaffung von Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Materialnutzung, den Bau von Meerwasserentsalzungsanlagen und die Nutzung nachhaltiger CO<sub>2</sub>-Quellen.

Aus sozialer Perspektive sind die Schaffung von Arbeitsplätzen und die Integration der lokalen Bevölkerung in Entscheidungsprozesse relevant. Bio-SAF erfordert zusätzlich Maßnahmen zur Gesundheitssicherung, zur Gewährleistung der Nahrungsmittelversorgung sowie im Bereich Arbeitsschutz und Sicherheit. E-SAF kann durch geeignete Rahmenbedingungen zu einer verbesserten Stromversorgung der lokalen Bevölkerung beitragen.

Regulatorik und Governance umfassen die Schaffung finanzieller Fördermöglich-

lichkeiten, eines einheitlichen regulatorischen Rahmens und der Berücksichtigung von Stetigkeit sowie Flexibilität. Die Bio-SAF-Industrie erfordert konkrete Vorgaben zur Nutzung der Biomasse und zur Vermeidung von Konkurrenz mit der Lebensmittelindustrie. Der E-SAF-Sektor benötigt regulatorische Unterstützung für die Produktion und Entwicklung der PtL-Technologie, eine Regulierung von Kohlenstoffquellen und großflächige Infrastrukturmaßnahmen. Eine einheitliche CO<sub>2</sub>-Bilanzierung ist zusätzlich von großer Bedeutung.

Dieses Kapitel widmet sich zunächst den Herausforderungen und Risiken, die mit der Produktion, der Nutzung und der Skalierung von SAF einhergehen und fokussiert sich dann auf den potenziellen Nutzen für die Nachhaltigkeit im Bereich Umwelt, Gesellschaft und Regulatorik. Anschließend werden einige beispielhafte Rahmenbedingungen diskutiert, die für die erfolgreiche Implementierung nachhaltiger SAF-Projekte entscheidend sind. Dabei erfolgt eine differenzierte Betrachtung von Bio- und E-SAF, wobei einige Aspekte auf beide Arten zutreffen und daher gemeinsam analysiert werden.



## 7.1 Überblick über Herausforderungen, Risiken und Chancen mit Fokus auf ESG

Bei der Analyse der Auswirkungen von SAF auf die ESG-Kriterien werden die spezifischen Einflüsse auf Umwelt, soziale Aspekte und Governance untersucht.



Im **Umweltbereich (E)** steht insbesondere der Einfluss von SAF auf das Klima, die Biodiversität und die Ökosysteme im Vordergrund. Dabei ergeben sich Möglichkeiten zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zur Optimierung des Abfallmanagements. Risiken, die mit der SAF-Skalierung einhergehen können, sind Landnutzungsveränderungen, die oftmals negative ökologische Auswirkungen haben. Zudem können spezifische Produktionsprozesse und Bedingungen wie der Betrieb von Meerwasserentsalzungsanlagen (E-SAF), der Bedarf an seltenen Metallen (E-SAF) oder die Energieintensität (Bio-SAF) zusätzliche Umweltbelastungen darstellen.

Im **sozialen Bereich (S)** wird der Einfluss von SAF auf die lokale Gesellschaft am Produktionsstandort beleuchtet. Es können sich Chancen wie die Schaffung neuer Arbeitsplätze, die Förderung der Wirtschaftsentwicklung und Verbesserungen in der Nahrungsmittelversorgung (Bio-SAF), etwa durch die zusätzliche Erzeugung von Pflanzenproteinen als Nebenprodukt, ergeben. Herausforderungen umfassen die angemessene Integration betroffener Akteure, den Verlust von Arbeitsplätzen und die Entstehung von Landnutzungskonflikten.

Im Bereich **Governance (G)** ist die Entwicklung von Regularien für Landmanagement (Bio-SAF), Reststoffverwertung (Bio-SAF), Abfallwirtschaft (Bio-SAF) und erneuerbare Energien (E-SAF) von Bedeutung. Dabei ist zu beachten, dass Abfälle und Reststoffe oftmals unterschiedlichen Regulierungen unterliegen, was eine Herausforderung darstellen kann. Die Etablierung langfristiger, international gültiger und einheitlicher Zertifizierungsmaßnahmen und Nachhaltigkeitskriterien stellt eine wesentliche Herausforderung dar. Regulatorische Instrumente bieten allerdings die Möglichkeit, die Produktion und Nutzung von SAF effektiv zu steuern und Risiken und Gefahren zu minimieren.

# ESG

**Tabelle 12**

Überblick über Herausforderungen und Potenziale für Bio- und E-SAF gemäß ESG-Kriterien

(Quelle: EY)

| Auswirkungen<br>ESG | SAF-Art | Herausforderungen und Risiken                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Potenziale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Umwelt (E)          | Bio-SAF | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Produktion von Bio-SAF ist ein <b>energieintensiver Prozess</b>. Er verbraucht viel Energie während der Biomasseernte und kann den Kohlenstoff-Fußabdruck der Kraftstoffe beeinträchtigen. Die Umwandlung der Biomasse zu Bio-SAF, einschließlich Fermentation und Destillation, erfordert ebenfalls einen hohen Energieeinsatz. Zusätzlich benötigt der Transport der Biomasse, abhängig von der Distanz zwischen Weiterverarbeitungsanlage und Anbaufläche, Energie.<sup>175</sup></li> <li>Bio-SAF hat generell positive Klimaauswirkungen durch die CO<sub>2</sub>-Speicherung während des Biomassewachstums. Der Nettoeffekt der Kohlenstoffbindung hängt jedoch von einer nachhaltigen Anbauweise ab. <b>Landnutzungsveränderungen</b> können <b>Treibhausgasemissionen</b> aus Boden und Vegetation freisetzen, was die positive CO<sub>2</sub>-Bindung ausgleichen kann. Biomassekultivierung für Bio-SAF kann Umweltbelastungen wie Bodendegradation, Entwaldung und Verlust von Biodiversitätshabitaten verursachen.<sup>175</sup></li> <li>Die Kultivierung von Biomassepflanzen ist von <b>Wasserintensität</b> geprägt und kann in vulnerablen Regionen zu Wasserstress und einer Verschlechterung der Wasserqualität durch Abfluss von Düngemitteln und Pestiziden führen. Ein effektives Wassermanagement ist erforderlich, um die Auswirkungen auf Wasserquellen und aquatische Biodiversität zu minimieren. Dies umfasst eine effiziente Wassernutzung, den Einsatz wassersparender Bewässerungssysteme und den Anbau von Pflanzen mit geringem Wasserbedarf.<sup>175</sup></li> <li>Der Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden beim Biomasseanbau führt zu Nährstoffverschmutzung und beeinträchtigt die <b>Biodiversität und Bodengesundheit</b>. Monokulturen verursachen Bodenverarmung und eine erhöhte Abhängigkeit von landwirtschaftlichen Chemikalien. Eine Verringerung dieser Auswirkungen ist durch nachhaltige Anbaumethoden wie den Einsatz von Zwischenfrüchten, Fruchtfolge und den Anbau von anspruchsloseren Pflanzenarten, die das ökologische Gleichgewicht wahren, möglich.</li> <li>Ein weiteres Risiko des Biomasseanbaus ist die <b>Ausbreitung invasiver, nicht heimischer Arten</b>. Pflanzen, die für die Biomasseproduktion geeignet sind, zeichnen sich oft durch hohe Produktivität, geringen Input und breite Umwelttoleranz aus. Sie können sich im natürlichen Ökosystem ausbreiten, Ökosystemdienstleistungen beeinträchtigen und heimische Arten verdrängen, was Folgen für das ökologische Gleichgewicht und die Biodiversität hat. Die Kontrolle invasiver Arten erfordert erhebliche finanzielle Mittel.<sup>174</sup></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bio-SAF hat durch sein Potenzial der Reduktion von Flugtreibstoffemissionen einen <b>positiven Einfluss auf die Klimabilanz</b>. Die NASA untersuchte im Jahr 2017 die Auswirkung eines zu 50 % gemischten Bio-SAF auf den Emissionsausstoß und die Bildung von Kondensstreifen. Kondensstreifen können sich zu Zirruswolken entwickeln und natürliche Wetterprozesse negativ beeinträchtigen. Es wird angenommen, dass Kondensstreifen sogar einen höheren Einfluss auf die Atmosphäre haben als die CO<sub>2</sub>-Emissionen seit Beginn der Luftfahrt. Die Analyse zeigte eine Reduktion der Partikelemissionen um 50-70 %.<sup>176</sup> Für ein MJ Bio-SAF auf der Basis von Camelina-Öl (HEFA) fallen 44-47 g CO<sub>2</sub>eq an (verglichen mit 78,3 g/CO<sub>2</sub> je MJ herkömmlichen Kerosins<sup>177</sup>).</li> <li>Die Skalierung von Bio-SAF hat das Potenzial, die Umweltbelastung durch <b>Reststoffverwertung</b> zu verringern. Üblicherweise werden Abfälle auf Mülldeponien entsorgt, was zur Umweltschädigung beiträgt, sodass eine Konvertierung von Teilen der Abfälle zu Bio-SAF von Interesse ist.<sup>178</sup> Darüber hinaus bietet die <b>Nutzung von Abfällen und Reststoffen aus Biomasse</b> den Vorteil, dass weniger Landflächen für Mülldeponien oder Anbauflächen von Biomasse benötigt werden. Die Bio-SAF-Produktion trägt somit zu einem umweltfreundlichen Abfallmanagement und zur Kreislaufwirtschaft bei.<sup>179</sup> Der Abbau von Kunststoff dauert viele Hundert Jahre und Entsorgungsmethoden wie Verbrennung oder Deponierung verschmutzen die Umwelt. Durch thermische Verfahren könnten Kunststoffe zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt und zur Kraftstoffproduktion genutzt werden. Für dieses Verfahren sind allerdings zunehmende Entwicklung und Forschung sowie staatliche Unterstützung notwendig.<sup>180</sup></li> </ul> |
|                     | E-SAF   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Angesichts der Tatsache, dass Strom aus Bestandsnetzen oft auf einem hohen Anteil fossiler Energieträger basiert, ist er zur E-SAF-Produktion vielerorts ungeeignet. Daher ist ein Ausbau der erneuerbaren Energien für die E-SAF-Produktion unerlässlich.<sup>75</sup> Die Herausforderung der <b>Verfügbarkeit erneuerbarer Energie</b> ergibt sich aus dem steigenden Bedarf an erneuerbaren Energien in vielen Sektoren. Das WEF hebt hervor, dass die H<sub>2</sub>-Produktion und die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien aufgrund von Phänomenen wie verringerten Windgeschwindigkeiten weltweit, Wasserknappheit in vielen Regionen und der Bedrohung von Wasserkraft durch Dürren nicht gesichert sind.<sup>181</sup> Das Risiko der mangelnden Verfügbarkeit grüner Energie könnte zu einem Rückgriff auf traditionelle, fossile Energiequellen führen.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wie auch Bio-SAF leisten E-SAF einen Beitrag zur <b>Reduktion der Treibhausgasemissionen</b>. Die Nutzung von E-SAF ermöglicht es, das enorme Potenzial erneuerbarer Elektrizität durch die Nutzung von Quellen wie Sonne und Wind zu erschließen. In Kombination mit einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Quelle wie DAC bietet diese Technologie eine nachhaltige Lösung für den Flugverkehr.<sup>182</sup> E-Kraftstoffe haben generell eine sehr geringe Klimawirkung, auch wenn sie aufgrund der nicht zu vermeidenden Restemissionen durch den Bau etwa von Windkraft- und Photovoltaikanlagen, aber auch durch Transport und Distribution nicht vollständig klimaneutral sind.<sup>75</sup> Die Gesamtemissionen für die Produktion je MJ Kraftstoff liegen bei 5-10 g CO<sub>2</sub>eq.<sup>182</sup> Klassisches Kerosin hat einen Ausstoß von 78,3 g/CO<sub>2</sub> je MJ.<sup>177</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

| Auswirkungen<br>ESG         | SAF-Art | Herausforderungen und Risiken                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Potenziele                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Umwelt (E)</b>           | E-SAF   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Ausbau von E-SAF kann einen „<b>Lock-in-Effekt</b>“ haben, der die Ausschöpfung des Umweltpotenzials von SAF verhindert. Durch die Nutzung von industriellem CO<sub>2</sub> können eine Weiterentwicklung von Technologien (wie z. B. DAC) und die Dekarbonisierung von Sektoren gehemmt werden. Zusätzlich kann die Nutzung von E-SAF den Druck zur Weiterentwicklung innovativer Lösungen zur Entwicklung von Flugkonzepten, die keine kohlenstoffbasierten Flugzeugkraftstoffe nutzen, verringern.<sup>182</sup></li> <li>Für den Prozess der Elektrolyse werden Elektroden benötigt, die aus <b>Metallen wie Platin oder Iridium</b> bestehen. Diese Materialien sind selten und es gibt nur wenige Abbaustandorte. Auch das Recycling dieser Metalle wird bislang nur in geringem Maße betrieben. Die Förderung einer zirkulären Rohstoffnutzung und eine weitere Forschung zur Verringerung des Einsatzes dieser Materialien sind erforderlich, um Umweltschäden zu minimieren.</li> <li>Zur Produktion von einem Liter E-SAF (0,0008 Tonnen) werden 3,6 Liter Wasser in Trinkwasserqualität benötigt. Vor allem in Gebieten, die aufgrund ihres Solarenergiepotenzials für die Produktion erneuerbarer Energien attraktiv sind, ist das Wasserangebot gering. Somit muss auf <b>Meerwasserentsalzungsanlagen</b> zurückgegriffen werden, die wiederum durch erneuerbare Energien betrieben werden müssen.<sup>75</sup> Der Energieverbrauch von Meerwasserentsalzungsanlagen ist sehr hoch. Zusätzlich muss das bei der Entsalzung anfallende Nebenprodukt, der „Salzschlamm“, entsorgt werden, was beträchtliche Auswirkungen auf die Umwelt hat. Die Rückführung des Salzschlammes in die Meere führt zur Entstehung toxischer Zonen mit extrem hohem Salzgehalt und hohen Mengen an schädlichen Elementen. Bei nicht ausreichender Verdünnung des Abfalls können tote Zonen aufgrund von O<sub>2</sub>-Mangel und Verunreinigung entstehen.<sup>183</sup></li> </ul>                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Sozialer Bereich (S)</b> | Bio-SAF | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Gefahr eines Mangels an <b>Einbindung der lokalen Bevölkerung und öffentlicher Akzeptanz</b> ist wie bei vielen umfangreichen Infrastrukturprojekten relevant. Sowohl Bio-SAF- als auch E-SAF-Projekte gehen mit einem hohen Flächenanspruch einher. Bio-SAF erfordert insbesondere für den Anbau von Energiepflanzen große Flächen. Eine unzureichende Berücksichtigung der lokalen Gemeinschaften kann zu Konflikten über Landnutzungsrechte führen.<sup>75</sup> Daher ist es von ist von Relevanz, der Zivilgesellschaft ein umfängliches Mitspracherecht zu gewähren.</li> <li>Für die Bio-SAF-Produktion ist das <b>„Food vs. Fuel“-Dilemma</b> zu berücksichtigen, das die Konkurrenz um Flächen zwischen der Landwirtschaft und der Biokraftstoffindustrie beschreibt. Dies führt aufgrund des globalen Bevölkerungswachstums und der steigenden Nachfrage nach Nahrungsmitteln zu Bedenken in Politik und Wissenschaft. Lösungsansätze beinhalten die effiziente Nutzung marginaler Landflächen und das Konzept der Mehrfachnutzung von Flächen. Der Einsatz nachhaltiger Biorohstoffe wie Biomasse auf lignozellulärer Basis und Algen sollte gefördert werden, obwohl der kommerzielle Vertrieb algenbasierter Kraftstoffe aufgrund hoher Technologiekosten und Kultivierungslimitierungen noch nicht weit verbreitet ist.</li> <li>Eine weitere Problematik, die durch die Bio-SAF-Produktion eintreten könnte, ist eine zunehmende <b>Gesundheitsgefährdung</b> für die lokale Bevölkerung am Produktionsort, wie von einer Studie zu Aerospace Sciences hervorgehoben. Diese gesundheitsschädlichen Auswirkungen in den Regionen der Biokraftstoffherstellung fielen laut dieser Studie schlechter aus als bei der Produktion fossiler Flugzeugkraftstoffe. Diese Entwicklung steht mit dem Anbau von Biomasse, der H<sub>2</sub>-Produktion und der Verarbeitung von Biomassen in Verbindung, die bei herkömmlichem Flugzeugkraftstoff nicht erforderlich sind.<sup>184</sup></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Implementierung von Bio-SAF kann langfristig auch die <b>Gesundheit der Bevölkerung</b> durch Emissionsreduktionen, ein verbessertes Abfallmanagement und einen Zugang zu Transportsystemen fördern.<sup>178</sup></li> <li>IRENA hebt hervor, dass immer mehr Städte mit dem Ausbau von Mülldeponien durch einen Anstieg an Müll konfrontiert sind. Diesem Problem kann mittels der Verwendung von Abfällen als Rohstoff für SAF entgegen gewirkt werden.<sup>179</sup></li> <li>Eine Studie aus dem Jahr 2024<sup>178</sup> prognostiziert, dass bis 2050 bis zu 40 Mio. <b>neue Arbeitsplätze</b> im Bioenergiesektor entstehen können. Diese Arbeitsplätze verteilen sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wobei besonders im Landwirtschaftssektor ein Anstieg zu erwarten ist. Dies führt zu höheren Einkommen der Landwirte und fördert die lokale Wirtschaftsentwicklung.<sup>174</sup></li> <li>Trotz der Argumentation des „Food vs. Fuel“-Dilemmas können <b>positive Synergien zwischen der Nahrungsmittelversorgung und Biokraftstoffproduktion</b> entstehen, wenn sie angemessen gesteuert werden. Dazu zählen die Schaffung von Einnahmequellen für Landwirte, die Verbesserung des Pflanzenanbaus für Nahrungsmittel, der Ausbau landwirtschaftlicher Infrastruktur und die Beschaffung landwirtschaftlicher Betriebsmittel, die zur Steigerung des Landwirtschaftspotenzials führen.<sup>174</sup> Das effiziente Management des Lebensmittelsystems, insbesondere die gerechte Lebensmittelverteilung und die Minimierung an Lebensmittelabfall, kann zu einer Freilegung von Ressourcen für die Bioenergieproduktion führen.<sup>179</sup></li> </ul> |

| Auswirkungen ESG     | SAF-Art | Herausforderungen und Risiken                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Potenziale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sozialer Bereich (S) | Bio-SAF | <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Anbau von Biomasse benötigt erhebliche <b>Mengen Wasser</b> für die Bewässerung. Das Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung berechnete, dass ohne nachhaltiges Wassermanagement zusammen mit dem Bevölkerungswachstum bis Ende des Jahrhunderts sowohl die Zahl der Menschen als auch die Flächen, die unter starkem Wasserstress leiden, zunehmen werden. Regionen, die schon heute unter Wasserstress leiden, wären am stärksten betroffen, beispielsweise der Mittelmeerraum, der Nahe Osten, der Nordosten Chinas, Südost- und das südliche Westafrika.<sup>185</sup> Oftmals werden allerdings Nebenprodukte des landwirtschaftlichen Anbaus wie das Öl beim Sojaanbau als Biomasse genutzt, sodass hier der Wasserbedarf eine Folge des Nahrungsmittelanbaus ist. Ein möglicher Lösungsansatz für die Wasserproblematik ist der Anbau von Halophyten als Biomassepflanzen, die bei hohen Salzkonzentrationen und somit basierend auf Salzwasser wachsen können.<sup>186</sup></li> <li>Bei der Produktion von Bio-SAF kann fehlendes Engagement im Bereich <b>Arbeitsschutz und Sicherheit</b> ein Risiko für Arbeitnehmer darstellen. Es ist wichtig, die Gefahren, die mit der Herstellung von SAF einhergehen, zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die Gesundheit der Arbeitskräfte zu schützen. SAF-Anlagen weisen zwar weniger arbeitsmedizinische Probleme auf als die fossile Öl- und Bergbauindustrie, dennoch sind Todesfälle, Verletzungen und das Auftreten von Krankheiten bei Arbeitskräften ein ernst zu nehmendes Problem. Die Gefahren, die mit der Produktion von Bio-SAF einhergehen, sind biologischer, chemischer und physischer Natur. <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Biologische Gefahren:</b> Hierzu zählt die Ausbreitung respiratorischer und infektiöser Krankheiten durch die Exposition gegenüber organischen Materialien aus der Bio-SAF-Produktion.</li> <li><b>Chemische Gefahren:</b> Die Freisetzung von gefährlichen Verunreinigungen und Chemikalien durch Siedlungsabfälle stellt eine Herausforderung dar.</li> <li><b>Physische Gefahren:</b> Der unbewusste Umgang mit Maschinen in Bio-SAF-Anlagen kann zu Verletzungen führen.<sup>178</sup></li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Es wird erwartet, dass die Entwicklung der Bio-SAF-Produktion positive Auswirkungen auf die <b>wirtschaftliche Entwicklung</b> der Produktionsregionen hat. Dies umfasst die Schaffung neuer Arbeitsplätze, die Steigerung des BIP und die Förderung des Handels in Regionen, in denen der Anbau von Rohstoffen möglich ist.<sup>184</sup></li> <li>Die Nutzung biogener Reststoffe kann zur <b>Verringerung der Konkurrenz</b> zwischen der Nahrungsmittelproduktion und der Kraftstoffproduktion und zur Verbesserung weiterer Wertschöpfungsketten beitragen.</li> </ul>                                                                                               |
|                      | E-SAF   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Das Risiko eines Mangels an <b>Einbindung der lokalen Bevölkerung und öffentlicher Akzeptanz</b> sollte auch bei E-SAF-Initiativen berücksichtigt werden. E-SAF-Projekte benötigen insbesondere Flächen für Produktionsanlagen und die Gewinnung erneuerbarer Energie. Hier sollten Interessenkonflikte mit der lokalen Bevölkerung vermieden werden.</li> <li>Die Produktion von E-SAF birgt das Risiko der Entstehung von <b>Konflikten mit der lokalen Stromversorgung und der Energiewende</b>. Länder mit guten Produktionsbedingungen für E-SAF haben oftmals eine unzureichende oder auf fossilen Brennstoffen basierende Stromversorgung.<sup>75</sup> Somit werden die Kapazitäten an erneuerbaren Energien zur Versorgung der Bevölkerung und der lokalen Industrie vor Ort benötigt und stehen in Konkurrenz mit dem Energieverbrauch durch E-SAF und dessen Export.</li> <li>Ein weiteres Risiko ist der <b>Verlust von Arbeitsplätzen</b> durch die Abwanderung von Teilen der Wirtschaft in Regionen, die für erneuerbare Energien vorteilhaft sind, oder durch den Abbau von Arbeitsplätzen im fossilen Energiebereich. Es ist notwendig, einen sozialen Wandel und den Übergang von Arbeitskräften in neue Arbeitsfelder zu unterstützen, beispielsweise durch das Angebot von Umschulungen und Trainings.<sup>75</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Langfristig kann die Implementierung von E-SAF, ähnlich wie bei Bio-SAF, zur <b>Förderung der Wirtschaftsentwicklung</b> und lokalen Wertschöpfung beitragen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Akteure der gesamten Wertschöpfungskette, sowohl <i>upstream</i> als auch <i>downstream</i> in die Wertschöpfungskette integriert werden. Dies kann langfristig zu einer nachhaltigen Wirtschaftsentwicklung führen, beispielsweise durch die Gründung neuer Unternehmen, den Wissenszuwachs und Innovation. Die Schaffung von Arbeitsplätzen ist eine weitere positive Entwicklung, die laut Agora mit der E-Kraftstoff-Produktion einhergeht.<sup>75</sup></li> </ul> |



| Auswirkungen<br>ESG         | SAF-Art   | Herausforderungen und Risiken                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Potenziale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sozialer Bereich (S)</b> | E-SAF     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Negative Auswirkungen des E-SAF-Ausbaus für die lokale Bevölkerung können durch den <b>hohen Wasserbedarf</b> während der Produktion entstehen, insbesondere in wasserarmen Regionen. Neben dem Elektrolyseprozess verbrauchen auch Kühlungs- und Reinigungsverfahren Wasser, obwohl Letztere durch die Rückführung von Wasser aus dem Elektrolyseprozess gedeckt werden können. Generell ist der Wasserverbrauch von E-SAF jedoch beträchtlich geringer als der von Bio-SAF, wobei der Wasserfußabdruck eines Liters Bio-SAF (0,0008 Tonnen) im Vergleich zu einem Liter E-SAF (0,0008 Tonnen) um einen Faktor von über 5.000 erhöht ist.<sup>182</sup></li> <li>Der <b>Flächenbedarf</b> für die Produktion von E-SAF kann mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren, hauptsächlich aufgrund der Erzeugung erneuerbarer Energien. Im Vergleich dazu sind die Flächen, die für die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> (zum Beispiel durch DAC), für die Wasserelektrolyse und für die Kraftstofflagerung erforderlich sind, deutlich geringer. Der Flächenverbrauch für Photovoltaikanlagen ist deutlich größer als der für Onshore-Windanlagen. Die besten Landflächen für die Solarenergieproduktion sind wüstenähnliche Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung, die für die landwirtschaftliche Nutzung ungeeignet sind.<sup>182</sup> Die Nutzung von Agrivoltaik könnte eine Strategie sein, um Flächen sowohl für Photovoltaikanlagen als auch für die Landwirtschaft zu nutzen.<sup>187</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Darüber hinaus bietet die E-SAF-Produktion Chancen zur Unterstützung finanziell schwächerer Länder bei der <b>Finanzierung der Implementierung der erneuerbaren Stromversorgung</b>. Diese ist oft mit hohen Kosten verbunden, sodass Investitionen, die im Kontext von E-SAF-Projekten in Stromerzeugungsanlagen getätigt werden, die Möglichkeit zum Ausbau der erforderlichen Infrastruktur vor Ort bieten. Erforderlich wäre in diesem Zusammenhang der Bau zusätzlicher Stromerzeugungsanlagen und damit ein Überbau der Kapazitäten. Zusätzlich sollte das Stromnetzes im Rahmen von E-SAF-Projekten ausgebaut werden.<sup>75</sup> Der hohe Bedarf an grünem H<sub>2</sub> kann ein Momentum für die Etablierung von H<sub>2</sub>-Wertschöpfungsketten schaffen und den Zugang zu Transportmitteln verbessern.<sup>182</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Governance (G)</b>       | Allgemein | <ul style="list-style-type: none"> <li>Technologische und transformative Veränderungen setzen Regierungen unter Druck, einen <b>gemeinsamen regulatorischen Rahmen</b> zu schaffen. Dies ist herausfordernd, da traditionelle Regulierungen oft auf spezifische Themen und Sektoren ausgerichtet sind und nicht immer mit neuen Entwicklungen harmonisieren.<sup>188</sup> Die Einführung von SAF erfordert eine stärkere Integration verschiedener Sektoren (z. B. Energie-, Landwirtschafts- und Transportsektor sowie Luftfahrtindustrie) und somit die Zusammenarbeit von traditionell getrennten Industriezweigen.<sup>189</sup></li> <li>Governance-Herausforderungen können auch durch regulatorische Anforderungen entstehen, die zu <b>Markteintrittsbarrieren</b> für neue Wettbewerber führen und folglich Innovationen behindern können.<sup>188</sup></li> <li>Die OECD weist darauf hin, dass <b>traditionelle Regulierungen</b> nicht immer auf neue Situationen, Produkte und Dienstleistungen übertragbar sind, was auch auf die SAF-Implementierung zutrifft.<sup>188</sup> Regulierungsbehörden müssen daher ihre Ansätze stetig anpassen und flexibel gestalten.</li> <li>Traditionelle <b>Haftungskonzepte</b> greifen bei neuen Entwicklungen nicht immer.<sup>188</sup> Bei der SAF-Produktion ist eine Vielzahl von Akteuren beteiligt, was die Klärung von Haftung und Zuständigkeiten bei Risiken und Schäden erschwert. Regularien müssen hier klare Verantwortungen zuweisen.</li> <li>Die <b>internationale Koordination</b> von Regulierungen und Governance stellt ebenfalls eine Schwierigkeit dar, da die Produktion und Nutzung von SAF grenzüberschreitend stattfindet und somit eine abgestimmte internationale Regulierung erforderlich macht. Es besteht das Risiko, dass Unternehmen das „Forum Shopping“ nutzen, um sich Rechtsprechungen auszusuchen, die ihnen die günstigsten Bedingungen bieten, was das Umgehen regulatorischer Anforderungen ermöglicht.<sup>188</sup> Effektive SAF-Regulierungen müssen die geografischen, wirtschaftlichen, sozialen und politischen Unterschiede zwischen den Nationen berücksichtigen. Unterschiedliche Angebots- und Nachfragestrukturen sowie politische Instrumente müssen an die spezifischen Bedingungen der Länder wie Verfügbarkeit von Rohstoffen, Reife der Wertschöpfungsketten, Energieabhängigkeit und Klimaziele angepasst werden.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Regularien müssen zeitlich auf kurz-, mittel- und langfristige Wirksamkeit ausgerichtet sein, um <b>Investoren und Produzenten Sicherheit</b> zu gewährleisten, den Infrastrukturausbau voranzutreiben und die vorhandenen SAF-Kapazitäten auszubauen.<sup>189</sup></li> <li>SAF-Politik und die Zusammenarbeit mit den SAF-Lieferketten können die <b>Forschung und Entwicklung neuer Produktionswege</b> fördern.<sup>189</sup></li> <li>Es müssen regulatorische Maßnahmen ergriffen werden, um den <b>Markteintritt für neue Wettbewerber zu erleichtern</b>, etwa durch transparente Regulierungspolitik, vereinfachte Zulassungsverfahren und finanzielle Anreize, um Markteintrittsbarrieren für SAF-Produzenten und -Konsumenten abzubauen.</li> <li><b>Flexibilität</b>, um eine Anpassung an verschiedene Situationen und Prioritäten zu gewährleisten, ist sehr wichtig. Dies eröffnet die Möglichkeit, Richtlinien schnell an die technologischen Fortschritte anzupassen.</li> <li>Eine Regulierungspolitik, die von langfristiger Sicherheit geprägt ist, kann <b>Investitionsanreize</b> setzen und so die Produktion und Nutzung von SAF vorantreiben.</li> <li>Subventionen, Steuererleichterungen und weitere finanzielle Anreize sind ausschlaggebend, um einen <b>Ausgleich der höheren Kosten</b> von SAF gegenüber herkömmlichem Kerosin zu ermöglichen.<sup>191</sup></li> </ul> |

| Auswirkungen ESG      | SAF-Art   | Herausforderungen und Risiken                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Potenziale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Governance (G)</b> | Allgemein | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Die <b>Erleichterung der Zertifizierung</b> und Qualitätskontrollen von SAF-Lieferketten, die Nachhaltigkeitsstandards unterliegen, sollte vorangetrieben werden.<sup>189</sup> Vereinfachte, klare Zertifizierungen fördern Vertrauen, ermöglichen einen besseren Marktzugang und können Investitionsunsicherheit bieten.</li> <li>■ Generell behindern ein <b>unzureichendes gesellschaftliches Verständnis</b> für SAF sowie die unterentwickelte sozialwissenschaftliche Forschung die Gestaltung effektiver SAF-Politik und Regulatorik.<sup>188</sup> Die mangelnde Unterstützung der Luftfahrtindustrie für eine Politik, die darauf abzielt, die Kosten des Luftverkehrs zu erhöhen, Subventionen zu reduzieren oder das Wachstum des Luftverkehrsvolumens zu begrenzen, ist zusätzlich herausfordernd.<sup>190</sup></li> <li>■ Projekte im Energiesektor, die häufig mit großen <b>Flächenansprüchen</b> verbunden sind, können insbesondere in politisch instabilen Ländern zu einer Missachtung der Landnutzungsrechte führen. Um dies zu verhindern, sind effektive Governance-Strukturen notwendig, die lokale Akteure aktiv einbeziehen. Maßnahmen wie transparente Beschwerdemechanismen und die Schaffung von Dialogformaten mit der Zivilgesellschaft können dazu beitragen.<sup>75</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bei der Entwicklung von Richtlinien muss die Preisempfindlichkeit in Bezug auf externe Effekte wie etwa Umweltschäden berücksichtigt werden. Eine angemessene Bewertung dieser Kosten kann zur <b>Verbesserung der Marktbedingungen für SAF</b> beitragen.</li> <li>■ Einfach umsetzbare Regularien fördern die <b>Akzeptanz und Umsetzung</b> von SAF-Projekten durch die beteiligten Akteure und erleichtern die effektive Zusammenarbeit zwischen regionalen und nationalen Behörden.</li> <li>■ Es ist wichtig, <b>unbeabsichtigte Folgen</b> bei der Implementierung von Regulatorik zu vermeiden und sozialen, wirtschaftlichen oder ökologischen Gefahren durch vorausschauende politische Maßnahmen entgegenzuwirken.</li> <li>■ Eine robuste SAF-Politik zeichnet sich durch Widerstandsfähigkeit gegenüber Veränderungen und die Fähigkeit, festgelegte <b>Ziele zu erreichen</b>, aus.<sup>191</sup></li> </ul> |
|                       | Bio-SAF   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Im Bereich des <b>Landmanagements</b> für Bio-SAF sollten Regulierungen darauf abzielen, negative Auswirkungen auf die Lebensmittelsicherheit durch den Anbau von Energiepflanzen zu verhindern. Die Menge der angebauten Biorohstoffe beeinflusst die Landnutzung und die Preise von Nahrungsmitteln, was die Notwendigkeit von Regulierungen unterstreicht.<sup>192</sup> Es ist herausfordernd, politische Richtlinien zu definieren, die sowohl die Nahrungsmittelsicherheit als auch die Rohstoffgewinnung für die Bio-Energieproduktion priorisieren. Die Restbiomasse der zweiten Generation konkurriert weniger mit der Ernährungssicherheit und kann gleichzeitig die Energieeffizienz und -sicherheit verbessern. Daher sollten Richtlinien entwickelt werden, die den Einsatz von Restbiomasse und landwirtschaftlichen Abfallstoffen anstelle von Rohstoffen der ersten Generation fördern.<sup>178</sup></li> <li>■ Im Bereich des <b>Abfallmanagements</b> sind Regulierungen ebenfalls entscheidend, um die Förderung von SAF zu unterstützen. Diese betreffen die Handhabung von Produktionsnebenprodukten und Abfällen, die für die Produktion von fortschrittlichem Bio-SAF genutzt werden können. Zukünftig sollten Regierungen Farmbesitzer dazu ermutigen, Abfälle und Reststoffe in nützliche Produkte umzuwandeln. Sie sollten Anreize wie auch Steuererleichterungen bieten.<sup>193</sup></li> </ul> <p>Die aktuellen Regulierungen zur Definition von Abfällen, Nebenprodukten und Koppelprodukten sollten beachtet werden. So unterliegen diese Produkte teilweise zeitgleich unterschiedlichen Regulierungen, sodass sich deren konkrete Handhabung für die Biokraftstoffproduktion komplex gestalten kann. Im EU-Raum sind Details insbesondere in der RED II erklärt und definiert. So dürfen Produkte und Nebenprodukte nicht absichtlich und nachweislich in Abfälle und Reststoffe „umgewandelt“ werden, z. B. durch falsche Lagerung oder falsche Deklaration beim Import aus dem „Ausland“.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Siehe Governance allgemein.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

| Auswirkungen<br>ESG       | SAF-Art | Herausforderungen und Risiken                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Potenziele                    |
|---------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Governance<br/>(G)</b> | Bio-SAF | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Internationale und effektive Zertifizierungssysteme</b> müssen entwickelt werden, um festzulegen, welche Biomassequellen als nachhaltig eingestuft werden. Die RED II der EU untersagt beispielsweise den Einsatz von Biokraftstoffen mit hohem Risiko für Landnutzungsänderungen in Gebieten mit hohem Kohlenstoffbestand, etwa auf der Basis von Palmöl, um Zielkonflikte zu vermeiden, und schränkt generell den Anteil von Biokraftstoffen, die auf Lebensmittelrohstoffen basieren, ein.<sup>194</sup> Für die EU existiert bereits ein Zertifizierungsschema der ISCC (International Sustainability &amp; Carbon Certification), um die Einhaltung der Kriterien der RED II zu bescheinigen. Es geht sogar über die gesetzlichen Anforderungen der RED II hinaus, da es zusätzlich auch ökologische und soziale Anforderungen abdeckt.<sup>195</sup></li> <li>■ <b>Anreizpolitiken</b> sind entscheidend für die Förderung von Biokraftstoffen. In den USA, Brasilien und der EU haben Subventionen, Beimischungsziele und Steuerbefreiungen den Verbrauch von Biokraftstoffen bereits erheblich gesteigert. Direkte Subventionsmaßnahmen für Landwirte und Unternehmen, die Rohstoffe für Biokraftstoffe anbauen, reduzieren die Produktionskosten und erhöhen das Angebot an Bio-SAF. Steuervorteile für Biokraftstoffproduzenten und -verbraucher sind notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilen Brennstoffen zu gewährleisten. Die Förderung von Forschung und Entwicklung beschleunigt Innovation und Technologieentwicklung. Um die Nutzung von Biokraftstoffen in großem Maßstab zu ermöglichen, sind Investitionen in die Infrastruktur von Produktions- und Vertriebsanlagen erforderlich, insbesondere zur Förderung der Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten und dritten Generation.<sup>175</sup></li> <li>■ Kurzfristig müssen Regulationssysteme, insbesondere während der industriellen Skalierung, die <b>Rohstoffverfügbarkeit und -nachhaltigkeit</b> ausbalancieren und Flexibilität integrieren.</li> <li>■ Die regulatorische Förderung von <b>Ausbildungen, Schulungen und die Zertifizierung von Personal</b> ist ein wesentlicher Aspekt für die Produktion und Weiterentwicklung von Bio-SAF. Kenntnisse beispielsweise im Bereich der Biotechnologie, des Umweltmanagements und der Landwirtschaft sind von Bedeutung.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                               |
|                           | E-SAF   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Zertifizierungsmaßnahmen</b>, die sicherzustellen, dass E-SAF nachhaltig hergestellt wurde, müssen entwickelt werden. Dies umfasst insbesondere die Gewährleistung, dass CO<sub>2</sub> und Elektrizität die Nachhaltigkeitsstandards einhalten. Ein Beispiel für ein globales Zertifizierungssystem ist das ISCC (International Sustainability &amp; Carbon Certification), das neben der Zertifizierung von Rohstoffen auch E-SAF unterstützt. Es ist konform mit den Nachhaltigkeitsanforderungen der EU, Japans, Australiens und von CORSIA.<sup>196</sup></li> <li>■ Darüber hinaus muss eine <b>Regulierung der Kohlenstoffquellen und -infrastruktur</b> erfolgen, um eine sichere und nachhaltige CO<sub>2</sub>-Nutzung aus der Atmosphäre oder industriellen Anlagen sicherzustellen. Zudem muss festgelegt werden, wie die CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Gesamtbilanz des Kraftstoffs eingehen. Im Februar 2024 stellte die EU-Kommission die „Industrial Carbon Management“-Strategie vor, ein regulatorisches Rahmenwerk, das den zukünftigen Bedarf an nachhaltigem CO<sub>2</sub> für den Transport- und Mobilitätssektor beschreibt, auch für E-Kraftstoffe. Trotz einer Weiterentwicklung des Kohlenstoffmanagements in den vergangenen Jahren fehlt es dem Rahmenwerk an regulatorischer Sicherheit, politischer Kohärenz sowie an Anreizen für Investitionen in CCU-Systeme (Carbon Capture and Utilization). Beispielsweise fallen bisher nur CO<sub>2</sub>-Pipelines, die CO<sub>2</sub> zur permanenten Speicherung transportieren, unter die EU-Taxonomie. Solche für den Zweck der CCU oder beispielsweise der E-Kraftstoffproduktion sind nicht EU-Taxonomie-konform. Dies führt zu ausbleibenden privaten Investitionen.<sup>197</sup></li> <li>■ Laut Agora konzentriert sich die Politik auf die <b>Förderung von Forschung und Entwicklung</b>, um Produktionsverfahren für E-Kraftstoffe zu optimieren und nachhaltige CO<sub>2</sub>-Quellen zu erschließen, was darauf hindeutet, dass regulatorische Systeme auch in diesem Bereich unabdingbar sind.<sup>75</sup></li> <li>■ Generell müssen unterstützende <b>finanzielle Maßnahmen</b> ergriffen werden, etwa Steuervergünstigungen, Subventionen und Zuschüsse,<sup>198</sup> da sowohl Produzenten als auch Konsumenten mit hohen Preisbarrieren durch die Produktion und den Kauf von E-SAF konfrontiert werden.<sup>199</sup> Diese Förderungen können nicht nur durch die direkte Unterstützung von E-SAF erfolgen, sondern auch durch die indirekte Unterstützung erneuerbarer Energiequellen.<sup>198</sup> Die IATA hebt hervor, dass Regierungen sicherstellen müssen, dass die Unterstützung zugunsten erneuerbarer Kraftstoffe und erneuerbarer Energien ausgebaut wird. 2023 subventionierten die meisten Länder weltweit die fossile Brennstoffproduktion.<sup>189</sup></li> <li>■ Die <b>Ausbildung, Schulung und Zertifizierung von Personal</b> sollte ebenfalls durch spezifische Regularien gefördert werden.</li> </ul> | ■ Siehe Governance allgemein. |

## 7.2 Rahmenbedingungen und Maßnahmen zur Minimierung von ESG-Risiken

Um die in Kapitel 7.1 beschriebenen Herausforderungen und Risiken, die mit der Skalierung von SAF einhergehen, angemessen zu bewältigen und effektiv zu reduzieren, ist es erforderlich, Rahmenbedingungen in den Bereichen Umwelt, Soziales und Governance zu beachten und geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt, die eine nachhaltige Produktion und Nutzung von Bio- und E-SAF ermöglichen.

### 7.2.1. Umweltbereich (E) für SAF-Projekte

#### 1 | Bio-SAF – Produktion und Energieverbrauch

Da sich die Produktion von **Bio-SAF** energieintensiv gestaltet, sind **Maßnahmen zur Minimierung des Energieverbrauchs** essenziell. Dies kann durch die Nutzung effizienter Erntetechniken, die Optimierung der Logistik und die Steigerung der Prozesseffizienz erreicht werden.<sup>175</sup> Zum Beispiel erfordert die Optimierung der nachhaltigen Logistik und des Transports, die sich über die gesamte Lieferkette erstrecken, eine effiziente Gestaltung aller Transportprozesse. Hierbei müssen Faktoren wie die durchschnittliche Transportdistanz, die Biomassedichte und -menge, die Tragekapazität und die Geschwindigkeit des Transportfahrzeugs berücksichtigt werden.<sup>200</sup> Für den optimierten Energieverbrauch kann die neue Generation der SAF-Produktion wie beispielsweise die Verwendung von Algen oder Bakterien interessant sein. So können Cyanobakterien Kohlenwasserstoffe wie Alkene aus Sonnenlicht und atmosphärischem CO<sub>2</sub> produzieren.<sup>175</sup> Durch genetische



Die Nutzung regenerativer Energiequellen ist stets limitiert und mit Nutzungskonkurrenz verbunden, unabhängig davon, welche erneuerbaren Quellen genutzt werden. Ein Vorteil von Biomethan, wie es Caphenia verwendet, ist der deutlich geringere Energieverbrauch. Langfristig wird Biomethan sicherlich auch ins Stromnetz eingespeist werden, sobald die entsprechende Infrastruktur ausgebaut ist.

**Dr. Mark Misselhorn**, Chief Executive Officer, Caphenia GmbH

Manipulation werden bestimmte Enzyme in Cyanobakterien gehemmt, um die Kohlenwasserstoffproduktion zu maximieren. Dies ermöglicht die natürliche Produktion von Alkenen, die dann durch Hydrotreatment weiterverarbeitet werden, ähnlich wie im HEFA-Prozess. Der Einsatz genetisch veränderter Cyanobakterien ist ein vielversprechender Ansatz zur Vermeidung übermäßigen Flächenverbrauchs, des Eingriffs in natürliche Ökosysteme, der Ausbreitung invasiver Pflanzenarten und der Freisetzung von Treibhausgasen. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine weitere intensive Forschung und Entwicklung.

Um die Risiken der Ausbreitung invasiver Arten und Umweltschäden durch den Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln in der landwirtschaftlichen Produktion zu minimieren, können **nachhaltige Anbaumethoden** wie der Einsatz von **Zwischenfrüchten, Deckfrüchten, Fruchtfolge und der Anbau von anspruchslosen Pflanzenarten**, die auch einen geringen Bedarf an Chemikalien und Wasser haben, zum Einsatz kommen.<sup>175</sup> Zwischenfrüchte werden zwischen den Hauptanbau-

perioden mit dem Ziel der Futterproduktion und Gründüngung kultiviert.<sup>201</sup> Die Zwischenfrüchte sind somit nicht primär zum Verkauf bestimmt. Beispielsweise kann die Pflanzenart *Brassica carinata* (B. carinata) als Zwischenfrucht angepflanzt werden, um sie später als Rohstoff für die Bio-SAF-Produktion zu nutzen. Das britische Ölfeldunternehmen BP hat bereits begonnen, Öl aus B. carinata in kleinem Umfang für die Biokraftstoffproduktion zu verwenden. BP-Raffinerien in Deutschland haben 2023 erfolgreich demonstriert, dass B. carinata-Öl zusammen mit Rohöl in bestehenden Anlagen verarbeitet werden kann.<sup>202</sup> Deckfrüchte werden oberhalb einer anderen Frucht (Untersaat) gesät, sodass nach der Ernte der Deckfrucht auch weiterhin eine Vegetationsdecke vorhanden ist, die den Boden weniger anfällig für Verdichtung und ihn in feuchten Jahreszeiten tragfähiger macht. Zusätzlich kann die Unterfrucht auch als Viehfutter Einsatz finden.<sup>203</sup> Auch die Fruchtfolge bietet zahlreiche Vorteile, darunter die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und die Reduktion des Bedarfs an chemischen Düngemitteln durch den Wechsel an angebauten



Pflanzen und einen damit einhergehenden unterschiedlichen Nährstoffverbrauch. Darüber hinaus unterstützt die Fruchtfolge die Diversifizierung der Einkommensquellen für Landwirte, die sich im Bereich der erneuerbaren Energien engagieren möchten.<sup>204</sup> Die Chevron Corporation arbeitet gemeinsam mit Bunge und Corteva an der Nutzung von Winterraps als Teil einer Fruchtfolge für die Biokraftstoffproduktion. Diese Pflanzenart bietet ähnliche Vorteile wie herkömmliche Zwischenfrüchte, einschließlich verbesserter Bodengesundheit, reduziertem Wasser- und Nährstoffabfluss sowie Kohlenstoffspeicherung im Boden.<sup>205</sup>

Die sorgfältige **Auswahl von Anbauflächen** für Biomasse ist entscheidend, um die Umwelt und die biologische Vielfalt zu schonen. Bevorzugt sollten bereits degradierte Landflächen genutzt werden, um die negativen Auswirkungen auf unberührte Ökosysteme zu minimieren. Zudem ist es wichtig, Standorte auszuwählen, deren Umwandlung in landwirtschaftliche Nutzflächen nicht zur Freisetzung gespeicherter Kohlenstoffvorräte führt, wie es bei der Rodung von Wäldern und Savannen der Fall wäre.<sup>175</sup> Das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) legt im CDP Executive Board Report fest, dass nachhaltige Biomasse auf Flächen wie Wald-, Acker- und Weideland angebaut werden soll, wobei die jeweiligen Landtypen erhalten bleiben oder ein nachhaltiges Management praktiziert wird, um das

Niveau der Kohlenstoffspeicherung dieser Flächen zu bewahren.<sup>206</sup>

Zur **Minimierung des Wasserverbrauchs** beim Anbau von Biomasse ist ein effizientes Wassermanagement von Bedeutung. Dies umfasst den Anbau von Pflanzen, die einen geringeren Wasserbedarf haben. Ferner ist es ratsam, Anbauflächen zu wählen, die natürlicherweise über ausreichende Wasservorräte verfügen. Multifunktionale Pflanzungen bieten einen weiteren effektiven Ansatz. Bestimmte Vegetationsformen wie Wälder und Sträucher können als natürliche Filter für die Aufbereitung nährstoffreichen Wassers dienen, beispielsweise für Abwässer aus Haushalten, landwirtschaftlichen Abflüssen oder Sickerwasser aus Deponien. Bodendeckende Pflanzen tragen dazu bei, Wassererosion einzudämmen, den direkten Oberflächenabfluss zu verringern, Sedimente zu filtern und das Risiko von Erdrutschen zu senken.<sup>207</sup> Der Einsatz innovativer und effizienter Bewässerungstechniken ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt. Tropfbewässerungssysteme ermöglichen eine gezielte Wasserzufuhr und gewährleisten, dass das Wasser tief in die Wurzelschicht eindringt, was die Wassernutzungseffizienz erheblich steigert.<sup>208</sup>

Letztendlich erweist sich der Einsatz von Halophyten als Biomasse, etwa die Gattungen *Salicornia* oder *Suaeda*, als ein innovativer Ansatz, um dem zunehmenden Mangel an bewässertem Land und einem Anstieg der Boden-

versalzung zu begegnen. Halophyten haben die Fähigkeit, bei sehr hohen Salzkonzentrationen zu wachsen, so dass sie mit Meerwasser bewässert werden können. Sowohl das Öl der Samen als auch die lignozelluläre Biomasse können für die Biokraftstoffproduktion eingesetzt werden. Zusätzlich geht der Anbau von Halophyten mit verringerten Energiekosten einher.<sup>186</sup>

Die **Optimierung des Abfallmanagements** durch die Ausweitung von BioSAF ist nur durch eine zunehmende Fokussierung auf Kraftstoffe der zweiten, dritten und potenziell vierten Generation möglich. Obwohl diese Generationen von SAF noch in den Anfängen stecken und nicht in großen Mengen verfügbar sind, markieren sie einen wichtigen Schritt in Richtung nachhaltigerer SAF-Produktion.<sup>209</sup>

Ein herausragendes Beispiel für effizientes Abfallmanagement ist die Stadt Oslo. Zwischen 2016 und 2019 wurden dort 16-19 Kilotonnen Essensabfälle aus Haushalten (etwa 50 % des Gesamtabfalls der Haushalte) gesammelt. Insgesamt liefert Oslo 30 Kilotonnen Lebensmittelabfälle und feuchtorganischen Abfall an die Biogasanlage in Romerike, unter Berücksichtigung zusätzlicher industrieller und kommerzieller Abfälle.<sup>210</sup> Dieses Modell könnte in Zukunft auch an die Biomasseproduktion zur Herstellung von BioSAF adaptiert werden.

# Bio- und

# E-SAF

## 2 | E-SAF – Produktion und Energieverbrauch

Die effiziente Produktion von **E-SAF** ist an **Orten mit einem hohen Potenzial für erneuerbare Energien** wie Australien, Südafrika, den Golfstaaten und Chile am sinnvollsten. Dies trägt dazu bei, das Problem der begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energien in manchen Regionen zu überwinden.

Die Erzeugung **erneuerbarer Energien in unmittelbarer Nähe zu den Produktionsstätten** ist eine weitere Strategie. Dies reduziert nicht nur den Energiebedarf für den Transport, sondern führt auch zu einer Minimierung der Emissionen. Kürzere Transportwege bedeuten zudem geringere Energieverluste und erhöhen somit die Gesamteffizienz. Generell ist der Ausbau erneuerbarer Energien essenziell, um die Skalierung von E-SAF voranzutreiben. Dabei sollte der Anteil erneuerbarer Energien im Stromnetz konsequent erhöht werden.<sup>211</sup> Um CO<sub>2</sub> und Kosten im Transport zu sparen, ermöglicht das „Book & Claim“-Verfahren (siehe Kapitel 5.1) die Nutzung von SAF nahe am Produktionsstandort. Dieses System vermeidet lange Transportwege und zusätzliche Treibhausgasemissionen.<sup>212</sup>

Die Förderung einer **zirkulärer Material- und Rohstoffnutzung** sowie die Entwicklung **alternativer Materialien** für Elektrolyseanlagen tragen zur Verringerung der Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen wie Platin und Iridium in Elektroden bei. Iridium, ein

seltenes Metall, wird zunehmend durch robustere Materialien ersetzt. Die Unternehmen Sibanye-Stillwater und Heraeus haben Katalysatoren auf der Basis von Ruthenium für die PEM-Elektrolyse entwickelt, die ein großes Potenzial bieten, da Ruthenium eine 50-mal so hohe Masseaktivität und eine höhere katalytische Aktivität als Iridium aufweist. Ruthenium kann ebenfalls die O<sub>2</sub>-Entwicklungsreaktion, einen wichtigen Schritt der Elektrolyse, katalysieren. Da es jedoch nicht so stabil wie Iridium ist, wurde für diese Entwicklung eine Kombination aus beiden Metallen genutzt.<sup>213</sup>

Das Recycling von Materialien aus Elektrolyse-Brennstoffzellen nach dem Ende ihrer Betriebszeit unterstützt die zirkuläre Rohstoffnutzung. Bosch arbeitet an Technologien zur Rückgewinnung und zum Recycling von Platin aus Brennstoffzellen. Laut dem Unternehmen kann das Recycling zu einer Reduktion von bis zu 95 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen, die durch den Abbau von Platin entstehen. Zudem ist dieses Verfahren wirtschaftlich vorteilhaft. Da Platin in vielen industriellen Sektoren wie der Medizin und dem Automobilsektor benötigt wird, ist ein nachhaltiger Einsatz dieses Rohstoffs in Zukunft essenziell.<sup>214</sup>

Der Bau **nachhaltiger Meerwasserentsalzungsanlagen** ist eine effektive Strategie, dem hohen Wasserbedarf für die E-SAF-Produktion entgegenzuwirken. Die Global Clean Water Desalination Alliance hat bereits im Jahr

2015 das globale Ziel formuliert, bis 2036/2040 für alle neu erbauten Entsalzungsanlagen ein Clean Energy Target von 70-100 % zu erreichen und damit den Betrieb auf der Basis nachhaltiger Energiequellen auszubauen.<sup>215</sup>

Für Elektrolysesysteme wird hochreines Wasser benötigt, das durch die Entfernung gelöster Salze und Mineralstoffe aus dem Meerwasser gewonnen wird. Diese Wasseraufbereitung, die zumeist durch die Technologie der mehrstufigen Entspannungsverdampfung erfolgt, hat einen hohen Energiebedarf. Es wird bereits an Elektrolyseverfahren geforscht, die Meerwasser direkt verwenden, unter der Annahme, dass dies eine Senkung des Energieverbrauchs ermöglicht.<sup>75</sup> Das WEF stellte jedoch fest, dass dieser Ansatz nur zu marginalen Energieeinsparungen führt. Die Organisation empfiehlt stattdessen, die Energieeffizienz und die Kosten der Anlagen zu reduzieren, um eine nachhaltige Produktion von E-SAF zu ermöglichen.<sup>216</sup>

Eine zusätzliche Maßnahme zur Steigerung der Effizienz und zur Reduktion des Wasserverbrauchs im Produktionsprozess ist die Implementierung **effizienter Wassernutzungstechnologien** in der H<sub>2</sub>-Elektrolyse. Beispielsweise können trockene Kühlungsprozesse eingesetzt werden. Es ist ebenfalls wichtig, überschüssiges Wasser aus der Elektrolyse zu recyceln und für weitere Zwecke nutzbar zu machen.<sup>217</sup>

# E-SAF



Plugpower, ein US-amerikanisches Unternehmen, dessen Schwerpunkt auf der Produktion von  $H_2$  und Brennstoffzellen liegt, plant den Bau einer  $H_2$ -Anlage in Kalifornien (Mendota), die  $H_2$  auf der Basis von Abwässern produzieren wird. Hierzu werden zusätzliche Tertiärwasseraufbereitungsanlagen errichtet, um Abwässer oder sekundär behandeltes Wasser für industrielle Zwecke aufzubereiten. Die Fertigstellung dieser Anlage ist bis 2025 geplant.<sup>218</sup> Ein solches Projekt leistet zusätzlich zur Wassereffizienz einen Beitrag zur Abwasserentsorgung der lokalen Gemeinden.

Die Nutzung **nachhaltiger  $CO_2$ -Quellen** ist essenziell, um einen geschlossenen  $CO_2$ -Kreislauf zu gewährleisten. Dies impliziert, dass ausschließlich  $CO_2$  verwendet wird, das zuvor aus der Atmosphäre extrahiert wurde. Aufgrund der noch nicht vollständig hochskalierten DAC-Technologien ist  $CO_2$  aus diesen Quellen noch kostspielig. Daher sind weitere Forschung und Entwicklung erforderlich, um in Zukunft ausreichende Mengen nachhaltiges  $CO_2$  bereitstellen zu können. Die Verwendung von biogenem  $CO_2$  konkurriert mit der Nahrungsmittelindustrie und führt zu einer Flächenkonkurrenz sowie Landnutzungsänderungen, weshalb diese  $CO_2$ -Quellen in den benötigten Mengen nicht nachhaltig verfügbar sind.<sup>75</sup> Airbus wurde im September 2023 mit dem Deutschen Zukunftspreis für die Entwicklung einer DAC-Technologie ausgezeichnet, basierend auf einer Technologie, die das von Astronauten auf der ISS ausgeatmete  $CO_2$  aus der Bordatmosphäre entfernt.<sup>219</sup> Die Fortführung der Entwicklung innovativer Technologien spielt eine entscheidende Rolle für die zukünftige Produktion von E-SAF.

Um die **Flächennutzung** für die Produktion erneuerbarer Energien aus Photovoltaik (PV) und Windanlagen effizient zu gestalten und gleichzeitig eine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion zu vermeiden, sollten verschiedene Strategien berücksichtigt werden.



Laut Daten des Umweltbundesamtes beträgt der flächenspezifische Ertrag für E-SAF im Jahr 2050 bei Nutzung solarer Großkraftwerke 7.680–19.930 Flugkilometer (km) pro Hektar und Jahr und bei Nutzung von Onshore-Windanlagen 3.770–6.860 km pro Hektar und Jahr. Eine Kombination beider Technologien ermöglicht eine Ausbeute von 10.480–24.480 km pro Hektar und Jahr. Trotz des höheren Bruttoflächenbedarfs für E-SAF, das auf der Basis von Strom aus PV-Anlagen (Flächenbedeckung 33 %) produziert wird, im Vergleich zu E-SAF auf der Basis von Strom aus Windanlagen (Flächenbedeckung 1,5 %) bietet eine Kombination beider Technologien aufgrund der höheren flächenspezifischen Ausbeute eine vielversprechende Perspektive.<sup>182</sup>

Ein weiterer Ansatz zur Bewältigung des zunehmenden Platzbedarfs für den Bau von PV-Anlagen für die Produktion von E-SAF ist die Agri-PV. Dieses Konzept basiert auf der doppelten Nutzung von Landflächen und ermöglicht den Bau großer PV-Anlagen bei

gleichzeitiger Bodenfreiheit für die Lebensmittelproduktion. Besonders vorteilhaft ist Agri-PV in Regionen mit nährstoffreichem Boden und gemäßigtem Klima, die sowohl für die Landwirtschaft als auch aufgrund hoher Sonneneinstrahlung für PV-Anlagen geeignet sind. Neben der Steigerung der Landnutzungseffizienz ermöglicht Agri-PV eine Erhöhung der Resilienz und der Ernteerträge durch technologische Anpassungen der Systeme. So können durch den Einsatz von PV-Tracking-Systemen eine Reduktion des Bewässerungsbedarfs um 20 %, das Sammeln von Regenwasser zur Bewässerung, eine Verringerung der Winderosion und die Optimierung der Lichtverfügbarkeit für Pflanzen erreicht werden.<sup>187</sup>

Zur Identifikation von E-SAF-Produktionsregionen sollten generell **Machbarkeitsstudien** hinsichtlich potenzieller Risiken und deren Minimierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Dies ermöglicht es, Herausforderungen und Risiken frühzeitig zu begegnen.



### 7.2.2. Sozialer Bereich (S) für SAF-Projekte

#### 1 | SAF allgemein

Der Aufbau von SAF-Produktionsanlagen sollte einen Beitrag zur **Schaffung neuer Arbeitsplätze** leisten, die die sozioökonomische Entwicklung am lokalen Produktionsstandort positiv beeinflussen. Obwohl noch keine konkreten Zahlen zu den bisherigen durch SAF-Projekte geschaffenen Arbeitsplätzen verfügbar sind, gibt es einige vielversprechende Entwicklungen.

In Port Colborne, Kanada plant Azure ein Bio-SAF-Projekt, das nach erfolgreicher Umsetzung 1.500 Konstruktionsjobs während des Aufbaus der Anlage sowie 150 Vollzeit-Arbeitsplätze während des Betriebs schaffen soll.<sup>220</sup> Diese SAF-Anlage soll zukünftig ungefähr 3,18 Mio. Liter (2.521,74 Tonnen) pro Tag liefern, mit einer ersten Produktion im Jahr 2027.<sup>221</sup> LanzaTech, ein Pionier in der AtJ-Technologie, plant ein Projekt im Vereinigten Königreich. Bei einer geplanten Kapazität von 100 Mio. Litern (79.300 Tonnen) pro Jahr werden voraussichtlich 150 Vollzeitstellen geschaffen, darunter 85 qualifizierte Arbeitsplätze vor Ort.<sup>222</sup>

Das Projekt HyKero zielt auf die Einführung einer E-SAF-Anlage in Böhlen-Lippendorf in der Nähe von Leipzig mit Betriebsbeginn im Jahr 2027 ab.<sup>223</sup> Bei erfolgreicher Umsetzung werden 100 Arbeitsplätze direkt in der Anlage selbst entstehen, 500 weitere in begleitenden Servicestrukturen wie Wartung, Instandhaltung und TÜV-Tests. HyKero soll jährlich 50.000 Tonnen SAF produzieren.<sup>224</sup>

Ein zentrales Element zur **Sicherstellung der Trinkwasserversorgung** und der Deckung weiterer Wasserbedürfnisse der lokalen Bevölkerung im Kontext der SAF-Produktion ist die Einführung eines nachhaltigen Wassermanagements. Dies ist insbesondere in von Wasserstress betroffenen Regionen (z. B. Naher Osten, Nordosten Chinas, Südostasien, südliches Westafrika) von großer Bedeutung. Ein effektives Wassermanagement ist essenziell, um die menschliche Gesundheit zu schützen und gleichzeitig die SAF-Projekte erfolgreich umzusetzen. Dabei müssen Maßnahmen für einen nachhaltigen und effizienten Wasserverbrauch implementiert werden.

Um SAF-Projekte erfolgreich zu gestalten, ist die **Integration lokaler und regionaler Gemeinschaften** sowie relevanter Akteure und Organisationen notwendig. Eine vertrauensvolle Zusammenarbeit ermöglicht es,

frühzeitig auf Bedenken einzugehen und externe Perspektiven zu berücksichtigen. Durch die Kooperation mit der lokalen Bevölkerung kann zudem das Bewusstsein für die Vorteile von SAF geschärft werden. Dies fördert nicht nur umweltbewusstes Verhalten, sondern erhöht auch die Akzeptanz solcher Projekte.

Die ICAO betont, dass eine erfolgreiche Integration der Bevölkerung durch einen proaktiven, gut geplanten und strategischen Ansatz erreicht werden kann. Lokale Akteure sollten frühzeitig und langfristig eingebunden werden, um beständiges Vertrauen aufzubauen. Eine transparente Kommunikation und inklusive, kollaborative Strukturen sind dabei von zentraler Bedeutung. Eine Kombination aus neuen (etwa Social Media) und traditionellen Medien sollte als Kommunikationsformat genutzt werden.<sup>225</sup>



## 2 | Zusätzlich für Bio-SAF

### Die **Gesundheit der Bevölkerung**

kann durch die Implementierung biologischer Abfallmanagementsysteme, die mit der Produktion von **Bio-SAF** zweiter oder höherer Generation einhergehen, erheblich verbessert werden. Ein effektives Abfallmanagement trägt nicht nur zur Produktion von Bio-SAF bei, sondern schafft auch gesündere Lebensbedingungen für die Menschen vor Ort.

### Die **Gewährleistung einer sicheren**

**Lebensmittelversorgung** ist ein weiterer wichtiger Aspekt, der durch den Einsatz nachhaltiger Anbaumethoden und die sorgfältige Auswahl von Anbauflächen, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen, erreicht werden kann. Dieser Ansatz hilft, das Dilemma „Food vs. Fuel“ zu lösen, indem er sicherstellt, dass die Produktion von Biokraftstoffen nicht zulasten der Lebensmittelversorgung geht.

Die Präzisionslandwirtschaft bietet ebenfalls einen Ansatz, um die Herausforderung des Konflikts zwischen der Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung und dem steigenden Bedarf nach nachhaltiger Energie und Biokraftstoffen anzugehen. Sie umfasst den Einsatz fortschrittlicher Technologien zur Überwachung und Steuerung des Pflanzenwachstums und ermöglicht einen optimierten Einsatz von Ressourcen wie Energie, Wasser und Dünger. In den USA wurden Erfolge bei der Integration von Biokraftstoffen und Präzisionslandwirtschaft erzielt. So können Landwirte Ernterückstände vorhersagen, die für die Umwandlung in Biokraftstoffe genutzt werden können. In Brasilien wird die Präzisionslandwirtschaft eingesetzt, um mittels datengesteuerter Entscheidungen das Zuckerrohrwachstum zu maximieren und Umweltbelastungen einzuschränken.<sup>225</sup>

Ein vielversprechender Ansatz für eine nachhaltige Bio-SAF-Produktion liegt in der Verwendung nachhaltiger

gerer Rohstoffe wie organischer Abfälle aus Land- und Forstwirtschaft sowie von Pflanzen, die auf degradierten Flächen angebaut werden, die nicht für die Lebens- oder Futtermittelproduktion geeignet sind.<sup>226</sup>

Der Mangel an Arbeitsschutz und Sicherheit in vielen Sektoren, einschließlich der erneuerbaren Kraftstoffe, ist ein häufig übersehener Aspekt. Bio-SAF-Anlagen und Kommerzialisierungsvorhaben sollten insbesondere das SDG-Ziel 3 (Gesundheit und Wohlbefinden) berücksichtigen. Beim Betrieb von Bio-SAF-Anlagen ist es beispielsweise essenziell, die Freisetzung schädlicher Chemikalien zu minimieren. Die Förderung der Gesundheit am Arbeitsplatz, einschließlich des körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens, ist unerlässlich.

Um Arbeitssicherheit und -schutz zu gewährleisten und Verletzungen, Todesfälle sowie Krankheiten zu vermeiden, kann auf die Norm ISO 45001 verwiesen werden. Sie zielt auf die Verbesserung

“

Wir betrachten die Befürchtungen eines Rohstoffmangels als überbewertet, da ihnen eine statische Sicht zugrunde liegt. Durch den Anstieg des atmosphärischen CO<sub>2</sub> ist das Biomassewachstum bereits deutlich angestiegen. Somit ist die Biomasse eindeutig skalierbar. Zudem ergeben sich enorme zusätzliche Produktionspotenziale, beispielsweise durch Algenwachstum, wenn eine entsprechende Wertschöpfung dadurch möglich ist.

**Dr. Mark Misselhorn**, Chief Executive Officer, Caphenia GmbH

der Luftqualität, die Eliminierung toxischer Substanzen, die Bereitstellung persönlicher Schutzausrüstung für Arbeitnehmende, die Implementierung organisatorischer Sicherheitsprotokolle, die Bereitstellung von sauberem Wasser, die Verwendung von Kennzeichnungen und Warnschildern sowie die Bereitstellung unterstützender Maßnahmen zur Förderung der geistigen Gesundheit ab.<sup>178</sup>

## 3 | Zusätzlich für E-SAF

Investitionen in zusätzliche Stromerzeugungsanlagen im Rahmen von E-SAF-Initiativen können zur Verbesserung der Stromversorgung der lokalen Gesellschaft beitragen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es ausschlaggebend, dass die Projekte sowohl einen Kapazitätsüberbau an erneuerbarem Strom als auch eine Netzverstärkung umfassen.<sup>75</sup> Zudem ist es entscheidend, den Produktionsprozess von E-SAF energieeffizient zu gestalten, um mögliche Konflikte mit der lokalen Energiewende zu vermeiden.<sup>182</sup>

### 7.2.3. Governance (G) für SAF-Projekte

#### 1 | Governance allgemein

Um das Potenzial von SAF auszuschöpfen, ist die Umsetzung weitreichender regulatorischer Maßnahmen notwendig. Ein essenzieller Faktor hierbei ist, dass finanzielle Förderungsmöglichkeiten geschaffen werden sollten. Diese können nicht nur existierende und neue Produktionsanlagen direkt unterstützen, sondern auch helfen, gute Voraussetzungen für Forschung und Entwicklung an Produktionstechnologien zu schaffen. Dadurch kann der Ausbau von SAF-Kapazitäten maßgeblich vorangetrieben werden. Als besonders wichtige regulatorische Maßnahme, um die Dekarbonisierung des gesamten Transportsektors inklusive der Luftfahrt voranzutreiben, wird außerdem gemeinhin die Abschaffung von Subventionen fossiler Energieträger gesehen.<sup>190</sup> Derzeit wird der Hochlauf der SAF-Produktion durch hohe Kosten und den Aufbau der nötigen Infrastruktur gebremst. Hinzu kommt, dass noch weitreichende technologische Fortschritte erforderlich sind, die ebenfalls finanzielle Mittel erfordern. Hier können Regierungen einen signifikanten Beitrag leisten, indem entsprechende Fördermöglichkeiten geschaffen werden, die für eine gesteigerte Attraktivität und geringere Einstiegsbarrieren in den SAF-Markt sorgen. Auch andere regulatorische Mittel wie beispielsweise Steuererleichterungen können Anreize schaffen.

“

Anreizsysteme und steuerliche Vergünstigungen spielen eine entscheidende Rolle bei der Förderung von SAF.

In den Vereinigten Staaten beispielsweise werden solche Mechanismen bereits in größerem Umfang genutzt, um die Produktion und Verwendung von alternativem Kerosin zu unterstützen.

**Bernhard Dietrich**, Leiter CENA Hessen, Hessen Trade & Invest GmbH

Außerdem können Richtlinien genutzt werden, um eine Priorisierung von **erneuerbaren Kraftstoffen** für solche Transportmittel, die schwer zu dekarbonisieren sind, zu erreichen. Dies würde eine Priorisierung von SAF in den Produktionsstätten begünstigen und somit eine Ausreizung der maximalen Produktionskapazitäten herbeiführen.<sup>189</sup>

Es ist unumgänglich, einen **gemeinsamen regulatorischen Rahmen** zu schaffen und die grenzüberschreitende Koordination und Kooperation zwischen den Ländern umzusetzen. So kann verhindert werden, dass sich eine Konkurrenz zwischen verschiedenen Sektoren negativ auf die SAF-Produktion auswirkt oder internationale Inkompatibilitäten die Effektivität nationaler Maßnahmen hemmen. Außer-

dem kann der regulatorische Rahmen vorteilhafte Bedingungen für einen Einstieg in den SAF-Markt schaffen. Während Regularien international abgestimmt und kompatibel sein müssen, ist es meist nicht vorteilhaft, wenn sie in allen Ländern identisch sind. Stattdessen sollte sie an die jeweiligen ökonomischen und sozialen Gegebenheiten angepasst sein. Außerdem sollten auch die regionalen Voraussetzungen wie zum Beispiel die Verfügbarkeit von Feedstock oder erneuerbaren Energien beachtet werden.<sup>189, 191</sup> Einige Aspekte wie zum Beispiel Bilanzierungsmethoden sollten allerdings international einheitlich sein, um den Handel und internationale Aktivitäten, die im Luftfahrtsektor üblich sind, zu vereinfachen. Beispielsweise sollte die Einführung von SAF-Quoten, die für eine Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors maß-

# Gover



geblich sind, international abgestimmt sein. Dies ist wichtig, um die Verlagerung beispielsweise von Unternehmenssitzen in Länder mit weniger strengen Vorgaben und damit ein „Carbon Leakage“ zu verhindern.<sup>189</sup> Die Schaffung eines solchen gemeinsamen regulatorischen Rahmens erfordert eine internationale Kooperation, mit dem Ziel, sowohl die Nachfrage als auch das Angebot zu stimulieren.<sup>191</sup>

Eine **stetige und flexible Anpassung** existierender Regulierungen ist notwendig, um einen möglichst reibungslosen Hochlauf der SAF-Anwendung zu erreichen und sowohl die Produktion als auch die Adaption zu vereinfachen.<sup>188</sup> Gleichzeitig muss der regulatorische Rahmen stabil und verlässlich sein, um den beteiligten Parteien die nötige Planungssicherheit zu geben.<sup>191</sup> In der Findung neuer Regularien ist es hilfreich, Produzenten, Abnehmer und andere Beteiligte einzubeziehen, um deren Bedürfnisse und Perspektiven berücksichtigen zu können. Dies ermöglicht es, vorteilhafte Lösungen für alle Parteien zu finden, die zum Beispiel die Kooperation zwischen Produzenten und Abnehmern in Lieferverträgen und ähnlichen Maßnahmen vereinfachen. Außerdem können eine Integration der Öffentlichkeit und die Schaffung von Verständnis helfen, eine effektive und effiziente SAF-Politik zu ermöglichen.



# nance



## 2 | Governance Bio-SAF

Eine der Hauptherausforderungen bei der spezifischen Betrachtung von **Bio-SAF** ist, dass Landnutzungskonflikte und andere negative Auswirkungen in der Beschaffung der erforderlichen Biomasse verhindert werden müssen. Hierbei können **Vorgaben zur Verwendung von Biomasse** als Rohstoff eine Rolle spielen. In der EU beispielsweise ist die Produktion von Biokraftstoffen aus Biomasse, die negative Landnutzungsauswirkungen haben könnte, durch die RED-II-Richtlinie verboten. Hierzu gehört Palmöl, dessen Anbau häufig mit der Abholzung von Regenwäldern verbunden ist. Hierbei ist es allerdings essenziell, dass ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt wird. Das Verbot nur einzelner Feedstocks könnte dazu führen, dass die insgesamt genutzte Landfläche nicht verringert wird. Stattdessen könnte die Substitution mit alternativen Pflanzen, die einen noch höheren Flächenbedarf haben, die Landnutzung und die negativen Gesamtauswirkungen sogar verstärken.<sup>194</sup>

Außerdem muss verhindert werden, dass die Produktion von Bio-SAF bei der Beschaffung von Biomasse eine Konkurrenz mit der Lebensmittelversorgung verursacht. Dies kann beispielsweise durch Regularien erreicht werden, die dafür sorgen, dass weniger lebensmittelgeeignete Pflanzen für die Produktion von Biokraftstoffen verwendet werden. Unter anderem können Anreize geschaffen werden,

nicht lebensmitteltaugliche Pflanzen auf Flächen anzubauen, die nicht fruchtbar genug für den Lebensmittelanbau sind.<sup>192</sup> Zusätzlich sollten Anreize geschaffen werden, um landwirtschaftliche Abfälle für die Produktion von Biokraftstoffen zu nutzen. Dies könnte die Herstellung von Biokraftstoffen in mehreren Regionen ermöglichen und kosteneffizienter gestalten.<sup>193</sup>

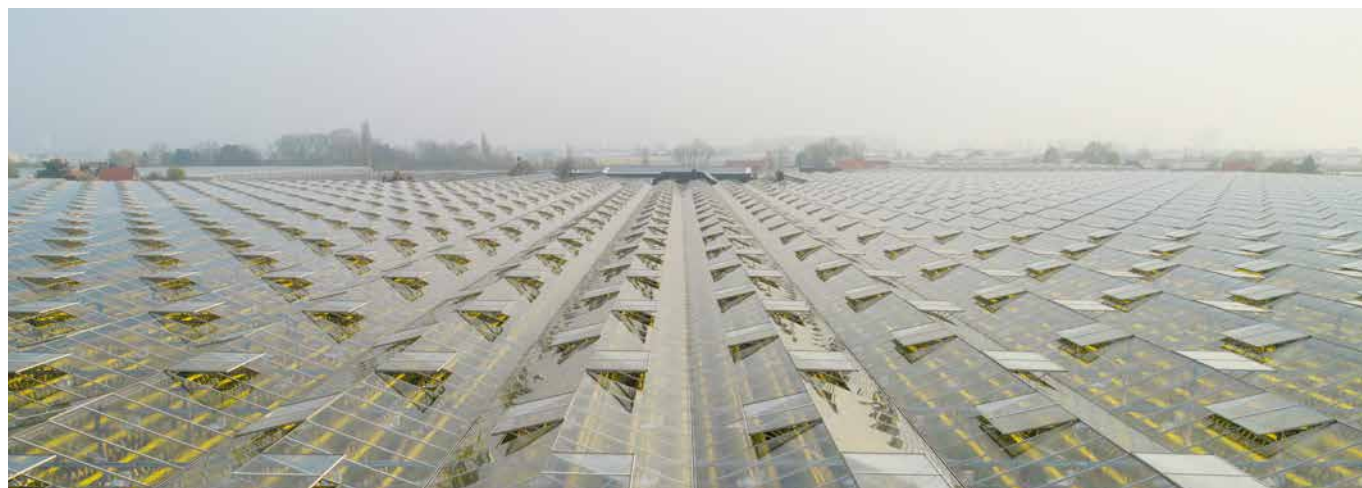
Bei all diesen Regularien muss allerdings beachtet werden, dass oberflächlich positive Vorgaben, die zum Beispiel den negativen Umwelteinfluss der Biomassebeschaffung senken sollen, an anderen Stellen ungewollte Konsequenzen haben können. So kann das Verbot bestimmter Biomasserohstoffe wie zum Beispiel Sojaöl dazu führen, dass Landwirte in nichteuropäischen Anbaugebieten wie Malaysia und Indonesien mit einer geringeren Nachfrage und damit einem reduzierten Einkommen konfrontiert werden.<sup>194</sup> Zusätzlich muss auch die Verfügbarkeit verschiedener Rohstoffe berücksichtigt werden und es gilt, ein effektives Gleichgewicht zwischen Wirtschaftlichkeit und Skalierbarkeit sowie ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit zu finden.

**Einheitliche Regularien und Nachhaltigkeitszertifikate** für biobasierte Rohstoffe sind essenziell, um die Einhaltung der zuvor beschriebenen Maßnahmen sicherzustellen. Nur so kann das Potenzial von Bio-SAF, die Luftfahrt nachhaltiger zu gestalten, voll-

ständig genutzt werden. Dass robuste und zuverlässige Zertifizierungsprozesse notwendig sind, zeigen beispielsweise aktuelle Entwicklungen der EU-Importe von Biomasse, die zur SAF-Produktion genutzt werden kann. Es ist wahrscheinlich, dass Palmöl seit dem Verbot seiner Nutzung zur Kraftstoffgewinnung immer noch im Umlauf ist, fälschlicherweise deklariert als Abfallöl. Aus diesem Grund gibt es auch Forderungen nach einer einheitlichen Datenbank, in der Informationen zu Biokraftstoffen gesammelt werden, um die Transparenz zu erhöhen.<sup>227</sup>

Auf freiwilliger Basis gibt es hier unter anderem schon die ISCC für SAF, die die Nutzung von Feedstocks mit geringem Risiko für negative Landnutzungsauswirkungen bestätigt.<sup>196</sup>

Der Anbau der für Bio-SAF benötigten Rohstoffe benötigt nicht nur viel Fläche, sondern hat auch einen hohen Wasserverbrauch. Regularien **zu nachhaltigem Bewässerungsmanagement** können hier verhindern, dass die Dekarbonisierung der Luftfahrt zulasten anderer Nachhaltigkeitsaspekte geht.<sup>228</sup> Beispiele für solche regulatorischen Maßnahmen sind Wasserbepreisungen oder Zuteilungssysteme, die die Wassermenge begrenzen, die aus Flüssen entnommen werden darf. Außerdem können Anreize für Unternehmen geschaffen werden, die Nutzung von Wasser effizienter zu gestalten.<sup>185</sup>



### 3 | Governance E-SAF

Um Hindernisse bei der Skalierung der **E-SAF**-Produktion zu überwinden, ist die Gestaltung von Regulierungen, die die Produktion und **Entwicklung von PtL-Technologien unterstützen**, notwendig. Nur so kann eine weitläufige Kommerzialisierung ermöglicht werden.<sup>182,229</sup> Eine mögliche Maßnahme ist die Formulierung von Unterquoten, die spezifizieren, wie viel des vorgeschriebenen SAF-Anteils mittels PtL produziert worden sein muss. Solche Vorgaben gibt es beispielsweise in der EU im Rahmen der RefuelEU-Aviation-Initiative. Außerdem erfordert die Bereitstellung der erforderlichen Investitionen eine Unterstützung seitens der Politik. Regularien können beispielsweise Sicherheit für potenzielle Investoren schaffen.<sup>182</sup> Insbesondere ist eine Förderung der Entwicklung von DAC-Technologien notwendig, um das Dekarbonisierungspotenzial von E-SAF zu maximieren.

Um sicherzustellen, dass das benötigte CO<sub>2</sub> auf nachhaltige Weise gewonnen wird, sollte eine **Regulierung der Kohlenstoffquellen** erfolgen. Hierzu gehört, dass ein regulatorischer Rahmen geschaffen werden muss, der sicherstellt, dass der Einsatz von CO<sub>2</sub> in schwer zu dekarbonisierenden Sektoren wie der Luftfahrt bevorzugt wird. Dies ist notwendig, da nachhaltige CO<sub>2</sub>-Quellen wie beispielsweise eine Gewinnung über DAC noch begrenzt sind.<sup>197</sup> Wie bei den Rohstoffen für Bio-SAF können auch bei der Produktion von E-SAF einheitliche Zertifizierungen für CO<sub>2</sub>- und Energiequellen sicherstellen, dass negative Effekte verhindert werden.<sup>196</sup>

Zudem ist es notwendig, **großflächige Infrastruktursysteme** wie zum Beispiel Pipelines zum Transport von CO<sub>2</sub> zu schaffen, um eine ortsunabhängigere industrielle Produktion zu ermöglichen.<sup>197</sup>

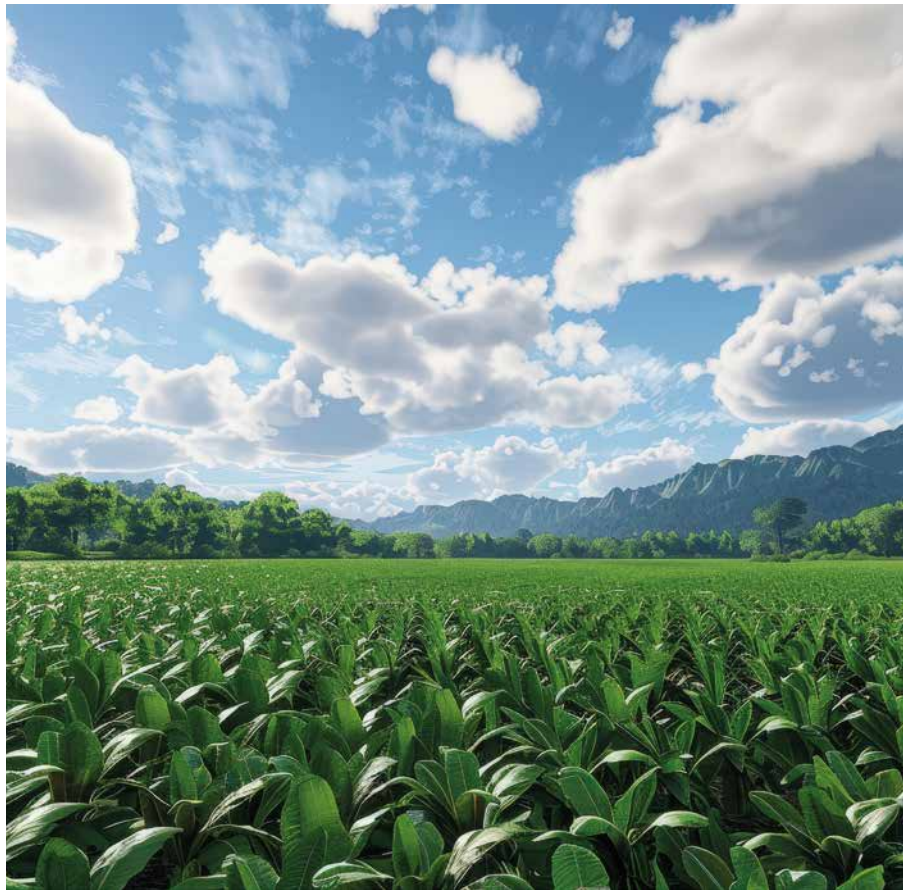


Des Weiteren ist noch nicht einheitlich geklärt, wie das in der Produktion benötigte CO<sub>2</sub> bilanziert wird. Hier sollte die Politik **international einheitliche Bilanzierungssysteme** schaffen und festlegen, an welcher Stelle diese Bilanzierung vorgenommen wird, um Doppelzählungen zu vermeiden.<sup>197</sup>



# **Kritische EU-Erfolgs- faktoren für die Transformation des Luftverkehrs**





## Einführung

Bereits in den letzten Jahren ließ sich ein starker Anstieg der SAF-Nachfrage beobachten. Die in Kapitel 3 dieser Studie diskutierte EY-Prognose zeigt auf, dass in den nächsten Jahrzehnten eine Fortsetzung und sogar Verstärkung dieses Trends zu erwarten ist. Momentan wird die gesamte produzierte SAF-Menge bereits abgenommen und einige Abnehmer sehen sich beim Versuch, SAF zu erwerben, sogar mit Schwierigkeiten konfrontiert. Obwohl auch die Produktionskapazitäten künftig deutlich ausgebaut werden sollen, ist zu erwarten, dass sich über die nächsten Jahre eine deutliche Versorgungslücke aufbauen wird.

Insbesondere in der EU, wo der Markt und die Abnahme durch die ReFuelEU-Aviation-Initiative festgelegt sind, be-

steht ein essenzieller Bedarf, die Lücke zwischen Produktionskapazität und Nachfrage zu schließen. Derzeit besteht das Risiko, dass viele Fluggesellschaften die SAF-Quoten bis 2030 nicht erfüllen und hohe Strafen zahlen müssen. Die größere Herausforderung wird jedoch ab 2035 erwartet, wenn die E-SAF-Quoten relativ hoch werden. Es müssen Investitionen in die Entwicklung getätigt werden, um eine Ausreifung der Produktionstechnologien zu erreichen. Insbesondere für E-SAF sind signifikante Fortschritte notwendig, um die Herstellung auf industrieller Ebene zu ermöglichen. Zudem muss die Produktion von SAF wirtschaftlicher und die Preise für SAF für Fluggesellschaften attraktiver und erschwinglicher werden. Um diese Voraussetzungen für eine erfolgreiche Skalierung von SAF zu schaffen, soll eine Kombination aus effizienten

und umfassenden politischen und finanziellen Instrumenten auf EU-Ebene erreicht werden. Ziel sollte es sein, die Erfüllung der EU-Vorgaben voranzutreiben.

Außerdem sollten die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass der SAF-Markt langfristig auch ohne Subventionen und anderweitige Unterstützung sowohl für Produzenten als auch für Abnehmer attraktiv wird. Hierbei spielt die Technologie eine wichtige Rolle.

Mit diesem Fokus behandelt das folgende Kapitel konkrete Empfehlungen für regulatorische, finanzielle und technische Rahmenbedingungen, die optimale Bedingungen für die Bankfähigkeit von SAF-Projekten schaffen können.

erfolg



## 8.1 Entwicklung von Finanzinstrumenten für SAF-Projekte und Verbesserung der Finanzierbarkeit

Die Verfügbarkeit ausreichender Finanzierungsquellen ist ein entscheidender Erfolgsfaktor. Besonders wichtig ist es, öffentliche Fördermittel bereitzustellen und diese effektiv mit Privatkapital zu kombinieren. Es wird nicht machbar sein, allein private Investoren einzubinden, da diese eine Rendite-

erwartung von 11-20 % haben, was in manchen Fällen nicht realistisch ist.

In der EU gibt es bereits verschiedene Finanzierungsquellen, um die Dekarbonisierung des Luftverkehrs zu unterstützen (z. B. Fördermittel für innovative Produktionswege, H2Global usw.). Hierzu gehören auch Strafzahlungen, die aus der Nichteinhaltung von Regularien der ReFuelEU-Aviation-Verordnung resultieren. Diese werden dezentral in jedem EU-Land gesammelt und sollten grundsätzlich in die Skalierung von SAF reinvestiert werden. Allerdings bleibt es jedem Land offen zu entscheiden, wie es diese Mittel verwendet. Es kann dann schwierig sein, die Mittel je nach Bedarf für SAF-Projekte aufzuteilen und zu priorisieren.

Um dies möglichst effektiv und effizient zu tun, sollten gesammelte Strafzahlungen an einer zentralen Stelle gebündelt werden.

Hier sehen wir die Möglichkeit, einen Fonds auf die EU-Ebene einzurichten, der ausschließlich auf die Finanzierung und Förderung von SAF-Projekten, vorrangig in der EU, ausgerichtet ist. Dies könnte auch auf globaler Ebene Vorteile für die EU und europäische Fluggesellschaften bieten.

Im Folgenden beschreiben wir die Struktur eines solchen Fonds sowie mögliche finanzielle Instrumente und ihre Funktion.



### 8.1.1. Überblick über einen möglichen Fonds und Finanzinstrumente

Im Zentrum eines möglichen EU-Fonds soll eine Institution (evtl. auch Wasserstoffbank – EHB) auf EU-Ebene stehen, die die zentrale strategische und operative Verantwortung für die Reinvestition verschiedenster finanzieller Mittel in SAF-Projekte trägt. Die EHB funktioniert wie ein politisches Instrument (im Rahmen der „REPowerEU“), mit dem die Produktion und Förderung von grünem H<sub>2</sub> angekurbelt werden soll. Es gibt aber Potenzial für die Er-

weiterung der Hauptfunktion der EHB mit einer möglichen Unterstützung von Bio-SAF- und E-Fuel-Projekten, insbesondere wenn sie in Verbindung mit Wasserstofftechnologien stehen. Hier sehen wir ein Potenzial für eine mögliche Ergänzung durch SAF, sofern diese nicht der EU-Regulierung und/oder geltendem Recht widerspricht.

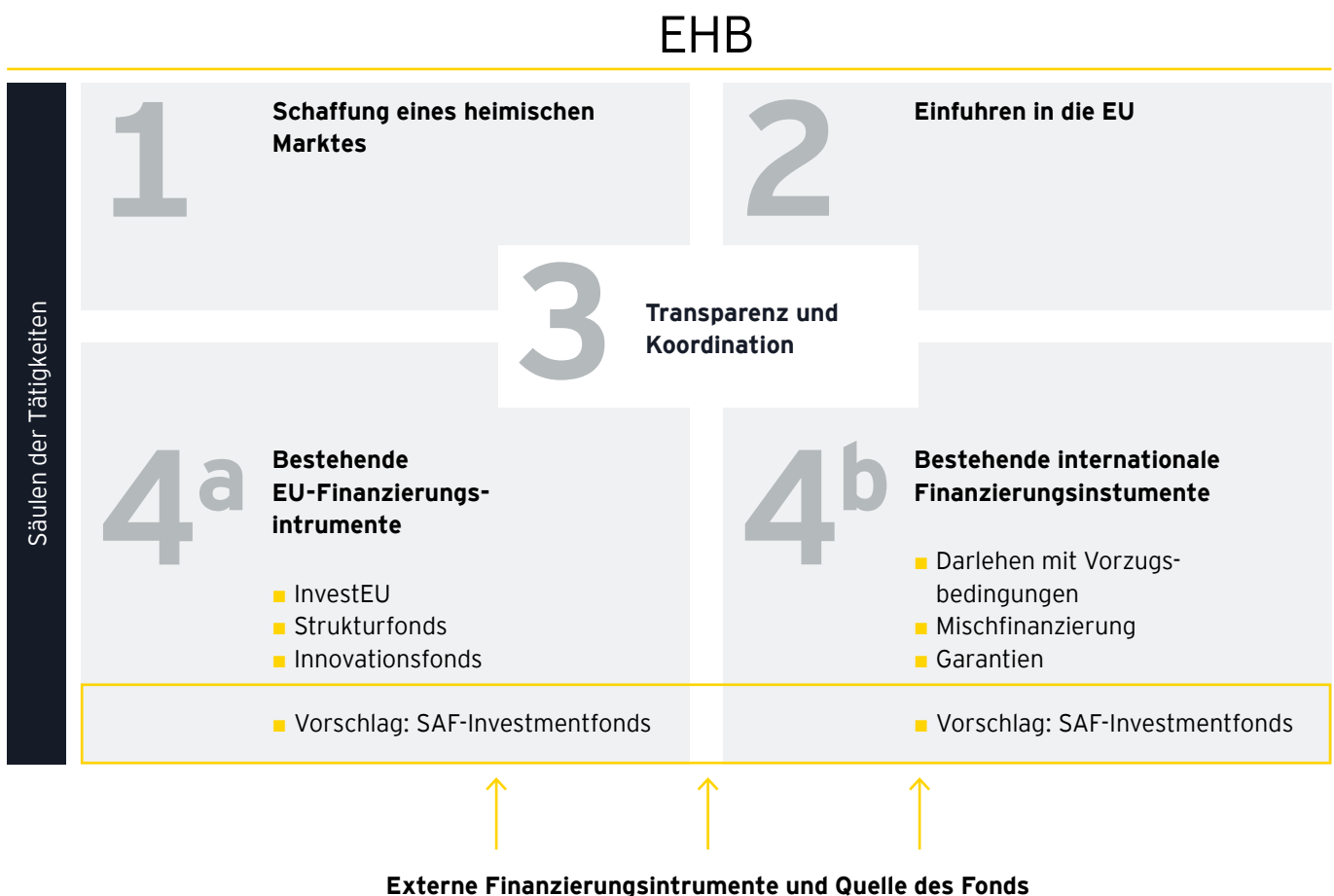
Die EHB hat derzeit vier Säulen der Tätigkeiten und zur vierten Säule könnte ein spezieller SAF-Investmentfonds hinzugefügt werden.

Dieser Fonds könnte aus verschiedenen Finanzierungsquellen bestehen. Hier schlägt EY fünf Quellen vor, die zur Finanzierung von SAF-Projekten, aber auch für CfDs im E-SAF-Bereich verwendet werden können. Einen Überblick über alle fünf Finanzierungsquellen und den gesamten Mechanismus bietet Abbildung 48.

#### Abbildung 47

Aktuelle Struktur der EHB und vorgeschlagene Ergänzung von SAF-Investmentfonds

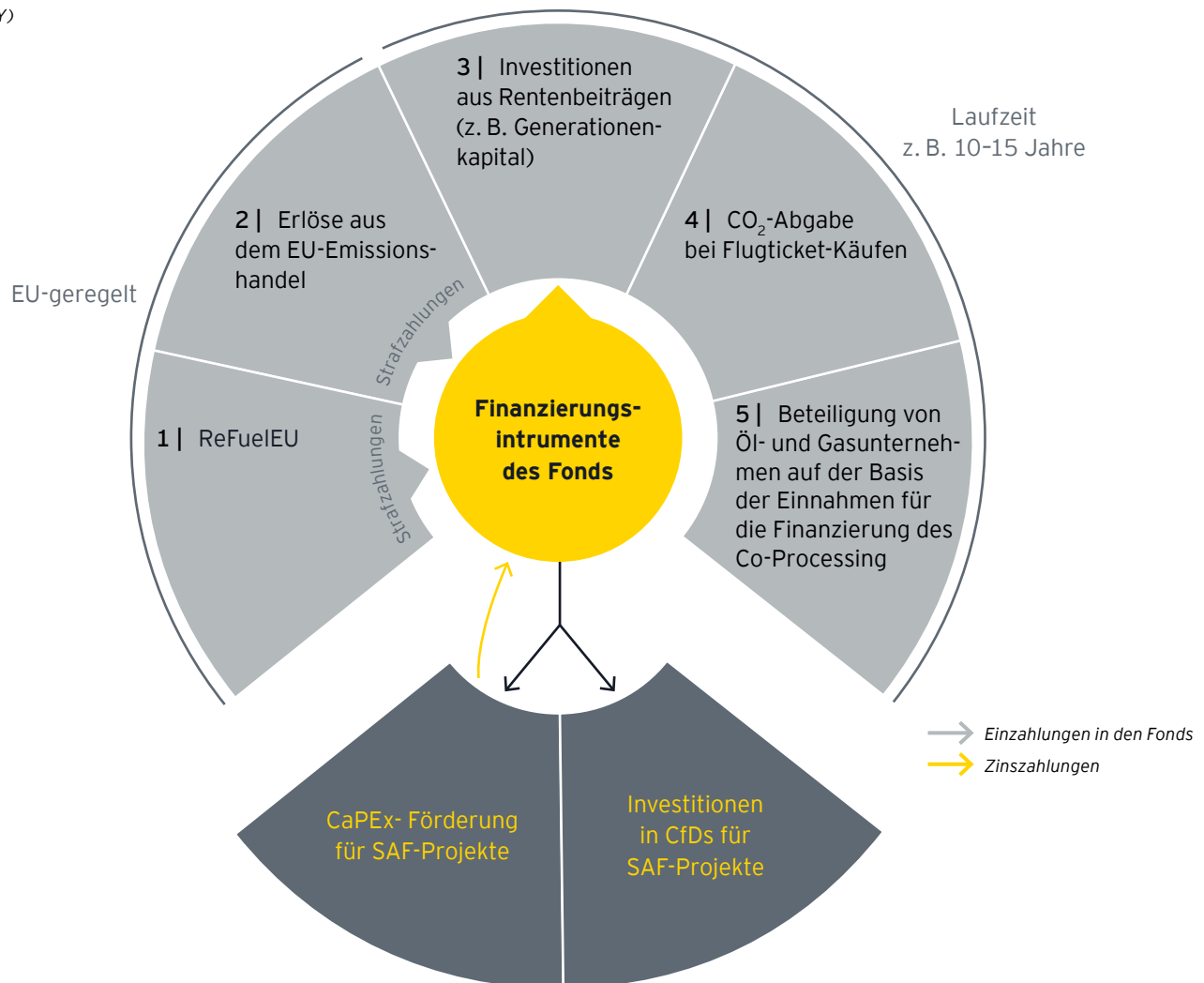
(Quelle: EU, EY)

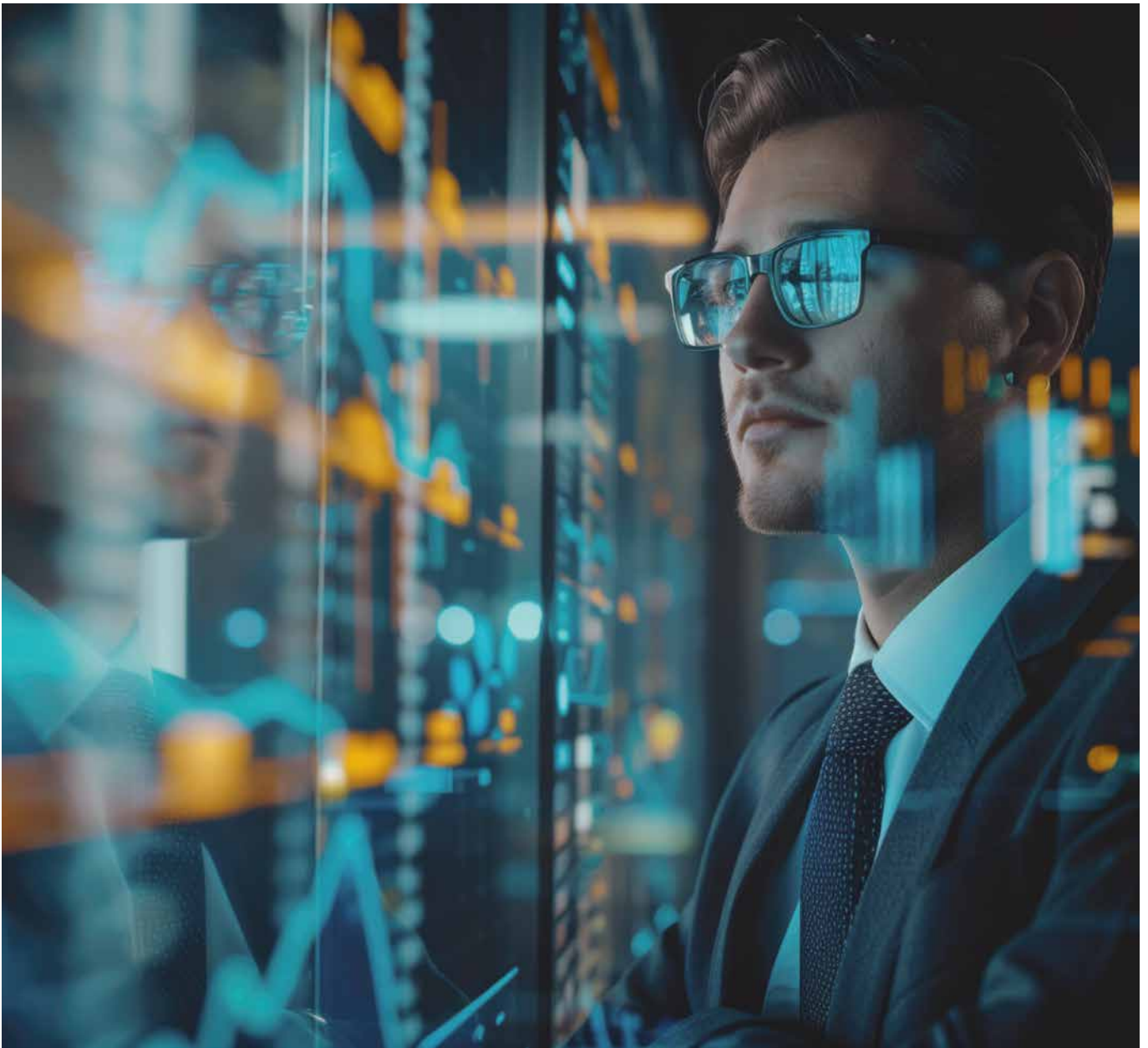


### Abbildung 48

Überblick über das von EY vorgeschlagene Modell für die Bereitstellung finanzieller Mittel für die Skalierung der SAF-Produktion

(Quelle: EY)





Hierunter sind sowohl bereits existierende Instrumente, die in ihrer Verwendung lediglich durch den Fonds gebündelt werden müssten, als auch neu vorgeschlagene Finanzierungsquellen zu verstehen. Sie umfassen zwei bereits existierende Mechanismen, für die lediglich eine direktere zentralisierte Reinvestition in die SAF-Skalierung vorgeschlagen wird. Hierbei handelt es sich um Strafzahlungen für die Nichteinhaltung der ReFuelEU-Aviation-Richtlinie und um Erlöse aus dem EU ETS. Außerdem haben vier der fünf Quellen einen direkten Bezug zum Luftfahrtsektor oder zur Energieindustrie und sorgen somit für eine unmittelbare Umlenkung von Finanzströmen hin zu kohlenstoffarmen Technologien:

#### **1 | ReFuelEU-Aviation-Strafzahlungen:**

Die Verordnung legt Quoten für SAF für Produzenten, Flughäfen und Fluggesellschaften fest. Bei deren Nichteinhaltung werden Strafzahlungen fällig. Die Verordnung regelt allerdings noch nicht konkret, wer diese Strafzahlungen sammelt und wie sie in der Zukunft verwendet (reinvestiert) werden. Hierfür sind nach aktuellem Stand die Mitgliedstaaten zuständig. Obwohl die Verordnung vorschreibt, dass die Investitionen in die SAF-Industrie fließen müssen, bleibt die genaue Umsetzung den Mitgliedstaaten überlassen.<sup>35</sup> Dieses System könnte zentralisiert werden, sodass die finanziellen Mittel direkt in einen dedizierten Fonds fließen. Die Höhe der Strafzahlungen wird von den Mitgliedstaaten

unter Einhaltung einer Mindesthöhe individuell festgelegt. Eine zentrale Instanz in jedem Staat könnte für die Sammlung der Strafen und deren Weiterleitung an den Fonds verantwortlich sein.



**2 | Erlöse aus dem EU-Emissionshandel:** Ähnlich wie die ReFuelEU-Verordnung erlegt auch das EU ETS Unternehmen in der Luftfahrtbranche Vorgaben auf. In diesem Fall handelt es sich um Vorgaben hinsichtlich ihrer ausgestoßenen Emissionen für Flüge innerhalb der EU.<sup>230</sup> Hierbei werden Maximalwerte festgelegt, bei deren Nichteinhaltung ebenfalls Zahlungen fällig werden, und zwar in Form von Ausgaben für Emissionszertifikate. Einige dieser Zertifikate werden direkt von der EU-Kommission versteigert, andere von den EU-Mitgliedstaaten. Dementsprechend gehen auch die Einnahmen zu einem Teil direkt an die EU und zum anderen an die Mitgliedstaaten. Sowohl auf EU- als auch auf Länderebene werden diese Einnahmen in Fonds verschiedenen Zwecken zugeteilt, die größtenteils dem Klimaschutz zugutekommen sollen.<sup>231</sup> Derzeit fließen beispielsweise alle sektorenübergreifenden deutschen Einnahmen aus dem ETS in den Klima- und Transformationsfonds.<sup>232</sup> Um die Transformationskraft dieser finanziellen Mittel zu bündeln und positive Effekte zu maximieren, könnten auch hier die Einkünfte, die aus der Luftfahrtbranche kommen, in den dedizierten SAF-Fonds fließen. Hierfür wäre allerdings eine Transfor-

mation des aktuellen Zuteilungssystems der Einnahmen aus dem ETS nötig. Dies liegt daran, dass eine Separation nach dem Sektor, aus dem die Einnahmen stammen, noch nicht erfolgt.

**3 | Investitionen aus Rentenbeiträgen:** Eine neue Finanzierungsquelle für den SAF-Bereich könnten Investitionen aus den Rentensystemen jener Mitgliedstaaten sein, die Rentengelder an der Börse investieren. Der vorgeschlagene Fonds würde Gelder aus den Rentenbeiträgen sammeln und gezielt in Projekte investieren, die nachhaltige Kraftstoffe für die Luftfahrt entwickeln und produzieren. Der Fondsmanager würde eine Due-Diligence-Prüfung durchführen, um geeignete SAF-Projekte zu identifizieren. Diese Prüfung umfasst die Bewertung der technischen Machbarkeit, der finanziellen Rentabilität und der Umweltauswirkungen der Projekte. Ziel ist es, Projekte auszuwählen, die sowohl nachhaltige als auch profitable Erträge versprechen. Investitionen aus Rentenbeiträgen in SAF-Projekte bieten eine Win-win-Situation: Rentenfonds können stabile und langfristige Erträge erzielen, während sie gleichzeitig zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Förderung nachhaltiger Technologien beitragen. Solche Inves-

itionen erfordern jedoch eine sorgfältige Planung, Risikobewertung und die Zusammenarbeit mit staatlichen Stellen und privaten Unternehmen, um erfolgreich zu sein.

Beispielsweise wurde in Deutschland kürzlich das sogenannte Generationenkapital eingeführt. Hierbei legt eine eigens dafür gegründete Stiftung Gelder am Kapitalmarkt an. Die Erträge hieraus sollen dann als Finanzierungsbeitrag für die Rentenversicherung dienen.<sup>233</sup> Auch wenn diese Anlagen zur Risikominimierung global diversifiziert angelegt werden sollten, kann dennoch ein Fokus auf nachhaltige Investitionen gelegt werden und ein Teil in den dedizierten Fonds fließen. Dies würde verlässliche Zinszahlungen des Fonds an die verwaltenden Organisationen des Rentenkapitals erfordern. Auch andere EU-Länder haben ähnliche Rentensysteme, bei denen Geld am Kapitalmarkt angelegt wird. Eine verstärkte Investition in nachhaltige Anlagemöglichkeiten wie beispielsweise SAF-Projekte wäre auch hier denkbar. Zu den Ländern, deren Rentensysteme so zu einem dedizierten SAF-Fonds beitragen können, zählen Schweden und die Niederlande.



#### 4 | CO<sub>2</sub>-Abgabe bei Flugticket-Käufen:

Eine weitere Maßnahme, mit der Einnahmen für den Fonds generiert werden können, ist die Einführung einer verpflichtenden CO<sub>2</sub>-Abgabe beim Kauf von Tickets für Flüge, die an einem Flughafen in der EU starten oder landen. Diese könnte nach dem Beispiel der bereits existierenden freiwilligen Beiträge gebildet werden, die von vielen Fluggesellschaften beim Kauf von Tickets angeboten werden. Am denkbarsten erscheint eine pauschale Summe für europäische und ausländische Verbindungen. Dies würde den operativen Aufwand verringern. Solch eine Pauschale könnte beispielsweise 5 Euro (~ 5,4 US-Dollar) für Flüge innerhalb der EU und 10-15 Euro (~ 10,80-16,20 US-Dollar) für anderweitige Flüge, die in der EU starten oder landen, betragen. Anstelle einer Investition in Kompensationsprojekte würden die Mittel dann in den Fonds fließen und über diesen direkt in SAF-Projekte investiert werden. Hierdurch sind, im Gegensatz zu Kompensationsprojekten, eine direkte Verbindung zur Luftfahrt und langfristige Verbesserungen der Klimaauswirkungen des Sektors gewährleistet. Dieses Instrument muss aber noch mit den Fluggesellschaften abgestimmt werden.

#### 5 | Steuer auf Einnahmen aus Co-Processing:

Mittels Co-Processing kann in Raffinerien, in denen fossile Kraftstoffe produziert werden, neben den fossilen Energieträgern auch Biomasse als Rohstoff verarbeitet und somit direkt SAF (z. B. HEFA) hergestellt werden. Die vorhandenen Anlagen können mit Anpassungen und Upgrades für die Verarbeitung von Biomasse oder Abfällen genutzt werden. Für Öl- und Gaskonzerne, die solche Raffinerien betreiben, gibt es in der EU die Möglichkeit, von staatlichen Fördermitteln zu profitieren, um die notwendige Umrüstung der Anlage zu finanzieren. Obwohl das Co-Processing zu einer deutlich schnelleren Skalierung der SAF-Produktion beitragen kann, birgt diese Förderung auch Risiken. Da die Umrüstung deutlich kostengünstiger ist als der Aufbau einer komplett neuen Infrastruktur zur Produktion von SAF, besteht die Gefahr, dass große Energiekonzerne kleinere Projekte (z. B. Start-ups) vom Markt verdrängen. Um die finanziellen Mittel, die zur Investition in SAF-Projekte verfügbar sind, auszubauen und gleichzeitig diesem Risiko entgegenzuwirken, ist die Einführung einer neuen Abgabe eine Option. Solch eine Abgabe könnte in Form einer zusätzlichen Steuer auf die Profite des Verkaufs von SAF aus Co-Processing erfolgen. Hierbei ist es allerdings essenziell, dass diese Steuer nicht vollständig die Mehreinnahmen durch die höheren Verkaufspreise von SAF gegenüber fossilem Kerosin eliminiert. Die Produktion von SAF muss nach wie vor wirtschaftlich attraktiv bleiben. Zudem ist es wichtig, dass die Steuer nur auf SAF aus der Produktion im Co-Processing-Verfahren erhoben wird. So werden bei der Produktion von reinem SAF maximale Gewinne ermöglicht und Geldströme gezielt von Energiekonzernen, die hauptsächlich fossile Energien fördern, in die SAF-Produktion umgelenkt.

Die Besteuerung von Einnahmen aus Co-Processing hängt von den nationalen Steuergesetzen und Regelungen ab. Unternehmen müssen sicherstellen, dass sie alle relevanten Steuern korrekt berechnen und abführen, und sollten sich über mögliche Steuervergünstigungen und Anreize informieren, die für nachhaltige Praktiken verfügbar sind. In Deutschland können die Einnahmen aus Co-Processing wie folgt besteuert werden:

- Körperschaft- und Gewerbesteuer
- Umsatzsteuer (Mehrwertsteuer) auf den SAF-Verkauf

Es könnte spezielle Regelungen oder Anreize für Unternehmen geben, die nachhaltige Technologien und Verfahren einsetzen. Diese könnten in Form von Steuervergünstigungen oder Förderprogrammen bereitgestellt werden.





### 8.1.2 Die Funktion des dedizierten Fonds

All diese Mittel sollten dann in den oben bereits beschriebenen Fonds beziehungsweise die EHB (mit erweitertem Mandat) fließen und von dort strategisch gezielt in die SAF-Produktion reinvestiert werden. Der Hauptvorteil eines solchen Vorgehens ist die Bündelung sämtlicher Bemühungen zur Skalierung der SAF-Produktion. Dies birgt Potenzial für mehr Effektivität und Effizienz, als wenn alle Mitgliedstaaten die Mittel separat und mit unterschiedlichen Ansätzen unter Umständen verstreut investieren.

Die Prioritäten für die Investments dieses Fonds sollten insbesondere auf E-SAF liegen. Hier besteht wie in Kapitel 6.3 besprochen langfristig das größere Potenzial. Eine wichtige Maßnahme des Fonds könnte die Bezuschussung der Produktion sein, um die Kostenlücke zwischen SAF und fossilem Kerosin zu schließen. Ein konkretes Mittel hierfür könnten sogenannte Contracts for Difference sein. Solche Verträge werden von zwei Parteien über Preisdifferenzen von gehandelten Produkten abgeschlossen. Im Fall der SAF-Produktion könnten sie zwischen E-SAF-Produzenten und dem dedizierten Fonds über den Preis von grünem  $H_2$  abgeschlossen werden. Produzenten würden hierbei die Preisdifferenz

zwischen grünem und grauem  $H_2$ , der für die E-SAF-Produktion benötigt wird, aus dem Fonds finanziert bekommen. Solche direkten Vergünstigungen dürfen aber keinesfalls der Hauptzweck oder gar die einzige Verwendung des Fonds sein. Vielmehr muss das Ziel darin bestehen, die Produktion von SAF langfristig auch ohne regulatorisches Eingreifen wirtschaftlich nicht nur tragfähig, sondern attraktiv zu machen.

Um zu bewirken, dass die Produktion von SAF, insbesondere von E-SAF, langfristig durch reine Marktdynamiken attraktiv wird, sollte außerdem insbesondere in Forschungs- und Entwicklungsprogrammen für die PtL-Technologie investiert werden. Dies ist essenziell, um die Produktion von E-SAF auf industrieller Ebene zu ermöglichen. Außerdem sollte der Bau von Produktionsanlagen und Infrastruktur gefördert werden, um die Skalierung zu beschleunigen und die Voraussetzungen für eine langfristige Produktion stetig steigender SAF-Mengen zu schaffen.

Der dedizierte Fonds für SAF-Projekte, der in die EHB integriert ist, hat mehrere wesentliche Funktionen, um die Entwicklung und Implementierung von SAF in Europa zu fördern. Hier sind die Hauptfunktionen des Fonds:

- Finanzierung von SAF-Projekten inkl. der Bereitstellung von Mitteln für die Entwicklung, den Bau und den Betrieb von SAF-Produktionsanlagen und der Vergabe von Subventionen und Zuschüssen an Projekte, die innovative und nachhaltige Technologien zur SAF-Produktion nutzen
- Finanzierung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten, die neue Technologien und Verfahren zur Herstellung von SAF untersuchen und entwickeln; Unterstützung von Pilotprojekten, die darauf abzielen, die technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit neuer SAF-Produktionstechnologien zu demonstrieren
- Finanzierung von Infrastrukturprojekten, die notwendig sind, um die Produktion, Lagerung und Verteilung von SAF zu unterstützen, einschließlich Transport- und Verteilungsnetzwerken; Aufbau und Verbesserung von Versorgungsketten für die Rohstoffbeschaffung und den Vertrieb von SAF
- Schaffung finanzieller Anreize, um die Nachfrage nach SAF zu steigern und Investitionen in die SAF-Industrie zu fördern; Bereitstellung von Kaufgarantien und langfristigen Abnahmeverträgen, um die Marktstabilität und die Investitionssicherheit zu erhöhen
- Unterstützung der internationalen Zusammenarbeit



Durch die Bereitstellung finanzieller Mittel, die Unterstützung von Forschung und Entwicklung, den Ausbau der Infrastruktur, die Schaffung von Marktanreizen, die Unterstützung bei regulatorischen Fragen, den Kapazitätsaufbau und die internationale Zusammenarbeit trägt der Fonds maßgeblich zur Entwicklung und Verbreitung nachhaltiger Flugkraftstoffe bei. Dies unterstützt nicht nur die Dekarbonisierung des Luftverkehrs, sondern auch die Erreichung der Klimaziele der EU.

## 8.2 Weitere mögliche technische Entwicklung der SAF-Produktion

### 8.2.1 Herstellung von Bio-SAF und Co-Processing von Biomasse

Bio-SAF-Produktionsrouten sind eine verfügbare Brückentechnologie, um möglichst schnell ausreichende SAF-Mengen zur Verfügung zu stellen. So können der Aufbau einer Infrastruktur wie auch der Markthochlauf für SAF insgesamt sowohl zeitnah als auch für Endkunden erkennbar gestaltet werden. Der Markthochlauf von Bio-SAF sollte perspektivisch auch den Übergang zu E-SAF erleichtern, da sowohl Infrastruktur als auch Geschäftsmodelle übertragbar sind. Weiterhin könnte auch das Marketing für Bio- und E-SAF im Hinblick auf Endkunden nahtlos und zeitlich flexibel ineinander übergehen.

Da biobasierte Reststoffe und nachhaltige Biomasse limitiert sind, müssen die Akteure ihr subjektiv empfundenes Verhältnis von Chance zu Risiko entlang der Wertschöpfungskette gut aufeinander abstimmen. Konkret sollten ihre Geschäftsmodelle sowohl zukünftig steigende Preise für Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte einpreisen als auch idealerweise flexibel auf Marktveränderung reagieren können. Eine Möglichkeit der Flexibilität für SAF-Hersteller ergibt sich dadurch, nicht nur SAF, sondern zusätzlich auch Diesel und Naphtha als Einsatzstoffe zur Herstellung nachhaltiger Kunststoffe in verschiedenen Verhältnissen zu SAF herstellen zu können. Dies sollte bereits beim Neubau von Anlagen berücksichtigt werden, kann aber auch durch die Erweiterung existierender Anlagen von biobasiertem Diesel, z. B. HVO, zu Bio-SAF realisiert werden. Für die Akteure der Wertschöpfungs-

kette von Bio-SAF, die sich auf den Vertrieb von Reststoffen und die Herstellung nachhaltiger Biomasse spezialisieren, ist es in analoger Weise wichtig, weitere und idealerweise bereits existierende Märkte zu erschließen. Einerseits betrifft dies die Vermarktung von Nebenprodukten, z. B. von Proteinen beim Anbau von Biomasse, andererseits umfasst es die Erschließung des Marktes für nachhaltige Rohstoffe etwa für den Chemiesektor, z. B. Oleochemikalien für industrielle Schmier- und Reinigungsmittel. Aufgrund der Rohstofflimitierung werden im Folgenden der Zeitraum bis 2030 und derjenige nach 2030 im Hinblick auf technische Entwicklungen und Priorisierungen getrennt betrachtet.

#### ■ Bis 2030:

Bis 2030 bergen insbesondere die Technologien HEFA und ATJ signifikante Potenziale, die noch während der aktuellen Umsetzungs- und Hochlaufphase realisiert werden. Bei HEFA stellen die ökonomisch attraktive Verwertung der Rohstoffe zu HVO-Diesel und bei ATJ der direkte Einsatz des Alkohols als Benzinzusatz, zumindest momentan, noch Hindernisse dar. Diese Hindernisse sollten sich aber schnell in risikomindernde Faktoren umwandeln, da die Co-Produktion weiterer Kraftstoffderivate wie etwa Ethanol, HVO-Diesel oder Naphtha und LPG/Propan das Risiko des Markthochlaufs auch begrenzen und die Bankfähigkeit von SAF verbessern. Hier sollte am Ende die Marktnachfrage für die weitere Entwicklung entscheidend sein. Mit der Verabschiedung des neuesten delegierten Rechtsaktes der RED II im April 2024<sup>234</sup> wurde die Basis dafür geschaffen, dass neue Rohstoffe exklusiv für Bio-SAF wie etwa HEFA- und ATJ-SAF reserviert sind. Die gleichzeitige Produktion von Pflanzenölen, Zuckern, Reststoffen sowie Proteinen aus Zwischenfrüchten und deren Nutzung für Futtermittel, Bioenergie und Biokraftstoffe könnte den Business

Case für Bio-SAF zusätzlich verbessern. Die als Nebenprodukte bei Bio-SAF entstehenden Benzin- und Dieselfraktionen wurden im genannten Rechtsakt mengenmäßig beschränkt. So sollte möglichst viel ATJ und HEFA relativ zu Ethanol (Benzin) und HVO (Diesel) produziert werden. Falls die Nachfrage nach HEFA und ATJ aber nicht wie erwartet steigt, würden weiterhin nur HVO und Ethanol neben wenig Bio-SAF produziert und das von Clean Skies for Tomorrow im Jahr 2021 geschätzte globale Rohstoffpotenzial für HEFA und ATJ von insgesamt mehr als 100 Mio. Tonnen<sup>235</sup> bliebe für die EU ungenutzt. Die Produktion von Bio-SAF benötigt weniger Wasserstoff als die von E-SAF, wodurch der Markthochlauf bis 2030 voraussichtlich nicht durch die Verfügbarkeit von grünem Strom für die Wasserstoffherzeugung limitiert wird.

Der Einsatz von Co-Processing zur Herstellung von SAF in Raffinerien könnte die Herstellung der bisherigen HEFA/HVO-Stand-alone-Prozessrouten mengenmäßig deutlich übertreffen. Dies ermöglicht einen schnellen Hochlauf der Bio-SAF-Produktion über die bestehende Infrastruktur in den konventionellen Raffinerien.

#### ■ Ab 2030:

Die ATJ-Route kann ab 2030 zunehmend auch Synthesegas (beispielsweise aus der Vergasung von Biomasse oder aus Abgasen der Stahlproduktion) verarbeiten. Daraus ergeben sich Möglichkeiten zur hybriden Bio-/E-SAF-Synthese, da Synthesegas auch durch die Umsetzung von CO<sub>2</sub> mit H<sub>2</sub> zugänglich ist. Zudem lassen sich dabei Methanol und Ethanol zusammen verarbeiten und eine Zertifizierung als 100 % SAF mit ATJ-Aromaten und ohne notwendiges Mischen mit fossilem Düsentreibstoff scheint in greifbarer Nähe zu sein.



Der Einsatz von Co-Processing in Raffinerien könnte mengenmäßig die Herstellung von E-SAF antreiben und analog zum Markthochlauf von Bio-SAF durch Co-Processing anfänglich der ökonomisch attraktivste Technologieansatz werden, bevor dedizierte Anlagen für E-SAF gebaut werden können und bankfähig werden. Co-Processing wird auch von der IATA als eine Methode für einen möglichst schnellen Markthochlauf genannt.<sup>236</sup>

Regulierungen für SAF und Wasserstoff in der EU und auf globaler Ebene sollten synchronisiert werden, damit der Markthochlauf für SAF und Wasserstoff regional und global einerseits nicht behindert wird und andererseits nicht zu einem regionalen oder globalen handelspolitischen Ungleichgewicht

führen kann.<sup>237, 238</sup> Dies betrifft insbesondere die Regulierungen CORSIA, ReFuelEU und RED II/III sowie die entsprechenden Quotensysteme in der APAC-Region in China und Indonesien, wobei gerade in der APAC-Region ein Großteil des zukünftigen Wachstums der Luftfahrt erwartet wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entwicklung und die Implementierung von Bio-SAF bis 2030 und von E-SAF ab 2030 entscheidend für die möglichst schnelle Reduktion der Treibhausgasemissionen im Luftverkehr sind. Der Einsatz von Co-Processing in bestehenden Raffinerien bietet einen ergänzenden Ansatz, um die SAF-Produktion hochzufahren und anfangs die Wirtschaftlichkeit des Sektors zu fördern.

### 8.2.2 Verbesserung von „Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten“

Auswirkungen auf das Klima haben neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch SAF verringert werden sollen, auch die sogenannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte im Luftverkehr.

Dabei handelt es sich um die Klimaauswirkungen von Stickoxiden, Rußpartikeln, oxidierten Schwefelverbindungen und Wasserdampf, die während des Fliegens freigesetzt werden. Insbesondere den Kondensstreifen aus Wasserdampf und den daraus resultierenden Zirren wird ein signifikanter Einfluss zugeschrieben, der im Folgenden erklärt wird.



Flugzeugtriebwerke stoßen bei der Verbrennung von Kerosin neben  $\text{CO}_2$  und Wasser auch Stickoxide, unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Rußpartikel und andere Substanzen aus. In 8 bis 12 Kilometern Höhe, also in der üblichen Reishöhe der meisten Düsenflugzeuge, können die Außenlufttemperaturen bei unter  $-40^\circ\text{C}$  liegen. Wenn die heißen, feuchten Abgase in diese kalte Umgebung ausgestoßen werden, kühlen sie schnell ab. Dies führt dazu, dass der in den Abgasen enthaltene Wasserdampf kondensiert. Die Rußpartikel und andere Aerosole aus den Abgasen dienen dabei als Kondensationskeime, an denen sich die Wassertropfen bilden können.

Aufgrund der niedrigen Temperaturen gefrieren die Wassertropfchen sofort und bilden Eiskristalle. Diese breiten sich aus und bilden eine sichtbare Spur hinter dem Flugzeug, die als Kondensstreifen bekannt ist. Unter feuchtkalten Bedingungen können diese Streifen für Stunden bestehen bleiben und sich zu hohen Wolken, den sogenannten Kondensstreifenzirren, ausbreiten.<sup>239</sup>

In Abhängigkeit vom Sonnenstand, der natürlichen Wolkenbedeckung und der Bodenbeschaffenheit haben diese künstlich erzeugten Wolken einen kühlenden oder wärmenden Effekt. Sie können einerseits Sonnenlicht reflektieren und so eine kühlende Wirkung haben, andererseits aber auch die von der Erde abgestrahlte Wärme zurückhalten, was zu einer Erwärmung führt. Genaue Auswirkungen der Kondensstreifen, insbesondere von Kondensstreifenzirren, auf das Klima und die Oberflächentemperatur sind noch Gegenstand der Forschung. Forschende sind sich jedoch einig, dass die kühlende Wirkung im globalen Durchschnitt durch die wärmende Wirkung dominiert wird.<sup>240</sup>



Auch die von den Flugzeugtriebwerken ausgestoßenen Stickoxide, Sulfatpartikel und Rußpartikel leisten einen direkten klimarelevanten Beitrag.

Stickoxidemissionen tragen zur Ozonbildung bei, was zur Erwärmung der Atmosphäre führt. Gleichzeitig können sie zum Abbau von Methan in der Atmosphäre führen, wodurch ein kühlender Effekt induziert wird. Auch Sulfatpartikel haben einen kühlenden Effekt, indem sie das Sonnenlicht reflektieren und es so von der Atmosphäre abhalten.<sup>241</sup> Rußpartikel dagegen können durch die Absorption von Sonnenlicht erwärmend wirken.<sup>242</sup>

Die Manchester Metropolitan University und das DLR schätzen, dass die Nicht- $\text{CO}_2$ -Effekte insgesamt sogar den Großteil der Auswirkungen der Branche auf das Klima ausmachen: Ganze 2 % von dem 3,5 %-Anteil des Luftverkehrs an der menschengemachten Klimaerwärmung sind auf Nicht- $\text{CO}_2$ -Effekte zurückzuführen.<sup>243</sup>

Durch den Einsatz von SAF können nicht nur die  $\text{CO}_2$ -Effekte und deren Klimaauswirkungen, sondern auch die Nicht- $\text{CO}_2$ -Effekte und deren Klimaauswirkungen reduziert werden. SAF enthält weniger Rußpartikel und setzt auch weniger andere Treibhausgase frei als fossile Brennstoffe, wodurch die Bildung von Kondensstreifen und  $\text{NO}_x$ -Emissionen reduziert wird.<sup>244</sup> Die Quantifizierung der Gesamtklimawirkungen beim Einsatz von SAF ist Gegenstand aktueller Forschungen. Erste Berechnungen gehen davon aus, dass die Gesamtklimawirkungen durch den Einsatz von 100 % E-SAF in etwa halbiert werden könnten.<sup>245</sup>

Eine vollständige Eliminierung der Nicht- $\text{CO}_2$ -Effekte und derer Klimaauswirkungen durch SAF ist jedoch nicht möglich. Vielmehr bedarf es weiterer Maßnahmen wie beispielsweise der Optimierung der Flugrouten oder der Veränderung der Flughöhe.



# Abkürzungen

|                       |                                                                   |                      |                                                     |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>ASTM</b>           | American Society for Testing and Materials                        | <b>IPO</b>           | Initial Public Offering                             |
| <b>ATJ</b>            | Alcohol-to-Jet                                                    | <b>ISCC</b>          | International Sustainability & Carbon Certification |
| <b>APAC</b>           | Asien-Pazifik-Region                                              | <b>JIG</b>           | Joint Inspection Group                              |
| <b>Bio-SAF</b>        | Biogene Sustainable Aviation Fuels                                | <b>LCOE</b>          | Levelized Cost of Electricity                       |
| <b>CAAFI</b>          | Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative                  | <b>LPG</b>           | Liquified Petroleum Gas                             |
| <b>CAGR</b>           | Compound Annual Growth Rate                                       | <b>O<sub>2</sub></b> | Sauerstoff                                          |
| <b>CapEx</b>          | Capital Expenditures                                              | <b>OEM</b>           | Triebwerks- und Flugzeughersteller                  |
| <b>CBAM</b>           | Carbon Border Adjustment Mechanism                                | <b>OpEx</b>          | Operational Expenditures                            |
| <b>CCU</b>            | Carbon Capture and Utilization                                    | <b>PEM</b>           | Polymerelektrolytmembran                            |
| <b>CHJ</b>            | Catalytic Hydrothermolysis Jetfuel                                | <b>PtL</b>           | Power-to-Liquid                                     |
| <b>CO</b>             | Kohlenstoffmonoxid                                                | <b>PV</b>            | Photovoltaik                                        |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Kohlenstoffdioxid                                                 | <b>RED</b>           | Renewable Energy Directive                          |
| <b>CoA</b>            | Certificate of Analysis                                           | <b>RGGI</b>          | Regional Greenhouse Gas Initiative                  |
| <b>CORSIA</b>         | Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation | <b>RWGS</b>          | Reverse Water Gas Shift                             |
| <b>CST</b>            | Clean Skies for Tomorrow                                          | <b>SAF</b>           | Sustainable Aviation Fuels                          |
| <b>DAC</b>            | Direct Air Capture                                                | <b>SAFc</b>          | Sustainable Aviation Fuel Certificate               |
| <b>DLR</b>            | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt                         | <b>SDGs</b>          | Sustainable Development Goals                       |
| <b>DSHC</b>           | Direct Sugars to Hydrocarbons                                     | <b>SIP</b>           | Synthesized Iso-Paraffins                           |
| <b>EASA</b>           | European Aviation Security Agency                                 | <b>SKA</b>           | Synthetic Kerosene Containing Aromatics             |
| <b>E-Kraftstoffe</b>  | elektrochemische Kraftstoffe                                      | <b>SOEC</b>          | Estoxid-Elektrolyse                                 |
| <b>EI</b>             | Energy Institute                                                  | <b>SPAC</b>          | Special Purpose Acquisition Company                 |
| <b>E-SAF</b>          | elektrochemische Sustainable Aviation Fuels                       | <b>SPK</b>           | Synthetic Paraffinic Kerosine                       |
| <b>EU ETS</b>         | Europäisches Emissionshandelssystem                               | <b>THG</b>           | Treihausgase                                        |
| <b>EWR</b>            | Europäischer Wirtschaftsraum                                      | <b>TNFD</b>          | Taskforce für naturbezogene Finanzinformationen     |
| <b>FAA</b>            | Federal Aviation Administration                                   | <b>TRL</b>           | Technology Readiness Level                          |
| <b>FEED</b>           | Front-End Engineering Design                                      | <b>UCO</b>           | Used Cooking Oil                                    |
| <b>FFA</b>            | freie Fettsäuren                                                  | <b>WACC</b>          | Weighted Average Cost of Capital                    |
| <b>FFP</b>            | Fit for Purpose                                                   | <b>WEF</b>           | World Economic Forum                                |
| <b>FT</b>             | Fischer-Tropsch                                                   |                      |                                                     |
| <b>FTS</b>            | Fischer-Tropsch-Synthese                                          |                      |                                                     |
| <b>GH<sub>2</sub></b> | grüner Wasserstoff                                                |                      |                                                     |
| <b>H<sub>2</sub></b>  | Wasserstoff                                                       |                      |                                                     |
| <b>HC-HEFA</b>        | Hydrocarbon Hydrogenated Esters and Fatty Acids                   |                      |                                                     |
| <b>HEFA</b>           | Hydrogenated Esters and Fatty Acids                               |                      |                                                     |
| <b>H<sub>2</sub>O</b> | Wasser                                                            |                      |                                                     |
| <b>HVO</b>            | Hydrogenated Vegetable Oils                                       |                      |                                                     |
| <b>IATA</b>           | International Air Transport Association                           |                      |                                                     |
| <b>ICAO</b>           | International Civil Aviation Organization                         |                      |                                                     |
| <b>IEA</b>            | International Energy Agency                                       |                      |                                                     |

# Tabellenverzeichnis

|                   |                                                                                                                                                                                                                      |     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabelle 1</b>  | Zugelassene Bio-SAF-Arten in der EU (ASTM D1655 und ASTM D7566) <sup>a</sup>                                                                                                                                         | 14  |
| <b>Tabelle 2</b>  | Qualitätskontrollpunkten Qfos für SAF<br>(Quelle: Energy Institute, Joint Inspection Group 2019 <sup>6</sup> )                                                                                                       | 16  |
| <b>Tabelle 3</b>  | Input und Output „HEFA-Anlage“ in Kilogramm/Tonne Fett- oder Öltyp<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                                                           | 18  |
| <b>Tabelle 4</b>  | Input und Output „ATJ-SPK-Anlage“ in Kilogramm/Tonne Alkoholtyp<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                                                              | 20  |
| <b>Tabelle 5</b>  | Zeitlinie, Typen und Zumischungsgrenze zugelassener nicht Erdöl basierter Flugzeugkraftstoffe<br>(Quelle: Fraunhofer Umsicht)                                                                                        | 31  |
| <b>Tabelle 6</b>  | Qualifizierungsprozess für SAF gemäß ASTM D4054 <sup>26</sup>                                                                                                                                                        | 33  |
| <b>Tabelle 7</b>  | Beispiele globaler Lieferverträge der vergangenen Jahre mit den höchsten Volumina                                                                                                                                    | 54  |
| <b>Tabelle 8</b>  | Übersicht über die Lieferverträge deutscher Unternehmen                                                                                                                                                              | 55  |
| <b>Tabelle 9</b>  | Ausgewählte Produktionswerke mit hohem potenziellem Produktionsvolumen für Bio-SAF (aktiv, in Bau, angekündigt) <sup>64</sup>                                                                                        | 59  |
| <b>Tabelle 10</b> | Ausgewählte existierende und angekündigte E-SAF-Projekte mit ihren jeweiligen potenziellen Produktionsvolumina <sup>64</sup>                                                                                         | 60  |
| <b>Tabelle 11</b> | Ausgewählte Finanzkennzahlen in Mio. US-Dollar für SAF <sup>165</sup>                                                                                                                                                | 98  |
| <b>Tabelle 12</b> | Überblick über Herausforderungen und Potentiale für bio- und E-SAF gemäß ESG-Kriterien<br>(Quelle: EY)                                                                                                               | 105 |
| <b>Tabelle 13</b> | Selektive Übersicht globaler staatlicher Förderinitiativen für SAF, E-Fuels und Bio-Fuels-Kategorisiert nach Ländern und Regionen<br>(Beispielhafte Darstellung, keine vollständige Erfassung aller Förderprogramme) | 140 |



<sup>a</sup> Definition aus der ASTM D7566 für SPK: „synthesized paraffinic kerosine = synthetic blending component that is comprised essentially of iso paraffins, normal paraffins, and cycloparaffins“, SPA: = SPK plus aromatics



# Abbildungsverzeichnis

|                     |                                                                                                                                                                                                              |    |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Abbildung 1</b>  | Darstellung der Prozessroute 0: Flugzeugkraftstoff aus Erdöl - optional auch zusätzlich mit alternativen Rohstoffen zum Co-Processing wie etwa Fetten - mit Qualitätskontrollen Qfos<br>(Quelle: Fraunhofer) | 15 |
| <b>Abbildung 2</b>  | HEFA Prozessroute<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                                                                                                    | 17 |
| <b>Abbildung 3</b>  | ATJ-SPK Prozessroute ohne im Prozess selbst erzeugte „Aromaten“<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                                                      | 19 |
| <b>Abbildung 4</b>  | FT-SPK Prozessroute<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                                                                                                  | 20 |
| <b>Abbildung 5</b>  | DSHC/SIP Prozessroute<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                                                                                                | 22 |
| <b>Abbildung 6</b>  | HC-HEFA Prozessroute<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                                                                                                 | 23 |
| <b>Abbildung 7</b>  | Co-Processing in einer Raffinerie mit den Optionen für fossile und erneuerbare Rohstoffe <sup>19, 20</sup>                                                                                                   | 25 |
| <b>Abbildung 8</b>  | Schematische Darstellung der PtL-Prozesspfade über die<br>1   Fischer-Tropsch-Synthese und über die 2   Methanolsynthese<br>(Quelle: RWGS: Reverse water gas shift)                                          | 27 |
| <b>Abbildung 9</b>  | SAF-Anteile am Flugverkehrskraftstoff (nach RefueIEU) <sup>35</sup>                                                                                                                                          | 37 |
| <b>Abbildung 10</b> | Übersicht über die Preissteigerung pro Zertifikat <sup>41</sup>                                                                                                                                              | 39 |
| <b>Abbildung 11</b> | EU CO <sub>2</sub> Preisprognose<br>(Quelle: IEA)                                                                                                                                                            | 40 |
| <b>Abbildung 12</b> | IATA Strategische Net-Zero-Ziele<br>(Quelle: IATA)                                                                                                                                                           | 41 |
| <b>Abbildung 13</b> | Überblick über etablierte nachhaltige Strategien im Rahmen des Pariser Abkommens <sup>53</sup>                                                                                                               | 42 |
| <b>Abbildung 14</b> | CORSIA-Systemübersicht <sup>56</sup>                                                                                                                                                                         | 42 |
| <b>Abbildung 15</b> | Übersicht über globale ETS-Systeme, die bereits in Kraft getreten oder noch in Entwicklung bzw. in Erwägung sind<br>(Quelle: International Carbon Action Partnership)                                        | 43 |
| <b>Abbildung 16</b> | Angestrebter Anteil von SAF am gesamten Kraftstoffbedarf ausgewählter Fluggesellschaften<br>(Quelle: Airline Reports, EY-Interviews)                                                                         | 48 |
| <b>Abbildung 17</b> | Prognostizierte SAF-Nachfrage nach Region (in %) des gesamten Kerosinbedarfs und absolute SAF-Mengen<br>(Quelle: EY-Prognose)                                                                                | 49 |
| <b>Abbildung 18</b> | Prognostizierte Entwicklung der SAF-Nachfrage im europäischen Raum<br>(Quelle: EY-Prognose)                                                                                                                  | 49 |
| <b>Abbildung 19</b> | Priorisierung von verschiedenen Kraftstoffen für die Verwendung im Transportsektor <sup>72</sup>                                                                                                             | 51 |
| <b>Abbildung 20</b> | Anzahl der jährlich neu verkündeten Lieferverträge weltweit <sup>82, 83</sup>                                                                                                                                | 54 |
| <b>Abbildung 21</b> | Übersicht der Produktionsanlagen für nachhaltigen Kraftstoff in Planung <sup>64</sup>                                                                                                                        | 58 |
| <b>Abbildung 22</b> | Maximale, SAF-Produktionspotentiale in bereits existierenden oder angekündigten Anlagen bis 2030 <sup>64</sup>                                                                                               | 61 |
| <b>Abbildung 23</b> | Anzahl und Grad der Umsetzung von SAF-Projekten nach Kontinent <sup>64</sup>                                                                                                                                 | 62 |
| <b>Abbildung 24</b> | Angekündigte potenzielle SAF-Produktionsvolumina nach Kontinent (2023-2030) <sup>64</sup>                                                                                                                    | 62 |
| <b>Abbildung 25</b> | Anzahl der SAF-Projekte nach Ländern. Länder mit drei oder weniger Projekten zusammengefasst unter „Andere“ <sup>64</sup>                                                                                    | 63 |
| <b>Abbildung 26</b> | Vergleich erwarteter potenzieller Produktionskapazitäten an SAF bis 2030 in Mio. Tonnen (Weltweit, Europa, Deutschland) <sup>64</sup>                                                                        | 65 |
| <b>Abbildung 27</b> | Anzahl der SAF-Projekte in Deutschland nach Aktivitätsstatus und Produktionstechnologie <sup>64</sup>                                                                                                        | 65 |
| <b>Abbildung 28</b> | Mögliche Nachfrageerfüllung unter maximaler Auslastung der SAF-Produktionskapazitäten 2030 <sup>64</sup>                                                                                                     | 67 |

|                     |                                                                                                                                                   |     |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Abbildung 29</b> | Vergleich der maximal möglichen SAF-Produktionsmenge und dem tatsächlich angekündigten Volumen für ausgewählte Produktionsanlagen<br>(Quelle: EY) | 69  |
| <b>Abbildung 30</b> | Allgemeine SAF-Infrastruktur entlang der Lieferkette (Darstellung nach ICA)                                                                       | 72  |
| <b>Abbildung 31</b> | Biomasse Produktion und Logistik <sup>119</sup>                                                                                                   | 74  |
| <b>Abbildung 32</b> | Systemdesign der Alkalinen Elektrolyse <sup>123</sup>                                                                                             | 76  |
| <b>Abbildung 33</b> | Systemdesign der PEM Elektrolyse <sup>125</sup>                                                                                                   | 77  |
| <b>Abbildung 34</b> | Systemdesign der SOEC Elektrolyse <sup>125</sup>                                                                                                  | 77  |
| <b>Abbildung 35</b> | Carbon Capture Chain <sup>75</sup>                                                                                                                | 78  |
| <b>Abbildung 36</b> | Überblick über die allgemeine Infrastruktur für SAF-Blends und/oder fossiles Jetfuel<br>(Quelle: Fraunhofer)                                      | 81  |
| <b>Abbildung 37</b> | Struktur und Route für SAF-Transport<br>(Quelle: Fraunhofer)                                                                                      | 82  |
| <b>Abbildung 38</b> | Überblick über den Einsatz von SAF an europäischen Flughäfen <sup>129</sup>                                                                       | 83  |
| <b>Abbildung 39</b> | Betrachtete HEFA route für die LCO- und Preiskalkulationen<br>(Quelle: EY, MVaK <sup>132</sup> )                                                  | 87  |
| <b>Abbildung 40</b> | LCO für bioSAF (LCObioSAF) inkl. Gewinnmarge in US-Dollar pro Kilogramm                                                                           | 87  |
| <b>Abbildung 41</b> | Betrachtete Methanol-Route für die LCO- und Preiskalkulationen<br>(Quelle: EY)                                                                    | 87  |
| <b>Abbildung 42</b> | LCO von E-SAF inkl. Gewinnmarge in US-Dollar pro Kilogramm                                                                                        | 88  |
| <b>Abbildung 43</b> | Darstellung einer Auswahl globaler staatlicher Förderprojekte von SAF, E-Kraftstoffen und Biokraftstoffen <sup>i, j</sup>                         | 92  |
| <b>Abbildung 44</b> | Venture-Capital-Investitionen in SAF-Produktionsrouten (2021-2023) <sup>147</sup>                                                                 | 95  |
| <b>Abbildung 45</b> | Verlauf der Kurse ausgewählter Unternehmen in der SAF-Produktion (2019-2023)                                                                      | 97  |
| <b>Abbildung 46</b> | Enterprise Value (EV)/EBITDA und EV/Sales - Multiplikatoren für das Fiskaljahr bis 31. Dezember 2023 (12 Monate) <sup>165</sup>                   | 98  |
| <b>Abbildung 47</b> | Aktuelle Struktur der EHB und vorgeschlagene Ergänzung von SAF-Investmentfonds<br>(Quelle: EU, EY)                                                | 125 |
| <b>Abbildung 48</b> | Überblick über das von EY vorgeschlagene Modell für die Bereitstellung finanzieller Mittel für die Skalierung der SAF-Produktion<br>(Quelle: EY)  | 126 |

*i* Es muss hervorgehoben werden, dass die in diesem Kontext erwähnten Projekte lediglich eine Auswahl repräsentativer Initiativen darstellen. Zudem ist zu beachten, dass die Transparenz und Sichtbarkeit von Förderinitiativen in manchen Regionen geringer sein kann als in anderen.

*j* Die Umrechnung von Euro in US-Dollar erfolgt auf der Basis unseres EY-Preismodells. Die Umrechnung von länderspezifischen Währungen wird auf der Grundlage der Währungskurse zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Projekte durchgeführt.



## Anhang I: Detaillierte Übersicht über Finanzierungsquellen

**Tabelle 13**  
Selektive Übersicht über globale staatliche Förderinitiativen für SAF, E-Fuels und Bio-Fuels, kategorisiert nach Ländern und Regionen (beispielhafte Darstellung, keine vollständige Erfassung aller Förderprogramme)

| Land/<br>Region | Projekt/<br>Initiativen | Geldgeber  | Kurze Beschreibung<br>und Förderzweck                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Ankündi-<br>gung/Zeit-<br>raum der<br>Förderung | Förder-<br>volumen                   |
|-----------------|-------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| EU              | SAF Fund                | EU         | <p>Im Rahmen der ReFuelEU-Aviation-Initiative wurde der SAF Fund (Amendment 86, Artile 11a) eingeführt. Dieser soll für den Zeitraum von 2030 bis 2050 zur Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors beitragen. Besonderes Augenmerk liegt auf der Förderung von Investitionen in innovative Technologien und Infrastrukturen. Diese umfassen die Produktion, Einführung, Nutzung und Lagerung von SAF, alternative Antriebstechnologien für Flugzeuge wie H<sub>2</sub> und Elektrizität sowie Forschung für neue Triebwerke und Technologien zur direkten Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre. Zudem sollen Maßnahmen zur Reduktion der Nicht-CO<sub>2</sub>-Auswirkungen des Luftverkehrs unterstützt werden. Alle durch den Fonds geförderten Investitionen werden öffentlich gemacht und müssen den Zielen dieser Verordnung entsprechen.</p> <p>Der Fonds ist ein fester Bestandteil des EU-Haushalts und wird im Rahmen der Obergrenzen des mehrjährigen Finanzrahmens (MFR) in den Haushalt eingestellt. Die Einnahmen, die durch die Sanktionen im Rahmen dieser Verordnung erzielt werden, sollten dem Fonds zugewiesen werden.</p> <p>Die Verwaltung des Fonds erfolgt zentral durch eine Einrichtung der EU. Ihre Verwaltungsstruktur und Entscheidungsprozesse sind transparent und integrativ, insbesondere bei der Festlegung von Schwerpunktbereichen, Kriterien und Verfahren für die Gewährung von Finanzhilfen. Relevante Interessengruppen haben eine angemessene beratende Funktion.<sup>246</sup></p> | 2030-2050                                       | keine Angabe                         |
| EU              | Innovation Fund         | ETS-Handel | <p>Der Innovation Fund der EU finanziert sich aus den reinvestierten Mitteln des EU ETS. Im Rahmen dieses Fonds werden mitunter Projekte für SAF gefördert wie auch eine Reihe innovativer Projekte im Bereich der H<sub>2</sub>-Technologie. Als eines der weltweit umfassendsten Förderprogramme für fortschrittliche kohlenstoffarme Technologien, mit einem geschätzten Gesamtbudget von 40 Mrd. Euro (~ 43,2 Mrd. US-Dollar), unterstützt der Innovation Fund unterschiedliche Projekte - beispielsweise das Projekt „HySkies“ in Schweden, das sich der Produktion und Entwicklung von E-SAF widmet.<sup>247</sup> Im April 2024 gab die EU-Kommission die Förderung von sieben Projekten im Bereich erneuerbarer H<sub>2</sub> bekannt, die mit insgesamt nahezu 720 Mio. Euro (~ 777,6 Mio. US-Dollar) aus dem Innovation Fund gefördert werden. Diese Förderung erfolgt im Kontext der Hydrogen Bank der EU. Diese ausgewählten Projekte tragen zur H<sub>2</sub>-Produktion innerhalb Europas bei und erhalten Subventionen, um die Kostendifferenz zwischen den Herstellungskosten und dem Marktpreis, der primär vom konventionell erzeugten H<sub>2</sub> geprägt wird, auszugleichen. Die Fördermittel werden über einen Zeitraum von zehn Jahren gewährt, vorausgesetzt die Produktion beginnt spätestens fünf Jahre nach Erhalt der Förderung.<sup>248</sup></p>                                                                                                                                                      | 2020-2030                                       | 40 Mrd. Euro (~ 43,2 Mrd. US-Dollar) |



| Land/<br>Region | Projekt/<br>Initiativen                                                 | Geldgeber                          | Kurze Beschreibung<br>und Förderzweck                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Ankündi-<br>gung/Zeit-<br>raum der<br>Förderung | Förder-<br>volumen                                                                                           |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>EU</b>       | EU Emissions Trading System (ETS)                                       | EU                                 | Diese Förderung erfolgt im Kontext der ReFuelEU Aviation. Um den Preisunterschied zwischen SAF und herkömmlichem fossilen Kerosin auszugleichen, werden in der EU SAF-Zertifikate im Umfang von 20 Mio. Euro (~ 21,6 Mio. US-Dollar) an Fluggesellschaften im Kontext des ETS vergeben. <sup>249</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 2023-2030                                       | 20 Mio. Euro (~ 21,6 Mio. US-Dollar)                                                                         |
| <b>EU</b>       | IPCEI Hy2Move                                                           | ETS-Handel                         | Die Initiative deckt transnationale Projekte im europäischen Raum ab, die zur Erreichung strategischer Ziele Europas beitragen und entsprechend gefördert werden. In diesem Rahmen werden H <sub>2</sub> -Projekte, koordiniert von 22 EU-Staaten und Norwegen, vorangetrieben. Dazu gehören unter anderem Projekte wie Hy2Tech, Hy2Use und Hy2Infra. <sup>250</sup> Das Projekt Hy2Use wird von der EU-Kommission mit bis zu 5,2 Mrd. Euro (~ 5,46 Mrd. US-Dollar) unterstützt, in Zusammenarbeit mit 13 Mitgliedstaaten <sup>251</sup> , Hy2Tech erhält eine Förderung von 5,4 Mrd. Euro (5,67 Mrd. US-Dollar) durch 15 Mitgliedstaaten. <sup>246</sup> Im Jahr 2024 gab die EU-Kommission ferner bekannt, dass das Projekt Hy2Infra mit einer Summe von 6,9 Mrd. Euro (~7,45 Mrd. US-Dollar) durch sieben Mitgliedsländer unterstützt werden soll. <sup>252</sup> Ein weiteres Projekt (Hy2Move) soll voraussichtlich noch im Jahr 2024 von der EU-Kommission angekündigt werden und Mobilität auf der Basis von H <sub>2</sub> fördern. <sup>253</sup> Eventuell könnte die Förderung auch E-Kraftstoffprojekte betreffen, jedoch steht dies bisher noch fest. | 2024                                            | 1,4 Mrd. Euro (~1,5 Mrd. US-Dollar)                                                                          |
| <b>Schweiz</b>  | SWEET Program                                                           | Bundesamt für Energie (BFE)        | Das Swiss Energy Research for the Energy Transition (SWEET) Funding Program ist eine Initiative des Bundesamtes für Energie (BFE) der Schweiz. Dieses Programm trägt zur Umsetzung der Energiestrategie 2050 der Schweiz bei. Dabei werden Ausschreibungen durchgeführt, um Förderprojekte zu identifizieren. <sup>254</sup> Im Jahr 2023 erhielt refuel.ch (Renewable Fuels and Chemicals for Switzerland) Förderungen im Umfang von 15 Mio. Schweizer Franken (~17 Mio. US-Dollar*). Refuel.ch zielt darauf ab, die Kosten für nachhaltige Kraftstoffe und Plattformchemikalien zu reduzieren, indem die Lastflexibilität von Produktionsanlagen erhöht wird. <sup>255</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2021-2032                                       | u. a. 15 Mio. Schweizer Franken (~ 17 Mio. US-Dollar) für die Förderung des Projekts refuel.ch SWEET Program |
| <b>UK</b>       | Advanced Fuels Fund (AFF)                                               | UK Department for Transport        | Der Fonds unterstützt Investitionen in private Projekte für SAF. Ende 2022 wurden die ersten fünf Projekte mit einem Gesamtbetrag von 82,5 Mio. britischen Pfund (~ 101,9 Mio. US-Dollar <sup>l</sup> ) gefördert. Im November 2023 wurden in der zweiten Runde neun weitere Projekte ausgewählt, die jeweils 53 Mio. britische Pfund erhalten werden. <sup>256</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2022-2025                                       | u. a. 82,5 Mio. britische Pfund (~ 101,9 Mio. US-Dollar <sup>m</sup> )                                       |
| <b>Kanada</b>   | Strategic Innovation Fund                                               | Government of Canada               | Der Strategic Innovation Fund unterstützt allgemein innovative Projekte, die die Wirtschaft Kanadas vorantreiben. Im Jahr 2023 verkündete der Minister of Innovation, Science and Industry ein Investitionspaket in Höhe von 350 Mio. kanadischen Dollar (~ 261,2 Mio. US-Dollar <sup>m</sup> ) mit dem Ziel, die „Initiative for Sustainable Aviation Technology“ (INSAT) Kanadas voranzutreiben. Diese Investitionen sind auf den Ausbau von Forschung und Entwicklung mit einem Fokus auf hybriden und alternativen Antrieben, Flugzeugarchitektur, Übergang zu SAF und Flugzeugbetrieb ausgelegt. <sup>257</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2023                                            | u. a. 350 Mio. kanadische Dollar (~ 261,2 Mio. US-Dollar)                                                    |
| <b>USA</b>      | Teil des Fueling Aviation's Sustainable Transition (FAST Grant Program) | US Federal Aviation Administration | Im Rahmen des US IRA hat die US-Regierung ein Investitionspaket verabschiedet, das die Entwicklung von SAF vorsieht. Projekte, die eine Förderung anstreben, müssen Aktivitäten in den Bereichen Produktion, Transport, Mischung (Blending) und Lagerung von SAF umfassen. Die finanziellen Anreize der USA sind Teil des übergeordneten Ziels, bis zum Jahr 2050 Treibhausgasneutralität im amerikanischen Luftfahrtsektor zu erreichen. <sup>258</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2023 - laufend                                  | 244,5 Mio. US-Dollar                                                                                         |

k Der hier genutzte Wechselkurs für August 2023 liegt bei 1 US-Dollar = 0,88 Schweizer Franken.

l Der hier genutzte Wechselkurs für 2022 liegt bei 1 US-Dollar = 0,81 britische Pfund.<sup>283</sup>

m Der hier genutzte Wechselkurs für den 1. Juni 2023 liegt bei 1 US-Dollar = 1,34 kanadische Dollar.<sup>284</sup>



| Land/<br>Region   | Projekt/<br>Initiativen                          | Geldgeber                                                                                                                                      | Kurze Beschreibung<br>und Förderzweck                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Ankündi-<br>gung/Zeit-<br>raum der<br>Förderung | Förder-<br>volumen                                                      |
|-------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Brasilien</b>  | PAISS-<br>Programm                               | Brasilianische<br>Regierung                                                                                                                    | Das PAISS-Programm wurde 2018 zur Förderung der Biokraftstoff- und Ethanolproduktion eingeführt. Es umfasst die Unterstützung in Form von Darlehen, Kapitalbeteiligungen und Zuschüssen. <sup>259</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2018                                            | 200 Mio.<br>brasilianische<br>Real (~38 Mio.<br>US-Dollar)              |
| <b>Australien</b> | Sustainable<br>Aviation<br>Funding<br>Initiative | Australian<br>Renewable<br>Energy<br>Agency<br>(ARENA)                                                                                         | In <b>Australien</b> hat die Australian Renewable Energy Agency (ARENA) im Jahr 2021 im Rahmen der Sustainable Aviation Funding Initiative 30 Mio. australische Dollar (~ 20,1 Mio. US-Dollar <sup>n</sup> ) zur Förderung der Entwicklung der SAF-Industrie erhalten, mit dem spezifischen Ziel, Produktionstechnologien für SAF aus einheimischen Rohstoffen voranzutreiben. Die Initiative verfolgt mehrere Kernziele: Sie zielt darauf ab, den Technologiereifegrad zu verbessern, die technischen und kommerziellen Möglichkeiten für die Herstellung von SAF aus erneuerbaren Ressourcen in Australien auszuweiten und die industriellen Kapazitäten für diese zukunftsorientierte Branche zu erweitern. <sup>260</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2021                                            | 30 Mio.<br>australische<br>Dollar<br>(~ 20,1 Mio.<br>US-Dollar)         |
| <b>China</b>      | Investment<br>Plan of SPIC                       | State Power<br>Investment<br>Corporation<br>(SPIC)                                                                                             | In <b>China</b> kündigte die State Power Investment Corporation (SPIC), ein Staatsunternehmen unter der Verwaltung der chinesischen Zentralregierung, 2023 einen Investitionsplan in Höhe von 5,85 Mrd. US-Dollar für Nordostchina an. Das Ziel dieser Investition ist die Produktion von E-Kraftstoffen, die auf Windenergie basieren. Die geförderten Projekte sollen zusammen jährlich 400.000 Tonnen SAF produzieren. <sup>261</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2023                                            | 5,85 Mrd.<br>US-Dollar                                                  |
| <b>Indien</b>     | Pradhan<br>Mantri JI-VAN<br>Yojana               | Indische<br>Regierung                                                                                                                          | In Indien fördert die nationale Biokraftstoffpolitik aus dem Jahr 2018 die inländische Produktion nachhaltiger Kraftstoffe. Ein Finanzierungsschema mit Mitteln in Höhe von circa 5.000 indische Rupien (~ 728,8 Mio. US-Dollar <sup>p</sup> ) über einen Zeitraum von sechs Jahren wurde ins Leben gerufen, um die Finanzierungslücken für 2G-Ethanol-Bioraffinerien zu schließen. <sup>262</sup> In den Jahren 2018-2024 wurde eine finanzielle Unterstützung von etwa 1969,5 indische Rupien (~ 287,1 Mio. US-Dollar <sup>p</sup> ) von der indischen Regierung für den Aufbau von Second Generation Ethanol Projects aus nachwachsenden Rohstoffen zugesichert. Dies erfolgte im Rahmen des Pradhan-Mantri-JI-VAN-Programms. <sup>263</sup>                                                                                                                                                                                                                                                               | 2018-2024                                       | 6.969,5 indische<br>Rupien<br>(~ 1 Mrd.<br>US-Dollar <sup>p</sup> )     |
| <b>Japan</b>      | Green<br>Innovation<br>Fund                      | Ministry of<br>Economy,<br>Trade and<br>Industry<br>(METI),<br>Ministry of<br>Land, Infra-<br>structure,<br>Transport<br>and Tourism<br>(MLIT) | In <b>Japan</b> plant das Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (METI) in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Land, Infrastruktur, Verkehr und Tourismus (MLIT) im Jahr 2023, Forschung und Entwicklung sowie den Betrieb in der SAF-Produktion staatlich zu unterstützen. Dies schließt auch die Förderung des Zertifizierungserwerbs ein, um die heimische Produktion von SAF zu stärken. Auch ein Kapitalinvestitionsprogramm ist geplant. <sup>264</sup> Im Jahr 2022 wurden durch den „Green Innovation Fund“, der innovative Umweltprojekte mit 2,3 Billionen Yen (~ 15 Mrd. US-Dollar <sup>p</sup> ) unterstützt, etwa 114,5 Mrd. Yen (~ 755 Mio. US-Dollar) für Projekte im Bereich E-Fuels, SAF und nachhaltige Kraftstoffe eingeplant. Zudem stellte das METI in Kooperation mit der New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) weitere 5,18 Mrd. Yen (~ 34 Mio. US-Dollar) für die Entwicklung von Bio-Jet-Fuel-Technologien zur Verfügung. <sup>265</sup> | 2022                                            | 119,68 Mrd.<br>Yen (~789 Mio.<br>US-Dollar)                             |
| <b>Singapur</b>   | Aviation<br>Sustainability<br>Program            | Civil Aviation<br>Authority of<br>Singapore<br>(CAAS)                                                                                          | Die Civil Aviation Authority of Singapore (CAAS) hat mit dem „Sustainable Air Hub Blueprint 2024“ Maßnahmen für die Förderung von SAF vorgesehen. Dabei zielt das „Aviation Sustainability Programme“ aus dem Jahr 2023 darauf ab, nachhaltige Luftfahrtprojekte zu unterstützen. Etwa 50 Mio. Singapur-Dollar (~37,1 Mio. US-Dollar <sup>q</sup> ) werden für die Übernahme von Investitionskosten und die Beschleunigung von industriegeführten Projekten zur Verfügung gestellt. <sup>266</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2023 -<br>laufend                               | 50 Mio. Singa-<br>pur-Dollar<br>(~37,1 Mio.<br>US-Dollar <sup>q</sup> ) |

n Der hier genutzte Wechselkurs für den 2. Juli 2023 liegt bei 1 US-Dollar = 1,49 australische Dollar.<sup>285</sup>

o Der hier genutzte Wechselkurs für das Jahr 2018 liegt bei 1 US-Dollar = 68,608 indische Rupien.<sup>286</sup>

p Fußnote fehlt

q Der hier genutzte Wechselkurs für 2024 liegt bei 1 US-Dollar = 1,3470 Singapur-Dollar.<sup>287</sup>

| Land/<br>Region                  | Projekt/<br>Initiativen                           | Geldgeber                                                         | Kurze Beschreibung<br>und Förderzweck                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Ankündi-<br>gung/Zeit-<br>raum der<br>Förderung        | Förder-<br>volumen                                                                                                     |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>International<br/>/Afrika</b> | ICAO Euro-<br>pean Union<br>Assistance<br>Project | EU                                                                | Unterstützung von zehn afrikanischen Staaten (Kap Verde, Senegal, Mali, Elfenbeinküste, Benin, Ruanda, Botswana, Simbabwe, Seychellen und Madagaskar) bei der Reduktion ihrer CO <sub>2</sub> -Emissionen im Luftfahrtsektor durch Erstellung und Ver-<br>folgung von staatlichen Aktionsplänen, die Entwicklung und<br>Umsetzung von Einsparmöglichkeiten sowie die Einführung<br>von CO <sub>2</sub> -Monitoringsystemen für den Luftfahrtsektor (Aviation<br>Environmental Systems, kurz AES). Es ist jedoch hervorzuheben,<br>dass sich die Unterstützung im Rahmen dieses Projekts auf<br>nationale Regierungen konzentriert und nicht speziell auf<br>einzelne industrielle Projekte ausgerichtet ist. <sup>267</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Projekt-<br>phase II:<br>2019 bis<br>2023<br>(laufend) | 1,5 Mio. Euro<br>(~ 1,7 Mio.<br>US-Dollar) <sup>268</sup>                                                              |
| <b>International</b>             | Förderung<br>über ICAO-<br>ACT-SAF                | EU                                                                | Die Europäische Kommission kündigte im Jahr 2023 die finan-<br>zielle Unterstützung für die Entwicklung von SAF im Rahmen<br>des „ICAO ACT SAF“ an. Hierbei soll eine Auswahl von Partner-<br>ländern bei Machbarkeitsstudien und der Zertifizierung dieser<br>Kraftstoffe unterstützt werden. Das Projekt umfasst zwölf Partner-<br>länder (Kamerun, Ägypten, Äquatorial-Guinea, Äthiopien,<br>Gabun, Indien, Kenia, Mauretanien, Mozambik, Ruanda, Senegal<br>und Südafrika). <sup>269</sup> Insgesamt umfasst das 2022 gegründete<br>ICAO-ACT-SAF-Projekt 90 Mitgliedstaaten und 63 teilnehmende<br>Organisationen. Es ermöglicht es Staaten, ihr Potenzial<br>hinsichtlich SAF-Entwicklung und Implementierung<br>weiterzuentwickeln. <sup>270</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2023 -<br>laufend                                      | 4 Mio. Euro<br>(~ 4,3 Mio.<br>US-Dollar)                                                                               |
| <b>Afrika/<br/>International</b> | Africa-<br>Europe<br>Green<br>Energy<br>Program   | Öffentliche<br>und private<br>Akteure aus<br>Afrika und<br>Europa | Das Programm verfolgt das Ziel, durch die Einbindung von<br>Akteuren aus dem öffentlichen und privaten Sektor sowohl in<br>Europa als auch in Afrika die Energieerzeugung zu steigern<br>und den allgemeinen Zugang zu Energiequellen zu verbessern.<br>Umfasst ist Folgendes:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>■ Optimierung der Energieeffizienz</li> <li>■ Entwicklung regulatorischer Reformen zur Schaffung<br/>eines investitionsfreundlichen Klimas</li> <li>■ Förderung der Integration der Energiemärkte</li> <li>■ Steigerung der Energieerzeugung</li> <li>■ Verbesserung des Zugangs zu Energiequellen</li> </ul> <p>Ein Bestandteil dieses Vorhabens ist beispielsweise die Imple-<br/>mentierung des Power-to-X-Referenzwerks (P2X), das spezifisch<br/>die Position Marokkos in diesem Sektor stärken soll. Mit einer<br/>Förderung von 110 Mio. Euro (109 Mio. US-Dollar) soll das Pro-<br/>jekt nicht nur private Kapitalströme anziehen, sondern auch ent-<br/>scheidend zur Entwicklung einer nachhaltigen grünen H<sub>2</sub>-Wirt-<br/>schaft in Marokko beitragen.<sup>271</sup> Im Einklang mit den Zielen dieser<br/>Initiative hat der deutsche Bundeskanzler Olaf Scholz Ende 2023<br/>verkündet, dass Deutschland seine Investitionen in grüne Ener-<br/>gieprojekte in Afrika bis zum Jahr 2030 auf 4 Mrd. Euro<br/>(~ 4,32 Mrd. US-Dollar) erhöhen wird.<sup>272</sup></p> | keine Angabe                                           | u. a.<br>110 Mio. Euro<br>(109 Mio. US-<br>Dollar) für<br>Aufbau einer<br>P2X-H <sub>2</sub> -<br>Anlage in<br>Marokko |

# Quellen Finanzierung

# Anhang II: Schlüsselannahmen für die Berechnungen in Kapitel 6

## Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF

Bei der Berechnung der LCO von E-SAF und Bio-SAF wurden weitere grundlegende Annahmen getroffen, die übergreifend für beide SAF-Arten gelten und im Folgenden aufgeführt und teilweise erklärt sind

| Kostenkomponenten und relevante Datenpunkte | Definition                                                                                                                                                         | Erklärung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lebensdauer der Anlage                      | 25 Jahre (für alle Regionen einheitlich)                                                                                                                           | Die typische Betriebsdauer von E-SAF- und Bio-SAF-Anlagen beträgt 20 bis 30 Jahre.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Verschuldungs-/ Kapitalquote                | 35 % (für alle Regionen einheitlich)                                                                                                                               | Die Verschuldungs-/Kapitalquote von 35 % ergibt sich als globaler Durchschnittswert für entsprechende Quoten in den Branchen „Chemie“ und „Grüne und erneuerbare Energien“ gemäß den Daten von Damodaran. <sup>273</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Zinssatz                                    | 3,5 % (für alle Regionen einheitlich)                                                                                                                              | Der Zinssatz von 3,5 % ergibt sich als globaler durchschnittlicher Zinssatz in den Branchen „Chemie“ und „Grüne und erneuerbare Energien“ gemäß den Daten von Damodaran. <sup>274</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Wartungs- und Instandhaltungskosten         | 3,5 % der ursprünglichen CapEx (für alle Regionen einheitlich)                                                                                                     | Annahme von EY                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Energiekosten                               | Es wird erwartet, dass die LCOE von 2024 bis 2050 real halbiert werden, vor allem aufgrund der technologischen Verbesserungen (für alle Regionen unterschiedlich). | <p>Für die Produktion von E- und Bio-SAF wird Strom benötigt. Die Stromkosten unter Verwendung von ausschließlich erneuerbaren Energieträgern wurden dabei basierend auf dem Konzept der Levelized Cost of Electricity (LCOE) berechnet. Als primäre Datenquelle gelten die Wood Mackenzie Reports.<sup>275, 276, 277</sup></p> <p>Bei der Berechnung der LCOE wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Die globalen Stromgestehungskosten basieren auf den durchschnittlichen Stromgestehungskosten für die ausgewählten Länder in der EU, den USA und der APAC-Region.</li><li>■ Steuern (Grundsteuern, regulatorische Steuern, Unternehmenssteuern, sonstige Steuern oder gesetzlich vorgeschriebene Gebühren) sind in den Stromgestehungskosten enthalten.</li><li>■ Strom aus erneuerbaren Energien wird in der Nähe der Anlage produziert, in der SAF erzeugt wird, wodurch Transportkosten entfallen.</li></ul> <p>Weitere regionsspezifische Annahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ <b>EU:</b> Subventionen, Steuergutschriften und Anreize sind in den Stromgestehungskosten für die EU nicht enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass diese Vorteile langfristig nicht bestehen werden.</li><li>■ <b>USA:</b> Die Steuergutschriften für die USA werden voraussichtlich bis 2050 fortbestehen, da der US-Elektrizitätssektor nicht die 25 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 2022 erreicht, die für das Auslaufen des Investment Tax Credit (ITC) und des Production Tax Credit (PTC) im Rahmen des Inflation Reduction Act erforderlich sind.</li><li>■ <b>APAC:</b> Subventionen, Steuergutschriften und Anreize sind in den LCOE für die APAC-Region nicht enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass diese Vorteile langfristig nicht bestehen werden.</li></ul> |

Berechnungen

| Kostenkomponenten und relevante Datenpunkte | Definition                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Erklärung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kosten für grünen H <sub>2</sub>            | Es wird davon ausgegangen, dass die Kosten für grünen H <sub>2</sub> aufgrund der sinkenden LCOE, der schrittweisen zeitlichen Senkung der CapEx (erwarteter technologischer Fortschritt) und der Steigerung des Elektrolyseur-Wirkungsgrades sinken werden (für alle Regionen unterschiedlich). | <p>Grüner H<sub>2</sub> ist für die Produktion von E-SAF und in weitaus geringerem Maße für die Produktion von Bio-SAF von wesentlicher Bedeutung (weitere Einzelheiten sind in Kapitel 1.1 SAF-Arten zu finden). Die Stromgestehungskosten für H<sub>2</sub> (Levelized Cost of Hydrogen, LCOH) wurden mithilfe der Wasserelektrolysemethode berechnet. Weitere von EY getroffene Annahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>CapEx:</b> 1.500.000 US-Dollar/MW auf der Grundlage der durchschnittlichen Kosten für alkalische und Protonenaustauschmembran-Elektrolyseure.</li> <li>■ <b>Der Elektrolyse-Stack</b>, auf den 45 % der ursprünglichen Investitionskosten entfallen, wird nach zwölf Jahren ersetzt. Aufgrund des erwarteten technologischen Fortschritts wird zudem ein CapEx-Reduktionsfaktor berücksichtigt (für alle Regionen einheitlich).</li> <li>■ <b>Wartungs- und Instandhaltungskosten CapEx:</b> 3,5 % der ursprünglichen CapEx; siehe weiter oben in dieser Tabelle (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>Lebensdauer der Anlage:</b> 25 Jahre (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>Stromkosten:</b> Siehe weiter oben in dieser Tabelle (für alle Regionen unterschiedlich)</li> <li>■ <b>Wasserkosten:</b> Festgelegt auf 0,005 US-Dollar/kg Wasser mit einer jährlichen Anpassung von 2 % aufgrund des steigenden Wasserbedarfs<sup>27b</sup> (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>OpEx:</b> Die OpEx beinhalten Instandhaltung, Arbeitskosten und andere Betriebskosten, die auf 1,5 % der Summe aus CapEx und CapEx-Wartungs- und Instandhaltungskosten festgelegt wurden (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>Versicherungskosten:</b> 0,5 % der ursprünglichen CapEx; siehe weiter oben in dieser Tabelle (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>Transportkosten:</b> nicht inkludiert; siehe weiter unten in dieser Tabelle (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>Steuern:</b> nicht inkludiert; siehe weiter unten in dieser Tabelle (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ Zinssatz: 3,5 % (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>Anlagenkapazität:</b> 100 MW</li> <li>■ <b>Arbeitsstunden der Anlage pro Jahr:</b> 7.884 Stunden (entspricht 90 % des gesamten Jahres)</li> <li>■ <b>Elektrolyseur-Wirkungsgrad:</b> Steigerung von 65 % im Jahr 2024 auf 80 % im Jahr 2050 (für alle Regionen einheitlich)</li> <li>■ <b>Gewinnmarge:</b> aufgrund der direkten internen Weiterverwendung zur Herstellung von E-SAF und Bio-SAF nicht inkludiert (für alle Regionen einheitlich)</li> </ul> |
| Versicherungskosten                         | 0,5 % der ursprünglichen CapEx (für alle Regionen einheitlich)                                                                                                                                                                                                                                   | Annahme von EY                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Transportkosten                             | Nicht inkludiert (für alle Regionen einheitlich)                                                                                                                                                                                                                                                 | Die Transportkosten werden nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass grüner H <sub>2</sub> in der gleichen Anlage erzeugt wird, in der auch Strom und SAF produziert werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Steuern                                     | Nicht inkludiert (für alle Regionen einheitlich)                                                                                                                                                                                                                                                 | Steuern werden aufgrund zu großer lokaler Unterschiede nicht berücksichtigt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Die Berechnungen basieren auf realen Preisen 2023 und berücksichtigen nicht die Inflation.

# Kapitel 6



### Detaillierte Übersicht weiterer Prämissen zur Berechnung von E-SAF

Die Levelized Cost von E-SAF wurden basierend auf der Methanol-Route berechnet. Dazu wurden neben den bereits beschriebenen Prämissen weitere spezifisch für E-SAF geltende Annahmen getroffen, die im Folgenden aufgeführt und erklärt werden:

| Kostenkomponenten und relevante Datenpunkte | Definition                                                                                                               | Erklärungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CapEx                                       | 42.000.000 US-Dollar (für alle Regionen einheitlich)                                                                     | Die CapEx für eine Anlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 100 MW wurden auf 420.000 US-Dollar/MW festgelegt. Aufgrund des erwarteten technologischen Fortschritts wird ein CapEx-Reduktionsfaktor für zukünftige Zeiträume angewendet.                                                                                                   |
| Wartungs- und Instandhaltungskosten CapEx   | 3,5 % der ursprünglichen CapEx (für alle Regionen einheitlich)                                                           | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Stromkosten                                 | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“ (für alle Regionen unterschiedlich) | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Kosten für CO <sub>2</sub>                  | Die CO <sub>2</sub> -Kosten wurden auf 864 US-Dollar/Tonne festgesetzt. (für alle Regionen einheitlich)                  | Die CO <sub>2</sub> -Kosten basieren auf der DAC-Technologie (CO <sub>2</sub> aus direkter Luftabscheidung). Aufgrund des erwarteten technologischen Fortschritts in der DAC-Technologie wird für zukünftige Zeiträume ein Reduktionsfaktor angewandt.                                                                                                 |
| Kosten für grünen H <sub>2</sub>            | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“ (für alle Regionen unterschiedlich) | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| OpEx                                        | 2,0 % der Summe aus CapEx und CapEx-Wartungs- und Instandhaltungskosten (für alle Regionen einheitlich)                  | Die OpEx beinhalten Instandhaltung, Arbeitskosten und andere Betriebskosten, die auf 2,0 % der Summe aus CapEx und CapEx-Wartungs- und Instandhaltungskosten festgelegt wurden. Die im Vergleich zur Bio-SAF-Produktion (3,5 %) geringeren OpEx sind auf die geringere Anzahl der erforderlichen Arbeitsgänge bei der E-SAF-Produktion zurückzuführen. |
| Versicherungskosten                         | 0,5 % der ursprünglichen CapEx (für alle Regionen einheitlich)                                                           | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Transportkosten                             | nicht inkludiert (für alle Regionen einheitlich)                                                                         | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Steuern                                     | nicht inkludiert (für alle Regionen einheitlich)                                                                         | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Zinsen                                      | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“ (für alle Regionen einheitlich)     | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                   |

| Kostenkomponenten und relevante Datenpunkte | Definition                                            | Erklärungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WACC                                        | 10 %<br>(für alle Regionen einheitlich)               | Das mit der E-SAF-Produktion verbundene, im Vergleich zur Bio-SAF-Produktion höhere Risiko und die dadurch resultierenden höheren WACC sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>■ Die Technologie zur Herstellung von E-SAF ist relativ neu und befindet sich noch in der Entwicklungsphase.</li> <li>■ Die SAF-Produktion erfordert erhebliche Investitionen in die Infrastruktur für erneuerbare Energien, Elektrolyseeinheiten und CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologie.</li> <li>■ Es gibt erhebliche Schwankungen bei der Verfügbarkeit und den Kosten von Rohstoffen wie erneuerbarer Energie und CO<sub>2</sub>.</li> </ul> |
| Produktionskapazität und Anlageneffizienz   | 100 MW/Jahr<br>(für alle Regionen einheitlich)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Annahme von EY</li> <li>■ Aufgrund des durch EY angenommen technologischen Fortschritts erhöht sich die Anlageneffizienz über die Jahre.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Anzahl der Arbeitsstunden pro Jahr          | 7.446 Stunden/Jahr<br>(für alle Regionen einheitlich) | Annahme von EY                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

### Detaillierte Übersicht weiterer Prämissen zur Berechnung von Bio-SAF

Die Levelized Cost von Bio-SAF wurden basierend auf der HEFA-Route mit UCO als verwendetem Rohstoff berechnet. Der hier dargestellte Produktionsprozess mit den jeweiligen Mengenverhältnissen gilt für eine auf HEFA-SAF als Hauptprodukt ausgelegte Produktionsanlage, d. h., die Mengen an Inputs und die Art des Produktionsprozesses werden so gesteuert, dass ein größtmöglicher Anteil an HEFA als Endprodukt generiert wird und der Anteil an HVO-Diesel im Vergleich zu vielen heute existierenden Anlagen geringer ist. Der höhere Anteil an HEFA als Endprodukt führt auch dazu, dass der Anteil an hergestelltem Propangas im Vergleich zu einer HVO-Diesel-orientierten Anlage steigt.

Um die Levelized Cost von Bio-SAF zu berechnen, wurden neben den bereits beschriebenen Prämissen weitere spezifisch für Bio-SAF geltende Annahmen getroffen, die im Folgenden aufgeführt und erklärt werden:

| Kostenkomponenten und relevante Datenpunkte  | Definition                                                                                                               | Erklärungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CapEx                                        | 677.000.000 US-Dollar<br>(für alle Regionen einheitlich)                                                                 | <p>Die CapEx für eine Anlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 250.000 t wurde basierend auf Literaturwerten und mithilfe der folgenden Formel bezüglich der Beziehung zwischen Anstieg der CapEx und der Kapazitätserhöhung (Scale Economies) mit einem Koeffizienten von 0,6<sup>279</sup> berechnet:</p> $\frac{C_1}{C_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\alpha}$ <p><i>C<sub>1</sub>: CapEx der Bio-SAF- Produktionsanlage 1; C<sub>2</sub>: CapEx Bio-SAF-Produktionsanlage 2;<br/>V<sub>1</sub>: Kapazität der Bio-SAF- Produktionsanlage 1; V<sub>2</sub>: Kapazität der Bio-SAF- Produktionsanlage 2</i></p> <p><i>α: Skalenkoeffizient; CapEx-Reduktionsfaktoren werden aufgrund der Reife der Produktionsanlagen nicht berücksichtigt.</i></p>                                                                                                 |
| Wartungs- und Instandhaltungskosten CapEx    | 3,5 % der ursprünglichen CapEx<br>(für alle Regionen einheitlich)                                                        | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Energiekosten                                | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“ (für alle Regionen unterschiedlich) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Kosten für Biomethan zur Erzeugung von Dampf | ~ 70 US-Dollar/MWh<br>(für alle Regionen einheitlich)                                                                    | Bei der Produktion von HEFA ist die Verwendung von Dampf erforderlich, wobei für das zugrunde liegende Modell davon ausgegangen wird, dass dieser Dampf durch die Verbrennung von Gas, insbesondere Biomethan, erzeugt wird, um im Vergleich zu fossilem Gas ein möglichst umweltfreundliches Produkt herstellen zu können. Um Daten für Biomethan zu erhalten, wurden die Futures der EEX für Erdgas verwendet und ein Aufschlag addiert, da die Preise für Biomethan meist höher sind, z. B. aufgrund der geringeren Skaleneffekte von Biomethan im Vergleich zu Erdgas und teilweise höherer Produktionskosten wegen der Vorbehandlung der Biomasse zur Herstellung von Biomethan. Aufgrund fehlender konsistenter Daten von einer einzigen Quelle und zur Vereinfachung des Modells wurde ein weltweit einheitlicher Preis für Biomethan für alle Regionen gewählt. |

| Kostenkomponenten und relevante Datenpunkte                        | Definition                                                                                                               | Erklärungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kosten für zertifiziertes Used Cooking Oil und verwandte Rohstoffe | 1.527 US-Dollar/Tonne (für alle Regionen einheitlich)                                                                    | <p>Die Kosten für RED-zertifiziertes Used Cooking Oil und verwandte Rohstoffe (Jatropha etc.) wurden basierend auf den Kosten für Rapsöl mit einem 50-prozentigen Aufschlag berechnet. Die Kosten von Rapsöl dienen als Ausgangskosten, da Rapsöl schon heute als einer der relevantesten Rohstoffe für die Herstellung von Bio-Diesel in der EU bereits seit 20 Jahren im Maßstab von mehreren Mio. Tonnen am Markt etabliert ist, weltweit produziert und gehandelt wird und damit verlässliche historische Daten existieren, die eine gute Ausgangslage für weitere Berechnungen bilden.</p> <p>Der 50-prozentige Aufschlag wurde aus dem historisch bereits bekannten Preisaufschlag von UCO-Biodiesel gegenüber Rapsbiodiesel am Spotmarkt in Nordwesteuropa abgeleitet.<sup>280</sup> Es wird davon ausgegangen, dass der Preisaufschlag auch für Öle auf der Basis von Zwischenfrüchten und für auf degradiertem Land erzeugte Pflanzenöle in sehr ähnlicher Größenordnung liegt. Da die Nachfrage über die Regulierung und über Beimischquoten geregelt ist, wird sich hier das Preisgefüge über den Markt dynamisch anpassen.<sup>281</sup> Zur Fortschreibung der Kosten in der Zukunft dient der weltweite Agrarrohstoffpreis-Index.</p> |
| Kosten für grünen H <sub>2</sub>                                   | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“ (für alle Regionen unterschiedlich) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Kosten für Tonerde                                                 | 1.210 US-Dollar/Tonne (für alle Regionen einheitlich)                                                                    | <p>Die Tonerde dient dem Refining der Rohstoffe und wird auf 1.210 US-Dollar/Tonne geschätzt.</p> <p>Diese Zahl basiert auf den gemittelten Kosten je Tonne Tonerde laut OFI Magazine (510-700 US-Dollar/Tonne), also 605 US-Dollar/Tonne.<sup>282</sup> Die Kosten wurden dann verdoppelt, da die Anforderungen bei HVO im Gegensatz zur klassischen Nahrungsmittel- und Biodieselölaufreinigung laut BDI deutlich höher sind.<sup>283</sup></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| OpEx                                                               | 3,5 % der Summe aus CapEx und CapEx-Wartungs- und Instandhaltungskosten (für alle Regionen einheitlich)                  | Die OpEx beinhalten Instandhaltung, Arbeitskosten und andere Betriebskosten, die auf 3,5 % der Summe aus CapEx und CapEx-Wartungs- und Instandhaltungskosten festgelegt wurden. Die im Vergleich zur E-SAF-Produktion (2,0 %) höheren OpEx sind auf die höhere Anzahl der erforderlichen Arbeitsgänge bei der Bio-SAF-Produktion zurückzuführen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Versicherungskosten                                                | 0,5 % der ursprünglichen CapEx (für alle Regionen einheitlich)                                                           | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Transportkosten                                                    | nicht inkludiert (für alle Regionen einheitlich)                                                                         | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Steuern                                                            | nicht inkludiert (für alle Regionen einheitlich)                                                                         | Siehe „Detaillierte Übersicht der grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E-SAF und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Zinsen                                                             | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“ (für alle Regionen einheitlich)     | Siehe „Übersicht über die grundlegenden Prämissen zur Berechnung von E- und Bio-SAF“                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| WACC                                                               | 6 % (für alle Regionen einheitlich)                                                                                      | Annahme von EY                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Produktionskapazität                                               | 250.000 Tonnen/Jahr (für alle Regionen einheitlich)                                                                      | Basierend auf realen Daten einer in Rumänien geplanten Anlage wurden 250 Kilotonnen pro Jahr als jährliche Produktionskapazität gewählt. <sup>284</sup> Darin sind neben HEFA auch Naphtha, HVO-Diesel und Propane gemäß dem Produktionsprozess (siehe oben) als Endprodukte zu nennen. Die zeitlichen Unterbrechungen durch Wartung, Instandhaltung und Wechsel der Katalysatoren sind dabei bereits berücksichtigt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Nickelkatalysatoren                                                | 16,09 US-Dollar/Tonne eingesetztem Rohstoff (für alle Regionen einheitlich)                                              | Nickelkatalysatoren werden bei der Herstellung von HEFA für das Hydrotreating benötigt, um die Hydrierung von Pflanzenölen oder tierischen Fetten zu beschleunigen und die Umwandlung in hochwertige Dieselmotorkraftstoffe effizienter zu gestalten. Es handelt sich vorzugsweise um Nickel-Molybdän-Katalysatoren. Beim Co-Processing kommen eher Kobalt-Molybdän-Katalysatoren oder Gemische aus beiden Katalysatoren zum Einsatz, da der O <sub>2</sub> -Gehalt relativ gesehen geringer und der Gehalt an Schwefel des fossilen Anteils meist sehr viel höher ist als beim nicht fossilen Anteil.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

## Anhang III: Forschungsglossar

|                                                    |                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alkene</b>                                      | verzweigte, lineare oder zyklische ungesättigte Kohlenwasserstoffe, die nicht aromatisch sind                                                                |
| <b>anthropogen</b>                                 | durch den Menschen beeinflusst oder verursacht                                                                                                               |
| <b>Aromate</b>                                     | aromatische Verbindungen, ringförmige Moleküle mit Doppelbindungen, können im Erdöl vorkommen                                                                |
| <b>Benzin</b>                                      | Kraftstoff-Siedefraktion in der Raffinerie                                                                                                                   |
| <b>Blending</b>                                    | Mischen von Kraftstofffraktionen, z. B. fossilen Kraftstoff mit Sustainable Aviation Fuel                                                                    |
| <b>biogene Sustainable Aviation Fuels</b>          | nachhaltige Flugzeugkraftstoffe, die aus Biomasse und biogenen Reststoffen gewonnen werden                                                                   |
| <b>Biokraftstoffe</b>                              | nachhaltige Kraftstoffe, die aus Biomasse und biogenen Reststoffen gewonnen werden; übergreifender Begriff für Kraftstoffe für verschiedenste Verkehrsmittel |
| <b>Catalytic Hydrothermolysis Jetfuel</b>          | nachhaltiger Flugzeugkraftstoff aus Altvetten, Ölen und Wasser                                                                                               |
| <b>Cracking</b>                                    | nichtkatalytische Spaltung langkettiger Kohlenwasserstoffe mit oder ohne H <sub>2</sub> unter hohem Druck und großer Hitze                                   |
| <b>Co-Processing</b>                               | Mitverarbeitung von Bio- und Fischer-Tropsch-Komponenten mit Rohöl in der Raffinerie                                                                         |
| <b>Cycloparaffine</b>                              | ringförmige gesättigte Kohlenwasserstoffe                                                                                                                    |
| <b>Deacidification</b>                             | Entsäuerung von gebrauchten oder frischen Pflanzenölen                                                                                                       |
| <b>Degumming</b>                                   | Entschleimung von gebrauchten oder frischen Pflanzenölen                                                                                                     |
| <b>Diesel</b>                                      | Kraftstofffraktion aus der Raffinerie, mittels Cracking gewonnen, im Kontext dieser Studie nicht zwangsläufig normgerechter Diesel                           |
| <b>E-Kraftstoffe</b>                               | erneuerbare elektrochemische Kraftstoffe aus CO <sub>2</sub> und GH <sub>2</sub> , übergreifender Begriff für Kraftstoffe für verschiedenste Verkehrsmittel  |
| <b>Elastomer-dichtungen</b>                        | Dichtungen aus Elastomeren (formfesten und dennoch elastischen Kunststoffen)                                                                                 |
| <b>elektrochemische Sustainable Aviation Fuels</b> | elektrochemische Sustainable Aviation Fuels, die unter Verarbeitung von CO <sub>2</sub> und GH <sub>2</sub> hergestellt werden                               |
| <b>Ethanol</b>                                     | Alkohol mit zwei Kohlenstoffatomen (trinkbar)                                                                                                                |
| <b>Flugzeugkraftstoff</b>                          | Unterart von Kraftstoffen, die speziell für den Antrieb von Flugzeugen verwendet wird, auch Jetfuel genannt                                                  |
| <b>Fluid Catalytic Cracking</b>                    | katalytische Spaltung von Schweröl- und Dieselölfraktionen ohne H <sub>2</sub>                                                                               |
| <b>Fraktion</b>                                    | Untergruppe von Substanzen in einem Stoffgemisch, hier z. B. verschiedene Gruppen von fossilen Kraftstoffen, die aus Rohöl gewonnen werden                   |
| <b>Fuel Gas</b>                                    | Gasgemische in der Raffinerie, die thermisch verwertet werden                                                                                                |
| <b>Gas Oil</b>                                     | Dieselfraktionen                                                                                                                                             |
| <b>grüner Wasserstoff</b>                          | H <sub>2</sub> , der aus erneuerbarer Energie gewonnen wird                                                                                                  |
| <b>Hydrogenated Vegetable Oils</b>                 | grünes „hydrotreated“ Pflanzenöl, Premiumdiesel mit hoher Cetanzahl und einer Winterdiesel-Blend-Komponente                                                  |
| <b>Hydrierung</b>                                  | chemische Reaktion, bei der H <sub>2</sub> zu anderen Molekülen addiert wird                                                                                 |
| <b>Hydrocracking</b>                               | katalytische Spaltung von Kohlenwasserstoffen mit H <sub>2</sub> , ggf. mit Sättigung von Aromaten und Isomerisierung von Alkanen                            |
| <b>Hydroprocessing</b>                             | kombinierter Prozess aus Hydrocracking und Hydrotreating                                                                                                     |
| <b>Hydrotreating</b>                               | Entfernung von Heteroatomen (z. B. N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> ) mittels Hydrierung und Sättigung von Aromaten                                           |
| <b>Isomerisierung</b>                              | katalytische Umwandlung von kettenförmigen Paraffinen zu verzweigten, sogenannten Iso-Paraffinen                                                             |



|                                            |                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Jetfuel</b>                             | Flugzeugkraftstoff (Jet-A1) gemäß globaler Norm ASTM D1655                                                                                                  |
| <b>Kerosin</b>                             | Siedefraktion im Bereich von Jetfuel, aber nicht immer auch Jetfuel                                                                                         |
| <b>Kraftstoff</b>                          | Brennstoffe, deren chemische Energie durch Verbrennung in Antriebskraft für verschiedenste Transportmittel umgewandelt wird.                                |
| <b>Liquified Petroleum Gas</b>             | Propan-Butan-Gemisch, auch Campinggas genannt                                                                                                               |
| <b>Naphtha</b>                             | Leichtbenzin, destilliert aus Rohöl (Straight Run) oder Spaltprodukt aus verschiedenen Raffinerieprozessen wie Cracking oder Nebenprodukt von SAF-Prozessen |
| <b>Olefine</b>                             | ungesättigte nichtaromatische Kohlenwasserstoffe, auch Alkene genannt                                                                                       |
| <b>Paraffine</b>                           | gesättigte Kohlenwasserstoffe                                                                                                                               |
| <b>Pentanol</b>                            | Alkohol mit fünf Kohlenstoffatomen (nicht trinkbar)                                                                                                         |
| <b>Petrol</b>                              | Benzinfraktion                                                                                                                                              |
| <b>Pyrolyseöl</b>                          | Öl, das unter Sauerstoffausschluss bei hohen Temperaturen aus Biomasse (z. B. Stroh, Holz) oder Plastik hergestellt wird                                    |
| <b>Pyrolyseöl</b>                          | Öl, das unter Sauerstoffausschluss bei hohen Temperaturen aus Biomasse (z. B. Stroh, Holz) oder Plastik hergestellt wird                                    |
| <b>Reverse Water</b>                       | chemische Reaktion, bei der H <sub>2</sub> O                                                                                                                |
| <b>Gas Shift</b>                           | (und CO als Nebenprodukt) aus CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> erhalten wird                                                                              |
| <b>Synthesized</b>                         | in einem Raffinerieprozess hergestellte                                                                                                                     |
| <b>Iso Paraffins</b>                       | Isoparaffine                                                                                                                                                |
| <b>SKA</b>                                 | SPK mit Aromaten                                                                                                                                            |
| <b>Synthetic Paraffinic Kerosine (SPK)</b> | Gemisch synthetischer Paraffine in Kerosinqualität, bestehend aus langkettigen, verzweigten und ringförmigen Paraffinen                                     |
| <b>Synthesegas</b>                         | bestehend aus den Gasen CO, CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub>                                                                                              |
| <b>Tall Oil</b>                            | Baumharzreste aus der Papierherstellung                                                                                                                     |
| <b>Workup</b>                              | Aufbereitung von Rohstoff- oder Kraftstofffraktionen über Destillation, Extraktion oder Filtration etc.                                                     |

# Anhang IV: Quellenverzeichnis

- 1 [Europäischer Rat: Fit for 55, April 2024.](#)
- 2 [IATA: Developing Sustainable Aviation Fuel \(SAF\), o. D.](#)
- 3 [Virgin Atlantic Airways Ltd: Virgin Atlantic flies first 100 % Sustainable Aviation Fuel flight from London Heathrow to New York JFK, in: PR Newswire, November 2023.](#)
- 4 [Swedish Biofuels AB: ASTM decision brings 100 % SAF certification within reach, in: PR Newswire, August 2023.](#)
- 5 [Rumizen, Mark, Andac, Gurham: ASTM Qualification of Synthetic Aviation Turbine Fuel \(SATF\), Juni 2023.](#)
- 6 [Energy Institute und Joint Inspection Group: EI/JIG 1530 Standard Quality Assurance Requirements for the Manufacture, Storage & Distribution of Aviation Fuels to Airports \(A4\), Mai 2019.](#)
- 7 [Hamelinck, Carlo et al.: Conversion efficiencies of fuel pathways for Used Cooking Oil, Studie beauftragt von EWABA und MVaK, Februar 2021.](#)
- 8 [Geleynse, Scott et al.: The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels: Techno-Economic Evaluation, ChemSusChem, September 2018.](#)
- 9 [Kumabe, Kazuhiro et al.: Production of hydrocarbons in Fischer-Tropsch synthesis with Fe-based catalyst: Investigations of primary kerosene yield and carbon mass balance, Fuel, 2010](#)
- 10 [Gamba, Simone et al.: Liquid fuels from Fischer-Tropsch wax hydrocracking: Isomer distribution, Catalysis Today, Oktober 2010.](#)
- 11 [ARA: ReadiJet – ARA’s History-Making Sustainable Aviation Fuel \(SAF\) Technology, o. D.](#)
- 12 [Kaneko, Norimitsu: Sustainable Aviation Fuels \(SAF\), Aviation CO<sub>2</sub> Reduction Stocktaking Seminar, 2020.](#)
- 13 [Metzger, P. et al.: Botryococcus braunii: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids, Applied Microbiology and Biotechnology, 2005.](#)
- 14 [Liu, Yanyong et al.: Hydrocracking of algae oil to aviation fuel-ranged hydrocarbons over NiMo-supported catalysts, Catalysis Today, 2019.](#)
- 15 [Ennaceri, Houda et al.: Progress of non-destructive hydrocarbon extraction technology of Botryococcus braunii, Algal Research, 2023.](#)
- 16 [ANA: ANA Conducted a Flight Using Sustainable Aviation Fuel Produced from Microalgae, Press Release ANA Group Corp., June 2021.](#)
- 17 [ASTM: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, ASTM D7566-23b, 2023.](#)
- 18 [Yakolieva, Anna et. al.: Experimental Study of Physical-Chemical Properties of Advanced Alcohol-to-Jet Fuels, Aviation, 2023.](#)
- 19 [Schimmel, Matthias et al.: Determining the renewability of co-processed fuels, Final report ECOFYS by order of Europäische Kommission, April 2018.](#)
- 20 [Air Resources Board: Co-processing of biogenic feedstock in petroleum refineries, Draft Staff Discussion Paper, März 2017.](#)
- 21 [de Luna, Phil et al.: What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes?, Science, April 2019.](#)
- 22 [EcoFuel: Innovations in Carbon Capture to Sustainable Fuels, EcoFuel Summit 2023, November 2023.](#)
- 23 [ASTM: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, ASTM D1655, 2022-22, 2022.](#)
- 24 [CAAFI: Fuel Readiness Level \(FRL\), Januar 2010.](#)
- 25 [ASTM: Revision of D1655-23a Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, ASTM WK88158, Oktober 2023.](#)
- 26 [Rumizen, Mark: Qualification of Alternative Jet Fuels, Frontiers in Energy Research, November 2021.](#)
- 27 [myclimate: Was bedeutet „Netto-Null-Emissionen“?, o. D.](#)
- 28 [Europäische Kommission: European Union: Going climate-neutral by 2050, 2019.](#)
- 29 [Fankhauser, Sam et al.: The meaning of net zero and how to get it right, Nature Climate Change, 2022.](#)
- 30 [Europäischer Rat: European Green Deal, Dezember 2019.](#)
- 31 [Europäische Kommission: Europäische Industriestrategie, o. D.](#)
- 32 [Europäisches Parlament: Revision of the Renewable Energy Directive: Fit for 55 package, Dezember 2023.](#)
- 33 [Europäischer Rat: Council and Parliament agree to decarbonise the aviation sector, April 2023.](#)
- 34 [Europäisches Parlament: ReFuelEU Aviation initiative: Sustainable aviation fuels and the fit for 55 package, November 2023.](#)
- 35 [Europäisches Parlament: Regulation \(EU\) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport \(ReFuelEU Aviation\), Official Journal of the European Union, Oktober 2023.](#)
- 36 [Europäisches Parlament: ReFuelEU Aviation initiative – Summary of Parliament’s and Council’s positions, Februar 2023.](#)
- 37 [NOW GmbH: ReFuelEU Aviation Regulation – How does it affect the aviation sector?, Mai 2024.](#)
- 38 [Europäische Kommission: Reducing emissions from aviation – European Commission, o. D.](#)
- 39 [OECD: Environmental Policies and Evaluation, o. D.](#)
- 40 [EY interne Quelle](#)
- 41 [EU-Emissionshandel: Entwicklung der Preise 2025 | Statista.](#)
- 42 [Europäische Kommission: Renewable Energy - Recast to 2030 \(RED II\), o. D.](#)
- 43 [Europäische Kommission: Biofuels - updated list of sustainable biofuel feedstocks, 2022.](#)
- 44 [BMUV: Verordnung zur Neufassung der Siebenunddreißigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes \(Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote – 37. BImSchV\), in: Bundesgesetzblatt, April 2024.](#)
- 45 [Europäischer Rat: Renewable energy: Council adopts new rules, Oktober 2023.](#)
- 46 [Europäische Kommission: Renewable Energy Directive, 2023.](#)
- 47 [Europäische Union: Richtlinie \(Eu\) 2023/2413 Des Europäischen Parlaments Und Des Rates, Oktober 2023.](#)
- 48 [Europäisches Parlament: Fit for 55: 70 % nachhaltige Flugkraftstoffe an EU-Flughäfen bis 2050, September 2023.](#)

- 49 [EASA: EASA's Sustainable Aviation Programme, o. D.](#)
- 50 [Hillyer, Madeleine: New Certificates Offer Flyers a Sustainable Fuel Option to Cut CO<sub>2</sub> in: WEF News Releases, Juni 2021.](#)
- 51 [IATA: Our Commitment to Fly Net Zero by 2050, o. D.](#)
- 52 [IATA: Energy and New Fuels Infrastructure Net Zero Roadmap, o. D.](#)
- 53 [Climatewatch: Communication of Long-term Strategy – Explore Long-Term Strategies \(LTS\), Januar 2024.](#)
- 54 [Gates, Bill: Introducing the Green Premiums in: GatesNotes, September 2020.](#)
- 55 [Yetiskin, Yasar und Blashard, Alastair: Scaling SAF: Aviation's License to Growth, ICF, März 2023.](#)
- 56 [EASA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation \(CORSIA\), o. D.](#)
- 57 [UK Government: UK Emissions Trading Scheme markets, Januar 2024.](#)
- 58 [International Carbon Action Ship: ICAP ETS Map, o. D.](#)
- 59 [IATA: Factsheet: EU und US policy approaches to advance SAF Production, o. D.](#)
- 60 EY Analyse
- 61 [ICAO: Japan's Statement from the High-Level Meeting on Long-Term Aspirational Goal, bei dem High-level Meeting on the feasibility of a long-term aspirational goal for international aviation CO<sub>2</sub> emissions reductions, Juli 2022.](#)
- 62 [ICAO: Production Facilities, o. D.](#)
- 63 [IEA: Oil 2023 – Analysis and Forecast to 2028, 2023.](#)
- 64 Argus, SAF capacity map
- 65 [ATAG: Sustainable aviation fuel, o. D.](#)
- 66 [Dilba, Dennis: Wie klimafreundliche Flugrouten den Luftverkehr grüner machen, in: AeroReport, November 2020.](#)
- 67 [Albrecht, Uwe et al.: Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen, Oktober 2013.](#)
- 68 [Transport & Environment: Biofuels and e-fuels in trucks will make it harder for aviation and shipping to go green, November 2023.](#)
- 69 [Osborne Clarke: EU's new RED III legislation significantly raises renewable energy targets for 2030, Dezember 2023.](#)
- 70 [Cazzola, Pierpaolo et al.: Assessment of the potential of sustainable fuels in transport, Research for TRAN Committee, März 2023.](#)
- 71 [IATA. Fact Sheet 2 – Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification, o. D.](#)
- 72 [Europäisches Parlament: Regulation \(EU\) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC \(Text with EEA relevance\), in: EUR-Lex, September 2023.](#)
- 73 [Neuling, Ulf; Berks, Leon: E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit – Was strombasierte synthetische Kraftstoffe für die Energiewende im Verkehr leisten können – und was nicht, Agora Verkehrswende, August 2023.](#)
- 74 [Maersk: Maersk to deploy first large methanol-enabled vessel on Asia – Europe trade lane, Dezember 2023.](#)
- 75 [IRENA: A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050, 2021.](#)
- 76 [WEF: First Movers Coalition: 120 Commitments for Breakthrough Industrial Decarbonization Technologies, Januar 2024.](#)
- 77 [US Department of State: Launching the First Movers Coalition at the 2021 UN Climate Change Conference, November 2021.](#)
- 78 [United Airlines: United, Tallgrass, and Green Plains Form Joint Venture to Develop New Sustainable Aviation Fuel Technology Using Ethanol, in: PR Newswire, Januar 2023.](#)
- 79 [Elgin, Ben: How US Airlines Fell Behind Europe on Sustainable Jet Fuel, in: Bloomberg, Oktober 2023.](#)
- 80 [DG Fuels: DG Fuels in St. James Parish and Louisiana, o. D.](#)
- 81 [Baldanza, Ben: The Aviation Industry Is Investing In Sustainable Fuel, But More Is Needed, in: Forbes, März 2023.](#)
- 82 [ICAO: Tracker of SAF Offtake Agreements, 2024.](#)
- 83 [IATA: Annual Review 2024, 2024.](#)
- 84 [IC Investors Group: Lufthansa Group and HCS Group sign LOI to partner on the production and supply of Sustainable Aviation Fuel „Made in Germany“, August 2023.](#)
- 85 [Lufthansa Group: Sustainable Aviation Fuel, o. D.](#)
- 86 [Norsk E-Fuel: Securing offtake and investment – Norsk e-Fuel closes milestone, Januar 2024.](#)
- 87 [Norsk e-Fuel: About Us, o. D.](#)
- 88 [Barbarà, Laia et al.: Sustainable Aviation Fuels: Offtake Manual, World Economic Forum, Juni 2023.](#)
- 89 [Thomsen, Marie Owens; Mistry, Hemand; Block, Alejandro: Update on SAF, o. D.](#)
- 90 [IATA: „Disappointingly Slow Growth in SAF Production“, Dezember 2024.](#)
- 91 [CENA Hessen: SAF Outlook 2024-2030: Eine Analyse von Mengen, Technologien und Produktionsstandorten für nachhaltige Flugtreibstoffe, 2024](#)
- 92 [IATA: Update on Sustainable Aviation Fuels \(SAF\), 2023.](#)
- 93 [WEF und McKinsey & Company: Clean Skies for Tomorrow: Delivering on the Global Power-to-Liquid Ambition, Mai 2022.](#)
- 94 [Villamizar, Helwing: Air Company Debuts First Carbon-neutral Jet Fuel, in: Airways, September 2022.](#)
- 95 [WEF: Scaling up Sustainable Aviation Fuel Supply: Overcoming Barriers in Europe, the US and the Middle East, März 2024.](#)
- 96 [LanzaTech: Corporate Presentation, Mai 2023.](#)
- 97 [World Energy: Together we'll make net-zero real, o. D.](#)
- 98 [World Energy: World Energy Fuels World's First Transatlantic Flight with 100 % SAF, November 2023.](#)
- 99 [Allan, Bentley et al.: The C-SAF Roadmap: Building a feedstocks-to-fuels SAF supply chain in Canada, 2023.](#)
- 100 [Altalto: A collaboration between British Airways and Velocys, o. D.](#)

- 101 Sunfire: *Norsk E-Fuel is Planning Europe's First Commercial Plant for Hydrogen-Based Renewable Aviation Fuel in Norway*, Juni 2020.
- 102 Bole-Rentel, Tjaša et al.: *Fuel for the Future – A Blueprint for the Production of Sustainable Aviation Fuel in South Africa*, 2022.
- 103 Roelf, Wendell: *EU infrastructure fund eyes African clean jet fuel projects*, in: Reuters, August 2023.
- 104 Aviation Week: *Brazil Will be Top Global Producer of SAF, Says Boeing*, August 2023.
- 105 McGurty, Janet: *Brasil BioFuels to build Brazil's first SAF facility in Manaus*, in: S&P Global, Oktober 2022.
- 106 Kitado, Akira: *Asia plays catch-up in race for sustainable aviation fuel*, in: Nikkei Asia, Juni 2023.
- 107 Neste: *Production in three countries*, o. D.
- 108 CSIRO: *Sustainable Aviation Fuel Roadmap*, 2020.
- 109 Dimitriadou, Evridiki und Lavinsky, Corey: *Long-term demand for SAF could run into supply constraints*, in: S&P Global, März 2022.
- 110 Electrive: *Wasserstoff-Brennstoffzellenflugzeuge – wozu und wann?*, Oktober 2022.
- 111 Martel, Éric: *Sustainable Aviation Fuels Can Move Our World Forward. So, Where's the Commitment?*, in: Milken Institute, April 2024.
- 112 EY Analyse
- 113 Dr. Memon, Omar: *Sustainable Aviation Fuel: Will There Ever Be Enough?*, in: Simple Flying, Juni 2023.
- 114 ACI: *Integration of Sustainable Aviation Fuels into the air transport system*, 2022.
- 115 JIG: *Company Structure – JIG, the JIG team and JIG council*, o. D.
- 116 Net zero 2050: sustainable aviation fuels.
- 117 IEA: *Biomass Production and Logistics*, in: IEA-ETSAP Technology Brief P09, Dezember 2013.
- 118 IEA: *Global Hydrogen Review 2021*, November 2021.
- 119 Umweltbundesamt: *Power-to-Liquid: A Scalable and Sustainable Fuel Supply Perspective for Aviation*, Januar 2022.
- 120 CAAFI: *Sustainability*, o. D.
- 121 eFuel Alliance: *What are eFuels?*, o. D.
- 122 Tüysüz, Harun: *Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production*, Accounts of Chemical Research, Februar 2024.
- 123 IRENA: *Green Hydrogen Cost Reduction – Scaling up Electrolysis to Meet the 1.5°C Climate Goal*, 2020.
- 124 ICAO: *SAF accounting and Book & Claim systems*, in: ACT-SAF Series #6, Oktober 2023.
- 125 Gill, Rob: *Neste launches book-and-claim SAF platform*, in: Business Travel News Europe, März 2024.
- 126 Brussels Airlines: *Brussels Airlines and Brussels Airport kick off the new year with first delivery of Sustainable Aviation Fuel via NATO pipeline*, Januar 2023.
- 127 Lufthansa Group: *Brussels Airlines und Brussels Airport: Sustainable Aviation Fuel jetzt per Pipeline*, Februar 2023.
- 128 Airports International: *Preparing airports for sustainable aviation fuel*, März 2023.
- 129 EUROCONTROL; ECAC: *Sustainable aviation fuels (SAF) in Europe: EUROCONTROL and ECAC cooperate on SAF map*, November 2022.
- 130 EASA Eco: *Current landscape and future of SAF industry*, o. D.
- 131 IATA: *Jet Fuel Price Monitor*, o. D.
- 132 MVaK: *Conversion efficiencies of fuel*, Februar 2021.
- 133 ATAG: *Accelerating Adoption of Sustainable Aviation Fuel: Financing and Related Issues*, März 2023.
- 134 Quelle: EY Interne Berechnungen
- 135 LeadVent Group: *Navigating the Sky: Innovative Financing and Investment Strategies for Sustainable Aviation Fuel (SAF) Projects*, Februar 2024
- 136 ICAO: *SAF Financing*, o. D.
- 137 ICAO: *Financing Aviation Emissions Reductions*, in: Transforming Global Aviation Collection, 2017.
- 138 van Gelder, Jan; German, Laura: *Biofuel finance: Global trends in biofuel finance in forest-rich countries of Asia, Africa and Latin America and implications for governance*, CIFOR infobriefs, Januar 2011.
- 139 Audu, Haliru; Duclos, Adeline: *Five Pillars That Determine Commercial Renewables Projects' Bankability*, April 2024.
- 140 Cummings, Douglas et al.: *Mapping the venture capital and private equity research: a bibliometric review and future research agenda*, Small Business Economics, 2023.
- 141 Faster Capital: *Aviation venture capital – Exploring the Potential of Aviation Venture Capital: A Comprehensive Guide*, Juni 2024.
- 142 LanzaJet: *LanzaJet Announces \$30 Million Investment from Southwest Airlines to Accelerate Company's Growth and Advance U.S. Sustainable Aviation Fuel Production*, Februar 2024.
- 143 Renewable Carbon News: *OXCCU Raises \$22 Million to Transform Carbon Dioxide into Sustainable Aviation Fuel*, Juni 2023.
- 144 Wizz Air: *CleanJoule Announces US\$50M Investment by International Consortium to Accelerate Sustainable Aviation Fuel Production*, Mai 2023
- 145 Emirates: *Emirates creates US\$ 200 million aviation sustainability fund*, May 2023.
- 146 Sustainable Aero Lab: *The State of the Sustainable Aviation Fuel (SAF) Company Ecosystem*, o. D.
- 147 Cleantech Group: *eJet Breakthroughs Can Double Sustainable Aviation Fuel Output to Support a 90% Green Aviation Fuel Future by 2050, says Cleantech Group*, Juni 2023.
- 148 Mishi, Musfika: *Over \$50 Billion Flow to Climate-Tech Startups in a Stormy Year*, in: BloombergNEF, Februar 2024.
- 149 Mergermarket: *LanzaTech to merge with AMCI Acquisition Corp. II, go public*, März 2022.
- 150 Clifford, Catherine: *Microsoft and Shell are betting on a company making greener jet fuel*, in: CNBC, Februar 2022.
- 151 Shell: *Sustainable Aviation Fuel*, o. D.
- 152 Mergermarket: *INERATEC raises US-Dollar 129m in Series B round*, Januar 2024.
- 153 Emerald: *INERATEC, sustainable aviation fuel vanguard, scores VC investment*, Januar 2024.



- 154 Halaby, Michael et al.: *Financing aviation decarbonisation*, in: ICAO: Aviation & Environmental Outlook, 2022.
- 155 Floquet, Laurent: *Funding aviation's e-fuel future requires new collaboration*, Januar 2024.
- 156 Bank of America: *Bank of America Sets 2030 Sustainable Aviation Fuel (SAF) Goal*, Februar 2022.
- 157 Cathay United Bank: *Cathay United Bank Singapore Branch Signs First Green Trade Loan With Apeiron to Boost Low Carbon Transport – A New Green Finance Milestone*, in: PR Newswire, Februar 2024.
- 158 Azure: *CIB partners with Azure Sustainable Fuels on SAF project development*, in: Skies Mag, Januar 2024.
- 159 Green Climate Fund: *Climate action during the pandemic*, 2020.
- 160 Reuters: *LanzaTech to go public in SPAC deal, valued at \$2.2 billion*, März 2022.
- 161 Quantum Commodity Intelligence: *Gevo SAF plant not likely to start until Q3 or Q4 of 2026: CEO*, März 2024.
- 162 Biofuels International: *LanzaJet opens new ethanol to SAF plant*, Januar 2024.
- 163 Whittaker, Matt: *4 Sustainable Aviation Fuel Stocks to Watch as SAF Takes Off*, in: U.S. News, Mai 2024.
- 164 Reuters: *Finland's Neste shares plummet on downbeat biofuel sales margin outlook*, Februar 2024.
- 165 S&P Capital IQ (2024).
- 166 SkyNRG: *Macquarie Asset Management Invests in a Leading SAF Platform SkyNRG*, November 2023.
- 167 Velocys: *Changing the way fuels are made*, o. D.
- 168 Godding, Nicky: *SAF company Velocys goes private after \$40M investment*, in: The Business Magazine, Februar 2024.
- 169 Polek, Gregory: *Promise of SAF Lies with Its Scalability, Cost Effectiveness* in: Aviation International News, Juni 2021.
- 170 Scholl, Blake: *What will it take to scale Sustainable Aviation Fuel in the next decade?*, in: WEF, Januar 2023.
- 171 Hader, Manfred; Baur, Stephan: *Sustainable aviation fuels: Key solution to achieving net zero?*, August 2022.
- 172 Boter, Thijmen: *Bio-SAF vs. E-SAF: land-use efficiency of conversion routes for sustainable aviation fuel production in the EU*, Utrecht University Student Theses Repository, 2023.
- 173 Novelli, Philippe: *The challenges for the development and deployment of sustainable alternative fuels in aviation*, ICAO, Mai 2013.
- 174 CAAFI: *CAAFI's Role*, o. D.
- 175 Cardoso Rial, Rafael: *Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition*, Renewable and Sustainable Energy Reviews Nr. 196, Mai 2024.
- 176 NASA: *NASA Study Confirms Biofuels Reduce Jet Engine Pollution*, März 2017.
- 177 EU-Commission: *Innovation Fund GHG emission calculations for Energy Intensive Industries*, o. D.
- 178 Sharno, Marjia, Afroz; Hiloidhari, Moonmoon: *Social sustainability of biojet fuel for net zero aviation*, in: Energy for Sustainable Development Nr. 79, Februar 2024.
- 179 IRENA: *World Energy Transitions Outlook 2022*. IRENA. 2022.
- 180 Emmanouilidou, Elissavet et al.: *Solid waste biomass as a potential feedstock for producing sustainable aviation fuel: A systematic review*, in: Renewable Energy, Februar 2023.
- 181 WEF: *Here's how to allocate scarce renewable resources*, Februar 2024.
- 182 Batteiger, Valentin et al.: *Power-to-Liquid A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation*, Umweltbundesamt, Januar 2022.
- 183 We are Water Foundation: *Desalination and its challenges*, Januar 2023.
- 184 Ansell, Phillip, J.: *Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability*, in: Progress in Aerospace Sciences Nr. 141, Juni 2023.
- 185 Leibniz Gemeinschaft: *Wasserstress reduzieren*, März 2021.
- 186 Sharma, Rita et al.: *Halophytes As Bioenergy Crops*, in: Frontiers in Plant Science, September 2016.
- 187 Trommsdorff, Max et al.: *Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Februar 2024.
- 188 Amaral, Miguel et al.: *Case Studies on the Regulatory Challenges Raised by Innovation and the Regulatory Responses*, OECD, KDI, 2021.
- 189 IATA: *SAF Deployment*, IATA o. D.
- 190 Gössling, Stefan; Lyle, Chris: *Transition Policies for climatically sustainable aviation*, in: Transport Reviews Nr. 5, 2021, S. 643-658.
- 191 ICAO: *Guidance on potential policies and coordinated approaches for the deployment of Sustainable Aviation Fuels*, ICAO, Juni 2022.
- 192 Supergen Bioenergy: *Myth-Busting Paper On Land Use: Food Vs. Fuel*, o. D.
- 193 Awogbemi, Omojola; Von Kallon, Daramy, Vandi: *Valorization of agricultural wastes for biofuel applications*, in: Heliyon Nr. 8, Oktober 2022.
- 194 Heimann, Tobias et al.: *Phasing out palm and soy oil biodiesel in the EU: What is the benefit?*, in: GCB Bioenergy Nr 16, Oktober 2023.
- 195 ISCC: *Reducing GHG Emissions in the Transport and Energy Sector*, o. D.
- 196 Schmitz, Norbert: *Sustainability Certification of SAF*, November 2021.
- 197 Hydrogen Europe: *H<sub>2</sub> features in Industrial Carbon Management Strategy 2024*, Februar 2024.
- 198 Leadvent: *Policy and Regulatory Frameworks for Promoting e-Fuels Adoption: A Path to Sustainable Energy*, Mai 2024.
- 199 Ellis, Terry: *E-fuels: A Challenging Journey To A Low-Carbon Future*, S&PGlobal, März 2024.
- 200 BiofuelCircle: *The Role of Logistics in the Bioenergy Supply Chain*, Juni 2021.
- 201 i. m. a: *AgriLexikon Zwischenfrucht*, o. D.
- 202 Regional Gateway: *Air BP on why the future of SAF may be found in an unexpected place*, Juni 2024.
- 203 i. m. a: *AgriLexikon Deckfrucht*, o. D.

- 204 [Green.org: Crop Rotation and Biofuel Production](#), Januar 2024.
- 205 [Chevron: From field to fuel: Harvesting the potential of winter rotational crops](#), August 2023.
- 206 [UNFCCC: CDM Executive Board report](#), o. D.
- 207 [Convention of Biological Diversity: Implications of biofuels on water resources](#), IWMI Report, o. D.
- 208 [Netafim: Tropfbewässerungssysteme für Feldkulturen. Mehr Ertrag und bessere Qualität](#), 2011.
- 209 [Haltermann Carless: Which feedstocks can be used for SAF sustainable aviation fuels?](#), März 2022.
- 210 [Waste2Road: Biofuels from waste to road transport](#), deliverable report, Mai 2021.
- 211 [Schmidt, Patrick, R. et al.: E-SAF: Techno-Economics of PtL and PtH<sub>2</sub>](#), November 2023.
- 212 [ICAO: Climate Change Mitigation: Sustainable Aviation Fuels](#), Report 2022, 2022.
- 213 [Heraeus: Heraeus and Sibanye-Stillwater introduce a ruthenium-based catalyst to reduce reliance on iridium for PEM water electrolysis](#), November 2023.
- 214 [Bosch: Bosch closes the circle: almost all the platinum in fuel-cell stacks can be recovered](#), September 2023.
- 215 [Global Clean Water Desalination Alliance: H<sub>2</sub>O minus CO<sub>2</sub>: Concept Paper](#), Global Clean Water Desalination Alliance, Dezember 2015.
- 216 [WEF: Seawater electrolysis for hydrogen: here are the numbers](#), September 2023.
- 217 [Plug Power: Electrolyzers and Water: Saving Water, Powering the World with Green Hydrogen](#), August 2022.
- 218 [Plug Power: Plug's California Green Hydrogen Plant Saves Water, Creates New Energy Source](#), Dezember 2022.
- 219 [Airbus: Airbus Direct Air Capture team reaches the finals of the German Future Prize](#), September 2023.
- 220 [Government of Canada: Government of Canada invests \\$15 Million in Clean Fuels Projects in the Niagara Region and Across Canada](#), März 2024.
- 221 [Azure Sustainable Fuels Corp: Azure Sustainable Fuels Announces Plans to Develop SAF-Focused Renewable Fuel Production Facility in Canada](#), o. D.
- 222 [Voegelé, Erin: LanzaTech receives planning permission for UK SAF project](#), in: Ethanol Producer Magazine, April 2024.
- 223 [XFuels GMBH: Project HyKero](#), 2023.
- 224 [ICAO: Community Engagement for Aviation Environmental Management](#), ICAO, 2017.
- 225 [GeoPard Agriculture: Sustainable Farming, Biofuels, and Role of Precision Agriculture](#), o. D.
- 226 [World Bio Market Insights: Are first-generation biofuels sustainable?](#), 2024.
- 227 [Norways, Kelly et al.: New biofuel data triggers fresh fraud concerns over EU imports](#), in: S&P Global, Dezember 2023.
- 228 [Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung: Limiting water stress risks: irrigation management key for bioenergy production to mitigate climate change](#), März 2021.
- 229 [Schmidt, Patrick R.; Weindorf, Werner: E-SAF: Techno-Economics of PtL and PtH<sub>2</sub>](#), November 2021.
- 230 [KlimaschutzPortal: Europäischer Emissionshandel: Der Handel mit CO<sub>2</sub> in Europa](#), o. D.
- 231 [Sandbag Climate Campaign: EU ETS Revenues: Who Receives What? The Trillion Euro Question](#), Februar 2022.
- 232 [Umweltbundesamt: Rekordeinnahmen im Emissionshandel: Über 13 Mrd. Euro für den Klimaschutz](#), Januar 2023.
- 233 [Bundesfinanzministerium: Das Generationenkapital](#), März 2024.
- 234 [EUR-Lex: Commission Delegated Directive \(EU\) 2024/1405 of 14 March 2024](#), März 2024.
- 235 [Clean Skies for Tomorrow: Powering Sustainable Aviation Through Consumer Demand: The Clean Skies for Tomorrow Sustainable Aviation Fuel Certificate \(SAFc\) Framework](#), Insight Report, World Economic Forum, Juni 2021.
- 236 [IATA: SAF Production to Triple in 2024 but More Opportunities for Diversification Needed](#), Juni 2024.
- 237 [European Court of Auditors: Special report 29/2023: The EU's support for sustainable biofuels in transport – An unclear route ahead](#), Special Report, European Union, Dezember 2023.
- 238 [European Court of Auditors: Special report 29/2023: The EU's industrial policy on renewable hydrogen – Legal framework has been mostly adopted – time for a reality check](#), Special Report, European Union, Juli 2024.
- 239 [DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Ein Drittel CO<sub>2</sub>- und zwei Drittel Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte](#), o. D.
- 240 [DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Klimaauswirkungen von Wolken aus Flugzeugkondensstreifen können sich bis 2050 verdreifachen](#), Juni 2019.
- 241 [Lee, David S.: The current state of scientific understanding of the non-CO<sub>2</sub> effects of aviation on climate](#), Dezember 2018.
- 242 [Bond, T.C. et al.: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment](#), in: Journal of Geophysical Research Atmospheres Nr 118, Januar 2013, S. 5380-5552.
- 243 [DLR – Institut für Physik der Atmosphäre: Der globale Luftverkehr trägt 3,5 Prozent zur Klimaerwärmung bei](#), September 2020.
- 244 [Air France KLM Group: Aviation non-CO<sub>2</sub> effects. Air France-KLM Statement](#), Juli 2022.
- 245 [atmosfair gGmbH: E-Kerosin: Non-CO<sub>2</sub> Effekte und knappe Energieressourcen – Sorgenfrei fliegen?](#), 2021.
- 246 [Europäisches Parlament: ReFuelEU Aviation Initiative](#), Juli 2022.
- 247 [Europäische Kommission: Innovation Fund projects](#), o. D.
- 248 [EU Commission: European Hydrogen Bank auction provides €720 million for renewable hydrogen production in Europe](#), April 2024.
- 249 [Europäische Kommission: RefuelEU Aviation](#), o. D.
- 250 [IPCEI Hydrogen: What is IPCEI](#), o. D.
- 251 [IPCEI Hydrogen: State Aid: Commission approves up to €5.4 billion of public support by fifteen Member States for an Important Project of Common European Interest in the hydrogen technology value chain](#), Juli 2022.
- 252 [IPCEI Hydrogen: Commission approves up to €6.9 billion of State aid by seven Member States for the third Important Project of Common European Interest in the hydrogen value chain](#), Februar 2024.
- 253 [Hydrogen Europe: European Commission approves Hy2Move IPCEI for hydrogen mobility](#), Mai 2024.

- 254 Schweizerische Eidgenossenschaft – Bundesamt für Energie: *Überblick SWEET*, März 2022.
- 255 Schweizerische Eidgenossenschaft – Bundesamt für Energie: *ReFuel.ch awarded funding from SWEET programme*, August 2023.
- 256 Department for Transport UK: *Sustainable Aviation Fuels Revenue Certainty Mechanism*, Crown, 2024.
- 257 Government of Canada: *Canada invests \$350 million in national sustainable aviation innovation network*, Juni 2023.
- 258 FAA: *Fueling Aviation's Sustainable Transition (FAST) Grants*, Dezember 2023.
- 259 Morgan, Trevor: *Renewable fuels incentive policies*, World LPG Association, 2022.
- 260 ARENA: *Sustainable Aviation Fuel Funding Initiative*, Australian Government ARENA, Juli 2023.
- 261 Reuters: *China's SPIC plans \$5.9 billion investment turning green hydrogen into fuel*, Dezember 2023.
- 262 Government of India – Ministry of Petroleum and Natural Gas India: *Cabinet approves National Policy on Biofuels – 2018*, Mai 2018.
- 263 Government of India – Ministry of Petroleum and Natural Gas India: *PM JI-VAN YOJANA*, August 2023.
- 264 Sasatani, Daisuke: *METI to Develop a Separate SAF Target*, United States Department of Agriculture, Global Agricultural Information, Juni 2023.
- 265 Sasatani, Daisuke: *Biofuels Annual Japan*, United States Department of Agriculture, Global Agricultural Information, Dezember 2023.
- 266 CAAS: *Singapore Sustainable Air Hub*, Civil Aviation Authority of Singapore, 2024.
- 267 Hupe, Jan et al.: *Capacity Building for CO<sub>2</sub> Mitigation from international aviation*, ICAO, o. D.
- 268 ICAO: *ICAO Assistance Project with the European Union (EU) Funding, Phase II*, o. D.
- 269 Europäische Kommission: *Decarbonising aviation: European Commission to support development of sustainable aviation fuels around the world*, Mai 2023.
- 270 ICAO: *ICAO Assistance, Capacity-building and Training for Sustainable Aviation Fuels (ICAO ACT-SAF)*, o. D.
- 271 Europäische Kommission: *Africa-Europe Green Energy*, o. D.
- 272 Reuters: *Scholz pledges greater investment in Africa green energy*, November 2023.
- 273 Damodaran, Aswath: *Debt Ration Trade Off Variables by Industry Global*, in: Damodaran online, Januar 2024.
- 274 Damodaran, Aswath: *Debt Details Global*, in: Damodaran online, Januar 2024.
- 275 Wood Mackenzie: *Battle for the future 2023: plummeting solar costs remake the power landscape in Asia Pacific*, Februar 2024.
- 276 Wood Mackenzie: *North America LCOE, 2023*, Januar 2024.
- 277 Wood Mackenzie: *Europe LCOE, 2023*, Dezember 2023.
- 278 E-Bridge: *Hydex & HydexPLUS – Kostenindizes für Wasserstoff*, o. D.
- 279 Tribe, M.A.; Alpine, R.L.W.: *Scale economies and the 0.6 rule*, in: Engineering Costs and Production Economics Nr. 10, 1986, S. 271-278.
- 280 Van Grinsven, Anouk et al.: *Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU*, CE Delft, 2020.
- 281 Lieberz, Sabine; Rudolf, Antonia: *Biofuels mandates in the EU by Member State – 2024*, Voluntary Report, US-DollarA, GAIN, 2024.
- 282 Bello, Jorge: *Bleaching Earths*, in: OFI Magazine, Juni 2021.
- 283 Baumgartner, Manfred: *The feedstock challenge*, August 2022.
- 284 Energate messenger: *OMV-Tochter Petrom will Biokraftstoffe und Wasserstoff produzieren*, Juni 2024.

## Über EY Sustainability

Mit einem Team von mehr als 250 Fachleuten begleiten wir große und mittelständische Unternehmen über alle Branchen hinweg dabei, passende Nachhaltigkeitskonzepte zu entwickeln und umzusetzen. Wir arbeiten fachabteilungsübergreifend und greifen dabei auf unsere umfassende Branchenexpertise und unser globales Netzwerk zurück. Die Kundenzentrierung steht bei unserer Arbeit stets im Vordergrund, ob es nun um die Entwicklung einer langfristig nachhaltigen Unternehmensstrategie und deren Verankerung in der Organisation oder um die frühzeitige Identifikation künftiger ESG-bezogener Herausforderungen und die Ausarbeitung entsprechender Handlungsoptionen geht. Wir begleiten Sie zudem bei steuerlichen und rechtlichen Fragestellungen und bei der Implementierung der aktuellen ESG-Regulatorik. Durch unsere innovativen und kollaborativen Formate wie zum Beispiel den EY wavespace fördern wir kreative Lösungsansätze. Wir sind Thought Leaders im ESG-Bereich und gestalten durch unsere Präsenz in renommierten Arbeitsgruppen wie auch durch regelmäßige Webcasts die Einführung der ESG-Regulatorik im Markt mit.



Wir setzen uns für eine besser funktionierende Welt ein, indem wir neue Werte für Kunden, Mitarbeitende, die Gesellschaft und den Planeten schaffen und gleichzeitig das Vertrauen in die Kapitalmärkte stärken.

Mithilfe von Daten, KI und fortschrittlicher Technologie unterstützen unsere Teams ihre Kunden dabei, gemeinsam die Zukunft mit Zuversicht zu gestalten und Antworten auf die drängendsten Fragen von heute und morgen zu finden.

Unsere Teams bieten ein breit gefächertes Dienstleistungsspektrum in den Bereichen Assurance, Consulting, Tax sowie Strategy and Transactions an. Unterstützt durch fundiertes Branchenwissen, ein global verbundenes, multidisziplinäres Netzwerk und vielfältige Ökosystem-Partner bieten unsere Teams Dienstleistungen in mehr als 150 Ländern und Regionen an.

All in to shape the future with confidence.

„EY“ und „wir“ beziehen sich auf die globale Organisation oder ein oder mehrere Mitgliedsunternehmen von Ernst & Young Global Limited, von denen jedes eine eigene juristische Person ist. Ernst & Young Global Limited ist eine Gesellschaft mit beschränkter Haftung nach englischem Recht und erbringt keine Leistungen für Kunden. Informationen darüber, wie EY personenbezogene Daten erhebt und verarbeitet, sowie eine Beschreibung der Rechte, die Einzelpersonen gemäß der Datenschutzgesetzgebung haben, sind unter [ey.com/privacy](https://ey.com/privacy) verfügbar. Weitere Informationen über unsere Organisation finden Sie unter [ey.com](https://ey.com).

© 2025 EY Strategy & Transactions GmbH  
All Rights Reserved.

KKL 2503-1204  
ED None

Diese Präsentation ist lediglich als allgemeine, unverbindliche Information gedacht und kann daher nicht als Ersatz für eine detaillierte Recherche oder eine fachkundige Beratung oder Auskunft dienen. Es besteht kein Anspruch auf sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und/oder Aktualität. Jegliche Haftung seitens der EY Strategy & Transactions GmbH und/oder anderer Mitgliedsunternehmen der globalen EY-Organisation wird ausgeschlossen.

[ey.com/de](https://ey.com/de)