

LET'S FLY SAF, NOW

Nachhaltige Kraftstoffe für die Luftfahrt



aireg 

und

en2x 

in Kooperation mit

 airbp


CAPHENIA
Turning CO₂ into fuel




EDL
PÖRNER GRUPPE

 GRIESEMANN

 H-C-S GROUP



 HORVÁTH


MABANAFT

NESTE RWE


TotalEnergies

anlässlich der ILA 2024

Sustainable Aviation Fuels sind unverzichtbar für die Defossilisierung des Luftfahrtsektors

Das Luftverkehrsaufkommen befindet sich nach dem durch die Covid-Pandemie bedingten Einbruch wieder im Steigflug. Experten gehen übereinstimmend von einer kontinuierlichen Zunahme des weltweiten Luftverkehrs aus. So rechnet die International Air Transport Association (IATA), der Dachverband der Fluggesellschaften, mit einem jährlichen Luftverkehrswachstum von rund 3,7 Prozent; dies entspricht in etwa einer Verdopplung bis zum Jahr 2040. Damit verbunden ist ein Anstieg der energiebedingten Klimagasemissionen, sofern keine Gegenmaßnahmen erfolgen.

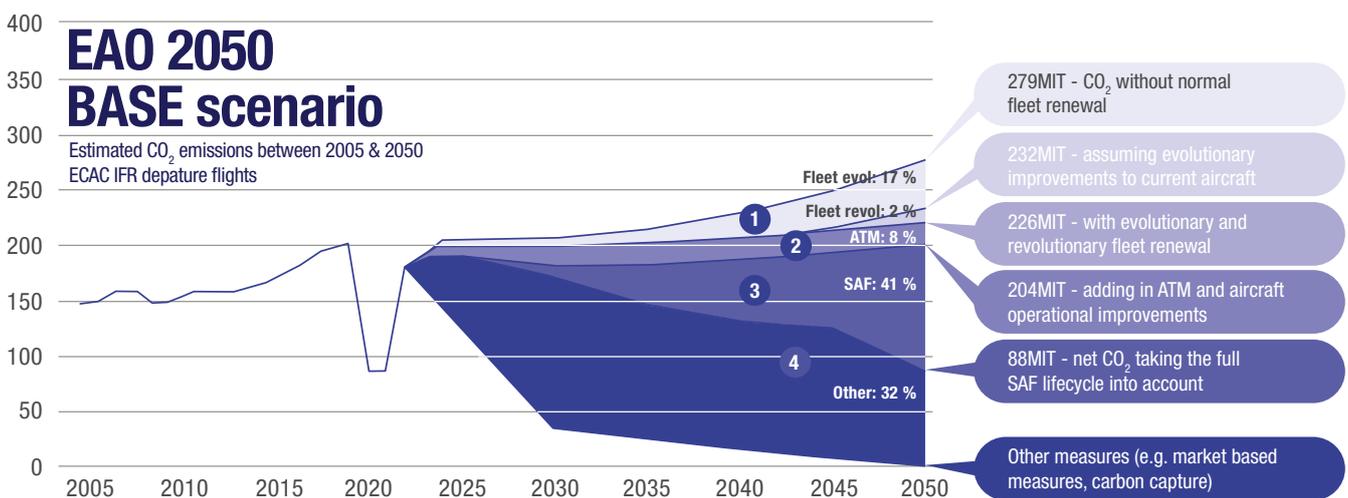
Auf dem Weg zur Klimaneutralität in der EU im Jahr 2050 stellt vor diesem Hintergrund die Defossilisierung des Luftverkehrs eine besondere Herausforderung dar. Denn nach heutigem Wissensstand wird eine direkte Elektrifizierung des Luftverkehrs, insbesondere für Mittel- und Langstreckenflüge, kaum möglich sein. Auch der Antrieb mit Wasserstoff ist für die kommerzielle Luftfahrt derzeit keine realistische Option zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen.

Laut dem Klimaschutzplan der europäischen Luftfahrt soll der Einsatz von Sustainable Aviation Fuels (SAF) den größten Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen leisten. Darüber hinaus könnte der Einsatz von SAF die Partikelemissionen als Auslöser für die Bildung von Kondensstreifen deutlich reduzieren. Zusammen mit der Minderung weiterer klimarelevanter Verbrennungsprodukte würden diese modernen Treibstoffe im Vergleich zu fossilem Kerosin auch die sogenannten Nicht-CO₂-Effekte auf Klima und Umwelt deutlich abschwächen.

Es werden daher neue, nicht-fossile Kraftstoffe benötigt, die „drop-in-fähig“ sind, das heißt ohne Änderung der bestehenden Infrastruktur und der existierenden Flugzeugtriebwerke genutzt werden können. Nachhaltige Flugtreibstoffe, die Sustainable Aviation Fuels (SAF), erfüllen dieses Kriterium. Zudem ist ihre Energiedichte vergleichbar mit der von fossilem Kerosin. Sie können aus Biomasse und/oder mit Hilfe von Strom aus erneuerbaren Quellen (Power-to-Liquid – PtL) in verschiedenen Produktionsverfahren hergestellt werden.

Klimaschutzplan der europäischen Luftfahrt bei großem Wachstum

CO₂ emissions in million tonnes



1. Einsparmaßnahmen durch die Erneuerung der Flugzeugflotten mit jeweils modernen Flugzeugmustern und die Effizienzverbesserung gegenüber der heutigen Technologie, Einsparpotenzial: 53 Mio. t CO₂
2. Einsparmaßnahmen durch Effizienzsteigerung im Bereich des Betriebs und der Infrastruktur, Einsparpotenzial: 24 Mio. t CO₂
3. Einsparmaßnahmen durch die Nutzung von SAF, Einsparpotenzial: 116 Mio. t CO₂
4. Weitere Einsparmaßnahmen durch marktbasierete Maßnahmen oder CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung, Einsparpotenzial: 88 Mio. t CO₂

SAF können in drei Kategorien eingeteilt werden:¹

1. Biogene SAF

Unter dem Begriff biogene SAF, die auch als Biokerosin, Aviation Biofuels oder Bio-SAF bezeichnet werden, wird ein breites Spektrum an unterschiedlichen SAF-Spezifikationen zusammengefasst, die aus öl- und fetthaltiger, stärkehaltiger, zuckerhaltiger und/oder lignocellulosehaltiger (holz- und halmgutartiger) Biomasse erzeugt werden. Darunter fallen Rohstoffe wie Pflanzenöle, Algen, bestimmte Komponenten von Energiepflanzen, gebrauchtes Speisefett, organische Siedlungs- und Industrieabfälle oder Rückstände aus der Land- und Forstwirtschaft. Die Verwendung von Biomasse hat den Vorteil, dass diese sowohl Kohlenstoff als auch Wasserstoff enthält, die für die Herstellung der verschiedenen Produkte genutzt werden können.



2. Strombasierte SAF

Unter strombasierten SAF sind nachhaltige Flugkraftstoffe zu verstehen, die ausschließlich auf der Basis von Wasser als Quelle für Wasserstoff, CO₂ und Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt werden. Sie werden auch als Power-to-Liquid(PtL)-Kerosin, PtL-Flugkraftstoffe, eKerosin oder eSAF bezeichnet.



3. Hybride SAF

PBtL-SAF (Power-and-Biomass-to-Liquids) basieren auf der Kombination von biomasse- und strombasierten Herstellungsverfahren. Neben Strom wird eine weitere Kohlenwasserstoffquelle direkt eingesetzt (im Falle von PBtL Biomasse), die bereits einen Teil der Energie enthält, die sich im produzierten Flugkraftstoff wiederfindet.



Warum SAF zur Reduzierung der Klimawirkung?



Geringere THG-Emissionen

- Schon heute bei HEFA-SAF bis zu 80 % weniger THG-Emissionen im Vergleich zu fossilem Kerosin
- Bei strombasierten SAF potenziell bis zu 100 % CO₂-Emissionsminderung



Reduktion von Nicht-CO₂-Effekten

- Resultieren aus der Bildung von Rußpartikeln und weiteren klimawirksamen Stoffen
- SAF verbrennen sauberer, unter verringerter Bildung von Partikeln



Alternativlosigkeit SAF

- Andere klimafreundliche Antriebe (Elektro, Wasserstoff) stehen frühestens ab 2030 zur Verfügung
- Dauer des Markthochlaufs aufgrund der Nutzungsdauer von Flugzeugen sehr lang



Drop-in-Lösung

- Keine Anpassung der Triebwerke und Tankinfrastruktur notwendig
- Heute kommerziell erhältlich und in Verwendung
- Bereits zugelassen in Beimischung bis 50 %

Der SAF-Markthochlauf benötigt jetzt nachhaltigen Schub

Der Markthochlauf von SAF für den Flugverkehrssektor hat vor diesem Hintergrund höchste klimapolitische Priorität. Bereits bis 2030 müssen in der EU auch die CO₂-Emissionen der Luftfahrt um mindestens 55 Prozent sinken, in Deutschland sogar um 65 Prozent. Um dieses Etappenziel erreichen zu können, ist die kurz- und mittelfristige hinreichende Versorgung mit SAF von großer Bedeutung. Bisher sind SAF allerdings nur in geringen Mengen verfügbar. Bei den biogenen SAF ist absehbar, dass die Produktionskapazitäten bis 2030 deutlich zunehmen werden. Insbesondere im Bereich der mit grünem Strom hergestellten eSAF-Qualitäten existieren bislang ausschließlich Forschungs- oder Demonstrationsanlagen, die keine nennenswerten Produktionsmengen vorsehen.

ReFuelEU Aviation sieht steigende SAF-Quoten vor

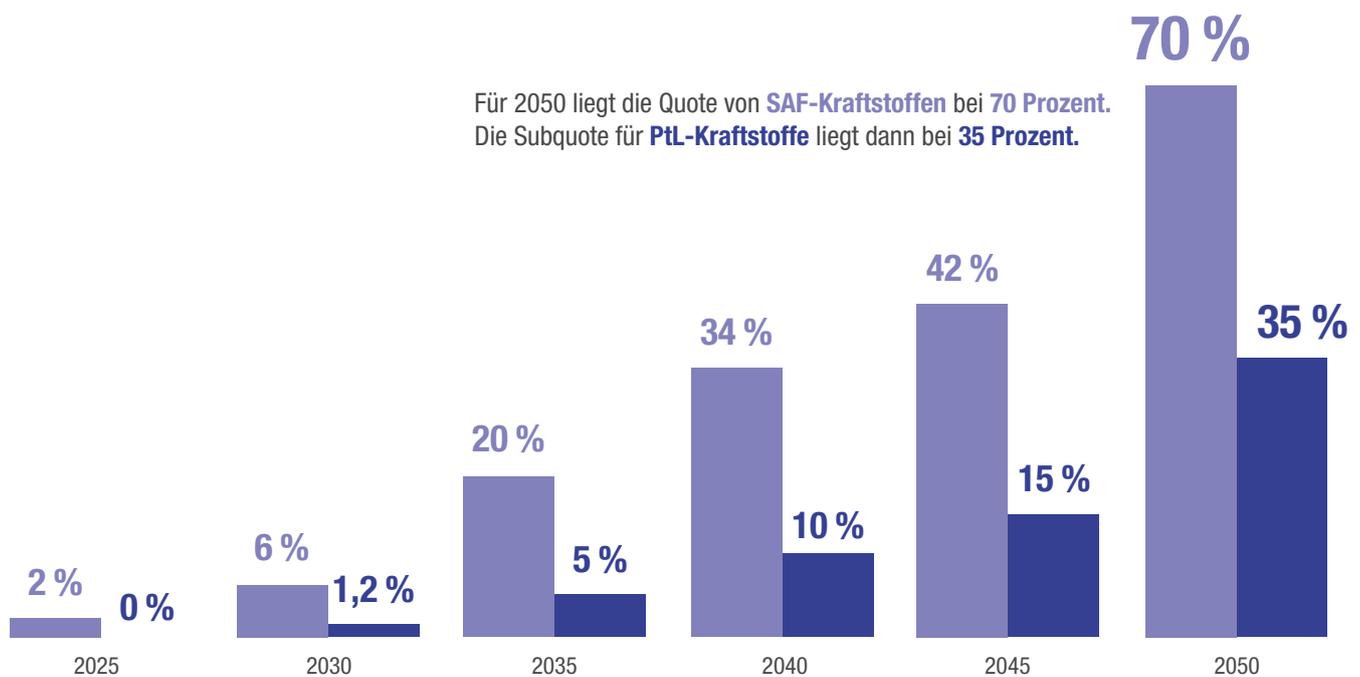
Die Abkehr vom Einsatz fossiler Treibstoffe wird regulatorisch vor allem durch die im Jahr 2023 beschlossene EU-Quotenregelung zur Beimischung von SAF in konventionelles Kerosin forciert: Gemäß der EU-Verordnung ReFuelEU Aviation gelten ab 2025 verbindliche SAF-Quoten in Europa. Ab 2025 müssen mindestens 2 Prozent der vertankten Treibstoffe an Flughäfen in der EU aus nachhaltigen Quellen

hergestellt sein. Bis 2050 soll dieser Anteil sukzessive auf 70 Prozent steigen, von denen mindestens 35 Prozent aus nicht-biogenen Quellen stammen sollen. Damit ist ein aus Ökostrom bzw. grünem Wasserstoff und nachhaltigem CO₂ hergestelltes PtL-Kerosin gemeint.

Die ReFuelEU Aviation verpflichtet verbindlich die Inverkehrbringer/Hersteller von Kerosin. Aber auch die Flugzeugbetreiber sind verpflichtet, ein Kerosin-SAF-Gemisch zu verwenden, wenn sie von EU-Flughäfen abheben wollen. Außerdem müssen die Flughäfen die notwendige Infrastruktur bereithalten, etwa zur Lagerung von SAF. Die ReFuelEU Aviation gibt zudem vor, dass die Nachhaltigkeitskriterien der Renewable Energy Directive (RED) für die Herstellung von SAF einzuhalten sind. Um die SAF-Quoten der EU einhalten zu können, müssen nach Darstellung des statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat) im kommenden Jahr 700.000 t rein biobasierte SAF, ab 2030 insgesamt 2,4 Mio. t SAF (davon 500.000 t eSAF) und 2035 bereits 8 Mio. t SAF (davon 2 Mio. t eSAF) zur Verfügung stehen.²

In Deutschland soll der Markthochlauf von nachhaltigen Flugkraftstoffen insbesondere durch die nationale eKerosin-Quote (oder PtL-Quote) gefördert werden. Gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) sind im Jahr 2026 0,5 Prozent, im Jahr 2028 1 Prozent und im Jahr 2030 2 Prozent eKerosin beizumischen. Verpflichtet sind hier die Inverkehrbringer. Diese nationalen Quotenvorgaben dürften allerdings vor dem Hintergrund der ReFuelEU Aviation angepasst werden oder ganz entfallen.

SAF-Quoten im Überblick



Sustainable Aviation Fuels (SAF) Power-to-Liquid (PtL)

Quelle: Lufthansa; Grafik (Nr. 443): en2x

Voraussetzungen für die Nutzung von SAF

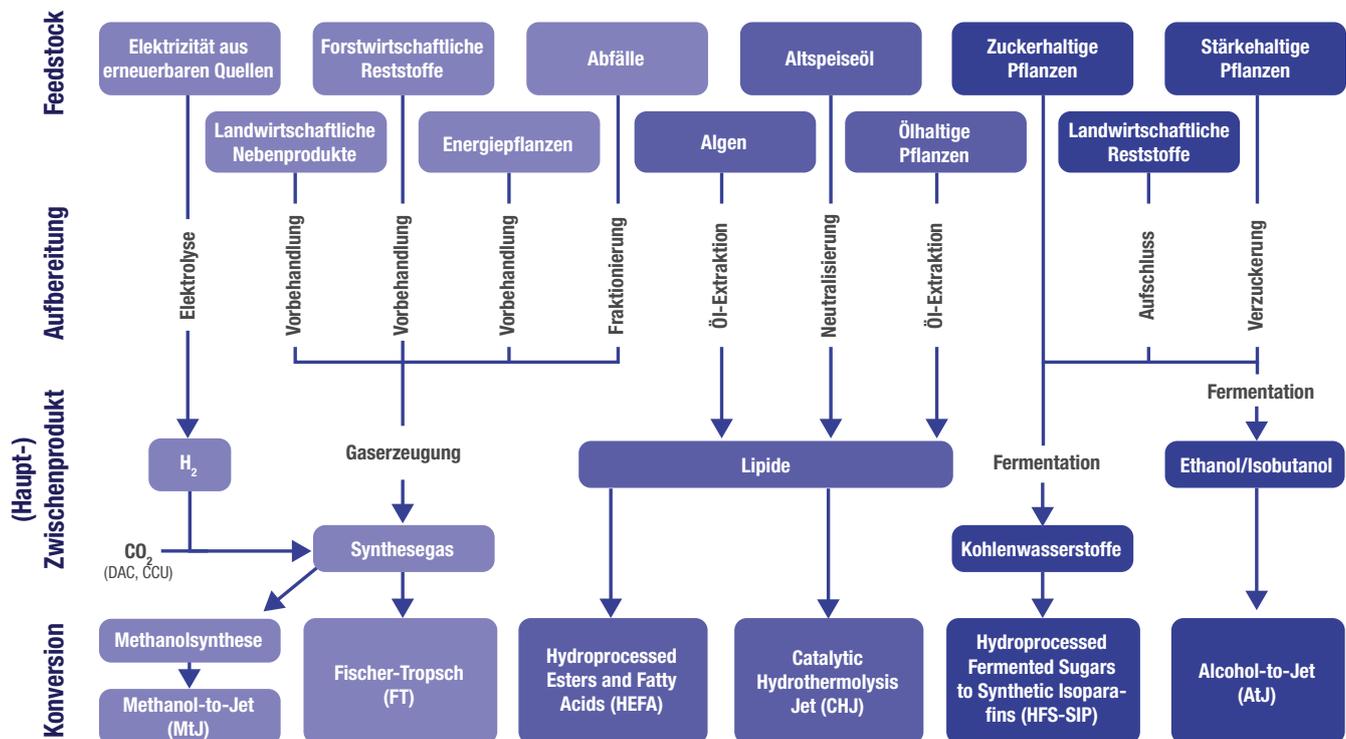
Für alle nachhaltigen Flugkraftstoffe gilt: Sie müssen drop-in-fähig, also problemlos mit herkömmlichem Kerosin sowie anderen SAF-Arten mischbar sein und die gleichen Normparameter erfüllen. Sie müssen außerdem einfach transportiert, gelagert und gepumpt werden können und in gleicher Qualität verfügbar sein. Damit ein sicherer Betrieb der Flugzeuge weltweit gewährleistet ist, sind alle SAF-Optionen bzw. das zugrundeliegende Herstellungsverfahren (teilweise in Kombination mit eingesetzten Rohstoffen) von der internationalen Standardisierungsorganisation ASTM International eigens für den Luftverkehr zuzulassen. Durchläuft eine SAF-Option das entsprechende Qualifizierungsverfahren erfolgreich, wird sie der sogenannten Standard-Spezifikation ASTM D7566 (für Flugkraftstoff Jet A-1 mit Anteilen synthetischer Kohlenwasserstoffe) bzw. der ASTM D1655 hinzugefügt. Die Norm ASTM D7566 definiert die Standards für die Qualität von nicht-mineralölbasierten Flugkraftstoffen sowie die Obergrenzen für deren anteilige Beimischung zu mineralölbasiertem Kerosin. Die Norm ASTM 1655 erlaubt das Co-Processing, also das gemeinsame Verarbeiten von erneuerbar produzierten Rohstoffen und SAF-Vorprodukten mit konventionellem Erdöl in der Raffinerie. Derzeit liegen die Obergrenzen für die Beimischung zu herkömmlichem Jet-A-Kraftstoff je nach Variante zwischen 5 Prozent (ausschließlich Co-Processing-Produkte) und 50 Prozent.

Wie können Sustainable Aviation Fuels hergestellt werden?

Für die Herstellung von biogenem SAF sind je nach verwendeter Biomasse unterschiedliche Vorbehandlungsschritte nötig, um die Biomasserohstoffe zu einem flüssigen, normenkonformen Kraftstoff weiterzuverarbeiten. Dabei werden die Rohstoffe, typischerweise nach einer Vorbehandlung, in einem ersten Schritt zu einem Zwischenprodukt umgewandelt, beispielsweise Alkohol, Synthesegas oder Bio-Rohöl (Biocrude). Aus diesen Zwischenprodukten wird in einem zweiten Umwandschritt Biokerosin gewonnen. Für die Herstellung von eSAF/PtL-Flugkraftstoff wird zunächst Wasser in einem Elektrolyseprozess mit Hilfe elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Der Wasserstoff wird anschließend zusammen mit CO₂ in ein Synthesegas umgewandelt. Aus dem Synthesegas werden mittels Fischer-Tropsch-Synthese oder Methanolsynthese die Zwischenprodukte synthetisches Rohöl oder Methanol erzeugt, die in der Raffinerie zu drop-in-fähigen Flugkraftstoffen aufbereitet werden.

Insgesamt sind derzeit mehr als 10 SAF-Varianten/Verfahren von der ASTM International anerkannt/zertifiziert. Dazu zählen für biobasierte SAF die Verfahren Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) und Alcohol-to-Jet (AtJ), für strombasiertes SAF das Fischer-Tropsch-Verfahren (FT).

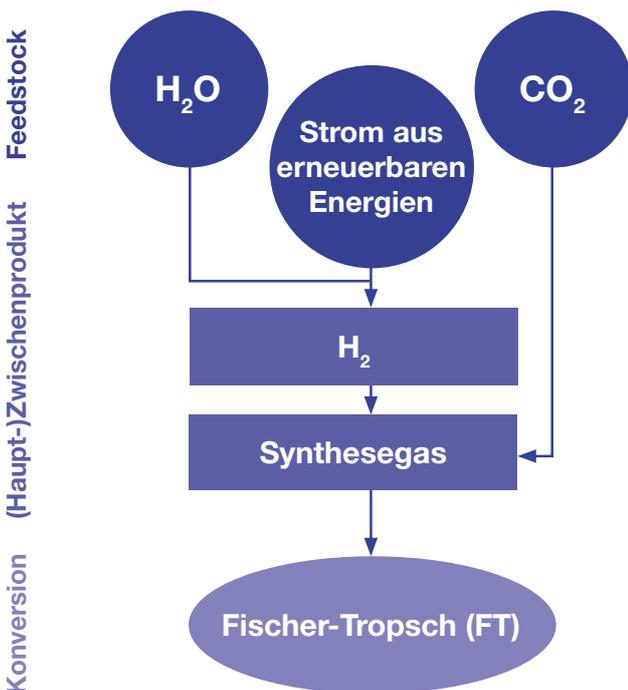
SAF-Herstellungspfade



HEFA – SAF-Biokraftstoff auf Basis von Estern und Fettsäuren

Biokraftstoff auf der Grundlage von Estern und Fettsäuren (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HEFA) ist die derzeit am weitesten entwickelte Option unter den SAF-Varianten. Bei dem HEFA-Verfahren handelt es sich im Wesentlichen um eine Hydrierung und ein Hydrocracking von pflanzlichen oder tierischen Ölen und Fetten und damit um deren Umwandlung in Gemische aus langkettigen Kohlenwasserstoffverbindungen, die die entsprechenden Kraftstoffspezifikationen erfüllen. Die in den Rohstoffen enthaltenen Lipide werden im Produktionsprozess (Hydrierung) in Standard-Hydrocracker-Anlagen mit Wasserstoff verarbeitet, so dass daraus HEFA Synthesized Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK) entsteht. Eine zusätzliche Isomerisierung senkt den Gefrierpunkt des biogenen Kraftstoffs, so dass er kältestabiler ist und herkömmlichem Kerosin beigemischt werden kann. Als Rohstoffe für die Herstellung werden aktuell hauptsächlich gebrauchte Speiseöle und -fette (Used Cooking Oil, UCO) eingesetzt. Doch es kommen auch Pflanzenöle, etwa aus Carinata oder Jatropha, deren Anbau keine Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelherstellung darstellt, sowie Algenöle infrage. HEFA-SPK ist gemäß der ASTM D7566 Anhang 2 seit 2011 als SAF für eine Beimischung von maximal 50 Prozent zu mineralölbasiertem Kerosin zertifiziert. Aufgrund der technischen Reife und der geringen Komplexität der Prozesse im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren ist HEFA aktuell der einzige alternative Kraftstoff, der kommerziell genutzt wird.

Strombasierte SAF Power-to-Liquid (PtL)



Quelle: In Anlehnung an Thomson et al. 2020): Sustainable Aviation Fuels. The Best Solution to Large Sustainable Aircraft

Alcohol-to-Jet – Synthetische Paraffinische Kraftstoffe

Die Alcohol-to-Jet (AtJ)-Technologie basiert auf der Umwandlung von verschiedenen Alkoholen (Ethanol, Methanol, Butanol und Isobutanol) in Flugkraftstoff und weitere Kohlenwasserstoffe. Bei der Herstellung der Alkohole werden heute in der Regel Polymerzucker aus einem Biomasserohstoff extrahiert und anschließend vergoren/fermentiert. Der so entstandene Alkohol wird in den weiteren Schritten des AtJ-Verfahrens – Bildung von kurzkettigen Olefinen, Bildung von langkettigen Kohlenwasserstoffen (Oligomerisierung) und Zusatz von Wasserstoff (Hydrierung) sowie Raffination – in synthetisches Paraffin umgewandelt und zu Flugkraftstoff aufbereitet. Die Bandbreite der beim AtJ-Verfahren einsetzbaren Rohstoffe ist prinzipiell groß und umfasst zuckerhaltige, stärkehaltige und lignocellulosehaltige Biomasse, biogene Abfall- und Reststoffe oder CO₂-haltige Abgase aus der Biomasseverbrennung. Alcohol-to-Jet Synthesized Paraffinic Kerosene (AtJ-SPK) ist nach ASTM 7566 Anhang 5, je nach Alkohol, mit einem Beimischungsanteil von 50 Prozent im herkömmlichem Jet-A zugelassen. Hinsichtlich der technologischen Reife befindet sich das AtJ-Verfahren derzeit im Demonstrationsstadium.

eSAF/PtL-Flugkraftstoff im Fischer-Tropsch-Verfahren

Im Rahmen der FT-Prozessroute wird PtL-Flugkraftstoff aus Wasser, CO₂ und Strom hergestellt. Dabei wird der per Elektrolyse erzeugte Wasserstoff zusammen mit CO₂ zum Beispiel aus Biogasanlagen, aus industriellen Punktquellen (CO₂-Abscheidung) oder der Umgebungsluft (Direct-Air-Capture) in Synthesegas umgewandelt. Das Synthesegas wird über eine sogenannte umgekehrte Wasser-Gas-Shift-Reaktion (rWGS) bei hohen Temperaturen erzeugt.

Es besteht primär aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂). In der Fischer-Tropsch-Synthese wird anschließend das Synthesegas unter Wärmefreisetzung zu Syncrude, einem paraffinischen Zwischenprodukt, das aus einer breiten Mischung von Kohlenwasserstoffen besteht, umgewandelt. Durch das anschließende Hydrocracking, katalytische Reformierung, Isomerisierung und Hydrierung kann aus dem Syncrude u. a. synthetisches Kerosin (eSAF) hergestellt werden. Mit einem neuen Verfahren, der sogenannten Co-Elektrolyse, ist es möglich, das Synthesegas in einem Prozessschritt effizienter herzustellen. Bereits seit 2009 ist Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK) gemäß der ASTM D7566 Anhang 1 als SAF für eine Beimischung von maximal 50 Prozent zu mineralölbasiertem Kerosin zertifiziert. Während das FT-Verfahren und das Hydrocracking bereits etablierte Verfahren sind, weisen die rWGS und vor allem die Co-Elektrolyse noch einen früheren technischen Reifegrad auf. Aufgrund ökonomischer und regulatorischer Risiken sind bislang noch keine großskaligen PtL-Anlagen in Betrieb.

Vor der Zulassung: Methanol-to-Jet-Verfahren

Zuerst wird aus grünem Strom und CO₂ grünes Methanol hergestellt. Hierfür gibt es unterschiedliche Verfahren. Um Flugkraftstoff herzustellen, wird im zweiten Schritt, dem sogenannten Methanol-zu-Olefin-Verfahren (MtO), das Methanol mit relativ hoher Selektivität in leichte Olefine (z. B. Ethylen und Propylen) umgesetzt und anschließend zu Flugkraftstoff raffiniert. Die einzelnen Verfahren wurden bisher noch nicht zu einem integrierten MtJ-Verfahren in großtechnischem Maßstab skaliert. Über den MtJ-Pfad hergestelltes SAF ist noch nicht durch die ASTM 7566 zertifiziert und darf daher noch nicht für kommerzielle Flüge verwendet werden. Aufgrund der Ähnlichkeit zum AtJ-Verfahren könnte MtJ in naher Zukunft zugelassen werden.

Bio- und strombasiert PBtL-Flugkraftstoff im Fischer-Tropsch-Verfahren

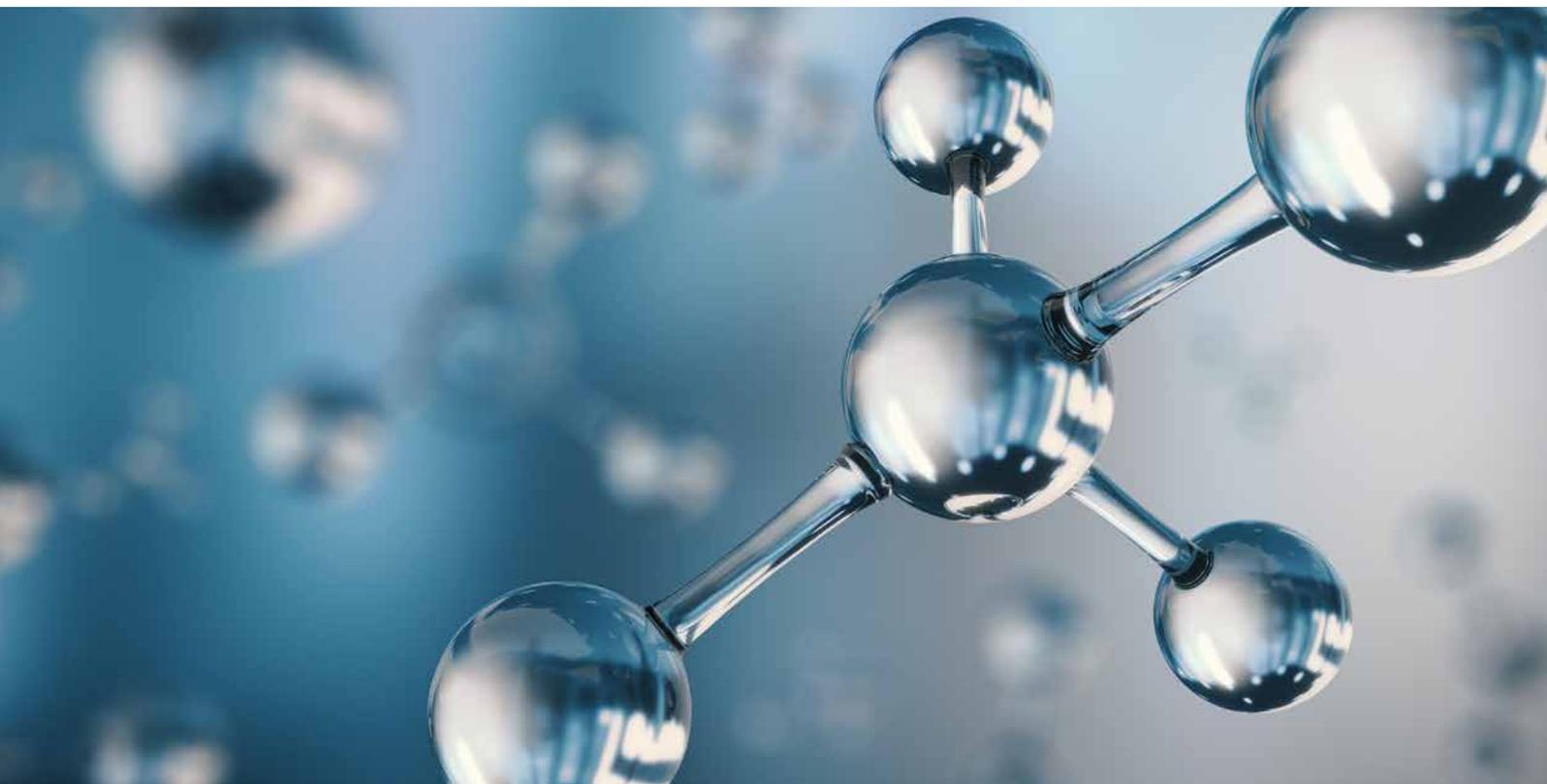
Die Herstellung von Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK) gemäß der ASTM D7566 Anhang 1 ist nicht ausschließlich an Wasser, CO₂ und Strom als Hauptausgangsstoffe gebunden. Zugelassen ist auch die Herstellungsvariante Power-and-Biomass-to-Liquids (PBtL), bei der – anders als bei PtL – ein Teil des Wasserstoffs sowie der benötigt Kohlenstoff und ein Teil der Energie zur Synthesegasherstellung aus der Biomasse stammt. Dabei kann das Biogas, das je nach Substrat und Prozessführung ca. zur Hälfte (volumenbezogen) aus Methan und CO₂ besteht, direkt in den Prozess der Synthesegaserzeugung eingebracht werden. Das Synthesegas wird wie bei der PtL-Variante mittels Fischer-Tropsch-Synthese zu Syncrude umgewandelt.

Co-Processing

Das sogenannte Co-Processing stellt eine weitere zugelassene Option dar, um alternative Rohstoffe für die Kerosinherstellung zu verwenden. Beim Co-Processing werden in der Raffinerie fossile und alternative Rohstoffe (Feedstocks) wie Pflanzenöle, tierischen Fette sowie Fischer-Tropsch-Zwischenprodukte (Syncrude oder Biocrude) gemeinsam in verschiedenen Verarbeitungsverfahren zu klimaschonendem Flugkraftstoff verarbeitet. Da sich diese Ausgangsstoffe von fossilem Rohöl unterscheiden, ergeben sich besondere Anforderungen an die Raffinerieprozesse; deshalb sieht die Standard-Spezifikation ASTM 1655 für diese SAF-Variante eine Beimischungsgrenze für alternative Rohstoffe von 5 Prozent vor.

Rohstoffauswahl wesentlich für CO₂-Minderung

Gegenüber fossilem Kerosin können mit nachhaltigen Flugkraftstoffen die CO₂-Emissionen deutlich reduziert werden. Mit biogenen Flugkraftstoffen sind CO₂-Minderungen von bis zu 80 Prozent und mehr möglich; dies gilt vor allem dann, wenn die eingesetzte Biomasse aus Rest- und Abfallstoffen stammt. Bei strombasierten SAF/PtL-Flugkraftstoffen können nahezu klimagasfreie Kraftstoffe hergestellt werden; dies gilt aber nur dann, wenn die erforderliche elektrische Energie vollständig aus erneuerbaren Quellen stammt und das CO₂ aus der Luft oder aus nachhaltigen biogenen Quellen gewonnen wird.



Welche SAF-Mengen können hergestellt werden?

Insgesamt sind SAF derzeit nur in überschaubaren Mengen verfügbar. Die Produktionskapazitäten reichen bei weitem noch nicht aus, um fossiles Kerosin in nennenswertem Umfang ersetzen zu können. Die internationale Luftfahrtorganisation IATA (International Air Transport Association) schätzt, dass sich die weltweite Produktion von SAF voraussichtlich von 600 Mio. Litern im Jahr 2023 auf 1,875 Milliarden Liter (1,5 Mio. t) im Jahr 2024 verdreifachen wird. Dies entspricht nur 0,53 Prozent des Kraftstoffbedarfs der Luftfahrt³. Eine von CENA Hessen (Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr) im Auftrag der hessischen Landesregierung erstellte Analyse⁴ gibt einen Überblick über den derzeitigen und prognostizierten Stand der SAF-Produktion.

CENA: Erfüllung der PtL-Quote wenig wahrscheinlich

Die CENA-Analyse mit Stichtag 31. Oktober 2023 bewertet die Projekte anhand von Härtegraden. Projekte mit niedrigem Härtegrad befinden sich im Stadium der Idee oder Planung; bei hohen Graden ist die Bau- oder die Produktionsphase erreicht. Daraus leiten die Autoren die Realisierungswahrscheinlichkeiten der SAF-Projekte ab – und ob die bereits verfügbaren sowie die angekündigten Produktionskapazitäten die derzeit geltenden Quoten auf nationaler und EU-Ebene erfüllen können. CENA hat insgesamt 144 aktive Projekte und Vorhaben zu Herstellung von SAF identifiziert, die meisten davon in den USA (34), gefolgt von Deutschland (20) und UK (12). Wesentliche Ergebnisse der Analyse:

- Im Jahr 2023 sind knapp 2 Mio. t SAF weltweit produziert worden. Die für das Jahr 2030 angekündigte maximale SAF-Produktionsmenge liegt bei ca. 30 Mio. t. Davon entfallen ca. 14 Mio. t auf Nordamerika, ca. 9 Mio. t auf Europa und ca. 5 Mio. t auf Asien.
- Die angekündigten Produktionsvorhaben, kombiniert mit den Härtegraden der Projekte in der EU, lassen eine Erfüllung der europäischen SAF-Quote aus hauptsächlich biogenen Verfahren als möglich erscheinen. Die Erfüllung der europäischen PtL-Quote hingegen erscheint wenig wahrscheinlich.
- Bio-SAF stellen in den Schlüsselregionen die meisten Produktionsvorhaben und -mengen. Die Entwicklung und Herstellung von PtL-Flugkraftstoff steht nur bei Projektvorhaben in Deutschland im Vordergrund.
- Die geplanten PtL-Produktionsmengen sind auch in Deutschland insbesondere bis 2026 sehr gering. Da auch die Härtegrade der Projekte sehr niedrig (Idee, Planung) sind, scheint eine Erfüllung der deutschen PtL-Quote aus eigener Produktion wenig wahrscheinlich.
- Aus Europa sind mit ca. 4 Mio. t die größten Mengen aus Projekten mit hohen Projekthärtegraden (in Betrieb, in Inbetriebnahme oder im Bau) und damit relativ sicherer finaler Investitionsentscheidung (FID) prognostiziert. Dies bezieht sich fast ausschließlich auf biogene SAF. In Deutschland wird hingegen auf Power-to-Liquid-Verfahren (PtL) gesetzt. Hier ist bis 2030 ein Produktionsvolumen von 1,5 Mio. t SAF geplant.
- Es besteht Handlungsbedarf, um eine zufriedenstellende PtL-Produktion in Deutschland und Europa sicherzustellen.

PtL-Flugkraftstoffe

Stärken

- Zulassung für die Nutzung in allen Flugzeugmustern
- Beimischung zu konventionellem Kerosin („Drop-in-Fuel“); keine Anpassungen am Flugzeug und auf den Flughäfen notwendig
- Hohes Potenzial zur Minderung der Klimawirkung (bis zu -90 % CO₂ sowie Minderung bestimmter Nicht-CO₂-Effekte)

Chancen

- Potenzial zur effizienten Speicherung von elektrischer Energie aus fluktuierenden erneuerbaren Quellen
- Kostensenkungspotenzial durch innovative Prozesse, optimierte Systemintegration und Skalierung
- Erhebliches Marktpotenzial für den Anlagenbau

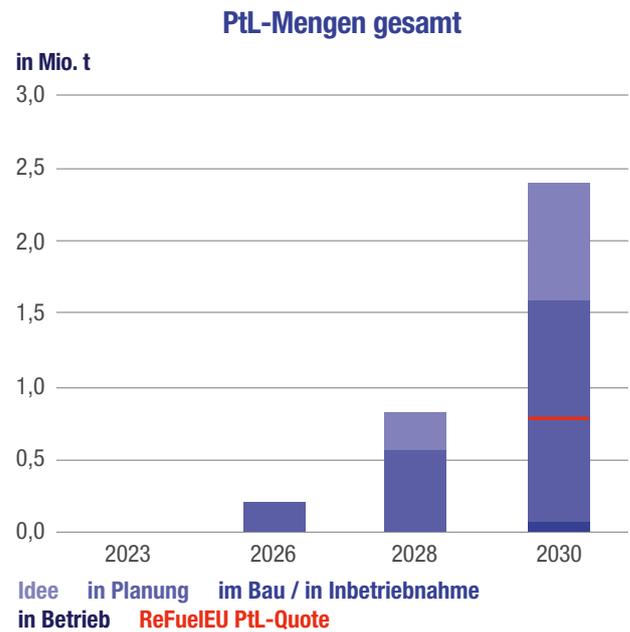
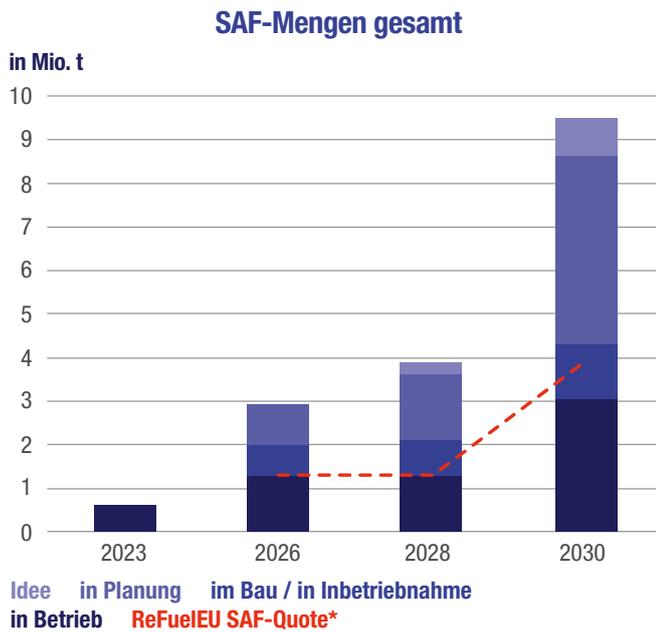
Schwächen

- Großtechnische Verfügbarkeit von nicht-fossilem CO₂ ist derzeit auf biogene Quellen (z. B. Biogasanlagen, Bioethanolanlagen) begrenzt; Direct-Air-Capture-Verfahren sind noch in der Entwicklung
- Höhere Treibstoffkosten im Vergleich zu HEFA-Kerosin
- PtL-Anlagen sind heute noch im Labor- und Pilotmaßstab; eine großtechnische Umsetzung steht noch aus

Herausforderungen

- Erprobung einer industriellen Produktion steht noch aus
- Einige Prozesskomponenten wurden noch nicht in einem großindustriellen Maßstab demonstriert
- Kostensenkungspotenzial stark abhängig von Innovationsdynamik und globaler Marktentwicklung

CENA SAF-Outlook: Geplante SAF-Mengen in Europa nach Projektstatus im Vergleich zu EU-Quoten



*ReFuelEU SAF-Quote (2 % ab 2025; 6 % ab 2030); ausgehende vom Verbrauch in 2019 (64,7 Mio. t), www.fuelseurope.eu
 Hinweis: Der Projektstatus gibt den aktuellen Stand in 2023 an. Es wurde keine Bewertung der künftigen Projektentwicklung vorgenommen.

Quelle: Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr; Grafik (Nr. 494): en2x

Fazit:

Nachhaltige Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) haben großes Potenzial, zum Haupttreiber für die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Luftverkehr zu werden. Entscheidend ist es, die Entwicklung industrieller Produktionsanlagen für SAF zu unterstützen und die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit von SAF anzustreben. Dazu bedarf es geeigneter Fördermaßnahmen und verlässlicher Rahmenbedingungen. SAF auf Basis biogener Quellen sind heute nur in geringen Mengen verfügbar; sie decken weniger als ein Prozent des globalen jährlichen Kerosinbedarfs. Notwendig ist ein substanzieller Produktionsanstieg in den nächsten Jahren, damit die SAF-Quoten annähernd erreicht werden.

Limitierte Potenziale biogener Rohstoffe werden die Bedeutung biogener SAF vermutlich langfristig begrenzen. Deshalb muss die eSAF-Produktion – parallel zur Markteinführung biogener SAF – zu einer großtechnisch und industriell verfügbaren und damit kostengünstigen Technologie auf- und ausgebaut werden. Aktuell befindet sich die Herstellung von strombasierten SAF noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Für eine Entwicklung hin zu industriellen Produktionsanlagen müssen Rahmenbedingungen einschließlich langfristig wirkender De-Risking- und Finanzierungsinstrumente geschaffen werden, die die nötigen großen Investitionen ermöglichen. Quoten für PtL-Flugkraftstoff reichen dazu nicht aus.

Quellen:

¹ aireg – Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V.: Roadmap zur Markteinführung von Sustainable Aviation Fuels, Dez. 2020, <https://relaunch.airreg.de/wp-content/uploads/2023/08/201217-aireg-Roadmap-Papier-Alternative-Flugkraftstoffe.pdf>

² Eurostat Database (2023); growth assumption aviation market 1.5 % per annum (according to the International Civil Aviation Organization, ICAO, medium scenario), nach NOW GmbH, Factsheet ReFuelEU Aviation Regulation – How does it affect the aviation sector?, Okt. 2023, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/11/NOW-Factsheet_ReFuelEU-Aviation-Regulation.pdf

³ IATA (International Air Transport Association), Presseinformation v. 6. Dez. 2023, <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/>

⁴ CENA SAF-Outlook 2024 – 2030: Eine Analyse von Mengen, Technologien und Produktionsstandorten für nachhaltige Flugtreibstoffe. Hrsg.: CENA Hessen – Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr, Okt. 2023

Hinweis!

Wie die aireg-Mitglieder mit den beschriebenen Herausforderungen beim SAF-Hochlauf umgehen wollen, können Sie hier nachlesen: <https://aireg.de/2024/05/27/aireg>

PROJEKTE

aireg-Mitglieder



Air bp: Fokussiert auf die Unterstützung der Industrie bei der Dekarbonisierung



Mit über 6.800 betankten Flügen pro Tag – mehr als 1 Flug alle 15 Sekunden. Air bp bedient rund **600 Standorte** in **mehr als 40 Ländern** und wir haben **SAF an über 45 Standorte** geliefert. Wir spielen eine wichtige Rolle in der Industrie und arbeiten mit Fluggesellschaften, Treibstoffherstellern und Handelsverbänden zusammen, um das Angebot und die Nachfrage nach nachhaltigem Flugzeugtreibstoff zu steigern. Zum Beispiel:

- Unser Treibstoffforschungs- und -entwicklungsteam sowie unsere Produktqualitätsexpert:innen haben eine zentrale Rolle bei der Entwicklung von unterstützenden Prozessen und Industriezulassungen gespielt.
- Im Jahr 2016 haben wir die erste kommerzielle Versorgung mit nachhaltigem Flugzeugtreibstoff über ein bestehendes Hydrantenbetankungssystem ins Leben gerufen.
- Nuseed und bp Products North America Inc. haben eine langfristige strategische Abnahme- und Marktentwicklungsvereinbarung geschlossen, die vorsieht, dass bp oder seine Tochtergesellschaften Nuseed Carinata Öl kaufen, um es zu verarbeiten oder in wachsenden Märkten für die Produktion nachhaltiger Biotreibstoffe zu verkaufen.

Abschließend noch ein echter Meilenstein für Air bp und die Luftfahrtindustrie: Wir haben im Juli (2023) bekannt gegeben, dass wir Teil eines von Virgin Atlantic geführten Konsortiums mit Rolls Royce und Boeing sind, um **nachhaltigen Flugzeugtreibstoff für den weltweit ersten mit zu 100 % mit nachhaltigem Flugzeugtreibstoff betankten Transatlantikflug bereitzustellen**. Die Boeing 787 flog Ende November 2023 von Heathrow nach New York JFK.

Weitere Informationen finden Sie unter Airbp.com/SAF.



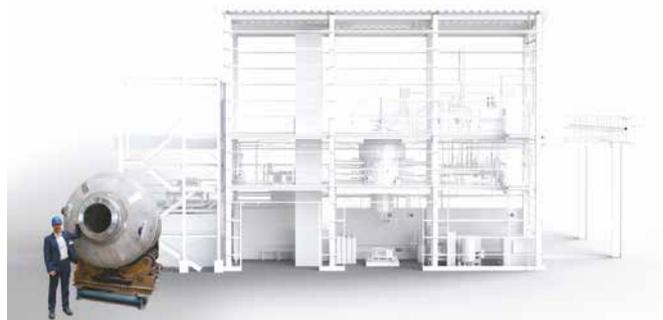
CAPHENIA: Power-and-Biogas-to-Liquid zur Synthesegas-Produktion



Unsere Mission: Durch den Einsatz von Spitzentechnologien und den Fokus auf Nachhaltigkeit wollen wir eine führende Rolle bei der Transformation der globalen Energie- und Chemieindustrie spielen und einen wesentlichen Beitrag zur Nachhaltigkeitsagenda leisten. CAPHENIA tritt als führender Innovator im Bereich erneuerbarer Kraftstoffe auf. Durch die Anwendung unseres Power-and-Biogas-to-Liquid (PBtL)-Verfahrens revolutionieren wir die Art und Weise, wie Synthesegas für die Produktion von nachhaltigen Kraftstoffen und chemischen Produkten gewonnen wird.

Pilotprojekt Germany I: In 2025 wird die PBtL-Pilotanlage Germany I im Industriepark Frankfurt-Höchst in Betrieb genommen. Die Anlage ist für eine Jahreskapazität von 500 Tonnen nachhaltigen Flugkraftstoffen ausgelegt. Für CAPHENIA ist Germany I ein wichtiger Schritt, um seine fortschrittlichen Technologien weltweit skalierbar zu machen. Mit der innovativen Methanpyrolyse und einem von CAPHENIA entwickelten Mehrzonen-Reaktorkonzept wird aus Biomethan und CO₂ ein hochwertiges Synthesegas, bestehend aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenstoffmonoxid (CO), hergestellt. Als Energiequelle dient nachhaltig erzeug-

ter Strom. Dieses Verfahren ermöglicht eine energieeffiziente Gewinnung von Synthesegas, das mittels Fischer-Tropsch-Synthese in verschiedene Kraftstoffe, einschließlich Kerosin, umgewandelt wird. Der Prozess minimiert Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen und steigert die Wirtschaftlichkeit durch Wärmerückgewinnung. Germany I entsteht in Kooperation mit renommierten Partnern und wird durch das 7. Energieforschungsprogramm des BMWK sowie durch das Land Hessen finanziell gefördert. Diese Unterstützung ist entscheidend für die Fortführung unserer Pionierarbeit.



DHL: Netto-Null-Emissionen im Jahr 2050



Die DHL Group ist mit rund 594.000 Mitarbeitern in über 220 Ländern und Territorien das weltweit führende Logistikunternehmen und ein Motor des globalen Handels.



Unsere Vision: ein sauberer Logistikbetrieb und Netto-Null-Emissionen im Jahr 2050. Dafür verpflichten wir uns im Rahmen der Science Based Targets Initiative (SBTi) im Einklang mit dem Pariser Abkommen zu einem festgelegten Ziel für die Treibhausgasemissionen bis 2030. Wir werden verstärkt nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF) verwenden, alle neuen Gebäude klimaneutral gestalten, ein umfassendes Portfolio an umweltfreundlichen Produkten anbieten und 60 Prozent unserer Zustellung auf der letzten Meile elektrifizieren.

Knapp 70 Prozent unserer Emissionen werden in der Luftfahrt ausgestoßen. SAF sind für uns daher ein zentraler Baustein der Dekarbonisierung. Wir gehören schon heute zu den größten SAF-Nutzern weltweit und haben mit 3,2 Prozent unseres Kerosinbedarfs den höchsten SAF-Anteil. Bis 2030 soll dieser Anteil auf 30 Prozent steigen. Dafür sucht ein Team aus Experten kontinuierlich nach neuen Möglichkeiten für langfristige Abnahmeverträge und wirbt im politischen Umfeld für positive und konstante regulatorische Rahmenbedingungen.



EDL: HyKero-Anlage zur industriellen Herstellung von PtL-SAF



Wir stehen voll und ganz zu den Klimazielen Deutschlands und der EU und tragen mit unseren Power-to-X(PtX)-Lösungen dazu bei, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 Prozent zu senken. Mit dem im Jahr 2020 gestarteten HyKero-Projekt wollen wir gemeinsam mit der XFuels GmbH und weiteren Partnern die Herstellung von strombasiertem Flugkraftstoff im industriellen Maßstab vorantreiben.

Projekt HyKero – PtL-SAF-Produktion ab 2028

Am Standort Böhlen-Lippendorf, südlich von Leipzig, sollen ab 2028 pro Jahr 50.000 Tonnen nachhaltige und umweltfreundliche PtL-SAF für die Luftverkehrswirtschaft sowie 14.000 Tonnen PtL-Naphtha produziert werden. Der Standort bietet eine ideale Infrastruktur und liegt zudem unweit des Flughafens Leipzig-Halle.

Die HyKero-Technologie ermöglicht eine wirtschaftliche Produktion von PtL-SAF (eSAF) ohne CO₂-Emissionen. Das Verfahren nutzt grünen Wasserstoff, der durch Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von erneuerbarem Strom erzeugt wird. Aus dem grünen Wasserstoff und nachhaltigem

Kohlenstoff wird Synthesegas erzeugt. Dieses wird mittels Fischer-Tropsch-Synthese und nachfolgendem Refining zu PtL-SAF und PtL-Naphtha weiterverarbeitet. Durch die Verwendung von PtL-SAF können die Treibhausgasemissionen in der Luftfahrt signifikant reduziert werden. Als „Important Project of Common European Interest“ erhält das Projekt HyKero Fördermittel vom Land Sachsen sowie vom Bund.



HCS: Amelia-Projekt setzt auf Alcohol-to-Jet



Die HCS Group verfolgt als weltweit führender Hersteller hochwertiger Kohlenwasserstoffe das Ziel, wegweisende Lösungen für eine fossilfreie Welt zu entwickeln. Das Chemieunternehmen setzt dabei auf Ansätze wie biobasierte, strombasierte und zirkulare Lösungen, insbesondere in Branchen wie Luftfahrt, Pharma und Kosmetik, in denen Kohlenwasserstoffe unverzichtbar sind.

Ein Innovationsprojekt der HCS Group ist Amelia, ein Vorhaben, das den Pioniergeist des Unternehmens in der Kraftstoffentwicklung unterstreicht. Ziel ist es, als erster Hersteller in Deutschland nachhaltigen Flugkraftstoff (SAF) mittels des Alcohol-to-Jet (AtJ)-Verfahrens herzustellen und die Luftfahrtindustrie auf dem Weg zu nachhaltigem Fliegen zu unterstützen. Als Rohstoff für biogene SAF setzt die HCS Group auf abfallbasierte Biomasse gemäß EU RED III Anhang IX Teil A aus dem europäischen Raum. Der Produktionsstart mit einer Kapazität von 60.000 Tonnen pro Jahr ist für 2027 an einem bestehenden Standort der Haltermann Carless geplant.

Der Projektstatus – Engineering, Rohstoffversorgung, Kundenbeziehungen und regulatorische Aspekte sind geklärt – unterstreicht die Skalierbarkeit und Umsetzbarkeit der SAF-Produktion in Deutschland und markiert einen bedeutenden Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Zukunft.



HCS-Produktionsstandort in Speyer: ein möglicher Standort für die erste industrielle Bio-SAF-Herstellung im AtJ-Verfahren in Deutschland.



MABANAFT: eSAF im Fokus



Mabanaft ist ein führendes unabhängiges und integriertes Energieunternehmen – mit einer aktiven Rolle in der Energiewende. Unter dem Slogan „Fuelling a clean, safe and fair tomorrow“ haben wir uns das Ziel gesetzt, bis 2030 die Emissionen in unserem Geschäftsbetrieb um 50 Prozent im Vergleich zum Basisjahr 2022 zu reduzieren.

Wir wollen unsere Kunden bei ihren eigenen Anstrengungen zur Senkung von Verbrauch und Emissionen unterstützen. Ob zu Wasser, auf der Straße oder in der Luft: Wir gestalten die Mobilität von morgen. Mit innovativen Energielösungen sorgen wir dafür, dass der Energiebedarf unserer Kunden nachhaltig gesichert ist.

Wir beliefern unsere Kunden aus der Luftfahrt bereits heute mit kohlenstoffreduzierten SAF-Kraftstoffen. Über unser Joint Venture P2X Europe entwickeln wir eigene eSAF-Projekte in Europa und arbeiten an der Beschaffung von Electro Sustainable Aviation Fuels (eSAF) aus Projekten Dritter. So wird P2X Europe voraussichtlich ab 2027/2028 jährlich 8.000 Tonnen RFNBO Crude Liquids aus dem ersten Projekt von Nordic Electrofuel in Norwegen abnehmen und

in eSAF umwandeln können. Diese und weitere Mengen an eSAF und SAF werden wir importieren, lagern und mischen – und sie an Kunden in Deutschland und anderen europäischen Ländern liefern.



NESTE: Vorreiter bei der SAF-Herstellung aus biogenen Reststoffen

NESTE

Neste ist der weltgrößte Hersteller von Sustainable Aviation Fuel (SAF), erneuerbarem Diesel und erneuerbaren Rohstoffen für die Chemie- und Kunststoffindustrie. Eines der Ziele von Neste ist es, die Treibhausgasemissionen seiner Kunden durch die erneuerbaren Produkte des Unternehmens ab 2030 um jährlich 20 Mio. t zu senken. Im Jahr 2023 lag dieser Wert bereits bei 11 Mio. t.

Neste produziert SAF aus nachhaltig beschafften, 100 Prozent erneuerbaren Rohstoffen, etwa alten Speiseölen oder Tierfettabfällen. Neste MY Sustainable Aviation Fuel senkt die THG-Emissionen gegenüber dem Einsatz von fossilem Kerosin um bis zu 80 Prozent über den Lebenszyklus des Kraftstoffs.

Neste's globale Produktionskapazität für SAF wird 2024 auf 1,5 Mio. t pro Jahr steigen und 2026 rund 2,2 Mio. t erreichen. SAF erfüllt alle Anforderungen der Normen für Flugzeugtreibstoffe, ist nach ASTM D7566 zertifiziert und kann

nach der Beimischung zu herkömmlichem Kerosin direkt verwendet werden. SAF ist mit bestehenden Flugzeugtriebwerken und Flughafeninfrastrukturen kompatibel. SAF von Neste wird bereits heute von zahlreichen Airlines weltweit genutzt und ist an Flughäfen rund um den Globus verfügbar.



TotalEnergies: 1,5 Mio. Tonnen SAF-Produktionskapazität bis 2030



TotalEnergies hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 CO₂-Neutralität zu erreichen, gemeinsam mit der Gesellschaft. Weltweit engagieren sich über 100.000 Mitarbeitende dafür, dass Energie zunehmend erschwinglicher, nachhaltiger, zu-

verlässiger und für so viele Menschen wie möglich zugänglich wird. Für TotalEnergies Aviation bildet die Entwicklung von Biokraftstoffen eine der strategischen Prioritäten, um die Dekarbonisierung der Luftfahrtindustrie im Einklang mit dem Netto-Null-Ziel zu meistern.



Seit über 10 Jahren beteiligt sich TotalEnergies an Initiativen zur Förderung der Produktion und Entwicklung nachhaltiger Flugkraftstoffe. 2021 startete das Unternehmen die SAF-Produktion in Frankreich. Mit der ersten SAF-Lieferung an den Flughafen Charles de Gaulle und dem ersten permanenten SAF-Angebot am Flughafen Le Bourget konnte es 2021 zwei französische Premierien und mit den ersten vollständig mit SAF betriebenen Flügen eines Airbus-Hubschraubers und eines Airbus A319 Neo zwei Weltpremierien feiern. Aktuell nutzt und prüft TotalEnergies weitere SAF-Produktionstechnologien, wie Co-Processing oder die Entwicklung von E-Fuels. Bis 2030 soll eine Produktionskapazität von 1,5 Mt erreicht werden.

**aireg setzt sich für die verstärkte
Herstellung und Nutzung regenerativer
Energieträger im Luftverkehr ein:**

**Im Jahr 2030 sollen 10 Prozent des
gesamten in Europa getankten
Flugtreibstoffs aus regenerativen,
nachhaltigen Kraftstoffen bestehen.**





Aviation Initiative for
Renewable Energy in Germany e.V.

aireg – Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. | Bundesratufer 10 | 10555 Berlin
T +49 178 184 30 41 | kontakt@aireg.de | www.aireg.de



**Wirtschaftsverband Fuels
und Energie e.V.**

en2x – Wirtschaftsverband Fuels und Energie e.V. | Georgenstraße 24 | 10117 Berlin
T +49 30 403 66 55 0 | info@en2x.de | www.en2x.de