Technische, logistische und wirtschaftliche Herausforderungen bei der praktischen Einführung und Umsetzung von 100 % SPK-SAF in der Luftfahrt

Kontakt: Wolfgang Grimme

Institution: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Luftverkehr

Autoren: Wolfgang Grimme, Leon Müller, Dr. Shravan Kumar

E-Mail: wolfgang.grimme@dlr.de

Veröffentlichungsdatum: 21. Juli 2026

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

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch: NOW

Projektträger: VDI VDE IT, FNR

Inhalt

Zusammenfassung **4**

1 Einleitung **6**

2 Aufgabenstellung, Umfang und Systemgrenzen **10**

3 Rahmenbedingungen und Hintergründe **12**

3.1 Status Quo Treibstofflogistik und Nachfrage 12

3.2 Regulatorischer Rahmen 17

3.3 Beitrag von SAF zur Reduktion von Klimawirkungen und lokaler Luftqualität 20

4 Herausforderungen beim Einsatz von SPK-SAF und geeignete Lösungsansätze **22**

4.1 Methodik 22

4.2 SPK-SAF-Produktion 23

4.3 Treibstofflogistik 26

4.4 Flughafeninfrastruktur und Betankung 27

4.5 Flugzeug- und Triebwerkshersteller 31

4.6 Airlines 34

4.7 Markt & Regulatorik 36

5 Szenarien und ökonomische Bewertung **38**

5.1 Szenarien 38

5.2 Flotten- und Treibstoffmodellierung 40

6 Ergebnisse und Diskussion **44**

6.1 Ergebnisse der Modellierung 44

6.2 Nutzen-Kosten-Bewertung 48

6.2.1 Investitions- und Logistikkosten *48*

6.2.2 Nutzendimension „Klima“ *51*

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR

6.2.3 Nutzendimension „lokale Luftqualität“ ... 54

6.2.4 Weitere Nutzendimensionen ... 57

6.3 Ökonomische Implikationen bei der Nutzung von 100 % SPK-SAF ... 58

6.3.1 Beschreibung des Status Quo der SAF-Nutzung ... 58

6.3.2 Physische Duplikation der Infrastruktur ... 58

6.3.3 Umlageverfahren ... 59

6.3.4 Book & Claim ... 61

6.4 Priorisierung individueller Flüge ... 62

7 Fazit und Ausblick ... 69

Danksagung ... 76

Abkürzungsverzeichnis ... 77

Abbildungsverzeichnis ... 80

Tabellenverzeichnis ... 82

8 Literaturverzeichnis ... 83

Anhang ... 91

Fragenkatalog der Stakeholder-Befragung ... 91

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

Zusammenfassung

Neben den CO_2-Emissionen des Luftverkehrs rücken Nicht-CO_2-Effekte, welche im Wesentlichen durch Kondensstreifen verursacht werden, in den Fokus von Wissenschaft, Politik und Luftverkehrswirtschaft. Durch den Einsatz von Sustainable Aviation Fuels (SAF) lassen sich Ruß- und Eispartikel bei der Verbrennung und damit auch die Nicht-CO_2-Effekte deutlich reduzieren. Ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Rußpartikeln ist der Anteil von Aromaten im Treibstoff. Es liegt somit nahe, aromatenfreien Treibstoff zu verwenden, um die Nicht-CO_2-Effekte des Luftverkehrs zu reduzieren. Allerdings ist ein Mindestgehalt an Aromaten in Flugzeugtreibstoffen notwendig, um u. a. die Dichtigkeit des Treibstoffsystems in heutigen Flugzeugen und der Treibstoffinfrastruktur am Boden sicherzustellen. Während in fossilem Kerosin Aromaten auf natürliche Weise vorhanden sind, wurde für SAF eine Untergrenze der Aromaten von 8 Vol.-% definiert.

In der vorliegenden Studie wird untersucht, ob und wie ein künftiger Übergang zur Nutzung eines aromatenfreien Flugtreibstoffs, sogenanntem Synthetic Paraffinic Kerosene (SPK), an deutschen Flughäfen gelingen könnte. Hierzu wurden zunächst in Stakeholder-Befragungen relevante Aspekte der heutigen Treibstofflogistik im Luftverkehr erhoben (Status Quo) und wesentliche Herausforderungen für einen Übergang auf 100 % SPK-SAF identifiziert. Dabei wurden die Elemente SAF-Produktion und -Distribution, Flughafeninfrastruktur und Betankung, Flugzeug- und Triebwerkszertifizierung, operativer Airline-Betrieb und Markt & Regulatorik untersucht.

Neben der qualitativen Analyse von Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten steht die Ermittlung von Kosten und Nutzen der Verwendung von 100 % SPK-SAF im Zentrum dieser Studie. Es wurden mehrere Einführungs- und Nutzungsszenarien entwickelt, die sich im

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Hinblick auf die Verbreitung von 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen in der Flotte und der konkreten Umsetzung (physische Bereitstellung vs. Book & Claim[1]) unterscheiden.

Aus den Erkenntnissen der qualitativen und quantitativen Analyse wurden unterschiedliche Handlungsoptionen abgeleitet, die dazu beitragen sollen, die Nutzung von 100 % SPK-SAF zu ermöglichen und damit den Luftverkehr nachhaltiger zu gestalten. Die Analysen haben ergeben, dass die Nicht-CO_2-Effekte von Flügen ab deutschen Flughäfen stark auf einige wenige Flughäfen, vor allem Frankfurt/Main und München, konzentriert sind. Daher erscheint unter den gegebenen Rahmenbedingungen und Annahmen eine gezielte, physische Bereitstellung von 100 % SPK-SAF an diesen Flughäfen sinnvoll, während die annahmen- und modellgestützten Analysen zeigen, dass Treibstoffe für Flüge ab den übrigen Flughäfen etwa über ein Book & Claim-System eingebunden werden könnten. Flankierende Maßnahmen zur Schaffung von Anreizen zur Nutzung von 100 % SPK-SAF können dazu beitragen, die Einführung möglichst wettbewerbsneutral zu gestalten, bei gleichzeitiger Maximierung der Reduktion von Nicht-CO_2-Effekten. Bis zur Einführung von 100 % SPK-SAF sind erhebliche Herausforderungen in unterschiedlichen Bereichen zu lösen. Dazu gehören die Definition des Treibstoffstandards, die (Re-)Zertifizierung und mögliche Umrüstung von Flugzeugen, die Schaffung einer geeigneten Infrastruktur und Versorgungskette sowie Anpassungen des regulatorischen Rahmens.

[1] Der Begriff Book & Claim bezeichnet ein Modell, bei dem Nachhaltigkeitszertifikate (Claims) unabhängig vom physischen Produkt (wie bspw. hier dem SPK-SAF) gehandelt werden, sodass ein Unternehmen Umwelteigenschaften nachhaltiger Produktion für sich verbuchen kann, ohne das physische Produkt erhalten zu haben.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

1 Einleitung

Der internationale Luftverkehr ist für ca. 3 bis 5 % der globalen anthropogenen Klimawirkung verantwortlich (Lee et al. 2021). Auch Flüge von und nach Deutschland tragen entsprechend zur Umweltbelastung durch den Luftverkehr bei. Um die Klimawirkung des Luftverkehrs zu reduzieren, unterliegt dieser seit 2012 dem Emissionshandelssystem der Europäischen Union (EU EHS). Dabei werden neben sinkenden Emissionsgrenzen (Caps) für den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO_2) auch die Zertifikatsfreimengen für den Luftverkehr bis 2026 gestrichen. Darüber hinaus sollen durch das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), welches von der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) initiiert wurde und von den teilnehmenden Mitgliedsstaaten administriert wird, die CO_2-Emissionen des internationalen Luftverkehrs ausgeglichen werden. Emissionen, die über eine festgelegte Basis (85 % der Emissionen aus dem Jahr 2019) hinausgehen, müssen durch Kompensation in Form von CO_2-Einsparungen in Projekten, die meist andere Sektoren betreffen, ausgeglichen werden.

Neben direkten CO_2-Emissionen trägt der Luftverkehr auch mit sogenannten Nicht-CO_2-Effekten bei. Diese umfassen unter anderem Aerosole, die zur Bildung von Kondensstreifen und Cirruswolken führen, und Stickoxidemissionen (NO_x), die eine Bildung von Ozon begünstigen (Lee et al. 2021). Nicht-CO_2-Effekte können sowohl erwärmende als auch kühlende Effekte haben, der Nettoeffekt ist jedoch erwärmend. Nicht-CO_2-Effekte machen dabei etwa die Hälfte (Lee et al. 2021) bis zwei Drittel der gesamten Klimawirkung des Luftverkehrs aus (Niklaß et al. 2019), werden allerdings in CORSIA oder dem EU EHS derzeit nicht in die Abgabepflicht inkludiert. Seit 2025 müssen Luftfahrzeugbetreiber ihre Nicht-CO_2-Effekte im Rahmen des jährlichen Emissionsberichts des EU EHS melden. Diese Berichtspflicht umfasst dabei grundsätzlich die gleiche geografische Abgrenzung wie das EU EHS (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) 2026).

Neben dem EU EHS hat die Europäische Union im Jahr 2023 Mandate für die Verwendung von nachhaltigen Treibstoffen, sogenannten Sustainable Aviation Fuels (SAF), in der ReFuelEU Aviation-Verordnung für alle Abflüge in der Europäischen Union vorgeschrieben. Gemäß der ReFuelEU Aviation-Verordnung sind SAF sowohl biogene Treibstoffe, welche aus Rohstoffen hergestellt werden, die nach der Erneuerbare-Energien-Richtline III (RED III) definiert sind, als auch synthetische Treibstoffe, hergestellt aus grünem Wasserstoff (H_2) und CO_2 (Renewable Fuels of Non-Biological Origin / RFNBO). SAF werden nicht in Reinform,

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

sondern als Mischung („Blend“) mit fossilem Kraftstoff genutzt. In den Dokumenten der American Society for Testing and Materials (ASTM International) werden SAF als Synthetic Blending Components (SBC) bezeichnet, um eine klarere Abgrenzung zwischen dem fertig gemischten Treibstoff und den synthetischen Komponenten zu schaffen (ASTM D7566 - 23b; ASTM D1655 - 24).

Die Quoten zur Nutzung von SAF im Verhältnis zur insgesamt verwendeten Treibstoffmenge in der ReFuelEU Aviation-Verordnung steigen von 2 % im Jahr 2025 auf 70 % im Jahr 2050 (Abbildung 1). Der Prozentsatz bezieht sich dabei auf den unverschnittenen SBC-Anteil.[2] Ab 2030 gilt zusätzlich eine Unterquote zur Verwendung strombasierter Treibstoffe, welche bis 2050 auf einen Anteil von 35 % steigt. Die größten technologischen und ökonomischen Herausforderungen bei der Nutzung von SAF liegen in der Skalierung der Produktion und Senkung der Produktionskosten, da SAF heute signifikant teurer ist als fossiles Kerosin (Braun et al. 2024; EASA 2026).

SAF, als Mischung von SBC und fossilem Flugturbinentreibstoff (Jet A-1), können unmittelbar in heutige Treibstoffinfrastrukturen und Logistikketten integriert und mit heutigen Flugzeugen und Triebwerken verwendet werden, da sie die Spezifikationen für Flugtreibstoffe erfüllen. Diese Treibstoffe werden daher als Drop-in-Treibstoffe bezeichnet. Die ASTM legt globale Standards für die Nutzung von SAF in der Luftfahrt fest. Derzeit sind nach ASTM D7566 acht Herstellungsverfahren für SAF zugelassen, zusätzlich zu drei weiteren für Co-Processing. Die derzeitigen maximalen Beimischungsgrenzen von SAF als SBC zu herkömmlichem Treibstoff (Jet A-1) sind dabei abhängig vom Rohstoff sowie vom Herstellungsverfahren des SAF, dürfen aber maximal 50 % nicht überschreiten.

[2] Die in dieser Studie im Folgenden genannten SAF-Anteile bzw. -Mengen beziehen sich immer auf das unverschnittene SBC gemäß der Systematik der ReFuelEU Aviation-Verordnung.

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

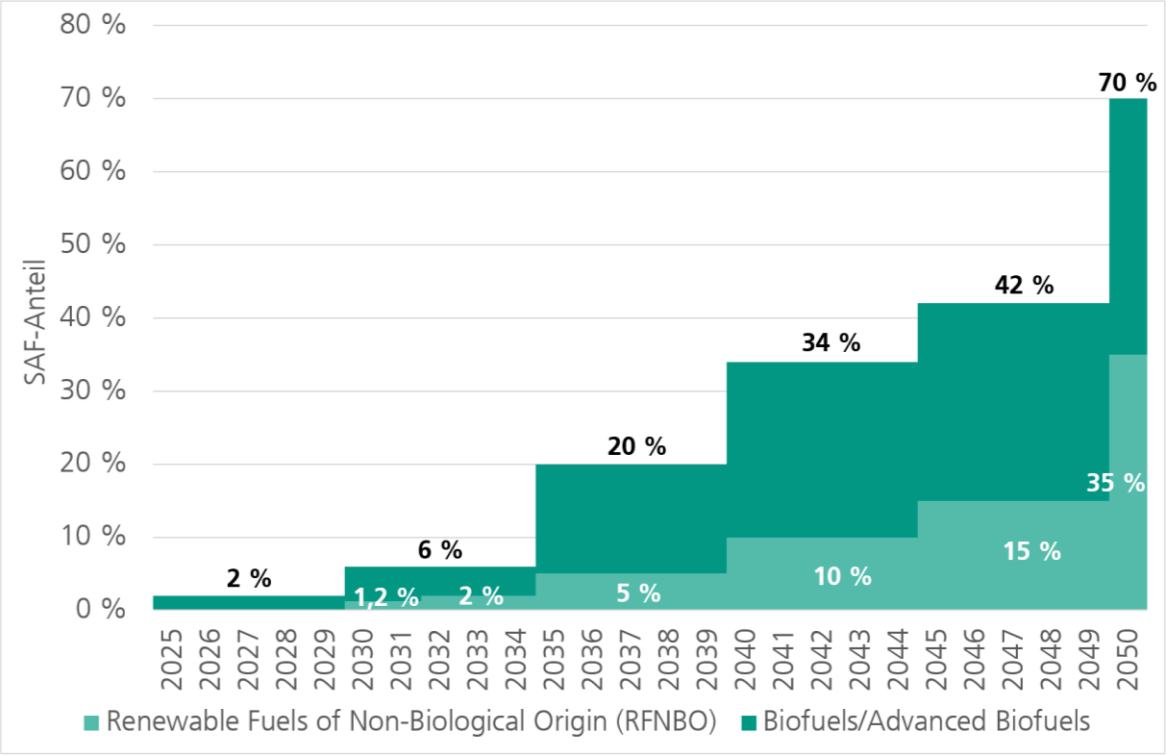

Abbildung 1: Entwicklung der SAF-Beimischungsverpflichtung gemäß Verordnung (EU) 2023/2405 (Quelle: Eigene Darstellung, Datenquelle: Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2023))

Durch die Nutzung alternativer Treibstoffe lassen sich sowohl die CO_2- als auch die Nicht-CO_2-Effekte reduzieren. Messungen des DLR in der ECLIF3-Studie in Zusammenarbeit mit Airbus, Rolls-Royce und Neste konnten zeigen, dass durch den reduzierten Ausstoß von Rußpartikel-Emissionen und eine geringere Anzahl an Eiskristallen bei der Kondensstreifenbildung die Klimawirkung der Kondensstreifen beim Einsatz von reinem SAF um 26 % gesenkt werden kann (Märkl et al. 2024). Die Emissionen durch Rußpartikel lassen sich durch die Reduktion der benötigten Aromaten im Treibstoff verringern. SAF kann dabei theoretisch aromatenfrei hergestellt werden. Das Vorhandensein von Aromaten in Treibstoffen ist jedoch in heutigen Verkehrsflugzeugen notwendig, um beispielsweise Dichtungen elastisch zu halten. Aufgrund dessen werden in Drop-in-SAF Aromaten z.T. künstlich hinzugefügt. ASTM D7566 schreibt dabei einen Mindestanteil von 8 Vol.-% Aromaten in zugelassenen, mit SAF gemischten Treibstoffen (SAF-Blends) vor.

Eine künftige Nutzung von 100 % SPK-SAF, von einigen Stakeholdern der Luftverkehrswirtschaft auch als „Jet X“ in Anlehnung an den heutigen Treibstoffstandard Jet A/A-1 bezeichnet (Ahrens et al. 2025), könnte die Klimawirkung des Luftverkehrs daher im Vergleich zur

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Nutzung von aromatenhaltigen Treibstoffen weiter reduzieren. Auch die Schadstoffbelastung im Nahbereich der Flughäfen könnte durch den Einsatz von 100 % SPK-SAF aufgrund der Reduktion von Rußpartikeln verringert werden. Heutige kommerzielle Flugzeugtypen sind allerdings für die Nutzung von SAF mit einem geringeren Anteil an Aromaten derzeit nicht zugelassen.

In dieser Studie werden tragfähige Konzepte und damit wissenschaftliche fundierte Handlungsoptionen für den Übergang zu einer potentiellen 100 %-igen Versorgung mit aromatenfreiem SAF im Luftverkehr in Deutschland entwickelt und untersucht. Im Mittelpunkt stehen dabei die Identifikation und Analyse technischer, logistischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Herausforderungen sowie die Bewertung individueller Szenarien in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von SPK-SAF sowie der Kompatibilität der Flotte. Dabei sollen auch die Auswirkungen einer Verteilung des SAF auf besonders klimaintensive Flüge berücksichtigt und bewertet werden. Zusätzlich werden in der Szenarioanalyse unterschiedliche Ansätze der Verteilung von SPK-SAF auf deutsche Flughäfen – etwa physische Doppelstrukturen oder zentrale Flexibilitätslösungen wie Book & Claim – auf Basis von Annahmen und mittels Modellen im Hinblick auf Effizienz, Kosten und Umsetzbarkeit wissenschaftlich untersucht.

Die Studie ist dabei wie folgt gegliedert:

In Kapitel 2 werden Aufgabenstellung, Umfang und Systemgrenzen der Studie definiert. In Kapitel 3 wird ein Überblick über die Treibstofflogistik an Flughäfen, das regulatorische Umfeld zum SAF-Einsatz und den Umwelteffekten von 100 % SPK-SAF gegeben. In Kapitel 4 werden, basierend auf einer Literaturstudie und einer Stakeholder-Befragung, die Herausforderungen des Einsatzes von 100 % SPK-SAF abgeleitet. Kapitel 5 umfasst die quantitative Untersuchung, in der szenarienbasiert die Kosten und der Nutzen des Einsatzes von 100 % SPK-SAF analysiert werden. In Kapitel 6 werden die qualitativen und quantitativen Ergebnisse diskutiert und wissenschaftlich fundierte Handlungsoptionen abgeleitet. Die Studie schließt mit einem Fazit und möglichen Perspektiven für weitere Untersuchungen zur Förderung des Einsatzes von 100 % SPK-SAF in Kapitel 7.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

2 Aufgabenstellung, Umfang und Systemgrenzen

Der Anwendungsbereich der betrachteten Studie bezieht sich auf die theoretischen Auswirkungen der Nutzung von 100 % SPK-SAF auf Flügen ab deutschen Flughäfen. Dabei wird die gesamte Wirkungskette betrachtet, inklusive der Herstellung, der Distribution, der Lagerung, der Betankung sowie dem Flugbetrieb. Es werden offene Fragen hinsichtlich Zertifizierung und Regulatorik aufgegriffen und im späteren Verlauf wissenschaftlich fundierte Handlungsoptionen abgeleitet. Hierdurch werden relevante Unterschiede bei der Nutzung von 100 % SPK-SAF im Vergleich zum Status Quo identifiziert, wie in Abbildung 2 dargestellt.

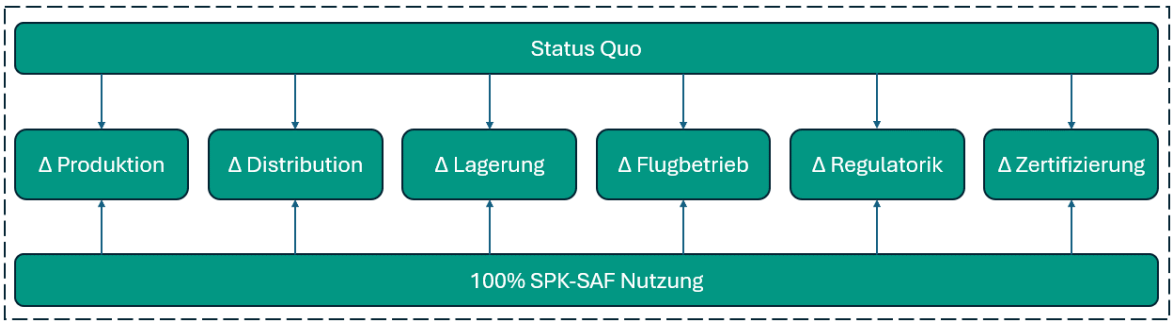

Abbildung 2: Systemgrenzen / Komponenten der quantitativen Analyse (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Auswirkungen auf die genannten Elemente der Wirkungskette werden dabei qualitativ bewertet, um die Vorteilhaftigkeit bestimmter Maßnahmen abzuleiten. Eine quantitative Bewertung wird hinsichtlich der Auswertung potentieller Treibstoffbedarfe eines flächendeckenden und gezielten Einsatzes von 100 % SPK-SAF durchgeführt. Darüber hinaus wird die Vorteilhaftigkeit des gezielten Einsatzes, zum Beispiel auf Grundlage klimatologisch optimaler Betankung, auf Basis der quantitativen Analyse abgeschätzt.

Die Abschätzung des Treibstoffbedarfs (fossiles Kerosin und SAF) basiert auf den durch die Beimischungsquote in der ReFuelEU Aviation-Verordnung gesetzten, derzeit gültigen rechtlichen Rahmenbedingungen. Es wird davon ausgegangen, dass die durch ReFuelEU festgelegten SAF-Mengen auch in Zukunft erfüllt werden, allerdings überall dort, wo möglich, durch 100 % SPK-SAF. Um die Nutzbarkeit von 100 % SPK-SAF durch kompatible Flugzeuge abzuschätzen, werden Flottenmodellierungen für den zukünftigen Flottenmix von Flugzeugen an deutschen Flughäfen durchgeführt.

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Nicht näher betrachtet werden Aspekte im Bereich der zivil-militärischen Kooperation, z.B. die Kompatibilität von Militärflugzeugen mit Non-drop-in-Treibstoffen und gegenseitige Abhängigkeiten bei der Treibstoffversorgung an gemeinsam genutzten Flughäfen.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch:
Projektträger:

3 Rahmenbedingungen und Hintergründe

3.1 Status Quo Treibstofflogistik und Nachfrage

Die Versorgung mit Flugtreibstoffen ist für einen zuverlässigen und sicheren Luftverkehr unerlässlich. Turbofan- und Turbopropflugzeuge sind für die Nutzung von Flugturbinentreibstoff (Kerosin) zugelassen, dessen Eigenschaften in den ASTM-Standards D1655 (für fossiles Kerosin) bzw. Def Stan 91-091 und D7566 (für Treibstoffe mit synthetisch hergestellten Anteilen) festgelegt sind. In Europa wird der Treibstoff als Jet A-1 verkauft.

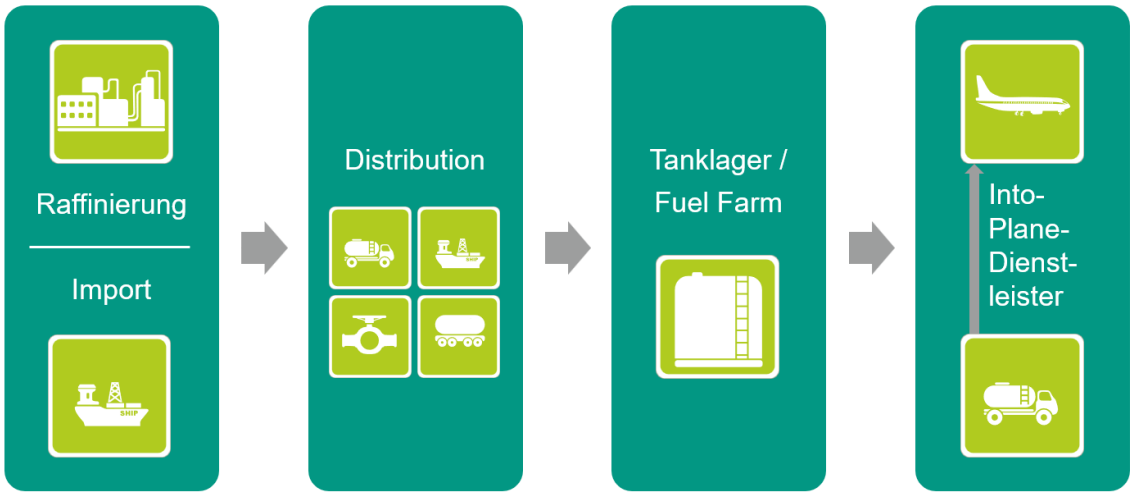

Abbildung 3: Logistikkette bei der Versorgung mit Flugtreibstoffen (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Logistikkette der Treibstoffversorgung ist regulatorisch und organisatorisch komplex mit einer Beteiligung verschiedener Stakeholder (Abbildung 3). Die meisten Raffinerien werden von den großen Mineralölunternehmen betrieben. Die aktuelle Raffinerieproduktion von Flugturbinentreibstoffen in Deutschland von ca. 4,5 bis 4,8 Mio. t pro Jahr deckt jedoch nur etwas weniger als die Hälfte des Inlandsbedarfs (Wirtschaftsverband Fuels & Energie e.V. (en2x) 2025). Bei der Versorgung mit Flugturbinentreibstoff wird Deutschland zunehmend von Importen abhängig. Während in den frühen 2000er-Jahren noch über 60 % des in Deutschland benötigten Treibstoffs in deutschen Raffinerien erzeugt wurden, beträgt dieser Wert in den 2020er-Jahren nur noch weniger als 50 %. Insgesamt wurde die Raffineriekapazität in Deutschland in den letzten Jahren reduziert, u. a. auch durch die Schließung bzw. Umwandlung der Anlagen in Wilhelmshaven (2011), Hamburg-Harburg (2022) und Wesseling (2025) (Hedvat 2023; Westerhoff 2010; Shell Deutschland GmbH 2025).

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

Die Treibstoffversorgung der deutschen Flughäfen mit Jet A-1 erfolgt je nach Lage und infrastruktureller Anbindung per Pipeline, Binnenschiff, Eisenbahn-Kesselwagen oder Straßentankwagen. Vielfach werden auch an einem einzelnen Flughafen unterschiedliche Versorgungsmodi eingesetzt, z.T. aus Gründen der Redundanz gegenüber Störungen, teilweise auch aufgrund wechselnder Bezugsquellen.

Für Westeuropa bzw. Deutschland ist das Central Europe Pipeline System (CEPS) bedeutsam, das auf über 5000 km Raffinerien, Depots und Flughäfen in Belgien, Frankreich, Deutschland, Luxemburg und den Niederlanden miteinander verbindet (NATO 2021). Das Pipeline-System hat einen militärischen Hintergrund, ist jedoch für die Versorgung ziviler Flughäfen freigegeben. Die Pipeline-Abschnitte in Deutschland werden durch die mehrheitlich im Bundeseigentum befindliche Fernleitungs-Betriebsgesellschaft betrieben (Fernleitungs-Betriebsgesellschaft mbH 2023). Die Flughäfen Köln/Bonn, Frankfurt/Main, Stuttgart und Memmingen werden im Wesentlichen durch diese Pipeline versorgt. Andere Pipeline-Systeme sind ebenfalls für die Versorgung deutscher Flughäfen relevant, bspw. eine direkte Linie zwischen der OMV-Raffinerie in Burghausen und dem Flughafen München.

An anderen Flughäfen ist die Versorgung mit Eisenbahn-Kesselwagen die Haupt-Versorgungsroute. Hierzu gehört etwa der Flughafen Berlin Brandenburg, der den Treibstoff per Eisenbahn hauptsächlich aus den Raffinerien in Schwedt und Leuna erhält.

Für Flughäfen, die sich in der Nähe der schiffbaren Binnengewässer befinden, ist auch das Binnenschiff ein häufig genutzter Verkehrsträger. Bspw. befindet sich in unmittelbarer Nähe des Flughafens in Frankfurt/Main ein Hafen für Tankschiffe, sodass in Ergänzung zur Fernleitungs-Anbindung ein weiterer Versorgungsweg besteht. Für die Anbindung des Flughafens auf den letzten Kilometern wird wiederum ein Rohrleitungssystem verwendet.

Flughäfen, denen eine Pipeline-, Binnenschiff- und Bahnanbindung fehlt, werden über Straßentankwagen versorgt. Dieser Versorgungsweg wird bspw. an den Flughäfen Düsseldorf und Hamburg angewendet und auch an anderen Flughäfen, wenn etwa die Versorgung per Pipeline aufgrund von Wartungsarbeiten nicht zur Verfügung steht.

Auf dem Flughafengelände oder in dessen unmittelbarer Nähe befinden sich Tanklager, deren Funktion im Wesentlichen die kurzfristige Pufferung des Bedarfs und die Weiterverteilung auf dem Flughafengelände umfasst. Die Kapazitäten der Zwischenspeicherung im Flughafennahbereich umfassen typischerweise den Bedarf von nur wenigen Tagen (IATA 2008), daher müssen alternative Versorgungsmöglichkeiten bei Störungen in kürzester Zeit

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

umgesetzt werden, um einen reibungslosen Betrieb sicherzustellen. Die Tanklager und Distributionseinrichtungen werden von spezialisierten Unternehmen (bspw. in Frankfurt/Main die Hydranten-Betriebs OHG - HBG) betrieben, die sich sehr häufig im gemeinschaftlichen Besitz der Ölgesellschaften befinden.

Am Ende der Versorgungskette stehen die sogenannten „into-plane"-Dienstleister, die die Betankung der Flugzeuge vornehmen. In Abhängigkeit der infrastrukturellen Voraussetzungen erfolgt die Betankung vorrangig mit Pumpwagen, die von einem unterirdischen Hydrantensystem gespeist werden (Flughäfen Berlin Brandenburg, Frankfurt/Main und München) oder mit Tankwagen (alle übrigen Flughäfen). Die beiden Marktführer bei den into-plane-Dienstleistern in Deutschland sind Skytanking und AFS Aviation Fuel Services GmbH. Skytanking ist ein Tochterunternehmen von PrimeFlight Aviation Services, welche sich wiederum im Eigentum von zwei Private-Equity-Unternehmen (The Sterling Group und Capitol Meridian Partners) befindet (PrimeFlight Aviation Services 2023). Die AFS Aviation Fuel Services GmbH ist zu zwei Dritteln im Eigentum der Swissport International Ltd., einem der größten Anbieter von Bodenverkehrsdienstleistungen und zu einem Drittel im Eigentum der DLH Fuel Company mbH, dem Treibstoffunternehmen der Lufthansa Group.

Zur Sicherung der Qualität der Treibstoffe bestehen eine Reihe von Industriestandards. Neben den Treibstoffstandards der ASTM behandeln die Industriestandards den korrekten Umgang mit den Treibstoffen entlang der Versorgungskette, um Kontaminationen (z. B. mit Wasser oder Mikroorganismen) und auch die Vermischung unterschiedlicher Treibstoffe zu vermeiden, die dazu führen könnten, dass sich die Treibstoffe außerhalb der Spezifikationen befinden. Ein weiteres wichtiges Element zur Qualitätssicherung sind die Vorgaben zum Test und zur Beprobung des Treibstoffs entlang der Versorgungskette.

Eine Übersicht über die geltenden Regelwerke ist in ICAO Doc 9977 „Manual on Civil Aviation Jet Fuel Supply" zusammengestellt (ICAO 2012). Zu den bedeutsamsten Standards zur Qualitätssicherung der Prozesse in der Betankung gehören die Dokumente der Industrieorganisation Joint Inspection Group (JIG). Die beiden wichtigsten Regelwerke in Bezug auf die Treibstofflogistik und Betankung sind die JIG 1 (Aviation Fuel Quality Controls and Operating Standards for Into-Plane Fuelling Services) und die JIG 2 (Aviation Fuel Quality Controls and Operating Standards for Airport Depots and Hydrants).

Statistiken zur Erzeugung, zum Absatz sowie zum Import und Export von Flugturbinentreibstoff in Deutschland werden durch den Wirtschaftsverband Fuels und Energie e. V. (en2x) veröffentlicht. Inlandsablieferungen an die Luftfahrt haben sich zwischen 2001 und 2024

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

von 6,4 Mio. t auf 8,3 Mio. t erhöht, wobei die bisherige Verbrauchsspitze von 9,4 Mio. t im Jahr 2019 erreicht wurde (Abbildung 4). Aufgrund der im Vergleich zu anderen europäischen Staaten in den letzten Jahren relativ schwachen Luftverkehrsentwicklung und dem Einsatz von immer verbrauchseffizienteren Flugzeugen, wurden die Höchstwerte vor der COVID-19-Pandemie seitdem nicht mehr erreicht.

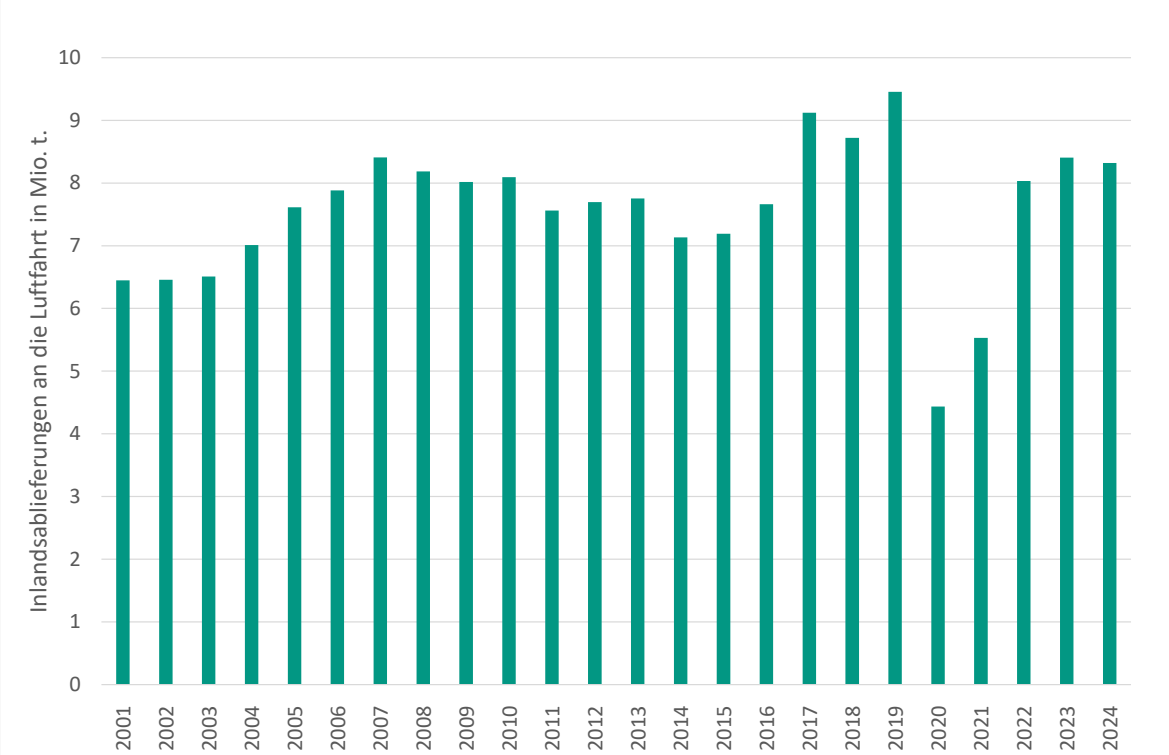

Abbildung 4: Inlandsablieferungen von Flugturbinentreibstoff an die Luftfahrt in Deutschland 2001-2024 (Quelle: Wirtschaftsverband Fuels & Energie e.V. (en2x) 2025)

Der Verbrauch von Flugturbinentreibstoff ist in der amtlichen Mineralölstatistik nicht nach Flughäfen gegliedert. Allerdings lassen sich aus den Flügen der amtlichen Luftverkehrsstatistik (mit Start- und Zielflughafen und Flugzeugtyp) und einer Flugleistungsmodellierung[3] die anteilig zuzuordnenden Verbräuche relativ genau abschätzen. Tankering, d. h. die Praxis der Fluggesellschaften, mehr Treibstoff zu tanken als für den nächsten Flug unmittelbar benötigt wird, bleibt dabei jedoch unberücksichtigt. Seit 2025 wird dies durch die Vorgabe der ReFuelEU Aviation-Verordnung, dass mindestens 90 % des jährlich benötigten Treibstoffs am jeweiligen Abflughafen getankt werden muss, ohnehin eingeschränkt. Abbildung

[3] Master Emissions Calculator der European Environment Agency (2023).

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

5 zeigt die auf diesem Wege geschätzte Verteilung des Treibstoffbedarfs in Deutschland im Jahr 2024.

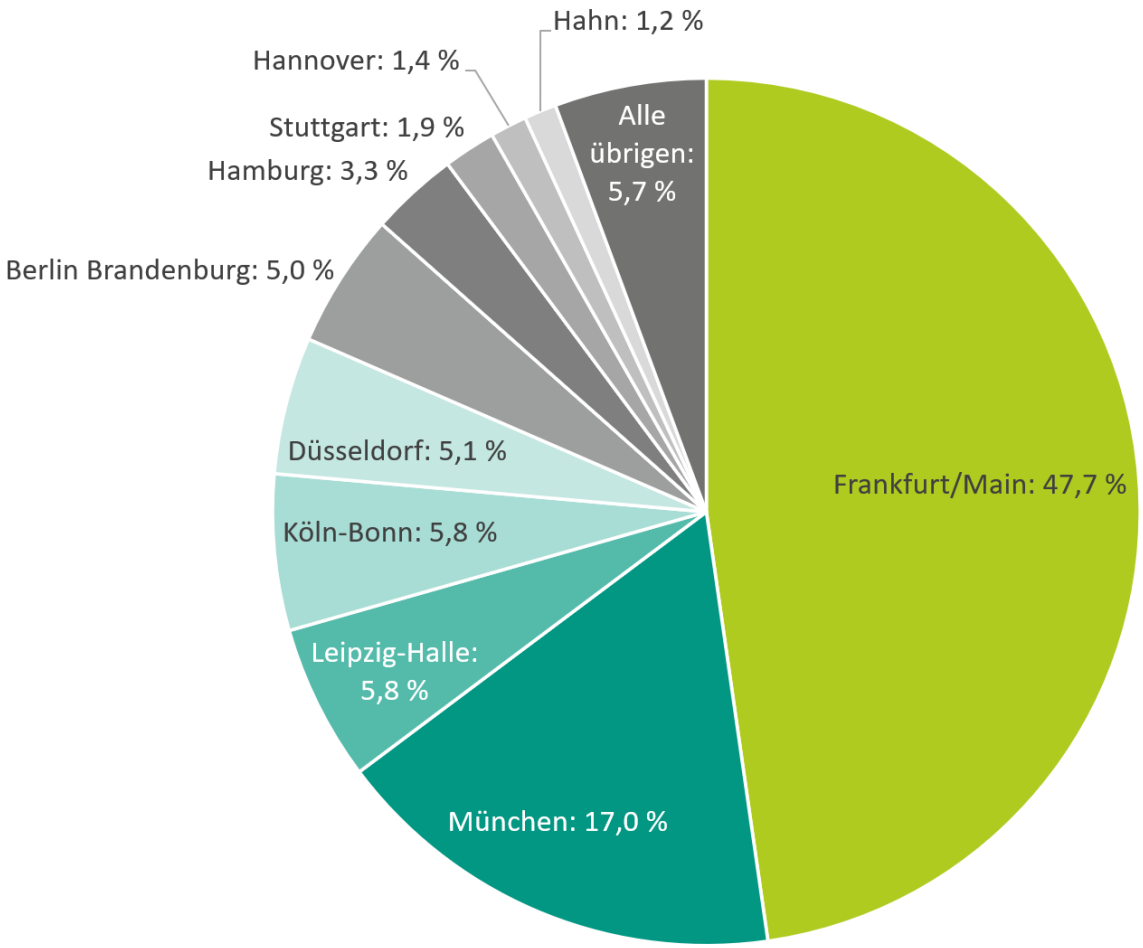

Abbildung 5: Geografische Verteilung der Nachfrage nach Flugturbinentreibstoff in Deutschland 2024 (Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der amtlichen deutschen Luftverkehrsstatistik)

Auf den Flughafen Frankfurt/Main entfallen gut 48 % der deutschen Gesamtnachfrage. Dies entspricht einer Größenordnung von etwa 4 Mio. t Treibstoff in 2024. 17 % des deutschen Gesamtverbrauchs entfallen auf den Flughafen München (ca. 1,5 Mio. t), gefolgt von Leipzig-Halle, Köln-Bonn, Düsseldorf und Berlin Brandenburg, auf die jeweils 5 bis 6 % der Gesamtnachfrage entfallen (jeweils etwa 500 Tsd. t). Es folgen Hamburg (3 %), Stuttgart (2 %), Hannover (1 %) und Hahn (1 %). Auf alle übrigen Flughäfen entfallen zusammen weniger als 6 % der Gesamtnachfrage.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

3.2 Regulatorischer Rahmen

Die Nutzung von SAF im Luftverkehr hat in den letzten Jahren immer größere Bedeutung gewonnen. Die Vertragsstaaten der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) haben sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 im weltweiten Luftverkehr Netto-Null bei den CO_2-Emissionen zu erreichen (ICAO 2022). Neben Kompensationsmechanismen, alternativen Antrieben und operationellen und betrieblichen Effizienzsteigerungen, soll SAF dabei den wichtigsten Anteil an der geplanten Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs beitragen (ICAO CAEP 2022). Auf der Third Conference on Aviation and Alternative Fuels (CAAF/3) vereinbarten die ICAO-Vertragsstaaten, dass global bis zum Jahr 2030 die CO_2-Emissionen des Luftverkehrs durch den Einsatz von SAF um 5 % gesenkt werden sollen (ICAO 2023).

Nationale und supranationale Anreizsysteme bzw. die Festlegung von SAF-Mindestmengen sollen dabei für eine erhöhte Nachfrage von SAF im Luftverkehr sorgen. In der EU wird über die Beimischungsverpflichtung der Verordnung (EU) 2023/2405 seit dem 1. Januar 2025 die Nutzung steigender SAF-Anteile auf Flügen von Flughäfen mit mehr als 800.000 Passagieren oder 100.000 t Fracht pro Jahr verbindlich vorgeschrieben (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2023). Verpflichtet zur Bereitstellung sind dabei die Inverkehrbringer. Den Luftverkehrsgesellschaften wurde auferlegt, mindestens 90 % des Jahresbedarfs an Treibstoff am jeweiligen Flughafen zu tanken. Für eine Übergangsphase bis Ende 2034 dürfen die Inverkehrbringer die Quote im Mittel über alle belieferten Flughäfen erfüllen, d. h. die den Airlines physisch zur Verfügung gestellte SAF-Menge kann sich erheblich unterscheiden. Dies stellt einerseits eine logistische Vereinfachung dar, führt aber bei den Fluggesellschaften zu einer Ungleichbehandlung, da diese nur die durch sie selbst eingesparten CO_2-Emissionen durch physisch getanktes SAF im EU-Emissionshandelssystem geltend machen dürfen, während standardmäßig für alle Tankvorgänge in der EU ein SAF-Aufschlag erhoben wird (persönliche Kommunikation mit Condor/Lufthansa). Airlines, die an Flughäfen operieren, die über hohe SAF-Anteile verfügen, benötigen daher im EU EHS weniger Emissionsrechte als Airlines, welche an Flughäfen abfliegen, an denen weniger bzw. kein SAF zur Verfügung gestellt wird. Fluggesellschaften berichten, dass nicht nur die ungleichmäßige Bereitstellung von SAF problematisch ist, sondern auch erhebliche Defizite bei der Bereitstellung benötigter Dokumentation der SAF-Nutzung besteht, die für die Anerkennung der CO_2-Einsparungen im EU EHS erforderlich sind (persönliche Kommunikation mit Condor und Lufthansa).

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

In den USA wurde gesetzlich keine Mindestverpflichtung zur Nutzung von SAF festgeschrieben, sondern die Treibstoffproduzenten erhalten eine Steuergutschrift von aktuell einem US-Dollar pro Gallone SAF (U.S. Government 2025). Gegenüber der ursprünglichen Fassung des Inflation Reduction Act in den USA (117th Congress of the United States of America 2022), der eine Steuergutschrift von 1,75 US-Dollar pro Gallone vorsah, stellt dies eine deutliche Absenkung dar.

Die Herstellungsverfahren für SBC bzw. deren maximale Beimischungsanteile sind durch ASTM-Normen festgelegt. ASTM D7566 beschreibt die Standard-Spezifikationen für Flugturbinentreibstoffe, die synthetisch hergestellte Kohlenwasserstoffe enthalten (ASTM D7566 - 23b). Darin enthalten sind die aktuell zugelassenen Herstellungsverfahren von SBC, deren Eigenschaften und deren maximalen Anteil in einem SAF-Blend (Tabelle 1). Zusätzlich sind ebenfalls drei weitere Arten von SAF, welche durch Co-Processing hergestellt werden, nach ASTM D1655 zugelassen (ASTM D1655 - 24).

Der Mindestanteil von 8 Vol.-% Aromaten im fertig gemischten Treibstoff gemäß ASTM D7566 ist aus sicherheitstechnischen Gründen derzeit notwendig, da diese u. a. das Aufquellen von Dichtungsringen bewirken, wodurch Treibstoffleckagen verhindert werden.

Da SPK-SAF nahezu aromatenfrei ist, ist eine Nutzung von 100 % SPK-SAF in heutigen Verkehrsflugzeugen nach gültigen ASTM-Standards nicht zulässig. Ein solcher Treibstoffstandard muss demnach zunächst entwickelt werden, was umfangreiches Testen sowie einen hohen Zertifizierungsaufwand verursacht. Da nur bestimmte Flugzeugtypen dadurch für die Nutzung von 100 % SPK-SAF zugelassen wären, würde dies eine Segregation der Treibstoffarten zur Betankung an den Flugzeugen notwendig machen.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Prozess	Maximaler Beimischungsanteil	ASTM-Norm
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)	50 %	ASTM D7566
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK)	50 %	ASTM D7566
Synthetic Iso-Paraffin (SIP)	10 %	ASTM D7566
Fischer-Tropsch Synthetic Kerosene with Aromatics (FT-SKA)	50 %	ASTM D7566
Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)	50 %	ASTM D7566
Catalytic Hydrothermolysis Jet fuel (CHJ)	50 %	ASTM D7566
Hydroprocessed Hydrocarbons-HEFA (HHC-HEFA)	10 %	ASTM D7566
Alcohol-to-Jet Synthetic Kerosene with Aromatics (ATJ-SKA)	50 %	ASTM D7566
Co-processing of mono-, di-, and triglycerides, free fatty acids, and fatty acid esters	5 %	ASTM D1655
Co-processing of hydrocarbons derived from synthesis gas via the Fischer-Tropsch process	5 %	ASTM D1655
Co-processing of hydrocarbons derived from hydroprocessed mono-, di-, and triglycerides, free fatty acids, and fatty acid esters	24 %	ASTM D1655

Tabelle 1: SAF-Produktionsprozesse und maximale Beimischungsanteile (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der ASTM D1655 - 24 und ASTM D7566 - 23b)

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

3.3 Beitrag von SAF zur Reduktion von Klimawirkungen und lokaler Luftqualität

Die Klimawirkungen des Luftverkehrs sind in den letzten Jahren in den Fokus von Regulierungsbehörden, der Luftverkehrswirtschaft und der gesamten Gesellschaft gerückt. Einerseits steht die Reduktion von CO_2-Emissionen im Vordergrund. Die CO_2-Emissionen können durch den Einsatz von SAF gesenkt werden, da deren Lebenszyklusemissionen, je nach Einsatz unterschiedlicher Ausgangsmaterialien, im Vergleich zu fossilem Flugtreibstoff deutlich geringer ausfallen.

Andererseits ist die Reduktion der Nicht-CO_2-Effekte des Luftverkehrs von zunehmender Bedeutung. In den letzten Jahren sind die Nicht-CO_2-Effekte Gegenstand laufender Forschung und können zunehmend besser bestimmt werden. Die Bestimmung der Nicht-CO_2-Effekte ist hochkomplex und deren klimatologischer Einfluss hängt von einer Reihe von Faktoren ab, darunter die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit), dem Entstehungsort der Emissionen (Flughöhe, geografische Breite), den Eigenschaften der verwendeten Triebwerke und der Zusammensetzung des Treibstoffs. Die Wirkung von Kondensstreifen und den daraus entstehenden Cirruswolken hängt zudem von der Tageszeit und den optischen Eigenschaften der Erdoberfläche (Rückstrahlfähigkeit/Albedo) ab. Je nach gewählter Klimametrik betragen die Nicht-CO_2-Effekte etwa die Hälfte bis zwei Drittel des Gesamtklimaeffekts des Luftverkehrs.

Durch den Einsatz von SAF lassen sich Kondensstreifenbildung und Partikelemissionen reduzieren. Die Nicht-CO_2-Effekte sind dabei negativ mit dem Anteil von SAF im verwendeten Treibstoff korreliert, d. h. ein hoher SAF-Anteil erzielt positive Wirkungen bei der Vermeidung von Nicht-CO_2-Effekten. Die positiven Effekte von SAF resultieren aus dem geringen Anteil an Aromaten, die bei der Verbrennung zur Bildung von Ruß (non-volatile particulate matter, nvPM) neigen und dem geringen Anteil an Schwefelpartikeln, die zur Bildung von volatilen Partikeln (vPM) beitragen.

Innerhalb der Emission and Climate Impact of alternative Fuels (ECLIF3) Kampagne wurden in situ Messungen der Emissionen eines Airbus A350-941 bei der Verbrennung von 100 % HEFA-SPK durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten dabei eine Reduktion der Eispartikel von 56 % und eine Reduktion der Rußpartikel um 35 % verglichen mit herkömmlichem Jet A-1, welche in globalen Modellierungen zu einer Reduktion des Strahlungsantriebs um 26 % führen kann (Märkl et al. 2024). Untersuchungen von Rolls Royce an einem Pearl-Triebwerk für

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

Business Jets kamen zum Ergebnis, dass der Einsatz von 100 % SPK-SAF die Partikelzahl und -masse im Landing-and-Take-Off-Zyklus (LTO-Zyklus) um 60 % reduzieren kann (Ahrens et al. 2025). Weitere Untersuchungen hierzu finden ab 2025 im HORIZON-EUROPE-Projekt PACIFIC (Particle Emissions, Air Quality and Climate Impact related to Fuel Composition and Engine Cycle) unter der Leitung von Airbus und der Mitarbeit von Rolls Royce und dem DLR statt (CORDIS 2025).

Teoh et al. (2022b) untersuchten die Auswirkungen der Verteilung von SAF auf einzelne Flüge über dem Nordatlantik mit hoher Klimawirkung. Sie stellten heraus, dass durch die gezielte Nutzung von SAF auf 2 % der Flüge, welche hauptursächlich für die Entstehung wärmender Kondensstreifen sind, eine Reduktion der gesamten Klimawirkung um 6 % in der betroffenen Region erzielt werden kann. Die Autoren und Autorinnen der Studie kommen weiterhin zum Ergebnis, dass bei einem Einsatz von 100 % SAF in der gesamten Flotte 44 % des Strahlungsantriebs aus Kondensstreifen reduziert werden könne.

Zwar bestehen immer noch Unsicherheiten bezüglich der exakten Quantifizierung der Reduktion der Nicht-CO_2-Effekte durch den Einsatz von SAF, aber dennoch lässt sich aus den Erkenntnissen der aktuellen Studien ableiten, dass der Nutzen von SAF maximiert werden kann, wenn es auf jenen Flügen eingesetzt wird, die besonders hohe Nicht-CO_2-Effekte haben. Dies stellt jedoch eine Abweichung von den aktuellen Regularien dar, die eine generelle Beimischung von SAF vorsehen, ohne bestimmte Flüge zu priorisieren.

Die Partikelemissionen aus dem Luftverkehr haben nicht nur einen erheblichen Beitrag zu den Nicht-CO_2-Effekten, sondern wirken sich auch auf die lokale Luftqualität im Flughafenumfeld durch die Bildung von nvPM und vPM aus. Einer aktuellen Studie von CE Delft zufolge würde der Einsatz von 100 % aromaten- und schwefelfreien Treibstoffen die Emissionen von Feinstaub um über 70 % reduzieren und damit in gleichem Maße das Auftreten von schweren Erkrankungen der Atemwege und des Herz-/Kreislaufsystems (van Seters et al. 2024). Der gezielte Einsatz von Treibstoffen mit einem hohen SAF-Anteil bzw. 100 % SPK-SAF an innenstadtnahen Flughäfen kann daher neben den oben beschriebenen Vorteilen bei der Reduktion der Nicht-CO_2-Effekte Vorteile für die lokale Luftqualität mit sich bringen.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

4 Herausforderungen beim Einsatz von SPK-SAF und geeignete Lösungsansätze

4.1 Methodik

Die Einführung von 100 % SPK-SAF würde erhebliche Veränderungen bei der Versorgung von Verkehrsflugzeugen mit Treibstoff im Vergleich zur heutigen Situation nach sich ziehen. Um diese Herausforderungen zu identifizieren und mögliche Lösungsansätze abzuleiten, wurden in dieser Studie sowohl eine Literaturrecherche durchgeführt als auch unterschiedliche Stakeholder konsultiert. Die Informationen der Stakeholder wurden dabei zum zusätzlichen Wissenserwerb genutzt, sollen aber auch unterschiedliche Positionen und Prioritäten der Luftverkehrswirtschaft, Industrie, Regulierungsbehörden und Wissenschaft widerspiegeln.

Die Kontakte zu den Stakeholdern wurden dabei über das InnoFuels-Projektteam hergestellt. Die einzelnen Stakeholder wurden im Anschluss in jeweils etwa einstündigen Interviews über ein Videokonferenzsystem zu den Auswirkungen der Einführung einer 100 % SPK-SAF-Nutzung im Luftverkehr befragt. In Vorbereitung auf die Interviews wurde dazu ein Fragenkatalog entworfen, welcher Fragestellungen bzgl. der Einführung von 100 % SPK-SAF entlang der gesamten Wirkungskette berücksichtigt. Der Fragenkatalog ist im Anhang dargestellt.

Die Fragen und Stakeholder wurden vor Beginn der Interviews in unterschiedliche Kategorien unterteilt, sodass die Stakeholder gezielt Fragen aus ihrem Branchensegment beantworten konnten. Insgesamt wurden 14 Stakeholder-Interviews durchgeführt. Die Kategorien sowie die befragten Stakeholder sind in Tabelle 2 aufgelistet.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Kategorie	Stakeholder
SAF-Produktion	SkyNRG Karlsruher Institut für Technologie, IKFT DLR-Institut für Verbrennungstechnik
Distribution, Flughafeninfrastruktur und Betankung	Flughafen Düsseldorf Flughafen Köln/Bonn Skytanking AFS Aviation Fuel Services BSAF Blue Sky Aviation Fuel
Flugzeug- und Triebwerkshersteller	Airbus Pratt & Whitney
Airlines	Deutsche Lufthansa Condor Flugdienst
Markt & Regulatorik	Umweltbundesamt Hochschule Rhein-Main

Tabelle 2: Stakeholder-Konsultation: Kategorien und kontaktierte Stakeholder

4.2 SPK-SAF-Produktion

Zwei wesentliche Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von SPK-SAF (und SAF generell) sind Verfügbarkeiten und Preise. Die Luftverkehrsbranche sieht einen höheren Bedarf für Fördermaßnahmen, um die großtechnische Umsetzung der SAF-Produktion zu realisieren. Zum jetzigen Zeitpunkt wird erwartet, dass zumindest kurz- und mittelfristig die SAF-Bedarfe durch Altspeiseöle und Fette mit dem HEFA-Verfahren abgedeckt werden. Die Verfügbarkeit von Speiseölen sowie tierischen und pflanzlichen Fetten als Reststoffe sind jedoch begrenzt und aufgrund steigender Nachfrage sind bei diesem Herstellungsverfahren, trotz neuer Anlagen mit Größenvorteilen, eher keine deutlich sinkenden SAF-Preise zu erwarten. Aktuell werden die Produktionskapazitäten für HEFA-SAF ausgeweitet (CENA Hessen 2025). Langfristig müssen aufgrund der stark steigenden Beimischungsquoten und der RFNBO-Unterquote andere Verfahren zur Nutzung einer breiteren

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Basis von Ausgangsstoffen weiterentwickelt und skaliert werden, um den wachsenden Bedarf zu decken. Daher sehen viele Stakeholder die primäre Herausforderung in der ausreichenden mittel- und langfristigen Bereitstellung von SAF und die damit im Zusammenhang stehenden regulatorischen Aspekte, wie bspw. den Nachhaltigkeitskriterien für Ausgangsstoffe (z. B. CO_2 und Wasserstoff), insbesondere beim Import von außerhalb der EU.

Durch Economies of Scale, der Verbesserung der Produktionsverfahren und Verbreiterung der Basis an Ausgangsstoffen besteht die Aussicht, dass die Kosten gesenkt werden können, die heute laut des EASA-Berichts zu Treibstoff-Referenzpreisen eine Größenordnung des dreifachen (Marktpreise von HEFA-SAF) bis zehnfachen (Produktionskosten von PtL-SAF) im Vergleich zu fossilem Kerosin betragen (EASA 2026). Eine preisliche Parität von SAF mit fossilen Treibstoffen ist jedoch voraussichtlich nicht erreichbar.

Die Produktion von SPK-SAF als Non-drop-in-Treibstoff ähnelt der Produktion von SBC, die für das Blending mit konventionellem Jet A-1 als Drop-in-Treibstoffe nach ASTM D7566 genutzt werden. Daher unterscheiden sich die technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen der Skalierung und Kostendegression kaum von der Herstellung von Drop-in-Treibstoffen. Bisher sind hauptsächlich Produktionsverfahren bekannt, die SAF mit wenig bzw. keinen Aromaten erzeugen können, darunter z. B. mit dem HEFA-Prozess, das einzige Verfahren, um SAF in größeren Mengen herzustellen. Um auf den Mindestgehalt von 8 Vol.-% nach ASTM D7566 zu kommen, müssen diese daher zugesetzt werden. Beim im Rahmen dieser Studie betrachteten 100 % SPK-SAF als Non-drop-in-Treibstoff sollen keine Aromaten enthalten sein. Dies bedeutet, dass der Nachteil heutiger Verfahren wie HEFA oder FT-SPK, die keine Aromaten enthalten, für die Produktion von 100 % SPK-SAF einen Vorteil darstellen könnte. Somit sind keine bzw. nur geringere Anpassungen in der Produktion zu erwarten. Dadurch sollten sich auch die Kosten der Herstellung von 100 % SPK-SAF als Non-drop-in-Treibstoff nicht wesentlich von jenen der Drop-in-Treibstoffen genutzten SBC unterscheiden. Da jedoch langfristig größere Mengen SAF produziert werden sollen, müssen voraussichtlich auch Verfahren verwendet werden, bei denen die Umwandlung mit deutlich höherem Aufwand verbunden ist, was die Kosten (relativ gesehen) voraussichtlich deutlich erhöhen wird.

Da die 100 % SPK-SAF-Treibstoffe die gleichen Nachhaltigkeitskriterien aufweisen, wird im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass zukünftig die SAF-Verpflichtungen durch ReFuelEU Aviation ganz oder teilweise durch die Nutzung von 100 % SPK-SAF als Non-drop-in-Treibstoff erfüllt werden können.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Zum jetzigen Zeitpunkt ist ein Treibstoffstandard für 100 % SPK-SAF als Non-drop-in-Treibstoff noch nicht definiert. Es wird erwartet, dass die entsprechenden Arbeitsgruppen erst nach 2028 zu einem Ergebnis kommen werden. Von Seiten der Luftverkehrswirtschaft werden zwei Zielrichtungen verfolgt: Zum einen soll ein Standard entwickelt werden, der eine 100 % SAF-Nutzung als Drop-in-Treibstoff erlaubt, um damit die Begrenzungen der in Tabelle 1 gezeigten maximalen SAF-Anteile anzuheben. Dies ist auch im Hinblick auf die Kompatibilität mit den vorgeschriebenen Beimischungsquoten von ReFuelEU Aviation von Bedeutung, die in 2050 eine SAF-Nutzung von 70 % vorsehen. Dieser Treibstoff würde jedoch einen Mindestgehalt an Aromaten vorsehen und damit nicht an die optimalen Verbrennungseigenschaften von aromatenfreiem 100 % SPK-SAF heranreichen.

Zum anderen soll ein Standard für ein 100 % SPK-SAF als Non-drop-in-Treibstoff festgelegt werden, dessen Eigenschaften gezielt optimiert werden sollen. Die besondere Herausforderung dabei ist, unterschiedliche Zielgrößen in Einklang zu bringen und einen Optimalpunkt zu finden. Sowohl die Eigenschaften und Charakteristika des Treibstoffs als auch dessen Zusammenspiel mit der Flugzeugtechnik und die Eigenschaften der Ausgangsstoffe und die Produktionstechniken müssen dabei berücksichtigt werden. Darunter zählen bspw.:

- Gravimetrische und volumetrische Energiedichte
- Leitfähigkeit
- Schmierfähigkeit
- Wärmekapazität
- Viskosität
- Oberflächenspannung
- Verbrennungseigenschaften (Partikelbildung)
- Wiederstart-Verhalten (für den Fall eines Triebwerksausfalls im Reiseflug)
- Auswirkungen auf Dichtungen/Leitungen in Flugzeugen und der Bodeninfrastruktur

Insbesondere das Verhalten des Treibstoffs bei der Zerstäubung in der Brennkammer ist ein bedeutsamer Faktor für das Verhalten beim Wiederstarten im Reiseflug. Bei extrem niedrigen Umgebungstemperaturen wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass 100 % SPK-SAF sich ungünstiger verhält als Treibstoffe, die die Spezifikationen nach Jet A/A-1 erfüllen (Ahrens et al. 2025).

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Vor Verabschiedung eines Standards sind Details zu speziellen Herausforderungen im Bereich der Produktion und Nutzung nur sehr eingeschränkt ableitbar. Daher werden für die qualitativen und quantitativen Untersuchungen in dieser Studie an vielen Stellen Annahmen getroffen.

4.3 Treibstofflogistik

Eine der größten Herausforderungen bei der Einführung eines Treibstoffs, der nicht die Spezifikationen für das heute genutzte Jet A-1 erfüllt, ist die Segregation von anderen Treibstoffen. Dies ist notwendig, da nach der Einführung eines Treibstoffstandards für die Nutzung von 100 % SPK-SAF derzeit davon ausgegangen werden kann, dass nur ein Teil der sich an einem Verkehrsflughafen befindlichen Flotte für diesen Treibstoff zertifiziert sein wird und zudem ein (abnehmender) Anteil an Treibstoffnachfrage auch künftig durch Jet A-1 bedient wird. Eine Kernherausforderung stellt daher die Duplikation der benötigten Infrastruktur dar. Durch die benötigte Segregation des Treibstoffes entstehen diese Herausforderungen bereits ab der Raffinerie für die gesamte Versorgungskette bis an die jeweiligen Flughäfen und für die Betankung der Flugzeuge.

Dabei sind die unterschiedlichen Verteilungswege des Treibstoffs an die Flughäfen zu berücksichtigen. Wird ein Flughafen über ein Pipelinesystem versorgt, sind die Möglichkeiten zur Segregation stark eingeschränkt. Daher müssten diese Flughäfen dauerhaft eine regelmäßig genutzte zusätzliche Distributionslinie für die Versorgung mit 100 % SPK-SAF erhalten.

Aus Redundanzgründen haben Flughäfen, die an Pipelinesysteme angeschlossen sind, bereits heute alternative Versorgungswege, die z. B. genutzt werden, wenn die Pipeline gewartet wird. Die alternativen Versorgungswege sind jedoch häufig mit höheren Logistikkosten (z. B. für Umschlag, Fahrzeuge und Personal) verbunden, wenn eine Belieferung mittels Binnenschifffahrt, Kesselwagen oder Tankwagen erfolgt.

Da einige Flughäfen nicht direkt an Häfen, Schiene oder das CEPS angeschlossen sind, entstehen oft kombinierte Distributionswege zur Belieferung des Flughafens mit Treibstoff. Die Herausforderungen für Flughäfen, welche nicht an das CEPS angeschlossen sind, könnten durch die Einführung eines 100 % SPK-SAF etwas geringer sein, da eine Umwidmung aktueller Transportmittel ggf. möglich ist. Hierbei ist jedoch unter allen Umständen eine vollständige Segregation einzuhalten, um Kontaminationen der Treibstoffe zu vermeiden.

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

In allen Fällen kann jedoch mit einer Erhöhung der Komplexität durch die zusätzlichen Transportwege für die Distribution des 100 % SPK-SAF gerechnet werden.

Es ist somit davon auszugehen, dass die Logistikkosten der Versorgung für viele Flughäfen deutlich ansteigen werden. Dies ist insbesondere im Zeitablauf zu erwarten, wenn die vorgeschriebene SAF-Menge ansteigt und mehr Flugzeuge mit 100 % SPK-SAF kompatibel sein werden. Damit würden alternative Versorgungswege eine größere Bedeutung bekommen als die heutige Versorgung per Pipeline. Dies würde gleichzeitig die Auslastung des CEPS reduzieren, wenn die Treibstoffe über andere Wege zur Verfügung gestellt würden. Für die Fluggesellschaften ist dies ein kritischer Punkt bei der Akzeptanz für 100 % SPK-SAF, da sich höhere Kosten im Wettbewerb, insbesondere auf der Langstrecke, nachteilig auswirken. Somit werden auch wettbewerbsneutrale Finanzierungsmechanismen ein wichtiges Element für die erfolgreiche Einführung von 100 % SPK-SAF.

4.4 Flughafeninfrastruktur und Betankung

Auch für die Flughafeninfrastruktur sowie die Betankung birgt die Einführung eines neuen Treibstoffes Herausforderungen. Im Wesentlichen sind hier drei Aspekte zu betrachten:

- Duplikation der Betankungsinfrastruktur (Tanklager)
- Priorisierung von Flügen zur Betankung mit 100 % SPK-SAF
- Organisation des Betankungsprozesses

Wie auch in der vorgelagerten Versorgungskette von den Herstellern bis zum Flughafen erfordert die Versorgung mit 100 % SPK-SAF eine separate Treibstofflogistik auch auf dem Flughafen.

Die konsultierten Stakeholder merkten an, dass mit der Nutzung von 100 % SPK-SAF signifikante Herausforderungen für die Betankung sowie die allgemeine Flughafeninfrastruktur verbunden sind. Durch die notwendige Segregation der Treibstoffarten sind extra dafür vorgesehene Tanklager notwendig. Aufgrund der benötigten Ruhezeiten sind daher mindestens, je nach Volumenbedarf, zwei bis drei neue Treibstofftanks erforderlich, welche die Funktionen der Einlagerung, des Ruhens des Treibstoffs und der Auslagerung übernehmen. Eine große Herausforderung ist hierbei auch der Platzbedarf an Flughäfen, der durch die neuen Tanklager vorgegeben ist. Eine Umwidmung bestehender Tanks ist dabei nur in einem sehr begrenzten Ausmaß möglich. Am Flughafen Köln/Bonn existieren beispielsweise nur insgesamt drei Tanks, die den Flughafen mit Treibstoff versorgen. Dies entspricht der

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

IATA-Empfehlung, welche vorsieht, dass ein Tank für den Empfang von Treibstoff vorgesehen ist, ein Tank für eine mehrstündige Ruhephase nach der Einlagerung bzw. als Reserve im Falle von Wartungsarbeiten und ein weiterer für die Entnahme von Treibstoff zur Betankung (IATA 2008).

Die Umstellung auf 100 % SPK-SAF würde somit den Neubau von mehreren Tanks und den dazugehörigen Ein- und Auslagerungsinfrastrukturen (Pumpstationen, Flächen zur Anlieferung mit Straßen-Tankwagen und Betankung von Vorfeld-Tankwagen) erfordern. Die besondere Herausforderung liegt dabei in der steigenden Nachfrage nach 100 % SPK-SAF im Zeitablauf, wenn mehr Flugzeuge zur Nutzung des Treibstoffs verfügbar sind. Dies würde den Neubau von fast der gesamten aktuellen Lagerkapazitäten bedeuten, um das System in den nächsten Jahrzehnten auf 100 % SPK-SAF umzustellen, jedoch gleichzeitig für alte Flugzeugmuster Jet A-1 zur Verfügung zu stellen.

Unter Berücksichtigung der kurz- bis mittelfristig geringen Verfügbarkeit von SAF ist zudem zu klären, welche Flüge mit SPK-SAF betankt werden sollen. Von Bedeutung sind dabei Konstellationen, in denen die Menge des SPK-SAF nicht ausreicht, um die Bedarfe aller kompatiblen Flugzeuge am Flughafen zu bedienen. In diesem Fall ist ggf. eine Priorisierung der Flüge mit der höchsten Klimawirkung vorzunehmen.

Verschiedene Studien haben sich mit den möglichen Auswirkungen des gezielten Einsatzes von SAF bzw. SPK-SAF auf die Klimawirkung sowie mit den notwendigen Voraussetzungen bei der physischen Infrastruktur an Flughäfen befasst. Quante et al. (2024) evaluierten die Machbarkeit und die operationellen Einflüsse einer segregierten Treibstoffinfrastruktur in Nordeuropa. Dazu wurden auf der Route Stockholm nach Kopenhagen 84 Flüge mit erhöhter Beimischungsquote von SAF mit Tankwagen betankt. Während der Ausbau bestehender Hydrantensysteme derzeit unpraktikabel erscheint, führen Quante et al. (2024) an, dass für Kurz- und Mittelstreckenflüge der Betankungsprozess über Tankwagen realistisch ist. Die Klimawirkung der durch die Flüge verursachten Kondensstreifen könnte durch Beimischungsquoten von 50 % um mehr als 20 % reduziert werden. Quante et al. (2025) untersuchten in Simulationen die gezielte Nutzung von 100 % SPK-SAF auf Flügen ausgehend von fünf größeren Flughäfen. Sie fanden dabei heraus, dass bei der gezielten Nutzung des SPK-SAFs die Klimawirkung um bis zu 55 % reduziert werden könnte, wenn nur auf Segmenten eines Fluges, in denen sich wärmende Kondensstreifen durch die atmosphärischen Bedingungen bilden, SPK-SAF eingesetzt würde. Quante et al. (2025) merkten dabei auch die

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

nötigen Infrastrukturmaßnahmen am Flughafen sowie notwendige Modifikationen der Flugzeuge an. Woeldgen et al. (2025) untersuchten drei verschiedene Strategien zur gezielten Nutzung von SAF im Luftverkehr für Flüge ausgehend von Flughäfen in der EU und dem Vereinigten Königreich in 2019. Dabei wurden neben der Betrachtung der Klimawirkung auch direkt anfallende Kosten quantifiziert und über Grenzvermeidungskosten für die einzelnen Strategien dargestellt. Woeldgen et al. (2025) analysierten dabei die Möglichkeit, SAF nur auf die Flüge zu verteilen, welche ab 16:00 Uhr lokaler Zeit starten. Diese Flüge wurden priorisiert, da die Klimaforschung zur Erkenntnis gekommen ist, dass Kondensstreifen in der Nacht eine besonders wärmende Wirkung entfalten (Stuber et al. 2006). Ebenso wurde die Option modelliert, nur Flüge, welche langlebige Kondensstreifen mit einer Länge von mehr als 250 km verursachen, mit höheren SAF-Beimischungsquoten zu betanken. Beide Optionen reduzierten den effektiven Strahlungsantrieb um 9 bis 17 % verglichen zu einer Nutzung von rein fossilem Jet A-1. Auf der anderen Seite entstehen zusätzliche Kosten für die Segregation des Treibstoffsystems. Eine weitere Strategie zur saisonal einheitlichen Verteilung des gesamten SAF von Oktober bis Februar führt hingegen zu einem ca. 12 bis 13 % geringeren Strahlungsantrieb, verursacht aber durch die uniforme Verteilung des Treibstoffes nur geringe zusätzliche Kosten, wodurch diese die kosteneffizienteste Maßnahme der Studie zur Vermeidung von klimarelevanten Emissionen darstellt.

Bei der Betankung der Flugzeugflotte ist darauf zu achten, dass ausschließlich die mit dem neuen Treibstoff kompatiblen Flugzeuge betankt werden, um eine Kontamination nicht kompatibler Flugzeuge zu vermeiden, was zusätzliche Komplikationen für den Flugbetrieb und die Betankung schaffen kann. An größeren Flughäfen in Deutschland (z. B. Frankfurt/Main oder München) erfolgt die Betankung der Flugzeuge hauptsächlich mit Unterflurbetankungssystemen. Aufgrund der notwendigen Segregation und der Vermeidung von Kontamination wäre eine zusätzliche Betankungsoption unerlässlich, d. h. das bisherige Unterflurbetankungssystem kann nicht für 100 % SPK-SAF genutzt werden.

Insbesondere in der Frühphase der Einführung von 100 % SPK-SAF an Flughäfen kann die Menge dieses Treibstoffes durch die geringe Verfügbarkeit kompatibler Flugzeuge beschränkt sein. Je nach Entwicklung werden größere Mengen des Treibstoffes in den Folgejahren durch die erhöhte Nachfrage kompatibler Flotten erwartet. Durch die steigenden Beimischungsquoten in der ReFuelEU Aviation-Verordnung kann davon ausgegangen werden, dass der Hochlauf von SAF bzw. 100 % SPK-SAF nach Einführung kompatibler Flugzeugty-

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

pen bis 2050 stark ansteigen wird. Die Einführung eines zusätzlichen Unterflurbetankungssystems für diesen Zeitraum scheint aufgrund der hohen Investitionskosten auch aus Sicht der Stakeholder unpraktikabel zu sein. Daher müsste auch an den drei deutschen Flughäfen Frankfurt/Main, München und Berlin-Brandenburg, die über ein Unterflurbetankungssystem verfügen und für insgesamt knapp 70 % des Treibstoffbedarfs in Deutschland verantwortlich sind, die Betankung von 100 % SPK-SAF auf Vorfeld-Tankwagen umgestellt werden. An diesen Flughäfen wäre eine derartige Umstellung mit hohen Kosten verbunden, da neue Tankwagen angeschafft und personell bestückt werden müssten. Betrieblich würde dies auch ein erheblicher Zuwachs an Verkehr auf dem Vorfeld bedeuten und zusätzliche lokale und global klimawirksame Emissionen, sofern keine elektrisch betriebenen Tankwagen eingesetzt werden. An den anderen Flughäfen in Deutschland, an denen die Betankung bereits heute mit Vorfeld-Tankwagen stattfindet, würde es zu verhältnismäßig geringeren Änderungen beim Betankungsprozess kommen.

Da auch bei der Betankung durch Tankwagen eine Segregation von 100 % SPK-SAF und Jet A-1 sichergestellt sein muss, würden für die Betankung von 100 % SPK-SAF fähigen Flugzeugen dezidierte Tankwagen benötigt, die im täglichen Betrieb nur für 100 % SPK-SAF verwendet werden. Zu prüfen wäre hierbei eine mögliche Umwidmung der bestehenden Flotte von Tankwagen an Flughäfen. Eine Herausforderung besteht dabei zum einen bei der benötigten Bedarfsmenge für einzelne Flüge, da Langstreckenflüge in der Regel mit zwei bis drei vollen Tankwagen beliefert werden müssten. Zum anderen stellt die Verfügbarkeit von Tankwagen eine weitere Komplexität dar. Die into-plane-Dienstleister müssten verhältnismäßig große Teilflotten an Tankwagen vorhalten, die zu jederzeit sowohl den Bedarf nach Jet A-1 als auch 100 % SPK-SAF erfüllen könnten. Da durch die erhöhte Klimawirkung von Langstreckenflügen diese unter Berücksichtigung der Treibstoffkompatibilität priorisiert mit 100 % SPK-SAF betankt werden sollten, könnten sich in Abhängigkeit des Flugplanes Peak-Phasen bilden, an denen viele Tankwagen zur selben Zeit gebunden werden, während in anderen Phasen des Tagesgangs die Auslastung sehr gering wäre. Die operationellen Einschränkungen und Herausforderungen sind daher essentiell in der Bewertung der Einführung des neuen Treibstoffs zu berücksichtigen.

Aufgrund der starken Konzentration des Langstreckenverkehrs in Deutschland auf die Flughäfen in Frankfurt/Main und München wäre bei begrenzter Verfügbarkeit von 100 % SPK-SAF vermutlich der größte Nutzen an diesen beiden Flughäfen zu erzielen, allerdings wären dabei auch die größten logistischen Herausforderungen zu bewältigen, da das bestehende

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Unterflurbetankungssystem wie beschrieben nicht für 100 % SPK-SAF genutzt werden und es aus Kostengründen auch höchstwahrscheinlich nicht dupliziert werden kann.

4.5 Flugzeug- und Triebwerkshersteller

Die wesentliche Herausforderung im Bereich von Flugzeugen und Triebwerken ist die Kompatibilität der Nutzung von 100 % SPK-SAF. Verkehrsflugzeuge erhalten mit ihrer Zulassung im Type Certificate Data Sheet (TCDS) eine Liste der Treibstoffe, die verwendet werden dürfen. Dies ist beispielhaft dargestellt in Abbildung 6 für den Airbus A320.

Fuel Specification

ENGINES	KEROSENE DESIGNATION
CFM56: Installation document CFM 2026 or CFM 2129)	JET A, JET A-1, JP5, JP8, N°3 Jet Fuel, JET B**, JP 4**, TS-1, RT(GOST), F44, F34, AVTUR, AVTUR/FSII, AVTAG/FSII, AVCAT/FSII
IAE V2500: IAE Standard Practices and processes Manual IAE 0043	JET A, JET A-1, JP5, JP8, N°3 Jet Fuel, JET B**, JP 4**, TS-1*, RT(GOST), F44, F34, AVTUR, AVTUR/FSII, AVTAG/FSII, AVCAT/FSII
IAE PW1100G-JM: (Service Bulletin PW1000G - 100-73 00-0002-00A930AD)	JET A, JET A-1, JP5, JP8, N°3 Jet fuel, TS-1(GOST), RT(GOST), AVTUR, AVTUR/FSII, AVCAT/FSII
CFMI LEAP-1A: Service Bulletin LEAP-1A S/B 73-0001	JET A, JET A-1, JP5, JP8, N°3 Jet fuel, TS-1(GOST), RT(GOST), AVTUR, AVTUR/FSII, AVCAT/FSII

The above-mentioned fuels are also suitable for the APU.
Refer to Consumable Material List (CML) for details on approved fuel specifications

* For IAE V2500 engines, TS-1 is cleared for transient use (less than 50% of operations)
** JET B and JP 4 fuels are not authorized for use in aircraft fitted with jet pumps (modification 154327)

Abbildung 6: Auszug aus dem Type Certification Data Sheet EASA.A.064 für den Airbus A320 (Quelle: EASA 2025)

Die Treibstoffe, die für die Nutzung in heutigen Flugzeugen freigegeben sind, entsprechen den Standards ASTM D7566/Def Stan 91-091 und ASTM D1655. Ein wesentlicher Faktor ist dabei der Aromatengehalt, der heute dazu beiträgt, dass Dichtungen aufquellen und das Treibstoffsystem dicht bleibt. Es wird in der Literatur darüber berichtet, dass es bei Flugzeugen, die mit Dichtungen aus Nitril ausgestattet waren und mit aromatenfreien Treibstoffen betankt wurden, zu Treibstoffleckagen gekommen ist (Hamilton et al. 2024). Fossiles Kerosin hat in der Regel einen ausreichenden Mindestgehalt an Aromaten, sodass im Treibstoffstandard keine Untergrenze festgelegt ist. Bei SAF ist, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, in ASTM D7566 ein Mindestgehalt von 8 Vol.-% vorgesehen.

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Um einen aromatenfreien Treibstoff nutzen zu können, müssten Flugzeuge und Triebwerke neu bzw. ergänzend zertifiziert und umgerüstet werden, um den hohen Sicherheitsstandards im Luftverkehr zu entsprechen. Dies würde bedeuten, Dichtungen aus Nitril durch andere Stoffe, bspw. Fluorosilikone, zu ersetzen, die jedoch teurer sind und zudem andere Eigenschaften aufweisen, z. B. geringere Abriebfestigkeit (Hamilton et al. 2024). Auch das Treibstoffmesssystem ist u. a. aufgrund von Unterschieden bei der Viskosität und spezifischem Energiegehalt auf den neuen Treibstoff auszulegen. Grundsätzlich ist dies technisch möglich. Das DLR hat in Zusammenarbeit mit Deutsche Aircraft ein Turboprop-Regionalflugzeug vom Typ Do328 für den Versuchsbetrieb mit einem aromatenfreien Treibstoff entsprechend umgerüstet (DLR 2024). Flugversuche des DLR in Kooperation mit Airbus haben grundsätzlich gezeigt, dass Flugzeuge der Typen A350 und A320neo ebenfalls mit aromatenarmem 100 % HEFA-Kerosin ohne wesentliche Umrüstungen betrieben werden können (Märkl et al. 2024). Allerdings fehlt eine Zulassung für den regulären kommerziellen Betrieb und Erfahrungen mit der langfristigen Nutzung von aromatenfreiem Treibstoff. Die Flugtests wurden zudem unter einschränkenden Bedingungen durchgeführt, die für einen kommerziellen Betrieb nicht praktikabel wären.

Die Kosten einer Re-Zertifizierung für den kommerziellen Flugbetrieb werden von den Stakeholdern der Flugzeug- und Triebwerkshersteller als erheblich eingestuft. Letztendlich müsste jedes einzelne Flugzeugmuster re-zertifiziert werden. Bei aktuellen Flugzeugmodellen, die sich in Produktion befinden, ist dies grundsätzlich denkbar, da es bei einer wachsenden Flotte und noch länger angedachten Produktionszeiträumen für Flugzeug- und Triebwerkshersteller wirtschaftlich sinnvoll sein kann, eine Ergänzung der Zertifizierung anzustreben. Dies wäre für die Nutzung von 100 % SPK-SAF eine notwendige Voraussetzung, da beispielsweise zum jetzigen Zeitpunkt keine Nachfolgemodelle für die Langstreckenflugzeuge A350 und A330neo von Airbus geplant sind. Der Markteintritt eines Nachfolgers der A320-Familie ist für die Zeit nach 2035 geplant (Eiselin 2025), sodass bis dahin voraussichtlich noch mehrere tausend Flugzeuge ausgeliefert werden. Für Flugzeugmuster, die nicht mehr produziert werden, ist der Business Case einer Re-Zertifizierung als deutlich schlechter einzustufen. Die Einführung von 100 % SPK-SAF ist aufgrund der fehlenden Standards und Infrastrukturen erst nach 2030 zu erwarten. Bis dahin wird die Anzahl der in den letzten Jahren/Jahrzehnten gebräuchlichen Flugzeugmuster (z. B. A320ceo, A330/340, Boeing 747, 757, 767) in den aktiven Flotten deutlich zurückgegangen sein, sodass eine Re-

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Zertifizierung wirtschaftlich wenig sinnvoll erscheint, sofern diese mit hohen Kosten verbunden ist.

Zu den Kosten der Re-Zertifizierung kämen noch die Umrüstkosten der individuellen Flugzeuge. Sollten Flugzeugmuster der Bestandsflotte für die Nutzung von 100 % SPK-SAF umgerüstet werden, müssten in vielen Fällen weitreichende Eingriffe in das Treibstoffsystem und die Triebwerke vorgenommen werden. Sollten entsprechende Möglichkeiten einer Umrüstung bestehen, erscheint es daher sinnvoll, solche Umbauten im Rahmen großer Wartungsereignisse (bspw. D-Check) vorzunehmen.

Bei der (Re-)Zertifizierung bzw. Umrüstung ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass eine „Abwärtskompatibilität“ gewährleistet ist. Flugzeuge, die für die Nutzung von 100 % SPK-SAF freigegeben sind, müssen auch noch mit herkömmlichem Jet A-1 betrieben werden können, da 100 % SPK-SAF voraussichtlich nicht an allen Flughäfen im globalen Luftverkehrssystem verfügbar sein wird. Dies kann u.U. dazu führen, dass Triebwerke nicht ausschließlich auf die Verbrennung von 100 % SPK SAF optimiert werden können bzw. weder den Optimalpunkt für 100 % SPK-SAF noch für Jet A-1 erreichen. Die Auswirkungen auf Treibstoffverbrauch und lokale Schadstoffemissionen wären im Detail zu prüfen, wenn der Treibstoffstandard für 100 % SPK-SAF vorliegt. Grundsätzlich lässt sich jedoch konstatieren, dass die Nutzung von 100 % SPK-SAF bei heutigen Triebwerken auf dem Prüfstand bisher keine negativen Aspekte, zumindest im kurzfristigen Betrieb, gezeigt haben. Beispielsweise hat Rolls Royce bereits 2023 auf dem Prüfstand nachgewiesen, dass alle ihrer in Produktion befindlichen Triebwerke kompatibel mit der Nutzung von 100 % SAF sind (Ahrens et al. 2025). Möglicherweise führt die Verbrennung mit weniger Rußpartikeln und die Schwefelfreiheit des Treibstoffs sogar zu positiven Wirkungen, z. B. reduzierte Ablagerungen, eine längere Nutzung von Bauteilen bis zur Überprüfung bzw. deren Austausch und damit geringeren Wartungskosten. Jedoch müsste auch diese Annahme durch Langzeittests überprüft werden, die so bisher noch nicht durchgeführt wurden.

Aufgrund der hohen Komplexität und den damit verbundenen Kosten einer Re-Zertifizierung von aktuellen bzw. nicht mehr produzierten Flugzeugmustern haben Flugzeug- und Triebwerkshersteller im Rahmen der Stakeholder-Befragung angemerkt, dass möglicherweise erst zukünftig neu auf den Markt kommende Flugzeugmuster 100 % SPK-SAF-kompatibel sein werden. Dies hätte erhebliche Auswirkungen auf die Nachfrage nach 100 % SPK-SAF

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

und den zu erwartenden Umwelteffekten, zumal Airbus die Indienststellung des A320-Nachfolgers erst nach 2035 erwartet. Eine Quantifizierung der Effekte wird in Kapitel 5 mit unterschiedlichen Szenarien vorgenommen.

4.6 Airlines

Auch für die Fluggesellschaften bringt die Einführung von 100 % SPK-SAF verschiedene Herausforderungen mit sich. Da die Treibstoffkosten je nach Geschäftsmodell, Einsatzszenario und Rahmenbedingungen rund ein Drittel der direkten operativen Kosten ausmachen können, reagieren Fluggesellschaften in der Regel sehr preissensitiv auf Änderungen der Treibstoffpreise. Eine besondere Herausforderung aller SAF-Arten sind dabei die deutlich höheren Kosten im Vergleich zu herkömmlichem Jet A-1. Laut EASA (2026) lagen die durchschnittlichen Referenzpreise für biobasierte nachhaltige Flugtreibstoffe im Luftverkehr in Europa im Jahr 2025 bei 1.925 €/Tonne, verglichen mit 640 €/Tonne für konventionelles Jet A-1. Marktpreise für synthetische Treibstoffe lagen der EASA nicht vor. Allerdings wurden die Produktionskosten mit durchschnittlich 7.520 €/Tonne mehr als zehnmal so hoch wie der Marktpreis für fossiles Kerosin eingeschätzt.

Aufgrund der derzeit noch geringen Beimischungsquoten von SAF sind die Auswirkungen auf die Gesamtkosten für Treibstoff bislang begrenzt. In der vorliegenden Studie wurde die Annahme gesetzt, dass die Beimischungsverpflichtungen der ReFuelEU Aviation-Verordnung nicht nur durch Drop-in-SAF, sondern zukünftig auch durch 100 % SPK-SAF erfüllt werden können. Die selektive Nutzung von 100 % SPK-SAF durch einige wenige Fluggesellschaften, die über kompatible Flugzeuge verfügen, würde jedoch einen finanziellen Ausgleichsmechanismus erfordern. Andernfalls würden die Betreiber von Flugzeugen, die mit 100 % SPK-SAF fliegen, einseitig erheblich finanziell belastet.

Die derzeitigen Anreizsysteme zur Nutzung von SAF sind jedoch nicht auf die besonderen Herausforderungen ausgelegt, die der Einsatz von 100 % SPK-SAF mit sich bringen würde. Eine Möglichkeit wäre, Fluggesellschaften über wirtschaftliche Anreize zur aktiven Nutzung und zum Kauf von 100 % SPK-SAF zu bewegen, sofern sie über kompatible Flugzeuge in ihrer Flotte verfügen. Denkbar wäre beispielsweise ein Umlageverfahren, bei dem alle Passagiere bzw. Versender von Luftfracht einen Aufschlag auf die Ticketpreise bzw. Frachtraten oder auf konventionellen Treibstoff zahlen. Die Erlöse könnten den Nutzern von

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

100 % SPK-SAF zugutekommen, um Wettbewerbsverzerrungen durch hohe Treibstoffkosten zu vermeiden. In einem solchen Anreizsystem sollte dabei sichergestellt werden, dass Flüge mit hoher Klimawirkung höhere Anreize zur Nutzung des Treibstoffs hätten, damit die begrenzt verfügbare Menge an SPK-SAF optimal eingesetzt würde. Gleichzeitig könnte im regulatorischen Rahmenwerk sichergestellt werden, dass für Fluggesellschaften, die auf die Nutzung von 100 % SPK-SAF verzichten, weil sie beispielsweise über keine kompatiblen Flugzeuge verfügen, keine Nachteile entstehen.

Sollten Fluggesellschaften aus Drittstaaten, in denen keine SAF-Beimischungs- oder Abgabeverpflichtungen für Emissionsrechte vorliegen, aufgrund von Wettbewerbsvorteilen Marktanteile gewinnen, besteht die Gefahr des Auftretens von Carbon Leakage, d. h. der Verlagerung von Emissionen in unregulierte Drittstaaten. Dieses Problem besteht nicht nur bei der Abgabepflicht für CO_2-Emissionsrechte, sondern würde sich bei potentiellen Abgabepflichten für Nicht-CO_2-Effekte vermutlich noch verstärken.

Ein solches System müsste so umfassend sein, dass auch die aktuell bestehenden Herausforderungen bei der Anrechnung der Nutzung von SAF im EU EHS fair gelöst werden. Zudem wäre ein belastbares MRV-System (Monitoring, Reporting and Verification) von Nicht-CO_2-Effekten erforderlich, um die Anreize wissenschaftlich korrekt abbilden zu können. Ein erster Schritt in diese Richtung ist das MRV-System Nicht-CO_2-Effekte im Rahmen des EU ETS, das mit der Novellierung der Durchführungsverordnung (EU) 2018/2066 in 2024 eingeführt wurde und derzeit im Aufbau ist.

Eine andere Option wäre der verpflichtende Einsatz von 100 % SPK-SAF auf Routen mit hoher Klimawirkung, sofern entsprechend zertifiziertes Fluggerät auf dieser Strecke eingesetzt wird. Der Vorteil einer solchen Maßnahme besteht dabei im Erreichen der maximalen Effektivität der Reduktion der Klimawirkung. In der Praxis würde dies jedoch bedeuten, dass 100 % SPK-SAF für diese Flüge bereitgestellt werden müsste, was erhebliche Herausforderungen in der Treibstofflogistik (und ggf. auch Flotten- und Netzwerkplanung) bedeuten würde. Zudem müssten flankierende Maßnahmen wie etwa ein Ausgleichsmechanismus für die unterschiedlichen Treibstoffkosten umgesetzt werden, um Wettbewerbsverzerrungen zu vermeiden. Sowohl Stakeholder-Gespräche im Rahmen dieser Studie als auch Pressemitteilungen bzw. Positionspapiere von Verbänden zeigen, dass die Luftverkehrswirtschaft einer Verpflichtung zur Nutzung von 100 % SPK-SAF kritisch gegenübersteht, da bereits die Umsetzung der ReFuelEU Aviation-Verordnung als wettbewerbsverzerrend ange-

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

sehen wird (Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft 2026). Ohne einen solchen Ausgleichsmechanismus hätten Betreiber von gemischten Flotten mit 100 % SPK-SAF-kompatiblen und inkompatiblen Flugzeugen einen Anreiz, inkompatible Flugzeuge auf besonders klimasensitiven Flügen einzusetzen, um sich einer 100 % SPK-SAF-Verpflichtung auf solchen Flügen zu entziehen.

In der Stakeholder-Konsultation wiesen Airline-Vertreter auch auf die logistischen Herausforderungen einer priorisierten 100 % SPK-SAF Nutzung auf Flügen mit besonders hohen Nicht-CO_2-Effekten hin. Die Bestimmung der Flüge, die 100 % SPK-SAF bereitgestellt bekommen, müsste mit ausreichendem zeitlichem Vorlauf erfolgen, damit die Betankungslogistik geplant werden kann. Es wurde in den Gesprächen darauf hingewiesen, dass Flexibilität in der Betankung verloren gehen könnte, wenn nur eine begrenzte Anzahl an Tankwagen mit 100 % SPK-SAF zur Verfügung stehen.

4.7 Markt & Regulatorik

Auch im Hinblick auf die Verfügbarkeit von 100 % SPK-SAF sowie dem regulatorischen Umgang mit diesem Treibstoff gibt es einige Herausforderungen zu bewältigen. Die geringen Produktionsmengen von SAF resultieren zum einen aus den geringen Produktionskapazitäten sowie den Nachfragehemmnissen auf Seiten der Fluggesellschaften aufgrund des hohen SAF-Preises. Maßgeblicher Treiber dürfte daher bis auf Weiteres die Beimischungsquote durch die ReFuelEU Aviation-Verordnung sein. Zudem können Maßnahmen wie die Anrechenbarkeit von SAF im EU EHS können dabei mögliche Anreizsysteme schaffen, führen aber laut den Stakeholdern nicht weit genug. Zur Steigerung der Nachfrage nach der Nutzung speziell von 100 % SPK-SAF wäre es eine aus wissenschaftlicher Sicht plausible Handlungsoption, zusätzliche Kompensationsmechanismen einzuführen. Zum einen, wie bereits in Kapitel 4.6 beschrieben, ist es aus vielfachen Gründen sinnvoll, Fluggesellschaften zu Nutzung des teureren 100 % SPK-SAF Anreize zu geben. Gleiches gilt auch für Anreize für Flughäfen, Treibstofflieferanten und Betankungsdienstleister für Investitionen in die Infrastruktur. Hier ergeben sich vermutlich relevante Unterschiede je nach Größe und Routennetzwerk des jeweiligen Flughafens.

Eine erhebliche Herausforderung wäre eine potentielle Anpassung der ReFuelEU Aviation-Verordnung, um eine aus wissenschaftlicher Sicht gebotene gezielte SAF-Nutzung auf Flü-

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

gen mit hohen Nicht-CO_2-Effekten zu incentivieren. Die im Rahmen der Stakeholder-Befragung konsultierten Vertreterinnen und Vertreter der Luftverkehrswirtschaft und Behörden gehen davon aus, dass zumindest kurzfristig keine komplette Reform der ReFuelEU Aviation-Verordnung realistisch erscheint. Es wurde darauf hingewiesen, dass der aktuell erreichte Stand ein Ergebnis langwieriger Verhandlungen gewesen sei und eine Reform der ReFuelEU Aviation-Verordnung das Risiko birgt, dass die ambitionierten Quotenregelungen abgeschwächt werden könnte.

Neben der Verfügbarkeit des SPK-SAFs müssen auch regulatorische Herausforderungen im Hinblick auf die Nutzung des Treibstoffes berücksichtigt werden. Derzeit sind, wie in Kapitel 3.2. beschrieben, nach ASTM D7566 und D1655 in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens nur SAF-Beimischungsquoten von bis zu 50 % zugelassen. Da die Mandate von ReFuelEU Aviation jedoch bis 2050 eine Nutzung von 70 % SAF bei Abflügen innerhalb der EU vorschreiben, muss erwartet werden, dass die maximal zulässigen Beimischungsanteile in Zukunft angepasst werden, um diese Quoten zu erfüllen. Sowohl Airbus als auch Boeing haben sich dabei selbstverpflichtet, ab 2030 Flugzeuge produzieren zu können, welche für die Nutzung von 100 % SAF (nicht aromatenfrei) zertifiziert sind (Airbus 2026; Boeing 2020).

Innerhalb der ASTM gibt es daher derzeit sowohl eine Task Force für die Entwicklung eines neuen Treibstoffstandards für Drop-in- und Non-drop-in-Treibstoffe. Für die Entwicklung eines neuen Treibstoffstandards für 100 % SPK-SAF muss dabei zusätzlich zur Aufhebung maximaler Beimischungsquoten unter anderem der Mindestanteil von Aromaten im Treibstoff reduziert werden. Derzeit wird erwartet, dass zunächst ein neuer Treibstoffstandard für Drop-in-Treibstoffe erarbeitet wird. Dies kann dazu führen, dass die Einführung eines Treibstoffstandards für Non-drop-in-Treibstoffe noch einige Jahre in Anspruch nehmen kann, was den Markthochlauf möglicher für diesen Treibstoff zertifizierter Flugzeuge verzögern kann.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

5 Szenarien und ökonomische Bewertung

5.1 Szenarien

Um die Auswirkungen unterschiedlicher zukünftiger Entwicklungen bezüglich der Verfügbarkeit von SPK-SAF, die Kompatibilität heutiger und zukünftiger Flugzeuggenerationen abzubilden und damit den Bedarf an 100 % SPK-SAF an deutschen Flughäfen abzuschätzen, wird im Folgenden eine Szenarioanalyse durchgeführt. Die Szenarien ermöglichen dabei, Unsicherheiten hinsichtlich der getroffenen Annahmen abzubilden und relevante Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

Durch die hohen Kosten und die geringe Verfügbarkeit von SAF im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass auch 100 % SPK-SAF nur begrenzt zur Verfügung stehen wird. International haben einige Staaten damit begonnen, die Nutzung von SAF gesetzlich vorzuschreiben oder Airlines über Anreizsysteme dazu zu incentivieren. In der EU werden Treibstofflieferanten seit 2025 über Beimischungsquoten in der ReFuelEU Aviation-Verordnung dazu verpflichtet, einen Mindestanteil an SAF an europäische Flughäfen zur Verfügung zu stellen. Dieser Anteil von SAF soll dabei bis zum Jahr 2050 auf bis zu 70 % ansteigen. Unter der Annahme, dass die Verfügbarkeit von SAF in der EU und in Deutschland eingeschränkt ist, jedoch die Mandate der ReFuelEU Aviation-Verordnung erfüllt werden müssen, kann für die quantitative Analyse angenommen werden, dass sich die Verfügbarkeit von SPK-SAF an diesen Mandaten orientiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass SPK-SAF auch die Mandate zur Nutzung von synthetischen Treibstoffen abdeckt.

Ein wesentliches Element dieser Studie ist die Analyse der Verfügbarkeit von SPK-SAF an Flughäfen in Deutschland. Dabei werden drei Szenarien definiert, die sich im Hinblick auf die Kompatibilität von Verkehrsflugzeugen unterscheiden:

Im **Szenario „ReCert Fleet“** wird angenommen, dass neben Neuflugzeugen, die ab 2035 ausgeliefert werden auch eine Rezertifizierung der Bestandsflotte möglich ist. Der Austausch von notwendigen Systemkomponenten, welche für die Nutzung von 100 % SPK-SAF notwendig wären, soll dabei im Rahmen eines regulären D-Checks ab 2035 durchgeführt werden können. Aufgrund der sowohl technisch komplexeren Umrüstung als auch der geringen wirtschaftlichen Anreize sollen dabei Flugzeuggenerationen, deren Produktion vor 2025 endete, nicht rezertifiziert werden können. Es wird angenommen, dass aufgrund hoher Zertifizierungskosten und einer abnehmenden Anzahl von Flugzeugen älterer Generationen

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

im Zeitablauf die Flugzeug- und Triebwerkshersteller aus wirtschaftlichen Gründen von einer 100 %-SPK-SAF-Zertifizierung dieser Flugzeuge absehen.

Im **Szenario „NextGen 2035“** wird angenommen, dass ausschließlich Verkehrsflugzeuge mit einer Auslieferung ab 2035 zur Nutzung von 100 %-SPK-SAF zertifiziert werden wird. Flugzeuge, welche davor ausgeliefert wurden, erhalten die Zertifizierung entsprechend nicht, d. h. eine Umrüstung der Bestandsflotte erfolgt nicht.

Im **Szenario „Late Adoption“** wird angenommen, dass sich die Einführung der Flugzeuggeneration, welche 100 % SPK-SAF-fähig sein werden, bis zum Jahr 2040 verzögern wird. In diesem Szenario wird die Rezertifizierung der Bestandsflotte ebenfalls ausgeschlossen. Die einzelnen Szenarien inklusive ihrer Ausprägungen sind in Abbildung 7 zusammengefasst.

Die Annahmen zum Markteintritt und Markthochlauf 100 % SPK-SAF-kompatibler Flugzeuge ist ein wichtiger Faktor in der Szenarioanalyse, um die limitierenden Faktoren identifizieren zu können. Die in den drei Szenarien angenommen Zeitpunkte für den Markteintritt der 100 % SPK-SAF Flugzeuggeneration basiert auf den Schätzungen der Flugzeug- und Triebwerkshersteller im Rahmen der Stakeholderkonsultation (Kapitel 4).

	ReCert Fleet	NextGen 2035	Late Adoption
Rezertifizierung Bestandsflotte	✓	✗	✗
Nachfolgegeneration 2035	✓	✓	✗
Nachfolgegeneration 2040	✓	✓	✓
Physische Doppelstruktur	*1A*	*1B*	*1C*
Flexibilitätsmechanismus	*2A*	*2B*	*2C*

Abbildung 7: Szenarien zur Flottenkompatibilität mit 100 % SPK-SAF (Quelle: Eigene Darstellung)

Neben dem Entry-into-Service der 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugflotte und der Umrüstung der Bestandsflotte wird auch die Verfügbarkeit von SPK-SAF an den Flughäfen untersucht. Hier werden zwei Ausprägungen in den Szenarien jeweils näher betrachtet: Zum einen der Aufbau einer physischen Doppelstruktur mit einer gleichzeitigen Belieferung von Jet A-1 und 100 % SPK-SAF an allen deutschen Flughäfen (1A, 1B und 1C). Zum anderen werden die Möglichkeiten von Flexibilitätsmechanismen untersucht (2A, 2B und 2C). Dazu

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

wird die Verteilung des verfügbaren SPK-SAFs auf einzelne Flughäfen in Deutschland analysiert. Mit möglichen Flexibilitätsmechanismen wie „Book and Claim“ und Kompensationsmechanismen bzw. Umlageverfahren sollen in dieser Ausprägung mögliche Anreizsysteme sowie Vor- und Nachteile zwischen den Ausprägungen wissenschaftlich analysiert und diskutiert werden. Über die Flexibilitätsmechanismen wird auch die Optimierung des Einsatzes des zumindest in der Markthochlaufphase knappen 100 % SPK-SAF betrachtet.

5.2 Flotten- und Treibstoffmodellierung

Zur Bewertung der zukünftigen Auswirkungen der Nutzung von 100 % SPK-SAF an deutschen Flughäfen soll in diesem Abschnitt der Modellierungsansatz für die tatsächlich nutzbare Menge von SPK-SAF in dieser Studie beschrieben werden. Diese Menge ist einerseits durch die Mindestmengen an SAF in der EU durch ReFuelEU Aviation vorgegeben, kann jedoch in Abhängigkeit der betrachteten Szenarien durch die Verfügbarkeit von kompatiblen Flugzeugen begrenzt sein. In diesem Fall würde die verbleibende Quote durch Drop-in-SAF erfüllt werden. Der Modellierungsansatz ist in Abbildung 8 überblicksartig dargestellt.

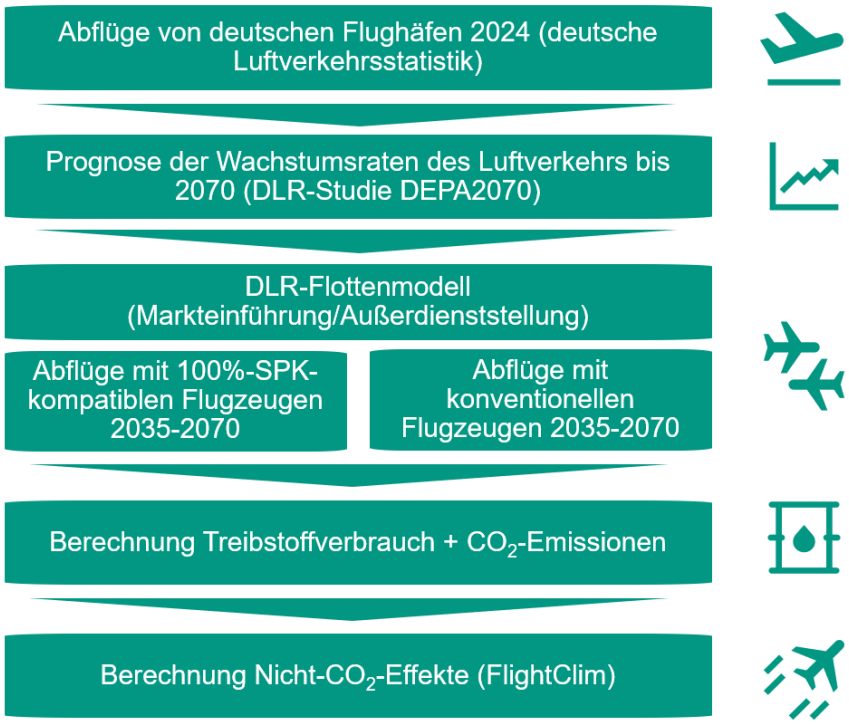

Abbildung 8: Modellierung von Flottenentwicklung, Treibstoffbedarfen und Nicht-CO_2-Effekten in den unterschiedlichen Szenarien (Quelle: Eigene Darstellung)

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Daten der deutschen Luftverkehrsstatistik (Fiplan GmbH), in der unter anderem alle Abflüge des Jahres 2024 von berichtspflichtigen Flugplätzen in Deutschland dokumentiert sind, bilden dabei die Grundlage für die Berechnung des heutigen und zukünftigen Treibstoffbedarfs. Die Luftverkehrsstatistik enthält dabei neben Informationen zu Start- und Landeplätzen, genutztem Flugzeugtyp, Missionstyp (bspw. Passagier- oder Frachtflug) auch die Summe der durchgeführten Flüge sowie der beförderten Nutzlast und die durchschnittliche Sitzplatzkapazität der Flüge.

Zur Modellierung der zukünftigen Flotten und Flugbewegungen werden die routenspezifischen Wachstumsraten des DLR-Projektes Development Pathways for Aviation up to 2070 (DEPA 2070, Leipold et al. 2024) verwendet. Dabei werden bis zum Jahr 2070 die zukünftigen Flugbewegungen, die Gesamtzahl der beförderten Passagiere sowie die durchschnittliche Anzahl der verfügbaren Sitzplätze pro Flug auf Routenebene modelliert. Bei Missionstypen ohne Passagieraufkommen (z. B. Frachtflüge, General Aviation) wird dabei nur die Anzahl der zukünftigen Flüge berücksichtigt.

Die durchgeführten Flüge werden – im Einklang mit den Szenarien – im Anschluss in zwei Kategorien unterteilt. Die eine Kategorie bilden dabei alle Flüge mit Flugzeugen, welche für die Nutzung von 100 % SPK-SAF zertifiziert sind, während in der anderen Kategorie alle anderen Flüge enthalten sind, bei denen ein solcher Treibstoff nicht genutzt werden kann. Unter Berücksichtigung des Flottenwachstums wird dabei angenommen, dass zusätzliche Flüge, welche ab 2035 (im Late Adoption Szenario ab 2040) auf einer Route eingesetzt werden, von 100 % SPK-SAF kompatiblen Flugzeugtypen durchgeführt werden. Zusätzlich wird angenommen, dass Flugzeuge, welche ebenfalls für diesen Treibstoff zertifiziert sind, die Bestandsflotte nach und nach ersetzen, sodass jährlich 5 % der Flüge der Bestandsflotte durch 100 % SPK-SAF kompatible Flugzeuge substituiert werden. Im ReCert Fleet Szenario wird ferner angenommen, dass, zusätzlich zum Austausch der Flotte, jährlich 8 % der Flugzeuge der Bestandsflotte umgerüstet werden können und anschließend für die Nutzung von 100 % SPK-SAF verwendet werden können. Dies entspricht der Annahme, dass die Umrüstungen im Zuge des D-Checks durchgeführt werden, der spätestens in einem Intervall von zwölf Jahren durchgeführt werden muss. Für die Umrüstung werden, wie in den Szenarien beschrieben, nur Flugzeuggenerationen, welche sich nach 2025 noch in Produktion befanden, berücksichtigt.

Im nächsten Schritt wird der benötigte Treibstoffbedarf bzw. Bedarf an 100 % SPK-SAF in Deutschland modelliert. Dazu wird das vom DLR entwickelte Tool FlightClim v1.0 genutzt.

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

FlightClim kann dabei für die Abschätzung der Klimawirkung einzelner Flüge herangezogen werden, bietet aber auch die vereinfachte Berechnung von Treibstoffverbräuchen für einzelne Flüge basierend auf Informationen zu Start- und Landeflughafen und Sitzplatzanzahl des durchgeführten Fluges an (Bruder et al. 2025). Daher werden zunächst spezifische Sitzplatzkategorien (20-50, 51-100, 101-151, 152-201, 202-251, 252-301 und 302-600 Plätze) für die modellierten Flüge im Einklang mit FlightClim zugewiesen. Frachtflüge werden dabei aufgrund des fehlenden Passagieraufkommens der höchsten Sitzplatzkategorie zugewiesen; Flüge der General Aviation der kleinsten Sitzplatzkategorie.

FlightClim berechnet im Anschluss für jedes Flughafenpaar die Distanz (Großkreisdistanz + 95 Kilometer) und die benötigte Treibstoffmenge basierend auf der spezifischen Sitzplatzkategorie und der Anzahl der durchgeführten Flüge. Darüber hinaus werden CO_2-Emissionen sowie die Nicht-CO_2-Effekte abgeschätzt.

Die berechnete Treibstoffmenge wird im Anschluss um eine durchschnittliche Effizienzsteigerung der Flotte von 1,5 % pro Jahr korrigiert. Die Gesamtmenge an Treibstoff sowie das gesamte Flottenwachstum ist dabei von den gewählten Szenarien unabhängig. In den Szenarien bleibt die potentielle Einführung von Wasserstoff- oder (hybrid-) elektrischen Flugzeugen unberücksichtigt, ebenso ein wachstumsdämpfender Effekt durch potentiell höhere Ticketpreise aufgrund von Kostensteigerungen durch den Einsatz wachsender SAF-Mengen oder steigender CO_2-Preise. Insbesondere der Einsatz neuer Energieträger könnte langfristig die Nachfrage nach kohlenwasserstoffbasierten Treibstoffen stark beeinflussen. Unter Berücksichtigung der geltenden Quoten aus ReFuelEU Aviation bis 2050 kann für die einzelnen Szenarien die Diskrepanz zwischen der tatsächlich abrufbaren Menge von 100 % SPK-SAF und der Bedarfsmenge kompatibler Flugzeuge abgeleitet werden. Dabei wird zum einen angenommen, dass die Menge des verfügbaren 100 % SPK-SAF durch die Quoten von ReFuelEU Aviation gedeckelt sind und zum anderen, dass über 2050 hinaus keine weitere Steigerung der geforderten Quoten stattfindet. Sollten in den Szenarien nicht ausreichend 100 % SPK-SAF-kompatible Flugzeuge verfügbar sein, um die verfügbare 100 % SPK-SAF

Aufgrund der möglichen Knappheit des 100 % SPK-SAF kann für einzelne Szenarien mit Hilfe von FlightClim zusätzlich die Klimawirkung der einzelnen Flüge abgeschätzt werden, um einzelne Flüge mit besonders hoher Klimawirkung gesondert bei der Verteilung des Treibstoffes zu priorisieren. Die CO_2-Emissionen werden mit Hilfe des Efficacy weighted

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Absolute Global Warming Potential mit einem Zeithorizont von 100 Jahren ($EAGWP_{100}$) berechnet. Dabei werden wiederkehrende Emissionen angenommen, da die Flüge jährlich stattfinden. Die Flüge werden basierend auf dem Verhältnis der Klimawirkung zur verbrauchten Menge Treibstoff absteigend sortiert. Dadurch können die klimaintensivsten Flüge herausgefiltert werden und bei der Verteilung des 100 % SPK-SAF priorisiert werden.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch:
NOW
Projektträger:
VDI VDE IT
FNR

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Ergebnisse der Modellierung

Abbildung 9 zeigt den Verlauf des Markthochlaufs von 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen in den drei Szenarien ReCert Fleet, NextGen 2035 und Late Adoption. Als Indikator wird die Anzahl der Flüge abgebildet, die mit 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen durchgeführt werden.

Im ReCert Fleet-Szenario könnten bereits etwa 10 Jahre nach Einführung von 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen mehr als 50 % der Flüge mit diesem Treibstoff durchgeführt werden. Auch im NextGen 2035-Szenario erfolgt der Hochlauf 100 % SPK-SAF-kompatibler Flugzeuge relativ schnell. Es zeigt sich, dass trotz fehlender Umrüstung der Bestandsflotte aufgrund von Luftverkehrswachstum und schrittweisem Ersatz der Bestandsflotte innerhalb weniger Jahre ein hoher Grad an Kompatibilität mit 100 % SPK-SAF hergestellt werden kann. Weiterhin kann man aus dieser Erkenntnis schließen, dass die Umrüstung der Bestandsflotte nicht eine notwendige Bedingung für die erfolgreiche Einführung von 100 % SPK-SAF ist, bzw. eine Umrüstung der Bestandsflotte sollte nur dann erwogen werden, wenn dies kosteneffizient möglich ist. Möglicherweise ist eine Umrüstung der Bestandsflotte auch dann nicht zwingend erforderlich, wenn die Menge an 100 % SPK-SAF begrenzt ist und ggf. schon durch die Nutzung durch Neuflugzeuge vollständig aufgebraucht wird.

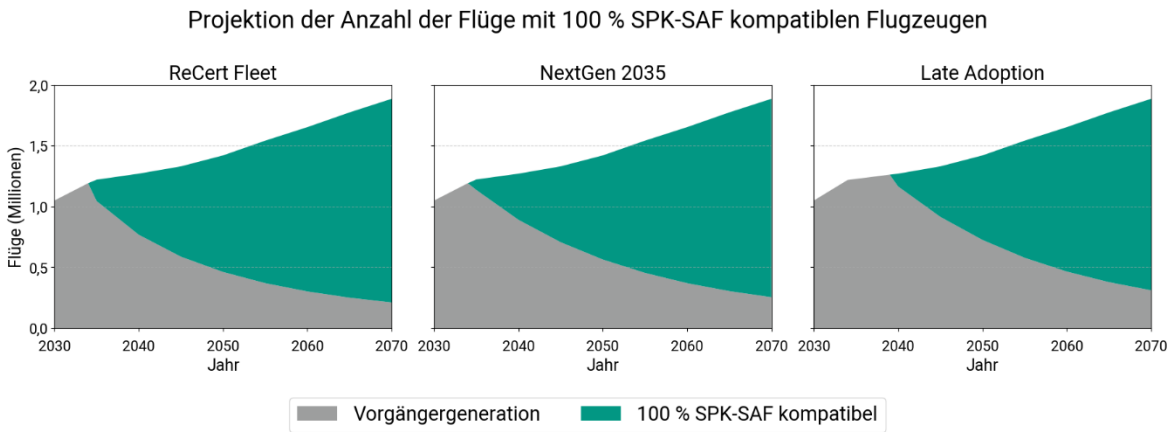

Abbildung 9: Entwicklung des Anteils der Flüge mit 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen in den Szenarien ReCert Fleet, NextGen 2035 und Late Adoption (Quelle: Eigene Darstellung)

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Abbildung 10 zeigt die Auswirkungen der Annahmen zur Entwicklung der Treibstoffverbrauchseffizienz auf die Treibstoffnachfrage. Durch die Annahme zur jährlichen Effizienzsteigerung von 1,5 % fällt im Jahr 2070 der Treibstoffverbrauch um rund 50 % geringer aus als ohne Effizienzverbesserungen. Auf einer langfristigen Zeitskala hat daher die Effizienzsteigerung bei Flugzeugtechnologie und betrieblichen Verfahren für die zukünftige Treibstoffnachfrage eine erhebliche Bedeutung. Die Abbildung 11 a, b und c zeigen die Gesamtmenge des benötigten Treibstoffs für Flüge ab den deutschen Flughäfen und die Differenzierung von 100 % SPK-SAF, Drop-in-SAF und konventionellem fossilem Jet A-1 im Zeitraum 2025 bis 2070 unter Berücksichtigung der jährlichen Effizienzsteigerung. Die Gesamtmenge des nachgefragten Treibstoffs steigt aufgrund der angenommenen Effizienzsteigerung von 1,5 % p. a. in der Flotte von aktuell (März 2026) ca. 8,3 Mio. t auf etwas über 10 Mio. t. Dies entspricht einer jährlichen Wachstumsrate (CAGR) des Treibstoffbedarfs von etwa 0,4 %. Dies entspricht in etwa der historischen Entwicklung in Deutschland. Die Effizienzsteigerungen in der Flotte haben den wachsenden Treibstoffbedarf aufgrund des Luftverkehrswachstums deutlich reduziert. Bspw. entsprach die Nachfrage nach Flugtreibstoffen im Jahr 2024 etwa dem Wert des Jahres 2007.

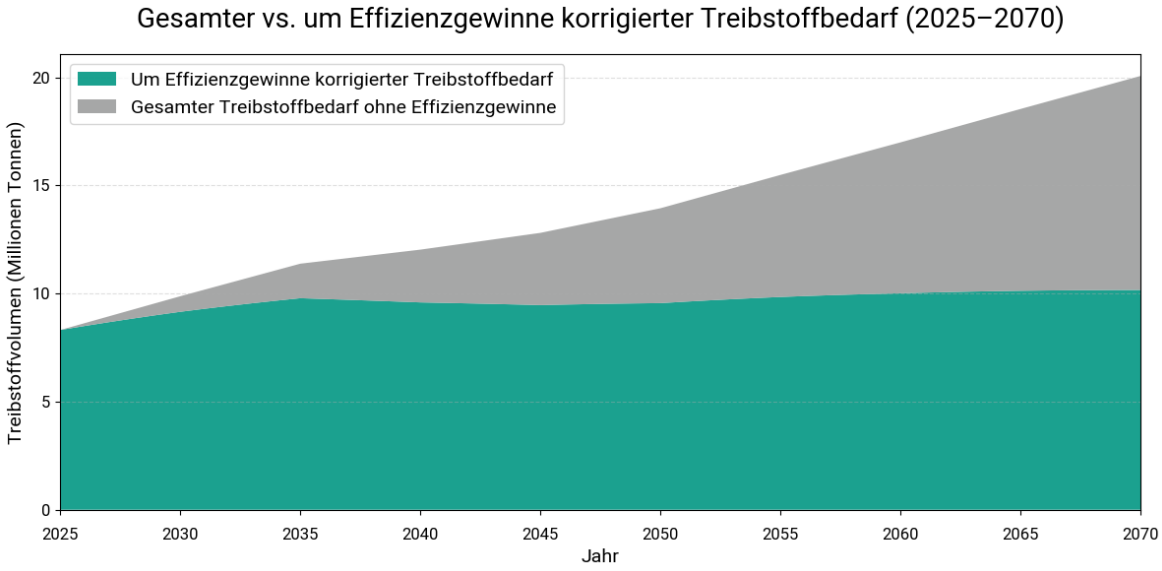

Abbildung 10: Auswirkungen von Annahmen zur Effizienzsteigerung auf den Treibstoffverbrauch der Abflüge ab Deutschland 2025-2070 (Quelle: Eigene Darstellung)

Im ReCert Fleet-Szenario (Abbildung 11a) kann aufgrund des relativ schnellen Zulaufs von 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen bereits ab dem Jahr 2036 das gesamte SAF (ca. 2 Mio. t) in Form von 100 % SPK-SAF vom Markt angenommen werden. Auch in den Folge-

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

jahren wächst die 100 % SPK-SAF-kompatible Flotte schneller als die Menge SPK-SAF, welche maximal zur Verfügung steht. Daher kann auch langfristig die gesamte SAF-Menge, die durch ReFuelEU Aviation vorgegeben ist, in Form von 100 % SPK-SAF genutzt werden, so dass Drop-in-SAF nur übergangsweise benötigt wird.

Im NextGen 2035-Szenario (Abbildung 11b) erfolgt die Verbreitung von 100 % SPK-SAF kompatiblen Flugzeugen zunächst deutlich langsamer, was sich in der entsprechenden Nachfrage nach 100 % SPK-SAF niederschlägt. Im Jahr 2035 wird erst knapp 1 Mio. t 100 % SPK-SAF nachgefragt, allerdings kann auch in diesem Szenario bereits ab ca. 2038 die gesamte SAF-Menge als 100 % SPK-SAF genutzt werden. Der Zulauf neuer, 100 % SPK-SAF-kompatibler Flugzeuge aufgrund des Luftverkehrswachstums und als Ersatz für außer Dienst gestellte Flugzeuge erfolgt noch vor dem Jahr 2040 in einer relativ hohen Rate, sodass auch in diesem Szenario die gesamte SAF-Menge, die durch ReFuelEU Aviation vorgegeben ist, in Form von 100 % SPK-SAF genutzt werden kann. Nur im Jahr 2050 durch den Quoten-Sprung auf 70 % SAF-Anteil ergibt sich ein erneuter kleiner Bedarf über einen kurzen Zeitraum für Drop-in-SAF.

Im Late Adoption-Szenario (Abbildung 11c) sieht die Situation deutlich anders aus: Da bis 2040 die SAF-Quote aus ReFuelEU Aviation auf 34 % des gesamten Treibstoffbedarfs ansteigen wird, aber erst zu diesem Zeitpunkt die ersten 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeuge im Markt verfügbar sein werden, muss bis nach 2040 ein Großteil des SAF als Drop-in-Treibstoff verwendet werden. Zwischen 2046 und 2049 kann zwischenzeitlich aufgrund der konstant bleibenden SAF-Quote und dem Anstieg der 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugflotte der SAF-Bedarf komplett als 100 % SPK-SAF gedeckt werden. Zwischen 2050 und 2054 ist aufgrund der Erhöhung der SAF-Beimischungsquote von 42 % auf 70 % ab 2050 wieder eine Diskrepanz zwischen zur Verfügung stehender 100 % SPK-SAF-Menge und kompatibler Flugzeugflotte zu beobachten. Ursächlich dafür ist, dass die verfügbare Menge an 100 % SPK-SAF durch die gestiegene SAF-Beimischungsquote deutlich stärker wächst als die Bedarfe kompatibler Flugzeuge für diesen Treibstoff in diesem Zeitraum.

Langfristig ist jedoch die Flugzeugflotte aufgrund der Flottenerneuerung und der Indienststellung von neuen Flugzeugen zur Bedienung der wachsenden Nachfrage kein einschränkender Faktor bei der potentiellen Nachfrage nach 100 % SPK-SAF.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

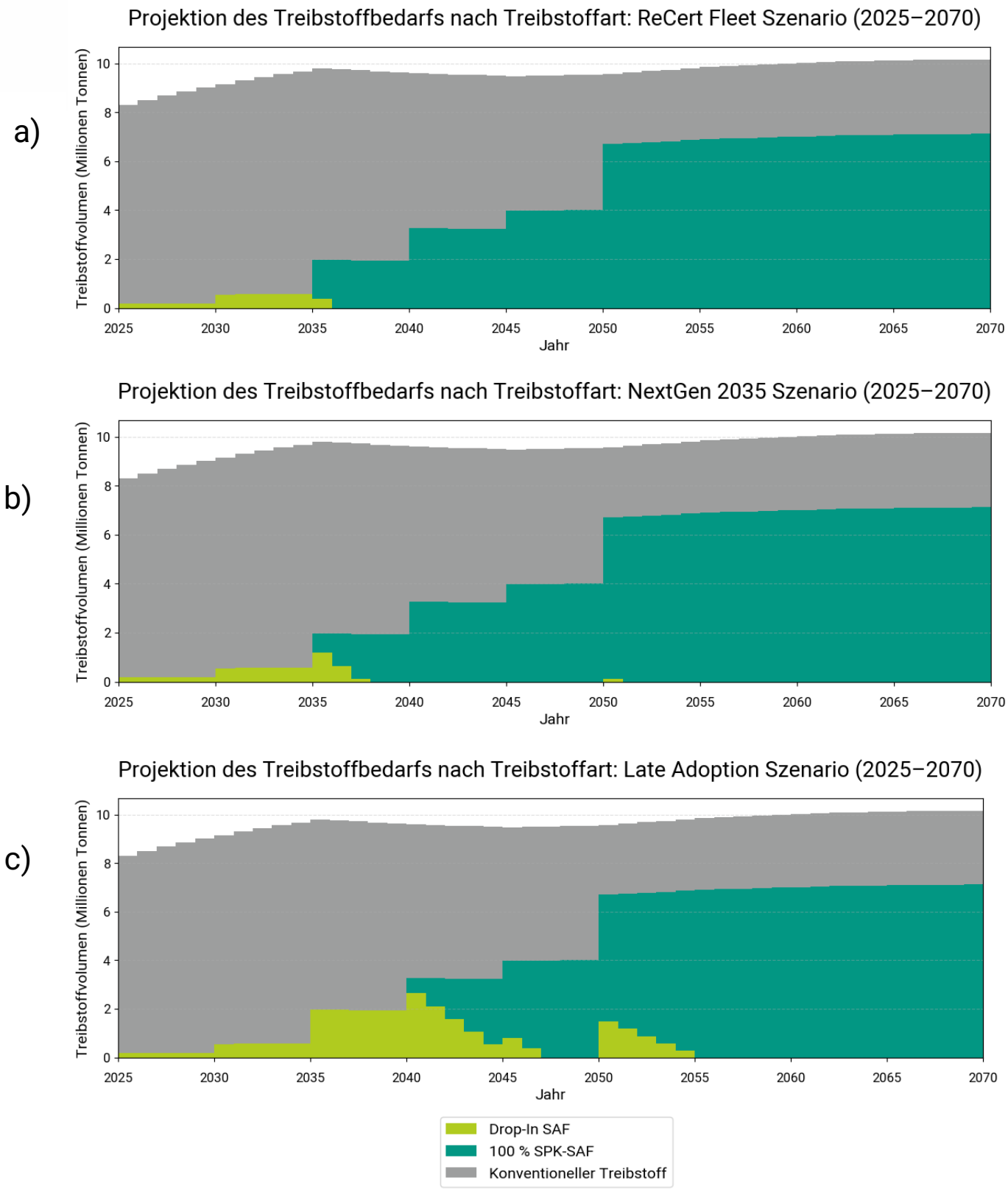

Abbildung 11: Treibstoffverbrauch in den Szenarien ReCert Fleet (a), NextGen 2035 (b) und Late Adoption (c) (Quelle: Eigene Darstellung)

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

6.2 Nutzen-Kosten-Bewertung

Der Einsatz von 100 % SPK-SAF an deutschen Flughäfen hat verschiedene Nutzen- und Kostendimensionen zur Folge. Zu den Nutzen gehören die Reduktion von Nicht-CO_2-Effekten im Bereich der Klimawirkung, die Verbesserung der lokalen Luftqualität durch geringere Feinstaubemissionen, eine potentielle Verringerung der Wartungskosten durch geringere Ablagerungen in Triebwerken sowie eine verbesserte Treibstoffeffizienz durch einen höheren Energiegehalt pro kg Treibstoff. Auf der Kostenseite fallen Aufwendungen für Infrastrukturmaßnahmen im Tanklager sowie der erhöhte Logistik-Aufwand bei der Betankung am stärksten ins Gewicht. Zu berücksichtigen sind ebenfalls die Kosten für die (Re-)Zertifizierung von Flugzeugmustern für die Nutzung von 100 % SPK-SAF und die Umrüstung der Bestandsflotte.

Da zum jetzigen Zeitpunkt keine genauen Informationen zu den Treibstoffeigenschaften von 100 % SPK-SAF vorliegen (z. B. spezifischer Energiegehalt/Energiedichte, Verbrennungseigenschaften, Produktionskosten, Anpassungserfordernisse der Flugzeuge), sind die quantitativen Bewertungen mit großen Unsicherheiten behaftet. Weder die Literaturrecherche noch die Stakeholder-Befragung konnten genauere quantitative Informationen zu den Kosten und dem Nutzen liefern. Daher erfolgt die Nutzen-Kosten-Bewertung auf Basis von bestmöglichen Schätzungen auf Basis der vorliegenden Informationen. Es ist zumindest möglich, Größenordnungen und Sensitivitäten von Nutzen und Kosten darzustellen, um eine Bewertung des Einsatzes von 100 % SPK-SAF vornehmen zu können.

6.2.1 Investitions- und Logistikkosten

Die bedeutsamsten Kostenkomponenten bei der Einführung von 100 % SPK-SAF sind die erforderlichen Modifikationen im Tanklager, um eine segregierte Versorgung mit dem neuen Treibstoff unabhängig von der bestehenden Versorgung mit Jet A-1 sicherzustellen und die Logistikkosten für die Flugzeugbetankung.

Für die Anpassung des Tanklagers erscheinen für einen großen Verkehrsflughafen Kosten in Höhe eines mittleren zweistelligen Millionenbetrags realistisch. Der geplante Neubau des Tanklagers am Flughafen Düsseldorf mit einer Lagerkapazität von 9.000 Kubikmetern wird mit 70 Mio. € veranschlagt (Flughafen Düsseldorf 2025a). Im Rahmen des von der EU geförderten Projektes „ALIGHT“ wurde die zielgerichtete SAF-Nutzung am Flughafen Kopen-

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

hagen untersucht, die ebenfalls eine segregierte Treibstoffversorgung und damit eine Erweiterung/Modifikation des Tanklagers erfordern würde. Die in diesem Projekt befragten Stakeholder schätzen die Kosten des Ausbaus des Tanklagers auf etwa 40 Mio. €. (Müller et al. 2025). Problematisch in diesem Kontext ist die Flächenverfügbarkeit an großen Verkehrsflughäfen, da ein Ausbau des Tanklagers, um die benötigten Kapazitäten für die Versorgung mit 100 % SPK-SAF zur Verfügung zu stellen, nicht uneingeschränkt möglich ist bzw. die Umwidmung von Flächen mit entsprechenden Opportunitätskosten verbunden ist. Ebenfalls aus betriebswirtschaftlicher Sicht herausfordernd ist die Eigenschaft, dass Investitionen in ein 100 % SPK-SAF-Tanklager weitgehend sprunghaft bzw. unteilbar sind: Es wird vorab eine hohe Investitionssumme benötigt, um ein entsprechendes Tanklager zu errichten, welches aber in der Anfangsphase überdimensioniert und wenig ausgelastet ist. Die Auslastung steigt erst im Zeitablauf mit höherer Verfügbarkeit von 100 % SPK-SAF und einer größeren Anzahl kompatibler Flugzeuge. Dies stellt ein erhebliches Problem dar im Hinblick auf die Amortisation einer solchen Investition.

Um die Amortisation einer einmaligen Investition zu berechnen, kann die Annuitätenmethode verwendet werden. Hierzu werden die Kapitalkosten als Verzinsung auf das eingesetzte Kapital und die Laufzeit (typischerweise die wirtschaftliche Lebensdauer eines Anlagegutes) benötigt. Als repräsentativer Kapitalkostensatz wird der weighted average cost of capital (WACC) der Fraport AG in Höhe von aktuell 8 % herangezogen (Fraport 2025a). Als wirtschaftliche Lebensdauer wird eine Zeitspanne von 30 Jahren angenommen. Bei einer Investition in Höhe von 50 Mio. € für ein ausreichend großes 100 % SPK-SAF-Tanklager, welches auch im Zeitablauf ein Wachstum der Nutzung von 100 % SPK-SAF erlaubt, würde dies jährliche Finanzierungs- und Abschreibungsaufwendungen von 4,44 Mio. € bedeuten. Hinzu kommen noch die Betriebs- und Unterhaltskosten der duplizierten Tankinfrastruktur.

Für die Betankung von Flugzeugen mit 100 % SPK-SAF wäre an Flughäfen, die heute über ein Unterflur-Betankungssystem verfügen, die zusätzliche Investition von Vorfeld-Tankfahrzeugen anzusetzen. Konventionell (mit Verbrennungsmotor) betriebene Fahrzeuge liegen in einer Größenordnung von 500.000 €, jene mit elektrischem Antrieb deutlich darüber. An Flughäfen, die über kein Unterflur-Betankungssystem verfügen, können eventuell bestehende Tankfahrzeuge für die Betankung mit 100 % SPK-SAF umgerüstet bzw. zweckgebunden werden, um zusätzliche Investitionskosten zu reduzieren.

Werden annualisierte Investitionskosten für Tanklager und Fahrzeuge sowie die potentiell erhöhten Logistikkosten (Betriebskosten der Fahrzeuge, Unterhalt, Personalkosten usw.)

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

zusammengerechnet, müsste der Nutzen aus dem Einsatz von 100 % SPK-SAF für einen großen Verkehrsflughafen mindestens in einer Größenordnung von 6 Mio. € liegen, damit die Kosten übertroffen werden. Hinzu kommen jedoch auch die Kosten für Fluggesellschaften für Umrüstung von Flugzeugen, Zertifizierungskosten und potentiell höhere betriebliche Komplexität, wenn nur bestimmte Flüge mit 100 % SPK-SAF betankt werden sollen.

Für den Aufbau einer **physischen Doppelstruktur** bedeuten die hier gewonnen Erkenntnisse, dass das Nutzen-Kosten-Verhältnis kritisch zu bewerten ist. Der Nutzen, der insbesondere durch die Verringerung von Nicht-CO_2-Effekten entsteht, ist sehr stark auf wenige Flughäfen konzentriert. Beim Aufbau einer physischen Doppelstruktur würden jedoch an jedem Flughafen hohe Investitions- und Betriebskosten entstehen. Auch wenn an den kleineren Flughäfen aufgrund geringerer Treibstoffnachfrage kleinere und günstigere Infrastrukturen aufgebaut werden könnten, würden sich die deutschlandweiten Gesamtkosten schätzungsweise auf einen mittleren dreistelligen Millionenbetrag belaufen. Dies steht im Kontrast zu den relativ geringen Nicht-CO_2-Effekten von Flügen, die von kleineren Flughäfen starten. Zudem ist zumindest in der Anfangsphase fraglich, ob bei einer geringen Anzahl an zur Verfügung stehenden Flugzeugen, die 100 % SPK-SAF-kompatibel sind, diese Flugzeuge auch an allen Flughäfen starten und landen, d. h. es besteht das Investitionsrisiko, dass 100 % SPK-SAF-Infrastruktur geschaffen wird, die potentiell über mehrere Jahre nicht intensiv genutzt wird.

Ein Unterschied zwischen den Szenarien 1A, 1B und 1C (Abbildung 7) besteht im Wesentlichen bei den Zeitpunkten, wann die Investitionen getätigt werden müssen. Die nachgefragten Mengen an 100 % SPK-SAF unterscheiden sich zwischen den Szenarien 1A und 1B nicht besonders stark, sodass für beide Szenarien in etwa eine ähnlich dimensionierte Infrastruktur gebaut werden müsste, auch im Hinblick auf das Wachstum über die Zeit. Sollten 100 % SPK-SAF-kompatible Flugzeuge erst ab 2040 eingeführt werden (Szenario 1C) würde zur Erfüllung der SAF-Quoten bis 2055 auch Drop-in-SAF benötigt. Die Infrastruktur zur Distribution von 100 % SPK-SAF könnte somit später aufgebaut werden. Allerdings würden auch die Nutzendimensionen erst später realisiert werden.

Die Abwärtskompatibilität der SPK-SAF zertifizierten Flugzeuge vorausgesetzt, erscheint es aus wissenschaftlicher Sicht daher sinnvoll, dass der Einsatz von 100 % SPK-SAF an wenigen Flughäfen konzentriert wird und die Stakeholder der Luftverkehrswirtschaft über ein **Book & Claim**-Verfahren eine möglichst wettbewerbsneutrale und gleichzeitig klimaoptimale Lösung für den Einsatz von 100 % SPK-SAF umsetzen können. Die Anforderungen in

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

den unterschiedlichen Szenarien 2A, 2B und 2C (Abbildung 7) betreffen auch hier die Dimensionierung der Infrastruktur an den jeweiligen Flughäfen. Wird die 100 % SPK-SAF-Nutzung auf wenige Flughäfen konzentriert, müsste die Infrastruktur dort größer dimensioniert werden, was jedoch in Summe geringe Kosten als bei der Duplikation der physischen Infrastruktur verursachen dürfte, da Größenvorteile realisiert werden können und bestimmte Fixkosten (z. B. für Planung und Genehmigung) nur an wenigen Flughäfen anfallen würden statt an allen.

6.2.2 Nutzendimension „Klima“

Die bedeutsamste Nutzenkomponente beim Einsatz von 100 % SPK-SAF ist die Reduktion der Nicht-CO_2-Effekte. Mithilfe des DLR-Tools FlightClim können die Nicht-CO_2-Effekte des von Deutschland ausgehenden Luftverkehrs in unterschiedlichen Klimametriken quantifiziert werden. Zur besseren Vergleichbarkeit ist es häufig sinnvoll, die Nicht-CO_2-Effekte als CO_2-Äquivalente darzustellen. Dies ermöglicht im Rahmen einer ökonomischen Bewertung auch die Monetarisierung dieser Effekte unter Verwendung der in der Literatur weit verbreiteten Schadenskosten pro t CO_2 und deren Vergleich mit anderen Nutzen- und Kostenkategorien, die ebenfalls monetär dargestellt werden.

Abbildung 12 zeigt die CO_2-Äquivalente für die von Deutschland aus abgehenden Flüge im Jahr 2024, differenziert nach direkten CO_2-Emissionen als auch den Nicht-CO_2-Effekten, dargestellt in der Klimametrik $EAGWP_{100}$. Die Gesamtsumme der CO_2-Emissionen betragen 26,3 Mio. t, der Nicht-CO_2-Effekte 67,8 Mio. t. CO_2-Äquivalente. Somit betragen die Nicht-CO_2-Effekte etwa das 2,6-fache der CO_2-Effekte. Die Abbildung zeigt die erhebliche Konzentration sowohl der direkten CO_2-Emissionen als auch der CO_2-Äquivalente der Nicht-CO_2-Effekte auf die Flughäfen Frankfurt/Main und München. Zudem ist die relativ hohe klimatische Bedeutung der Flughäfen Leipzig/Halle, Köln/Bonn und Hahn aufgrund des dort jeweils hohen Anteils an Luftfrachtverkehren erkennbar.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

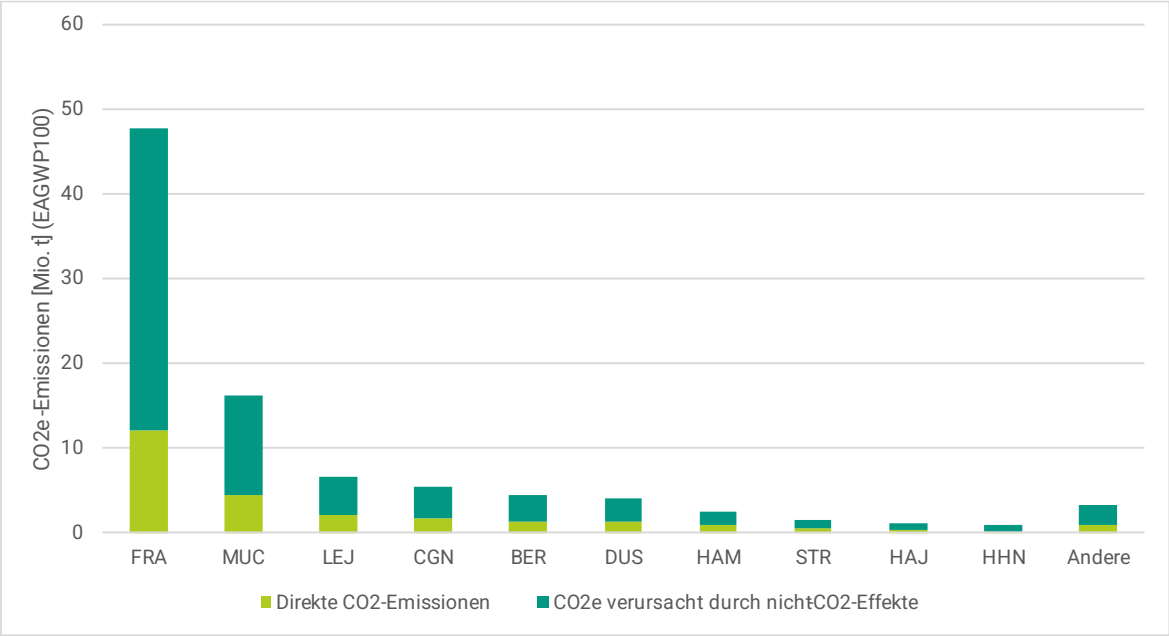

Abbildung 12: CO2e-Emissionen in Mio. t (EAGWP100) basierend auf FlightClim für Abflüge ab den deutschen Flughäfen in 2024 (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Verhältnis von Nicht-CO_2-Effekten zu CO_2-Effekten hängt wesentlich von der gewählten Methodik ab, um Nicht-CO_2-Effekte in CO_2-Äquivalente umzurechnen. Wird bspw. ein kürzerer Zeithorizont gewählt, würden die kurzlebigen Effekte (bspw. Cirruswolkenbildung aus Kondensstreifen) relativ zu langlebigen Effekten (CO_2) stärker gewichtet. Das Efficacy-weighted Global Warming Potential mit einem Zeithorizont von 100 Jahren ($EAGWP_{100}$) wird in der wissenschaftlichen Literatur als ein sinnvolles Maß zur Bewertung der Auswirkungen neuer Flugzeug- oder Treibstofftechnologien angesehen (Megill et al. 2024), allerdings gibt es an dieser Stelle keine eindeutige, objektiv richtige Wahl der Klimametrik.

Bzgl. des Reduktionspotentials der Nicht-CO_2-Effekte durch den Einsatz von aromaten- und schwefelfreiem Treibstoff hat die ECLIF3-Studie gezeigt, dass eine Minderung der Nicht-CO_2-Effekte um 26 % im gesamten Weltluftverkehr (Basisjahr 2018) im Vergleich zum Einsatz von fossilem Treibstoff erzielt werden kann (Märkl et al. 2024). Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich somit der ökonomische Nutzen des Einsatzes von 100 % SPK-SAF in einer ersten Näherung durch den Grad der Nutzung (Anteil an Flügen) und Annahmen zu den Schadenskosten der Emissionen (CO_2 bzw. CO_2-Äquivalente) bestimmen. Abbildung 13 zeigt die Höhe des ökonomischen Nutzens der Reduktion von Nicht-CO_2-Effekten in Abhängigkeit des Nutzungsgrads von 100 % SPK-SAF und den Annahmen von CO_2-Schadenskosten pro Emissionseinheit.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

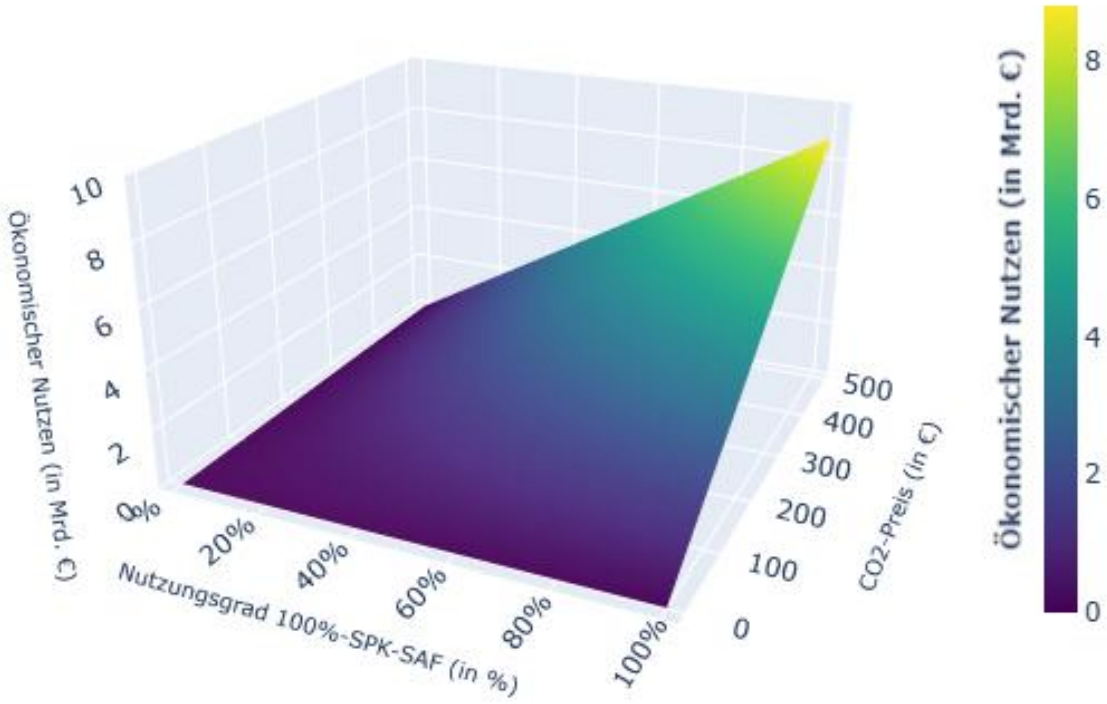

Abbildung 13: Abschätzung des ökonomischen Nutzens der Reduktion von Nicht-CO_2-Effekten in Abhängigkeit des Nutzungsgrads von 100 % SPK-SAF und des CO_2-Preises (Quelle: Eigene Darstellung.)

Unter der Annahme, dass 100 % SPK-SAF nicht priorisiert auf Flügen mit besonders hohen Nicht-CO_2-Effekten priorisiert eingesetzt wird (siehe hierzu die Diskussion in Kapitel 6.4), läge der ökonomische Nutzen der Vermeidung von Nicht-CO_2-Effekten etwa beim Einsatz von 100 % SPK-SAF auf 50 % der Abflüge von deutschen Flughäfen bei einem angenommenen CO_2-Preis von 100 € pro Jahr im Vergleich zur Nutzung von fossilem Treibstoff bei etwa 880 Mio. €. Die Höhe des in der Realität umgesetzten Klima-Nutzens kann jedoch niedriger ausfallen, z. B. wenn durch operationelle Maßnahmen Kondensstreifen durch andere Routen oder Flughöhen vermieden werden. Daher ist bei einer intensiveren Maßnahmenbewertung die Wechselwirkung unterschiedlicher Vermeidungsstrategien von Nicht-CO_2-Effekten zu untersuchen.

Eine gesonderte Betrachtung zur Reduktion der CO_2-Lebenszyklusemissionen von 100 % SPK-SAF im Vergleich zu fossilem Treibstoff erfolgt nicht, da in dieser Studie davon ausgegangen wird, dass die in der ReFuelEU-Aviation-Verordnung genannten Quoten durch 100 % SPK-SAF erfüllt werden. Das bedeutet, dass die CO_2-Reduktion durch den Einsatz von SAF als Drop-in-Treibstoff im aktuellen regulatorischen Rahmen einer generellen Beimischung oder in der Form der Nutzung von 100 % SPK-SAF quasi identisch ist.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

6.2.3 Nutzendimension „lokale Luftqualität“

Eine weitere bedeutende Nutzenkomponente im Zusammenhang mit dem Einsatz von 100 % SPK-SAF ist die Reduktion von Luftschadstoffen im Umfeld der Flughäfen. Insbesondere Feinstaub und Schwefeloxide gelten als gesundheits- und umweltgefährdend. Untersuchungen der NASA haben ergeben, dass sich die Masse der emittierten Feinstaubpartikel beim Einsatz reiner synthetischer Fischer-Tropsch-Treibstoffe im Vergleich zu JP-8-Treibstoff[4] um 86 % senken lässt (Beyersdorf et al. 2014). Die Autoren der Studie geben an, dass diese Erkenntnisse auf alle praktisch schwefel- und aromatenfreie Treibstoffe übertragbar sind, unabhängig von den eingesetzten Rohstoffen (Beyersdorf et al. 2014). In einer weiteren Studie wurden Partikelreduktionen von 70 % im Vergleich zu fossilen Treibstoffen für einen aromatenfreien ATJ-Treibstoff nachgewiesen. Dieser entsprach nicht den ASTM-Spezifikationen und wurde in einem Triebwerk auf dem Prüfstand getestet (Schripp et al. 2019). Rohkamp et al. (2025) haben gezeigt, dass die Reduktion der Masse des Feinstaubs durch die Verbrennung von aromaten- und schwefelfreien Treibstoffen in erheblichem Maße durch eine Verkleinerung der Partikel zustande kommt. Aufgrund der Herstellungsverfahren gilt SPK-SAF als praktisch schwefelfrei, d. h., die Problematik der Emission von Schwefeloxiden tritt nicht auf.

Die Nutzenbewertung bei der Verbesserung der lokalen Luftqualität beim Einsatz von 100 % SPK-SAF hängt maßgeblich von zwei Aspekten ab. Einerseits stellt sich die Frage, ob die konzentrierte Nutzung von 100 % SPK-SAF einen relativ gesehen höheren oder niedrigeren Effekt aufweist als eine generelle Beimischung. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl Partikelmasse als auch Partikelzahl relativ linear mit dem Aromaten- bzw. Wasserstoffgehalt im Treibstoff zusammenhängen (Brem et al. 2015). Daher wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass es für die Reduktion der Partikel global betrachtet unerheblich ist, ob SAF in Form von 100 % SPK-SAF oder als Blend mit deutlich geringeren SBC-Anteilen eingesetzt wird. Andererseits wäre jedoch der Nutzen dann maximal, wenn die Partikelreduktion an Flughäfen in urbanen Räumen umgesetzt würde, sodass eine größere Anzahl von Anwohnern von einer Emissionsreduktion profitieren könnte.

[4] JP-8 wird als militärischer Treibstoff verwendet und ist mit Jet A-1 vergleichbar, enthält jedoch zusätzliche Additive.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Informationen zur emittierten Masse an Feinstaub werden von den Flughäfen i.d.R. nur selten veröffentlicht, da aus Sicht der gesetzlichen Vorgaben und aus dem Interesse der Anwohner die Konzentrationswerte im Flughafenumfeld von größerem Interesse sind. Die folgende Tabelle 3 zeigt die Masse des emittierten Feinstaubs PM_{10} einer begrenzten Auswahl deutscher Verkehrsflughäfen.

Flughafen	Masse PM_{10}	Jahr	Quelle	Bemerkungen
Berlin-Brandenburg	6 t	2023	Winkler et al. 2026	
Düsseldorf	9,41 t	2024	Flughafen Düsseldorf 2025b	Summe aus PM_{10}, $PM_{2,5}$ und NVPM, LTO-Zyklus + APU
Frankfurt/Main	23,62 t	2024	Fraport 2025b	

Tabelle 3: Feinstaubemissionen an ausgewählten deutschen Flughäfen

Die Gesamtmenge des durch den Luftverkehr im LTO-Zyklus emittierten Feinstaubs wird durch den German Informative Inventory Report des Umweltbundesamts dargestellt (Umweltbundesamt 2025). Demnach wurden im LTO-Zyklus des innerdeutschen und internationalen Luftverkehrs in Deutschland im Jahr 2023 68,6 t Feinstaub (PM) und 32,8 t Black Carbon (Feinstaubpartikel aus Kohlenstoff) emittiert. Aufgrund des verhältnismäßig hohen Schwefelgehalts im fossilen Jet A-1 kommen noch 577,8 t Schwefeloxide (SO_x) hinzu.

Die ökonomische Bewertung der Schadenskosten von Feinstaub und Schwefeloxiden ist hochkomplex. Sie folgt typischerweise einer Wirkungskette, die aus der Modellierung der Emissionen, der Ausbreitung und der Konzentration und den gesundheitlichen Wirkungen auf die betroffene Bevölkerung besteht. Anschließend erfolgt eine Abschätzung der Schadenskosten durch die monetäre Bewertung von Morbidität und Mortalität.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Emissionsart	Schadenskosten (in €$_{2021}$ pro t), Environmental Prices Handbook	Schadenskosten BVWP (in €$_{2012}$ pro t)
Feinstaub (PM_{10})	44.300	122.800 bis 364.100
Feinstaub ($PM_{2.5}$)	81.200	
Stickoxide (NO_x)	19.300	15.400
Flüchtige organische Verbindungen (NMVOC)	2.160	1.700 (HC)
Schwefeldioxid (SO_2)	26.600	13.200
Kohlenmonoxid (CO)	16,50	62

Tabelle 4: Schadenskosten für unterschiedliche Luftschadstoffe (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis CE Delft 2024 und PTV Planung Transport Verkehr AG et al. 2016)

Tabelle 4 zeigt die durchschnittlichen Schadenskosten von Luftschadstoffen. Dargestellt sind die Werte des europäischen Environmental Prices Handbook (CE Delft 2024) und des Methodenhandbuchs der Bundesverkehrswegeplanung 2030 (PTV Planung Transport Verkehr AG et al. 2016). Die Schadenskosten setzen sich dabei unter anderem aus dem Einfluss der Schadstoffe auf die menschliche Gesundheit, der Umwelt, wie die Veränderungen der Biodiversität, oder Materialien und Gebäuden zusammen (CE Delft 2024). Die Spannbreiten der Schadenskosten sind teilweise relativ groß, so etwa bei den PM_{10}/$PM_{2,5}$, die bei CE Delft zwischen 44.300 €/t (PM_{10}) und 81.200 €/t ($PM_{2,5}$) liegen und im Methodenhandbuch der BVWP 2030 zwischen 122.800 € (außerorts) und 364.100 €/t (innerorts). Schwefeldioxid wird bei CE Delft wiederum mit 26.600 €/t deutlich höher bewertet als im Methodenhandbuch der BVWP 2030 (13.200 €).

Bei PM-Emissionen durch den Luftverkehr im LTO-Zyklus in einer Größenordnung von etwa 100 t pro Jahr liegen die Umweltkosten bei etwa 4,4 bis 12,3 Mio. €. Die Schadenskosten der Schwefeloxid-Emissionen liegen in einer Größenordnung zwischen 7,6 und 15,4 Mio. €.

Durch den Einsatz von 100 % SPK-SAF ließen sich die Schadenskosten deutlich senken. Dabei sind allerdings folgende Punkte zu berücksichtigen:

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

- Bereits durch die SAF-Anteile durch die generelle Beimischung von SAF gemäß der ReFuelEU Aviation-Verordnung verbessert sich die Luftqualität, d. h. der quantifizierte Nutzengewinn ergibt sich nur aus dem Vergleich zwischen genereller Beimischung von SAF und den hier betrachteten Szenarien.
- Die hier genannten lokalen Schadstoffemissionen beinhalten sowohl Starts als auch Landungen in Deutschland. Der Nutzen für die lokale Luftqualität durch die Nutzung von 100 % SPK-SAF könnte dann maximal ausfallen, wenn die 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeuge nicht nur in Deutschland, sondern auch im Ausland mit 100 % SPK-SAF betankt werden können.
- Je nach exponierter Bevölkerung können die effektiven Umweltkosten höher oder niedriger als die von CE Delft oder dem Methodenhandbuch der BVWP ausgewiesenen Mittelwerte ausfallen.
- Der Anteil von 100 % SPK-SAF am gesamten Treibstoffverbrauch determiniert schlussendlich den Nutzen für die lokale Luftqualität.

6.2.4 Weitere Nutzendimensionen

Eine weitere Nutzenkategorie könnten verringerte Wartungskosten für Triebwerke sein. Aufgrund der saubereren Verbrennung besteht eine Tendenz, dass sich weniger Ablagerungen im Triebwerk bilden, sodass sich Wartungsintervalle potentiell verlängern und Wartungskosten sinken (Boehm et al. 2024). In der Literatur und in der Stakeholder-Befragung konnten Experten die Einsparungen jedoch noch nicht quantifizieren, unter anderem, weil Langzeiterfahrungen mit SAF mit hohem SBC-Anteil noch fehlen.

Zuletzt könnte eine höhere Energiedichte (Energie pro Volumen) und ein höherer spezifischer Energiegehalt (Energie pro Masse) von 100 % SPK-SAF als weitere Nutzenkategorie bewertet werden. Boehm et al. (2024) weisen darauf hin, dass sich die Energiedichte bzw. der spezifische Energiegehalt beim Design eines neuen Treibstoffstandards gezielt erhöhen lässt. Im Kontext von 100 % SPK-SAF erscheint eine Verbesserung der Treibstoffeffizienz um etwa 0,3 % möglich, wobei die Effizienzsteigerung von Flugzeugtyp und Streckenlänge abhängt (Boehm et al. 2024). Durch einen höheren spezifischen Energiegehalt kann die Abflugmasse reduziert werden bzw. bei gleicher Abflugmasse kann anteilig mehr Nutzlast geladen werden.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

6.3 Ökonomische Implikationen bei der Nutzung von 100 % SPK-SAF

6.3.1 Beschreibung des Status Quo der SAF-Nutzung

Die Nutzung von 100 % SPK-SAF ist im aktuellen regulatorischen Rahmen der ReFuelEU-Aviation-Verordnung nicht vorgesehen. Ziel des EU-SAF-Mandats ist es, an allen größeren Flughäfen SAF in Höhe der im Zeitablauf ansteigenden Beimischungsquoten zu erfüllen. Ein wesentlicher Aspekt des aktuellen regulatorischen Rahmens ist es, dass die Inverkehrbringer von Treibstoff und nicht die Fluggesellschaften die Verpflichtungen der Beimischungsquote erfüllen müssen. Übergangsweise können die Inverkehrbringer die Gesamtmenge des in der gesamten EU eingesetzten SAF verrechnen (mass balancing), d. h. die Quote muss zunächst nicht an jedem Flughafen individuell erfüllt werden. Fluggesellschaften berichten, dass die Treibstofflieferanten einheitliche Zuschläge erheben, um die Mehrkosten für das eingesetzte SAF abzufedern. Die Fluggesellschaften haben jedoch nicht die Garantie, dass sie auch physisch jene SAF-Menge erhalten, für die sie einen Aufschlag bezahlt haben.

Beim Übergang auf 100 % SPK-SAF stellt sich daher nun die Frage, wie der aktuelle regulatorische Rahmen angepasst werden könnte, um eine Maximierung der Nutzendimensionen (insbesondere der Verringerung der Nicht-CO_2-Effekte) zu erzielen, gleichzeitig aber die Umsetzung möglichst wettbewerbsneutral zu gestalten, um Fluggesellschaften, die 100 % SPK-SAF einsetzen wollen, nicht einseitig mit hohen Kosten zu belasten.

6.3.2 Physische Duplikation der Infrastruktur

Bei einer **physischen Duplikation der Infrastruktur** an allen relevanten Flughäfen hätten die Fluggesellschaften die Möglichkeit, 100 % SPK-SAF für ihre kompatiblen Flugzeuge zu tanken.

Bei großen Fluggesellschaften mit einer gemischten Flotte aus 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen und jenen, die noch nicht 100 % SPK-SAF-kompatibel sind, könnte die Erfüllung der SAF-Quote durch die Nutzung von 100 % SPK-SAF auf jenen Flügen erfolgen, die einerseits 100 % SPK-SAF-kompatibel sind und andererseits besonders hohe Nicht-CO_2-Effekte aufweisen.

Mit diesem Ansatz sind jedoch mehrere Probleme verbunden: Erstens würde es eine Umstellung der verpflichteten Einheiten von den Inverkehrbringern zu den Fluggesellschaften erfordern, damit die Quote auf Airline-Ebene erfüllt werden kann. Zweitens wäre das genaue

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

Treffen der Quote schwierig. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die Anzahl der 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeuge begrenzt ist. In diesem Fall müsste zusätzlich SAF zur Quotenerfüllung als Drop-in-Treibstoff für die konventionelle Flotte genutzt werden. Fluggesellschaften, die bereits über viele 100 % SPK-SAF-kompatible Flugzeuge verfügen, hätten jedoch kein Interesse SAF als Drop-in-Treibstoff über die Erfüllung der SAF-Quote hinaus, die mit 100 % SPK-SAF erfolgt ist, zu tanken. In der Folge müssten für eine optimale Treibstoffnutzung nicht nur zwei Treibstoffarten (100 % SPK-SAF und fossiles Kerosin) getrennt angeboten werden, sondern zusätzlich auch noch Drop-in-Treibstoff mit einem SAF-Anteil. Drittens würde ohne weitere Mechanismen eine Fluggesellschaft, die ausschließlich über 100 % SPK-SAF-kompatible Flugzeuge verfügt, keinen direkten Anreiz haben, mehr 100 % SPK-SAF einzusetzen, als es die Quote vorschreibt. Viertens würde dieser Ansatz alleine keine unmittelbaren Anreize geben, 100 % SPK-SAF-kompatible Flugzeuge auf Routen mit besonders hohen Nicht-CO_2-Effekten einzusetzen und diese dann auch mit 100 % SPK-SAF zu betreiben. Dies würde ebenfalls zusätzliche, flankierende Maßnahmen bzw. Instrumente erfordern. Zu guter Letzt ist beim Aufbau einer physischen Doppelstruktur für die gleichzeitige Versorgung mit konventionellem und Non-drop-in-Treibstoff zu berücksichtigen, dass die Tankinfrastrukturen nutzerfinanziert sind. Eine reine Nutzerfinanzierung der aufgezeigten notwendigen Investitionen zur Infrastrukturanpassung würde eine enorme zusätzliche Kostenbelastung der deutschen Luftverkehrswirtschaft bedeuten.

Für eine erfolgreiche, umfassende, klimatologisch optimale und wettbewerbsneutrale Einführung von 100 % SPK-SAF müsste daher ein Airline-übergreifendes Anreizmodell geschaffen werden, welches in Form eines **Umlage-** oder eines **Book & Claim**-Verfahrens erfolgen könnte.

6.3.3 Umlageverfahren

Ein umfassendes **Umlageverfahren** müsste sich von der heute angewendeten Praxis unterscheiden, bei der die Fluggesellschaften in der Regel einen SAF-Aufschlag auf den Treibstoffpreis bezahlen, den die Treibstofflieferanten verrechnen, um die Mehrkosten für SAF abzudecken. Die Stakeholder-Interviews haben ergeben, dass diese aktuelle Praxis von den Fluggesellschaften kritisiert wird, da keine Garantie gegeben wird, dass das SAF auch physisch an die jeweilige Airline ausgeliefert wird. Denn nur dann können sich die jeweiligen Fluggesellschaften die SAF-Nutzung im EU EHS anrechnen lassen. In einem System der

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

gezielten 100 % SPK-SAF-Nutzung muss der Treibstoff physisch bei den jeweiligen Nutzern ankommen, während Kosten möglichst aufzuteilen wären.

Eine Möglichkeit wäre ein Umlageverfahren, bei dem die Mehrkosten der SAF-Nutzung auf alle Fluggesellschaften bzw. den Passagieren und ggf. den Versendern von Luftfracht verteilt werden und damit die Kosten für einzelne Fluggesellschaften, die gezielt 100 % SPK-SAF nutzen, abgefedert werden. Ein solches System wurde bereits von Airline-Interessenverbänden für den aktuellen regulativen Rahmen von ReFuelEU Aviation vorgeschlagen (Steer 2025). Auch außerhalb Europas werden Umlageverfahren zur Finanzierung der SAF-Einführung diskutiert. In Zukunft soll ein derartiges System in Singapur umgesetzt werden (Civil Aviation Authority of Singapore 2025).

Ein Umlageverfahren würde sich auch potentiell für die gezielte SAF-Nutzung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eignen. Die gezielte Nutzung von 100 % SPK-SAF auf den besonders klimasensitiven Flügen würde jene Airlines besonders stark belasten, die diese Flüge durchführen und damit die Akzeptanz und Realisierungswahrscheinlichkeit negativ beeinflussen. Würden die Kosten gleichmäßig auf alle Airlines bzw. Passagiere verteilt werden, könnte dies die Akzeptanz verbessern. Ein solches Verfahren müsste einen möglichst großen geografischen Raum (z. B. die gesamte EU) abdecken, um eine gerechte Verteilung von Kosten und Nutzen zu erzielen. Mehrkosten der 100 % SPK-SAF-Nutzung würden somit gleichmäßig von allen Passagieren und ggf. den Versendern von Luftfracht getragen werden. Fluggesellschaften, die 100 % SPK-SAF nutzen, könnten durch die Umlage den Treibstoff zu einem Preis beziehen, der das Niveau von fossilem Kerosin bzw. einem Drop-in-SAF-Blend entspricht.

Eine offene Frage im Kontext des Umlageverfahrens wäre noch die Anrechnung der Emissionsreduktion durch die 100 % SPK-SAF-Nutzung im EU EHS bzw. CORSIA. Im bestehenden System können nur jene Fluggesellschaften die Emissionsreduktion aus der Nutzung von SAF im EU EHS geltend machen, die das SAF auch physisch getankt haben. Dies würde bei der Nutzung von 100 % SPK-SAF auch zutreffen – nach geltendem Recht würde die Fluggesellschaft dann eine vollständige Freistellung von der Verpflichtung zur Abgabe von Emissionsrechten im EU EHS erhalten bzw. könnte zukünftig die Abgabeverpflichtung von Offsets reduzieren, wenn 100 % SPK-SAF in CORSIA angerechnet werden würde (CORSIA Eligible Fuels, vgl. ICAO 2025). Dies wäre jedoch dahingehend ungerecht, als dass die 100 % SPK-SAF-Nutzung durch das Umlageverfahren von anderen Fluggesellschaften bzw. deren Passagieren bezahlt wurde. Daher müsste der Nutzen aus der Verwendung von

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

100 % SPK-SAF wieder an jene Stakeholder zurückfließen, die den Treibstoff finanziert haben.

Für das Funktionieren des Umlageverfahrens wäre es schlussendlich unerheblich, an welchen bzw. wie vielen Flughäfen 100 % SPK-SAF verfügbar ist, wenn alle abfliegenden Fluggesellschaften bzw. deren Passagiere/Versender von Luftfracht in das System einbezahlen und die Nutzer von 100 % SPK-SAF davon profitieren. Eine vollständige physische Doppelstruktur für die Bereitstellung von 100 % SPK-SAF wäre somit nicht erforderlich.

6.3.4 Book & Claim

Alternativ zu einem umfassenden, verpflichtenden Umlageverfahren könnte 100 % SPK-SAF in ein **Book & Claim**-Verfahren für einen freiwilligen Teilnehmerkreis umgesetzt werden. Bei Book & Claim erfolgt eine Trennung zwischen der physischen Treibstoffnutzung und den dahinterliegenden Finanzflüssen. Der Vorteil eines solchen Ansatzes liegt aus ökonomischer Sicht darin, dass 100 % SPK-SAF nicht an allen Flughäfen zur Verfügung gestellt werden müsste, aber dennoch alle Fluggesellschaften (auch jene ohne 100 % SPK-SAF-kompatible Flugzeugflotte) von dem daraus generierten Nutzen potentiell profitieren können. Erforderlich hierfür ist jedoch eine Quantifizierung und Verbriefung von den generierten Benefits, sodass jene Stakeholder, die für die 100 % SPK-SAF-Nutzung zahlen, diese auch für sich verbuchen können. Die Finanzierung der 100 % SPK-SAF-Nutzung bei anderen Airlines könnte somit auf die eigene Erfüllung der SAF-Quote angerechnet werden. Auch in diesem Ansatz müsste wahrscheinlich die Ebene der verpflichteten Einheiten von den Inverkehrbringern des Treibstoffs auf die Nutzer (Flugzeugbetreiber) übergehen. Die Benefits könnten auch im Rahmen von marktbasierten Maßnahmen wie dem EU EHS oder CORSIA durch eine Reduktion der Verpflichtung zur Abgabe von Emissionsberechtigungen bzw. Offsets oder die Generierung von Carbon Credits gutgeschrieben werden. Dies wäre insbesondere durch den Nutzen, der durch die Verminderung von Nicht-CO_2-Effekten entsteht, eine Option.

Die Treibstofflogistik könnte durch einen solchen Ansatz erheblich vereinfacht werden, da 100 % SPK-SAF nur noch an wenigen Flughäfen angeboten werden müsste. Sofern dort eine ausreichende Anzahl an kompatiblen Flugzeugen betankt wird, könnten die Infrastrukturinvestitionen begrenzt werden. Die Kosten der Nutzung von 100 % SPK-SAF könnte jedoch auf eine größere Anzahl an Stakeholdern verteilt werden, die Interesse an der Minderung von Nicht-CO_2-Effekten haben.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

6.4 Priorisierung individueller Flüge

Insbesondere in den ersten Jahren nach Einführung von 100 % SPK-SAF an Flughäfen wird die Menge des nutzbaren SPK-SAFs durch die Verfügbarkeit kompatibler Verkehrsflugzeuge begrenzt sein. Wie die Ergebnisse gezeigt haben, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass durch Flottenwachstum sowie Erneuerung der Bestandsflotte 100 % SPK-SAF fähige Flugzeuge bereits nach einigen Jahren die verfügbare Menge dieses Treibstoffs abdecken können. Wenn der Bedarf der 100 % SPK-SAF-fähigen Flugzeuge die durch ReFuelEU Aviation definierte Menge übersteigt, stellt sich die Frage, welche Flüge mit 100 % SPK-SAF betankt werden. Eine Möglichkeit ist die Priorisierung anhand der Klimawirkung einzelner Flüge. Da die Klimakosten den größten Faktor bei der Bewertung der gesellschaftlichen Kosten des Luftverkehrs darstellen, kann eine effiziente Nutzung des 100 % SPK-SAF dazu führen, die Klimakosten signifikant zu senken.

Um die klimaintensivsten Abflüge zu bestimmen, wird das DLR Tool FlightClim v1.0 zur Abschätzung der CO_2-Äquivalente jedes simulierten Abfluges ab deutschen Verkehrsflughäfen genutzt. Die Datengrundlage bilden hier die Abflüge des Jahres 2024 aus der deutschen Luftverkehrsstatistik, welche mit den Wachstumsraten von DEPA2070 hochgerechnet wurden. Für das Jahr 2040 ergeben sich für die Szenarien ReCert Fleet sowie NextGen 2035 durch die höhere Anzahl von 100 % SPK-SAF kompatibler Flugzeuge höhere potentielle Bedarfsmengen an SPK-SAF als eigentlich durch die ReFuelEU Aviation-Verordnung vorgegeben sind. Bei der Priorisierung der klimaintensivsten Flüge zeigt sich hierbei insbesondere, dass die Bedarfsmengen durch die größeren Flughäfen in Deutschland dominiert werden. An den beiden großen Hubs Frankfurt/Main und München würden demnach für das Jahr 2040 dabei zwischen 59 % (NextGen 2035) und 69 % (ReCert Fleet) der insgesamt zur Verfügung stehenden Menge SPK-SAF getankt, wie in Abbildung 14 zu sehen ist. Dies liegt hauptsächlich an der hohen Anzahl von Langstreckenflügen an diesen Flughäfen, welche in der Regel eine höhere Nicht-CO_2-Klimawirkung pro verbrauchter Einheit Treibstoff aufweisen als Kurz- und Mittelstreckenflüge. Die Flughäfen Leipzig-Halle sowie Köln/Bonn weisen ebenfalls einen signifikanten Anteil der Treibstoffmenge am Gesamtbedarf von 100 % SPK-SAF auf, hauptsächlich bedingt durch Langstreckenflüge, welche durch das hohe Aufkommen von Frachtmaschinen an diesen Flughäfen durchgeführt werden. Da im Late Adoption Szenario im Jahr 2040 noch keine ausreichende Anzahl an Flugzeugen vorhanden ist, die mit der dann verfügbaren Menge an 100 % SPK-SAF betankt werden kann, stellt sich hier die Frage der Priorisierung nicht.

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

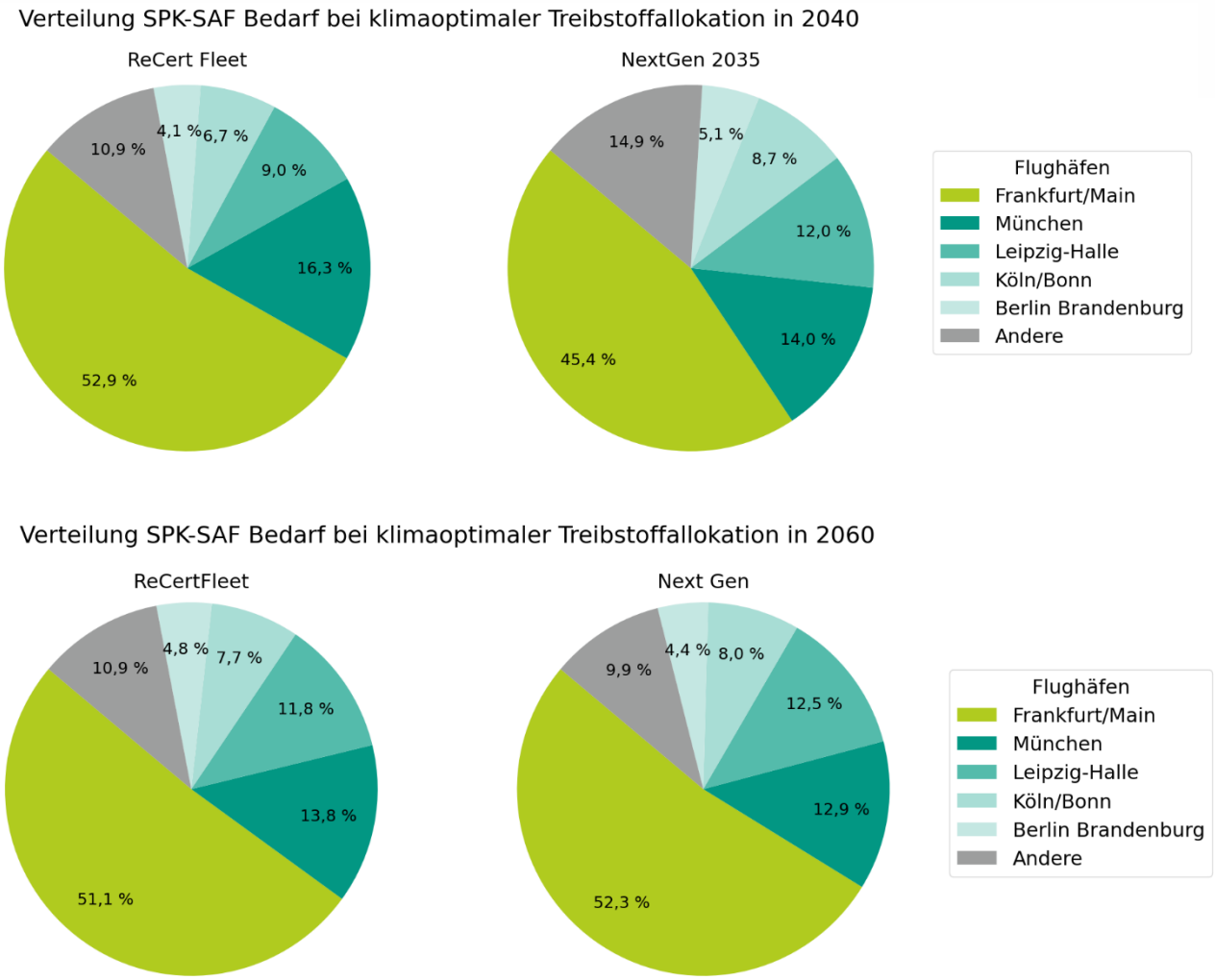

Abbildung 14: Anteile der 100 % SPK-SAF Nutzung nach Flughäfen bei Klimaoptimierung in den Szenarien ReCert Fleet und NextGen 2035 in 2040/2060 (Quelle: Eigene Darstellung)

Da, wie in Abbildung 14 dargestellt, ein Großteil des verfügbaren 100 % SPK-SAF an den Flughäfen Frankfurt/Main und München nachgefragt werden wird, wäre hinsichtlich der signifikanten Kosten einer doppelten Infrastruktur zu überlegen, ob zumindest zunächst nur an diesen beiden Flughäfen 100 % SPK-SAF angeboten werden sollte. Dabei stehen den sinkenden Kosten für Infrastruktur ein geringerer Nutzen durch eine weniger effiziente Reduktion klimarelevanter Emissionen gegenüber. Abbildung 15 vergleicht beispielhaft für das Basisszenario NextGen 2035 die klimaoptimale Allokation von 100 % SPK-SAF deutschlandweit mit einer Verteilung des Treibstoffs auf alle kompatiblen Flugzeugtypen ausgehend von Frankfurt/Main und München hinsichtlich des Bedarfs an 100 % SPK-SAF und der gesamten Klimawirkung. Der Anteil des Treibstoffbedarfs an 100 % SPK-SAF sowie

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

der CO_2-Äquivalente von allen kompatiblen Flugzeugen in Frankfurt/Main und München bleibt im Zeitverlauf dabei relativ konstant zwischen 55 % und 75 % verglichen mit der Allokation des Treibstoffs auf die klimaintensivsten Flüge ab Deutschland.

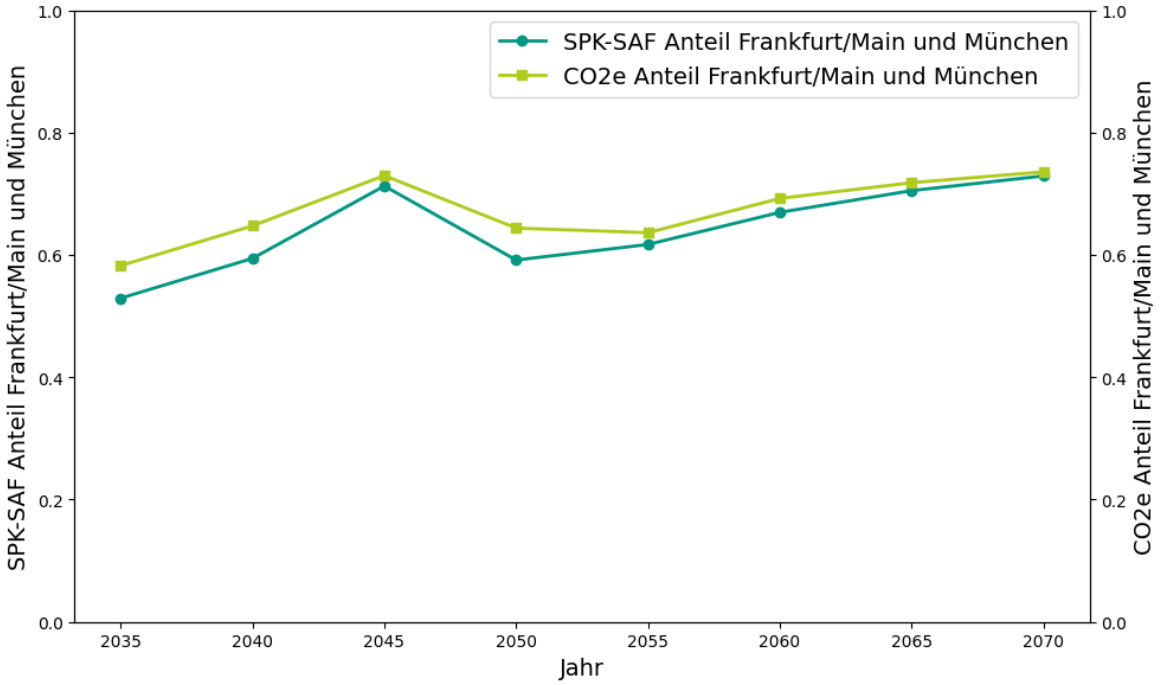

Abbildung 15: Anteile der Flughäfen Frankfurt/Main und München an den CO_2-Äquivalenten und der 100 % SPK-SAF Nutzung im Vergleich zur klimaoptimierten Nutzung von 100 % SPK-SAF an allen deutschen Flughäfen zwischen 2035 und 2070 im Szenario NextGen 2035 (Quelle: Eigene Darstellung)

Diese Erkenntnis hat erhebliche Konsequenzen für die Einführungsstrategien von 100 % SPK-SAF in Deutschland. Insbesondere in der Frühphase des Rollouts von 100 % SPK-SAF ist ein Angebot an vielen deutschen Flughäfen aus zwei Gründen sehr wahrscheinlich ökonomisch nachteilig:

(I) Zum einen ist zu erwarten, dass anfänglich nur relativ wenig 100 % SPK-SAF zur Verfügung steht und nur wenige Flugzeuge eingesetzt werden, die 100 % SPK-SAF-kompatibel sind – eine breite Verteilung auf mehrere Flughäfen würde relativ hohe Kosten des Infrastruktur-Aufbaus und der Logistik verursachen (vgl. Kapitel 6.2), ohne dass der Treibstoff effektiv genutzt werden kann.

(II) Zum anderen zeigen die hier dargestellten Ergebnisse, dass der Großteil der Nicht-CO_2-Effekte von Abflügen von Frankfurt/Main und München ausgeht.

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Besonders hohe Nicht-CO_2-Effekte werden von Langstreckenflügen verursacht, die über hellen Oberflächen (z. B. Polar-Region, schneebedeckte Flächen) in der Nacht Kondensstreifen bilden (Teoh et al. 2022a). Stuber et al. (2006) haben gezeigt, dass 60-80 % der wärmenden Nicht-CO_2-Effekte von den 25 % des Verkehrs ausgehen, der bei Nacht stattfindet.

Daher wäre eine vorrangige Nutzung von 100 % SPK-SAF auf diesen Flügen sinnvoll. Dieses Nutzungsszenario geht allerdings mit einigen Herausforderungen, aber auch teilweise Vereinfachungen einher:

- Abflughäfen der Langstreckenflüge und die jeweilige Treibstoffversorgungsinfrastruktur
- Anzahl an Tankvorgängen mit 100 % SPK-SAF
- Einsatzgebiete und Indienststellungszeitpunkte von 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen
- Verfügbarkeit von 100 % SPK-SAF
- Zuordnung von 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen auf besonders klimasensitiven Routen

An den **Abflughäfen der meisten Langstreckenflüge** ab Deutschland (Frankfurt/Main und München) erfolgt die Treibstoffversorgung durch Unterflurbetankungssysteme. Eine dedizierte Versorgung bestimmter Flüge mit 100 % SPK-SAF würde somit eine vollständige Duplizierung der Betankung (into-plane-Dienstleistung) mit Tankwagen bedeuten. Dies bedeutet auch den Aufbau neuer Infrastrukturen für die Tankwagen, eine Erhöhung des Verkehrsaufkommens auf dem Vorfeld und potentiell längere Turnaround-Zeiten, da die Betankung von Großraumflugzeugen mit Tankwagen aufgrund der geringeren Durchflussmenge und der begrenzten Gesamtmenge des mitgeführten Treibstoffs pro Tankwagen länger dauert als die Betankung mit Unterflursystemen/Hydranten.

Gleichzeitig reduziert die gezielte Nutzung von 100 % SPK-SAF auf Langstreckenflügen die **Anzahl der Tankvorgänge**, bei gleichzeitig relativ großen Mengen benötigten Treibstoffs pro Tankvorgang. Während auf der Kurzstrecke, bspw. im innereuropäischen Verkehr mit Flugstrecken von 500 bis 2000 km durchschnittlich Tankmengen von deutlich unter 10 t erfolgen, werden Großraumflugzeuge für Langstrecken mit 80-150 t Treibstoff pro Tankvorgang betankt. Dies wiederum reduziert die Komplexität, wenn nur wenige Tankvorgänge erfolgen müssen, um das zumindest in der Anfangsphase begrenzt verfügbare 100 % SPK-SAF zu verwenden. Jedoch ist aus Sicht der Fluggesellschaften auch zu berücksichtigen, dass die Betankung von Langstreckenflügen mit Tankwagen operativ komplexer ist, da die

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

Kapazität der Tankwagen beschränkt ist und ggf. zwei oder mehr Tankwagen benötigt werden, um einen Langstreckenflug zu betanken.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist unklar, **welche Flugzeuge zur Nutzung von 100 % SPK-SAF zugelassen werden** und wann diese einsatzbereit sind. In den beiden Szenarien „NextGen 2035“ und „Late Adoption“ wird erst die kommende Flugzeuggeneration für 100 % SPK-SAF zugelassen sein. Derzeit gibt es allerdings keine Projekte für ein neues Langstrecken-Flugzeugmuster, das in absehbarer Zeit auf den Markt kommen wird. Einzig Airbus hat zum jetzigen Zeitpunkt erklärt, den Nachfolger der Airbus A320-Familie für Kurz- und Mittelstrecken nach 2035 auf den Markt bringen zu wollen, der dann mit großer Wahrscheinlichkeit auch 100 % SPK-SAF-kompatibel sein wird (Airbus 2025).

Eine weitere Herausforderung ist die **Verfügbarkeit von 100 % SPK-SAF**. Bei einer begrenzten Menge an 100 % SPK-SAF würden bei klimaoptimierter Nutzung bereits die Flughäfen in Frankfurt/Main und München einen Großteil des 100 % SPK-SAF absorbieren, sodass an den anderen Flughäfen kaum noch 100 % SPK-SAF zur Nutzung zur Verfügung steht.

Aus dieser Erkenntnis folgt, dass es wahrscheinlich sinnvoll ist, die Bereitstellung von 100 % SPK-SAF auf wenige Flughäfen zu konzentrieren. Hieraus ergeben sich erhebliche Kosteneinsparungspotentiale für Infrastrukturausbau und Betrieb in der Fläche. Gleichzeitig ist die Schaffung der 100 % SPK-SAF-Infrastruktur und die Betankung der Flugzeuge an den Flughäfen in Frankfurt/Main und München aufgrund der dort benötigten Mengen, der operativen Komplexität aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und der begrenzten Flächen am schwierigsten umzusetzen.

In der Gesamtbetrachtung gehen mehr als 85 % der Nicht-CO_2-Effekte von den Abflügen von nur fünf Flughäfen aus (Frankfurt/Main, München, Leipzig-Halle, Köln/Bonn und Berlin Brandenburg), dabei alleine 68% an den Flughäfen Frankfurt/Main und München, d. h. der klimatische Nutzen von 100 % SPK-SAF an den übrigen Flughäfen ist relativ klein, während die Kosten der Bereitstellung, zumindest bei den größeren Verkehrsflughäfen wie Düsseldorf, Hamburg oder Stuttgart in einer ähnlichen Größenordnung wie in Berlin-Brandenburg, Leipzig-Halle oder Köln/Bonn liegen dürften.

Zuletzt ist auch der **Einsatz der 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeuge auf den besonders klimasensitiven Routen** eine Herausforderung. Damit die angestrebte Nutzenmaximierung durch den Einsatz von 100 % SPK-SAF erfolgen kann, ist es erforderlich, dass die

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Fluggesellschaften in ihrer Stationierungs- und Umlaufplanung die 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeuge genau dort stationieren, wo auch 100 % SPK-SAF angeboten wird. Optimalerweise werden die Flugzeuge dann auch auf Routen eingesetzt, die ein besonders hohes Reduktionspotential an Nicht-CO_2-Effekten aufweisen. Die Bereitstellung von 100 % SPK-SAF muss daher auf den Aufwuchs der 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flotte unter Betrachtung der lokalen Situation abgestimmt sein.

Die hier als wissenschaftlich fundierte Handlungsoption diskutierte Konzentration der Bereitstellung von 100 % SPK-SAF auf nur wenige Abflughäfen hätte möglicherweise zur Konsequenz, dass eventuell einige wenige besonders klimasensitive Flüge ab den anderen Flughäfen nicht mit 100 % SPK-SAF versorgt werden könnten. Eventuell könnte es möglich gemacht werden, Flüge mit besonders hohen Nicht-CO_2-Effekten an Flughäfen ohne stationäre 100 % SPK-SAF-Versorgung in begrenztem Ausmaß mit 100 % SPK-SAF durch kombinierte Straßen-/Vorfeldtankwagen zu versorgen. Hier müsste punktuell geprüft werden, ob die nochmals erhöhten Logistikkosten durch die Bereitstellung verhältnismäßig kleiner Mengen an 100 % SPK-SAF durch den Nutzen der Reduktion von Nicht-CO_2-Effekten übertroffen werden. Sollte eine mobile Versorgung nicht möglich sein, würden alternativ Flüge mit geringeren Nicht-CO_2-Effekten an den Flughäfen mit 100 % SPK-SAF-Versorgung 100 % SPK-SAF erhalten. In einem solchen Fall hängt der „verlorene“ Nutzen von der Differenz der Nicht-CO_2-Effekte der Abflüge an jenem Flughafen, der kein 100 % SPK-SAF erhält und der Abflüge mit den nächst höheren Nicht-CO_2-Effekten an einem Flughafen mit 100 % SPK-SAF-Versorgung ab. Es wäre im Einzelfall zu prüfen, wie hoch der Unterschied der Nutzenbewertung zwischen den beiden Flügen ausfällt, nachdem die Kosten für die 100 % SPK-SAF-Versorgung berücksichtigt worden sind. Somit könnte entschieden werden, ob eine mobile Versorgung mit kombinierten Straßen-/Vorfeldtankwagen sinnvoll ist. Dies lässt sich nicht pauschal beantworten, sondern nur nach Bewertung der Rangreihung der Nicht-CO_2-Effekte an Flughäfen mit und ohne 100 % SPK-SAF-Versorgung und den individuellen Logistikkosten.

Sollte in der Einführungsphase die Konzentration der 100 % SPK-SAF-Bereitstellung auf einige wenige Flughäfen erfolgen, so gäbe es sehr langfristig (z. B. etwa nach 2050) drei Optionen, wie mit den übrigen Flughäfen verfahren werden könnte:

- Beibehaltung der ausschließlichen Versorgung mit Jet A-1 bzw. SAF als Drop-in-Treibstoff;

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

- Duplikation der Infrastruktur und gleichzeitiges Angebot von 100 % SPK-SAF und Jet A-1 oder
- Umstellung von Jet A-1 auf 100 % SPK-SAF zu einem Stichtag.

Aus wissenschaftlicher Sicht könnte aufgrund der starken Konzentration der Treibstoffnachfrage auch in Zukunft der Einsatz von 100 % SPK-SAF auf wenige Flughäfen beschränkt bleiben. Allerdings ist jedoch die Bereitstellung von 100 % SPK-SAF an einer größeren Anzahl an Flughäfen denkbar, da aufgrund der großen Anzahl an 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen und der hohen Gesamtmenge an bereitgestelltem 100 % SPK-SAF keine starke Priorisierung für besonders klimasensitive Flüge mehr erfolgen muss. Zudem sollten dann auch an kleineren Flughäfen größere Mengen an 100 % SPK-SAF nachgefragt werden, sodass duplizierte Infrastrukturen in der Treibstoffversorgung besser ausgelastet sein sollten. In den in Kapitel 5 gezeigten Szenarien wird bspw. davon ausgegangen, dass in 2060 schätzungsweise 6 Mio. t 100 % SPK-SAF in Deutschland nachgefragt werden. Damit würden selbst an den kleineren Flughäfen, die nur 3 bis 5 % der deutschlandweiten Treibstoffnachfrage ausmachen, unter der Annahme der Fortschreibung der 70 %-igen SAF-Quote aus der ReFuelEU Aviation-Verordnung 500 bis 800 t 100 % SPK-SAF pro Tag nachgefragt werden.

Um die Kosten der Duplikation der Infrastruktur zu vermeiden, könnte an einem weit in der Zukunft liegenden Stichtag eine vollständige Umstellung der Versorgung an kleineren Flughäfen von Jet-A1 auf 100 % SPK-SAF erfolgen. Dies würde jedoch eine nahezu vollständige Verbreitung von 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen erfordern. Der Vorteil dieser Option liegt in der Einsparung von Investitions- und Betriebskosten, die eine Duplikation der Infrastruktur erfordern würde. Es ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht absehbar, ob ein derartiges Szenario als realistisch eingeschätzt werden kann.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

7 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurden die Herausforderungen und mögliche Strategien zur Einführung von 100 % SPK-SAF an deutschen Flughäfen untersucht. Die hier genannten Maßnahmen sind als rein wissenschaftlich basierte Handlungsoptionen zu verstehen.

Tabelle 5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Szenarioanalyse im Hinblick auf die Alternativen der Schaffung einer physischen Doppelstruktur bei der Infrastruktur einerseits bzw. einem Book & Claim oder Umlageverfahren zusammen.

In Bezug auf die Schaffung der Tankinfrastruktur an den Flughäfen unterscheiden sich die drei Einführungsszenarien (ReCert Fleet, Next Gen 2035 und Late Adoption) nicht wesentlich. Bei der physischen Doppelstruktur müssten an allen Flughäfen erhebliche Investitionen vorgenommen werden, während bei einem Book & Claim bzw. Umlageverfahren die Infrastrukturinvestitionen zielgerichtet an wenigen Flughäfen durchgeführt werden könnten.

Bzgl. der Flugzeugflotte würden die Szenarien ReCert Fleet (1A und 2A) die höchste Komplexität und potentiell die höchsten Kosten verursachen, wenn Flugzeugmuster der Bestandsflotte re-zertifiziert und die Flugzeuge individuell umgerüstet werden. Dieser Aufwand würde in den anderen Szenarien entfallen. Die Modellierung der Verbreitung der 100 % SPK-SAF kompatiblen Flugzeuge und der Verfügbarkeit von 100 % SPK-SAF hat unter den getroffenen Annahmen gezeigt, dass die Rezertifizierung der Bestandsflotte nicht zwingend notwendig ist, um eine weite Verbreitung / Nutzung von 100 % SPK-SAF zu erzielen.

Im Bereich der Regulatorik sind unabhängig von den Szenarien Anpassungen vorzunehmen, um die in der Stakeholder-Befragung herausgearbeitete Skepsis von Vertretern der Luftverkehrswirtschaft bzgl. der Einführung von 100 % SPK-SAF abzubauen. Der aufgezeigte volkswirtschaftliche Nutzen alleine wird nicht als Anreiz für die Nutzung von 100 % SPK-SAF ausreichen. Daher wären aus ökonomischer Sicht, unabhängig davon, ob eine physische Doppelstruktur oder ein Book & Claim-System besteht, regulatorische Anreize zu schaffen, die volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Ziele harmonisieren.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Szenario		Infrastruktur	Flugzeugflotte	Regulatorik	Nutzendimensionen
Physische Doppel-struktur	ReCert Fleet (1A)	Hohe Kosten, wenn 100 % SPK-SAF an allen Flughäfen verfügbar ge-macht werden soll Potentiell begrenzte Auslastung der 100 % SPK-SAF-Infrastruktur an kleineren Flughäfen, wenn dort nur wenige kompatible Flugzeuge eingesetzt werden	Hohe Komplexität und Kosten, wenn Luftfahrtzeuge re-zertifi-ziert und umgerüstet werden	Anpassungen not-wendig, um 100 % SPK-SAF-Nutzung zu incentivieren Anreize schaffen, damit Mehrkosten für die Nutzung wettbewerbsneut-ral getragen wer-den können	Zielgerichtete Nutzung auf be-sonders klimasensitiven Flügen möglich, wenn 100 % SPK-SAF an nahezu allen Flughäfen ver-fügbar ist
	Next Gen 2035 (1B)		Nur Neu-Flugzeuge sind 100 % SPK-SAF kompatibel, Re-zertifi-zierungs- und Umrüstkosten ent-fallen		Auch ohne Umrüstung der Be-standsflotte kann ein hohes Le-vel an Verringerung von Nicht-CO2-Effekten erreicht werden
	Late Adoption (1C)		Nur Neu-Flugzeuge sind 100 % SPK-SAF kompatibel, Re-zertifi-zierungs- und Umrüstkosten ent-fallen		Durch die sehr späte Einführung (2040) verschiebt sich die Reali-sierung des Nutzens weit in die Zukunft
Book & Claim / Um-lageverfahren	ReCert Fleet (2A)	Zielgerichtete Infrastruk-turinvestitionen möglich an Flughäfen mit poten-tiell hoher Nachfrage nach 100 % SPK-SAF Szenarien Next Gen / Late Adoption erlauben spätere Infrastrukturin-vestitionen	Hohe Komplexität und Kosten, wenn Luftfahrtzeuge re-zertifi-ziert und umgerüstet werden		Einige sehr klimasensitive Flüge können potentiell nicht mit 100 % SPK-SAF versorgt wer-den, alternativ versorgte Flüge haben potentiell geringere Nicht-CO_2-Effekte, die verringert werden
	Next Gen 2035 (2B)		Nur Neu-Flugzeuge sind 100 % SPK-SAF kompatibel, Re-zertifi-zierungs- und Umrüstkosten ent-fallen		
	Late Adoption (2C)		Nur Neu-Flugzeuge sind 100 % SPK-SAF kompatibel, Re-zertifi-zierungs- und Umrüstkosten ent-fallen		

Tabelle 5: Zusammenfassung der Szenarioanalyse

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

Bezüglich der Maximierung der Nutzenerzielung haben die Ergebnisse der Untersuchung gezeigt, dass Flüge mit den höchsten Nicht-CO_2-Effekten sehr stark auf wenige Abflughäfen konzentriert sind. Sofern diese Flüge in Zukunft mit 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen durchgeführt werden, wäre somit eine Konzentration der Belieferung mit SPK-SAF auf wenige Flughäfen aus wissenschaftlicher Sicht ökonomisch sinnvoll. Dies hätte als potentielle Konsequenz, dass nicht alle hoch klimasensitiven Flüge mit 100 % SPK-SAF versorgt werden könnten, allerdings wäre der Netto-Nutzen nach Berücksichtigung der Infrastruktur- und Logistikkosten möglicherweise höher, wenn 100 % SPK-SAF nur an wenigen Flughäfen angeboten werden würde.

Schlussendlich umfasst die Herausforderung bei der Einführung von 100 % SPK-SAF an deutschen Flughäfen die systemische Optimierung von sechs Handlungsfeldern:

- Produktion und Bereitstellung einer ausreichenden Menge an 100 % SPK-SAF
- Definition der Flughäfen, an denen 100 % SPK-SAF bereitgestellt werden soll und die Anpassung der dortigen Treibstoffinfrastrukturen und Betankungsprozesse
- Einsatz der 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugflotten, Matching von kompatiblen Flotten und Abflughäfen mit 100 % SPK-SAF-Bereitstellung
- Allokation der 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeuge auf Flugrouten mit den höchsten Nicht-CO_2-Effekten
- Betankung der Flüge mit den höchsten Nicht-CO_2-Effekten mit 100 % SPK-SAF
- Ökonomische Incentivierung der Nutzung von 100 % SPK-SAF

Die besondere Herausforderung ist dabei, dass unterschiedliche Stakeholder hier in optimaler Weise kooperieren müssen. Das Optimierungsproblem ist auch noch einmal zusammenfassend in Abbildung 16 dargestellt.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

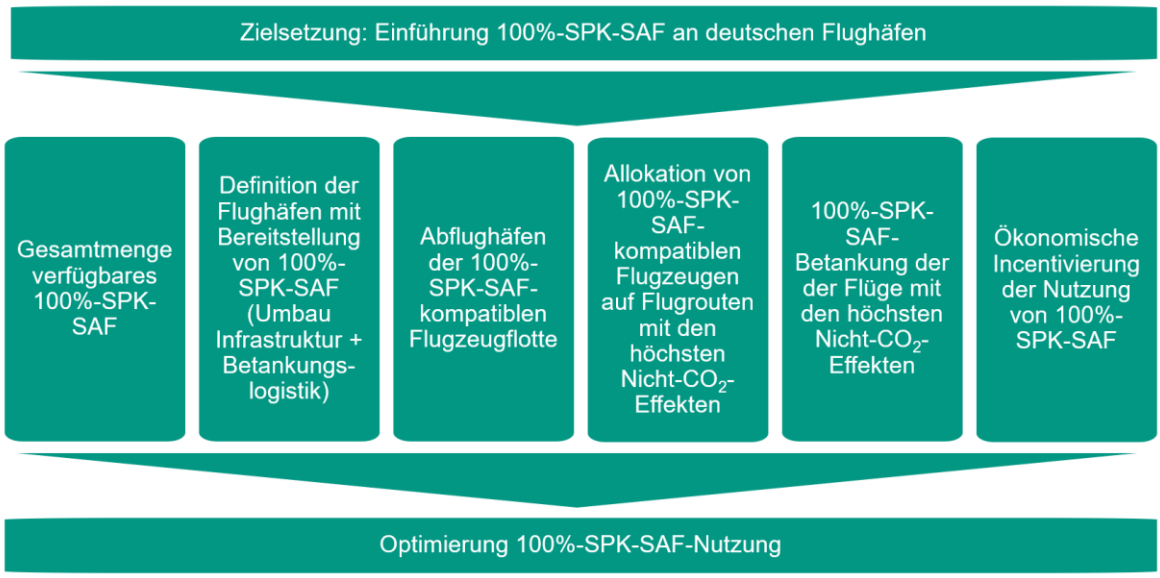

Abbildung 16: Herausforderungen bei der Optimierung der Nutzung von 100 % SPK-SAF (Quelle: Eigene Darstellung)

Zum jetzigen Zeitpunkt (Stand: April 2026) ist noch nicht absehbar, wie der Treibstoffstandard genau aussehen wird und welche Flugzeuge mit dem Treibstoff kompatibel sein werden. Die Definition des Treibstoffstandards ist jedoch die wichtigste Voraussetzung, um in der Folge die Zertifizierungsstandards für Luftfahrzeuge/Triebwerke zu definieren und Standards für Handling, Distribution und Betankungsprozesse (z. B. über eine Anpassung der JIG-Normen) festzulegen. Im gleichen Schritt ist an der Implementierung regulatorischer Instrumente zu arbeiten, um den Stakeholdern einen ökonomischen Anreiz zu bieten. In der Folge können Luftfahrzeuge umgerüstet und die Treibstoff-Infrastruktur an den Flughäfen angepasst werden. Unter optimalen Bedingungen könnte dies bis Anfang der 2030er Jahre erfolgen (Abbildung 17).

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

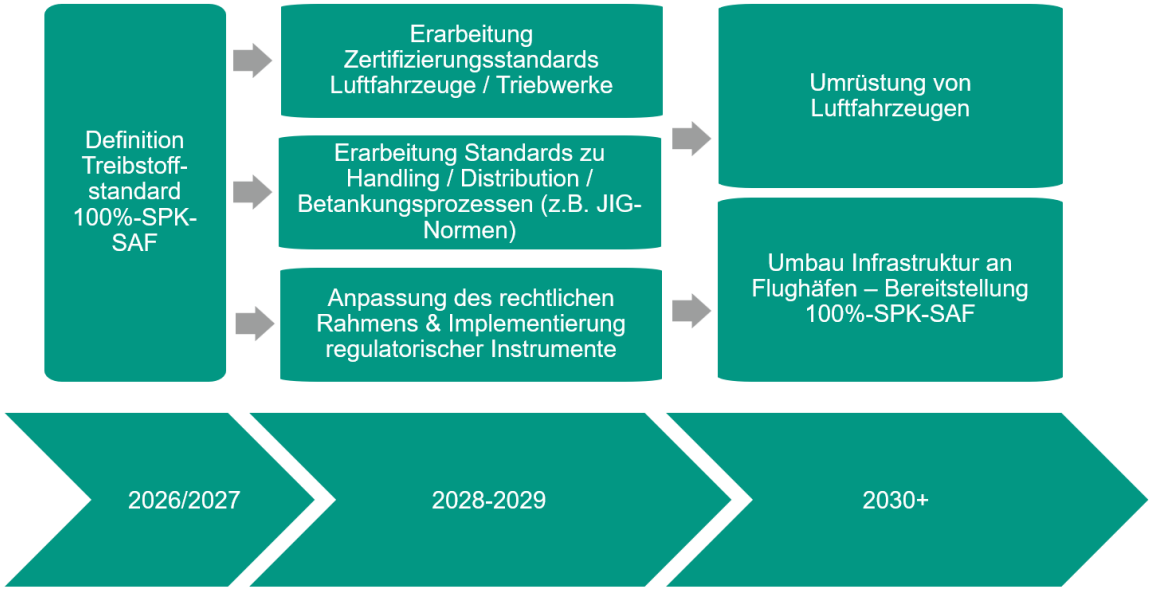

Abbildung 17: Zeitleiste Einführung 100 % SPK-SAF (Quelle: Eigene Darstellung.)

Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass sowohl in der wissenschaftlichen Literatur als auch in der praktischen Erfahrung der Stakeholder erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Einführung von 100 % SPK-SAF bestehen. Dies umfasst nahezu alle Bereiche wie die Definition des Treibstoffstandards, die Höhe von Infrastruktur- und Logistikkosten, das regulatorische Umfeld und auch die Quantifizierung des Nutzens, vor allem bei der Reduktion von Nicht-CO_2-Effekten.

Bisher sind Nutzen- und Kostenabwägungen nur theoretischer Natur und es gibt wenige praktische Erkenntnisse des Einsatzes von 100 % SPK-SAF. Um Wissen zu generieren, Unsicherheiten abzubauen und Akzeptanz der Stakeholder zu steigern, wäre ein längerfristig angelegtes Demonstrationsprojekt denkbar. Bspw. könnte eine eng abgegrenzte Regionalflugroute im Rahmen einer staatlich geförderten gemeinwirtschaftlichen Verpflichtung (Public Service Obligation – PSO) dauerhaft mit Flugzeugen bedient werden, die für diesen Zweck mit 100 % SPK-SAF betrieben werden. Sofern 100 % SPK-SAF-kompatible Langstreckenflugzeuge für den kommerziellen Betrieb verfügbar sind, könnte der Einsatz von 100 % SPK-SAF auch als Demonstrationsprojekt auf den besonders klimasensitiven Langstreckenflügen stattfinden. Als Beispiel für die erfolgreiche Demonstration des Einsatzes eines neuen Treibstoffs kann das BurnFAIR-Projekt herangezogen werden, beim dem im Jahr 2011 Biokerosin auf der Strecke Hamburg-Frankfurt im kommerziellen Betrieb getestet und wissenschaftlich begleitet wurde (Zschocke 2014). Mit einem dauerhaften Betrieb

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

über einen längeren Zeitraum könnten die Langzeiteffekte für die Flugzeug- und Triebwerkstechnik erfasst, Erfahrungen in der Treibstofflogistik gesammelt und damit wertvolle Erkenntnisse für einen großflächigen Einsatz gewonnen werden.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch:
NOW
Projektträger:
VDI VDE IT
FNR

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Franziska Bietke und Paula Wirth vom DLR-Institut für Luftverkehr für die redaktionelle Unterstützung bei der Erstellung dieses Berichts, der Erstellung von Grafiken und dem gewissenhaften Korrekturlesen. Ebenfalls möchten sich die Autoren beim Projektteam von InnoFuels und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des DLR-Instituts für Verbrennungstechnik, dem Kompetenzzentrum für Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr der Hessen Trade & Invest GmbH (CENA Hessen) und der Condor Flugdienst GmbH für die Begleitung des Projekts bedanken. Ein großer Dank gebührt den konsultierten Stakeholdern, die mit vielen praxisbezogenen Informationen einen erheblichen Beitrag geleistet haben. Ein besonderer Dank geht an Ulrike Schulte und das Team vom Flughafen Köln/Bonn, sowie Andreas Grabe von AFS Aviation Fuel Services GmbH für die Durchführung des Stakeholder-Workshops im November 2025.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATJ	Alcohol-to-Jet
BER	IATA Location Identifier Flughafen Berlin-Brandenburg
BVWP	Bundesverkehrswegeplanung
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CEPS	Central European Pipeline System
CGN	IATA Location Identifier Flughafen Köln/Bonn
CHJ	Catalytic Hydrothermolysis Jet Fuel
CO2	Kohlenstoffdioxid
CO2e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
Def Stan	Defence Standard
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DUS	IATA Location Identifier Flughafen Düsseldorf

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

EAGWP	Efficacy weighted Absolute Global Warming Potential
ECLIF	Emissions and Climate Impacts of Alternative Fuels
EU	Europäische Union
EU EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
FRA	IATA Location Identifier Flughafen Frankfurt/Main
FT	Fischer-Tropsch
H2	Wasserstoff
HAJ	IATA Location Identifier Flughafen Hannover
HAM	IATA Location Identifier Flughafen Hamburg
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
HHC	Hydroprocessed Hydrocarbons
HHN	IATA Location Identifier Flughafen Hahn
IATA	International Air Transport Association
ICAO	Internationale Zivilluftfahrt-Organisation
IKFT	Institut für Katalyseforschung und -technologie
JIG	Joint Inspection Group
LEJ	IATA Location Identifier Flughafen Leipzig-Halle
LTO	Landing-and-takeoff

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

MRV	Monitoring, Reporting and Verification
MUC	IATA Location Identifier Flughafen München
nvPM	Non-Volatile Particulate Matter (Nichtflüchtige Partikel)
PSO	Public Service Obligation
RED	Renewable Energy Directive
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
SAF	Sustainable Aviation Fuels
SBC	Synthetic Blending Component
SIP	Synthetic Iso-Paraffin
SKA	Synthetic Kerosene with Aromatics
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene
STR	IATA Location Identifier Flughafen Stuttgart
t	(metrische) Tonnen
TCDS	Type Certification Data Sheet
vPM	Volatile Particulate Matter
WACC	Weighted Average Cost of Capital

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der SAF-Beimischungsverpflichtung gemäß Verordnung (EU) 2023/2405 ... 8

Abbildung 2: Systemgrenzen / Komponenten der quantitativen Analyse ... 10

Abbildung 3: Logistikkette bei der Versorgung mit Flugtreibstoffen (Quelle: Eigene Darstellung) ... 12

Abbildung 4: Inlandsablieferungen von Flugturbinentreibstoff an die Luftfahrt in Deutschland 2001-2024 ... 15

Abbildung 5: Geografische Verteilung der Nachfrage nach Flugturbinentreibstoff in Deutschland 2024 ... 16

Abbildung 6: Auszug aus dem Type Certification Data Sheet EASA.A.064 für den Airbus A320 ... 31

Abbildung 7: Szenarien zur Flottenkompatibilität mit 100 % SPK-SAF ... 39

Abbildung 8: Modellierung von Flottenentwicklung, Treibstoffbedarfen und Nicht-CO_2-Effekten in den unterschiedlichen Szenarien ... 40

Abbildung 9: Entwicklung des Anteils der Flüge mit 100 % SPK-SAF-kompatiblen Flugzeugen in den Szenarien ReCert Fleet, NextGen 2035 und Late Adoption ... 44

Abbildung 10: Auswirkungen von Annahmen zur Effizienzsteigerung auf den Treibstoffverbrauch der Abflüge ab Deutschland 2025-2070 ... 45

Abbildung 11: Treibstoffverbrauch in den Szenarien ReCert Fleet (a), NextGen 2035 (b) und Late Adoption (c) ... 47

Abbildung 12: CO2e-Emissionen in Mio. t (EAGWP100) basierend auf FlightClim für Abflüge ab den deutschen Flughäfen in 2024 ... 52

Abbildung 13: Abschätzung des ökonomischen Nutzens der Reduktion von Nicht-CO_2-Effekten in Abhängigkeit des Nutzungsgrads von 100 % SPK-SAF und des CO_2-Preises ... 53

Abbildung 14: Anteile der 100 % SPK-SAF Nutzung nach Flughäfen bei Klimaoptimierung in den Szenarien ReCert Fleet und NextGen 2035 in 2040/2060 ... 63

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Abbildung 15: Anteile der Flughäfen Frankfurt/Main und München an den CO_2-Äquivalenten und der 100 % SPK-SAF Nutzung im Vergleich zur klimaoptimierten Nutzung von 100 % SPK-SAF an allen deutschen Flughäfen zwischen 2035 und 2070 im Szenario NextGen 2035 64

Abbildung 16: Herausforderungen bei der Optimierung der Nutzung von 100 % SPK-SAF 73

Abbildung 17: Zeitleiste Einführung 100 % SPK-SAF 74

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT, FNR
GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: SAF-Produktionsprozesse und maximale Beimischungsanteile 19

Tabelle 2: Stakeholder-Konsultation: Kategorien und kontaktierte Stakeholder..... 23

Tabelle 3: Feinstaubemissionen an ausgewählten deutschen Flughäfen 55

Tabelle 4: Schadenskosten für unterschiedliche Luftschadstoffe 56

Tabelle 5: Zusammenfassung der Szenarioanalyse 71

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch: NOW

Projektträger: VDI VDE IT FNR

8 Literaturverzeichnis

117th Congress of the United States of America (2022): Public Law 117–169.

Ahrens, Denise; Gebel, Gregor; Pathania, Rohit Singh; Armit, Chris; Löhnert, Katja; Clemen, Carsten (2025): Experimental Combustor Research in Sustainable Aviation Fuel at Rolls-Royce: Strategy, Achievements, and Outlook. In: Volume 3A: Combustion, Fuels & Emissions. ASME Turbo Expo 2025: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Memphis, Tennessee, USA, 16.06.2025 - 20.06.2025: American Society of Mechanical Engineers.

Airbus (2025): Airbus advances key technologies for next-generation single-aisle aircraft. Online verfügbar unter https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-03-airbus-advances-key-technologies-for-next-generation-single-aisle, zuletzt aktualisiert am 25.03.2025, zuletzt geprüft am 23.04.2026.

Airbus (2026): Airbus' commitment to sustainable aviation fuel. Online verfügbar unter https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/our-commitment-to-saf, zuletzt geprüft am 15.01.2026.

Beyersdorf, A. J.; Timko, M. T.; Ziemba, L. D.; Bulzan, D.; Corporan, E.; Herndon, S. C. et al. (2014): Reductions in aircraft particulate emissions due to the use of Fischer–Tropsch fuels. In: *Atmos. Chem. Phys.* 14 (1), S. 11–23. DOI: 10.5194/acp-14-11-2014.

Boehm, Randall C.; Faulhaber, Conor; Behnke, Lily; Heyne, Joshua (2024): The effect of theoretical SAF composition on calculated engine and aircraft efficiency. In: *Fuel* 371, S. 132049. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132049.

Boeing (2020): Boeing will deliver commercial airplanes ready to fly on 100% sustainable fuel. Online verfügbar unter https://www.boeing.com/company/about-bca/washington/boeing-will-deliver-commercial-airplanes-ready-to-fly-on-100-sus, zuletzt geprüft am 15.01.2026.

Braun, Matthias; Grimme, Wolfgang; Oesingmann, Katrin (2024): Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. In: *Journal of Air Transport Management* 117, S. 102580. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2024.102580.

Brem, Benjamin T.; Durdina, Lukas; Siegerist, Frithjof; Beyerle, Peter; Bruderer, Kevin; Rindlisbacher, Theo et al. (2015): Effects of Fuel Aromatic Content on Nonvolatile Particulate

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Emissions of an In-Production Aircraft Gas Turbine. In: *Environmental science & technology* 49 (22), S. 13149–13157. DOI: 10.1021/acs.est.5b04167.

Bruder, Hannes; Thor, Robin Niclas; Niklaß, Malte; Dahlmann, Katrin; Eichinger, Roland; Linke, Florian et al. (2025): The DLR CO 2 -equivalent estimator FlightClim v1.0: an easy-to-use estimation of per flight CO 2 and non-CO 2 climate effects.

Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft (2026): Klimaschutzreport. Strategien und Maßnahmen für Klimaschutz im Luftverkehr. Online verfügbar unter https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2026/03/260329_BDL_Klimaschutzreport_2025_digital.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2026.

CE Delft (2024): Environmental Prices Handbook 2024: EU27 version. Methodical justification of key indica-tors used for the valuation of emissions and the environmental impact. Online verfügbar unter https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2024/12/CE_Delft_230107_Environmental-Prices-Handbook-2024-EU-version_def.pdf, zuletzt geprüft am 04.03.2026.

CENA Hessen (2025): CENA SAF-Outlook 2025-2030. Mengen, Methoden und Märkte für nachhaltige Flugtreibstoffe. Online verfügbar unter https://www.innofuels.de/downloads/4460_CENA_SAF_Outlook_2025-2030.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2025.

Civil Aviation Authority of Singapore (2025): New Sustainable Aviation Fuel Levy to Apply From 1 April 2026 for Flights Departing From 1 October 2026. Online verfügbar unter https://www.caas.gov.sg/who-we-are/newsroom/Detail/new-SAF-levy-to-apply-from-1-apr-2026-for-flights-departing-from-1-oct-2026, zuletzt aktualisiert am 10.11.2025, zuletzt geprüft am 23.02.2026.

CORDIS (2025): Particle emissions, Air Quality and Climate Impact related to Fuel Composition and Engine Cycle. Online verfügbar unter https://cordis.europa.eu/project/id/101192334, zuletzt aktualisiert am 29.04.2025, zuletzt geprüft am 18.02.2026.

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (Hg.) (2026): Leitfaden für Luftfahrzeugbetreiber. Erstellung von Überwachungsplänen und Emissionsberichten ab dem Berichtsjahr 2025. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/luftverkehr/lv-leitfaden-ueberwachungsplaene.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 18.02.2026.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

DLR (2024): Fliegendes Labor misst Emissionen eines Turboprop-Flugzeugs mit 100 Prozent synthetischem Kraftstoff. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2024/fliegendes-labor-misst-erstmals-emissionen-eines-turboprop-flugzeugs-mit-100-prozent-synthetischem-kraftstoff, zuletzt geprüft am 12.02.2024.

EASA (2025): Type-Certificate Data Sheet No. EASA.A.064 for AIRBUS A318 - A319 - A320 - A321. Online verfügbar unter https://www.easa.europa.eu/en/downloads/16507/en, zuletzt geprüft am 18.03.2026.

EASA (2026): 2025 Aviation Fuels Reference Prices for ReFuelEU Aviation. Online verfügbar unter https://www.easa.europa.eu/en/downloads/143282/en, zuletzt geprüft am 31.03.2026.

Eiselin, Stefan (2025): Airbus' A320-Neo-Nachfolger wird «radikal anderes Flugzeug». Online verfügbar unter https://www.aerotelegraph.com/flugzeuge/airbus-a320-neo-nachfolger-wird-radikal-anderes-flugzeug/ebzgbnh, zuletzt geprüft am 12.02.2026.

Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union (2023): Consolidated text: 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) (Text with EEA relevance). Online verfügbar unter http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/2023-10-31.

European Environment Agency (2023): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. 1.A.3.a Aviation -Annex 1 - Master emissions calculator - 2023 - Protected - v1.5_18_09_2024. Online verfügbar unter https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation.3, zuletzt aktualisiert am 02.10.2023, zuletzt geprüft am 18.03.2026.

Fernleitungs-Betriebsgesellschaft mbH (2023): Service ist unser Geschäft. Raffiniert transportiert, garantiert. Online verfügbar unter https://www.unserebroschuere.de/FBGmbh/WebView, zuletzt geprüft am 06.02.2026.

Fiplan GmbH: ACHAT. Daten der amtlichen Luftverkehrsstatistik. Version v1.1.75.0 R. Online verfügbar unter https://www.fiplan.de/index.php/software.html, zuletzt geprüft am 20.02.2026.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Flughafen Düsseldorf (2025a): 70 Millionen Euro für nachhaltige Treibstoffversorgung: E-xolum errichtet modernes Tanklager am Flughafen Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.dus.com/de-de/konzern/presse/medieninformationen/exolum-errichtet-modernes-tanklager, zuletzt aktualisiert am 27.08.2025, zuletzt geprüft am 06.03.2025.

Flughafen Düsseldorf (2025b): Flughafeninduzierte Emissionen und Immissionen 2024 Flughafen Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.dus.com/-/media/dus/konzern/nachbarn/umweltauswirkungen/luftqualitaet/uebersicht/emissions-und-immissionsbericht/emissionen-immissionen2024.ashx?force-download=1, zuletzt geprüft am 04.03.2026.

Fraport (2025a): Geschäftsbericht 2024. Online verfügbar unter https://www.fraport.com/content/dam/fraport-company/documents/investoren/termine-und-publikationen/geschaeftsberichte/Geschäftsbericht%202024.pdf/_jcr_content/renditions/original./Geschäftsbericht%202024.pdf, zuletzt geprüft am 06.03.2026.

Fraport (2025b): Verkürzte Umwelterklärung 2024 mit Umweltprogramm bis 2026 für die Organisationen Fraport AG (Fraport-Muttergesellschaft), NICE, FCS, FraCareS und FGS GmbH am Flughafen Frankfurt. Online verfügbar unter https://www.fraport.com/content/dam/fraport-company/documents/nachhaltigkeit/umwelt-und-klima/umweltmanagement/de/umwelterklärungen/Verk.%20Umwelterklärung_2024_d.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/Verk.%20Umwelterklärung_2024_d.pdf, zuletzt geprüft am 04.03.2026.

Hamilton, J.; Elliott, K.; Singh, P.; Khandelwal, B. (2024): Investigation on elastomer behaviour when exposed to conventional and sustainable aviation fuels. In: *Aeronaut. j.* 128 (1325), S. 1485–1500. DOI: 10.1017/aer.2024.59.

Hedvat, Keyvan (2023): Nynas to convert Harburg refinery site into terminal. Online verfügbar unter https://www.argusmedia.com/de/news-and-insights/latest-market-news/2457121-nynas-to-convert-harburg-refinery-site-into-terminal, zuletzt aktualisiert am 07.06.2023, zuletzt geprüft am 16.03.2026.

IATA (2008): IATA Guidance on Airport Fuel Storage Capacity. EDITION 1 May 2008. Online verfügbar unter https://www.iata.org/contentassets/ebdba50e57194019930d72722413edd4/guidance-fuel-storage-may08.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2026.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

ICAO (2012): Manual on Civil Aviation Jet Fuel Supply. Doc 9977 AN/489. 1st Edition. Montreal.

ICAO (2022): Resolution A41-21: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection — Climate change. Online verfügbar unter https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A41-21_Climate_change.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2026.

ICAO (2023): ICAO Global Framework for SAF, LCAF and other Aviation Cleaner Energies. Online verfügbar unter https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/CAAF3/Documents/ICAO-Global-Framework-on-Aviation-Cleaner-Energies_24Nov2023.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2026.

ICAO (2025): CORSIA Eligible Fuels. Online verfügbar unter https://www.icao.int/CORSIA/corsia-eligible-fuels, zuletzt aktualisiert am November 2025, zuletzt geprüft am 23.02.2026.

ICAO CAEP (2022): Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions. Online verfügbar unter https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/LTAG/Documents/REPORT%20ON%20THE%20FEASIBILITY%20OF%20A%20LONG-TERM%20ASPIRATIONAL%20GOAL_en.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2026.

Lee, D. S.; Fahey, D. W.; Skowron, A.; Allen, M. R.; Burkhardt, U.; Chen, Q. et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)* 244, S. 117834. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.

Leipold, Alexandra; Baier, Fabian; Bauder, Uwe; Blinstrub, Jason; Buchtal (2024): DEPA 2070 – Final Report. Development Pathways for Aviation up to 2070. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/de/lv/forschung-transfer/projekte/depa-2070/depa2070_projektbericht_final.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2026.

Märkl, Raphael Satoru; Voigt, Christiane; Sauer, Daniel; Dischl, Rebecca Katharina; Kaufmann, Stefan; Harlaß, Theresa et al. (2024): Powering aircraft with 100 % sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails. In: *Atmos. Chem. Phys.* 24 (6), S. 3813–3837. DOI: 10.5194/acp-24-3813-2024.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Megill, Liam; Deck, Kathrin; Grewe, Volker (2024): Alternative climate metrics to the Global Warming Potential are more suitable for assessing aviation non-CO2 effects. In: *Commun Earth Environ* 5 (1). DOI: 10.1038/s43247-024-01423-6.

Müller, Leon; Kumar, Shravan; Grimme, Wolfgang; Maertens, Sven; Eichinger, Roland; Enderle, Benedict et al. (2025): Results for Cost Benefit Analysis of Smart Usage Scenarios of SAF. Deliverable D6.5.

NATO (2021): Central Europe Pipeline System (CEPS). Online verfügbar unter https://www.nato.int/en/what-we-do/deterrence-and-defence/central-europe-pipeline-system-ceps, zuletzt geprüft am 06.02.2026.

Niklaß, Malte; Dahlmann, Katrin; Grewe, Volker; Maertens, Sven; Plohr, Martin; Scheelhaase, Janina et al. (2019): - Integration of Non-CO2 Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA. Final Report. Hg. v. Umweltbundesamt (Climate Change, 20/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/1410/publikationen/2020-07-28_climatechange_20-2020_integrationofnonco2effects_finalreport_.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2026.

PrimeFlight Aviation Services (2023): Carlyle Agrees to Sell PrimeFlight Aviation Services to The Sterling Group and Capitol Meridian Partners. Online verfügbar unter https://www.primeflight.com/news, zuletzt geprüft am 06.02.2026.

PTV Planung Transport Verkehr AG; PTV Transport Consult GmbH; TCI Röhling – Transport Consulting International (2016): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Online verfügbar unter https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-methodenhandbuch.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 05.03.2026.

Quante, Gunnar; Enderle, Benedict; Laybourn, Peter; Holm, Peter W.; Andersen, Lars W.; Voigt, Christiane; Kaltschmitt, Martin (2025): Segregated supply of Sustainable Aviation Fuel to reduce contrail energy forcing – demonstration and potentials. In: *Journal of the Air Transport Research Society* 4, S. 100049. DOI: 10.1016/j.jatrs.2024.100049.

Quante, Gunnar; Voigt, Christiane; Kaltschmitt, Martin (2024): Targeted use of paraffinic kerosene: Potentials and implications. In: *Atmospheric Environment: X* 23, S. 100279. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2024.100279.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Rohkamp, Marius; Rabl, Alexander; Bendl, Jan; Neukirchen, Carsten; Saraji-Bozorgzad, Mohammad Reza; Helcig, Christian et al. (2025): Gaseous and particulate matter (PM) emissions from a turboshaft-engine using different blends of sustainable aviation fuel (SAF). In: *Aerosol Science and Technology* 59 (1), S. 111–126. DOI: 10.1080/02786826.2024.2417977.

Schripp, T.; Herrmann, F.; Oßwald, P.; Köhler, M.; Zschocke, A.; Weigelt, D. et al. (2019): Particle emissions of two unblended alternative jet fuels in a full scale jet engine. In: *Fuel* 256, S. 115903. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115903.

Shell Deutschland GmbH (2025): Zeitenwende: Shell in Wesseling rohölfrei – neue zukunftsweisende Produktionsanlagen entstehen. Online verfügbar unter https://www.shell.de/ueber-uns/newsroom/pressemitteilungen-2025/zeitenwende-shell-in-wesseling-roholfrei-neue-zukunftsweisende-produktionsanlagen-entstehen.html, zuletzt aktualisiert am 14.03.2025, zuletzt geprüft am 16.03.2026.

ASTM D7566 - 23b, 2023: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. Online verfügbar unter www.astm.org.

ASTM D1655 - 24, 2024: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. Online verfügbar unter www.astm.org.

Steer (2025): Mitigation for Fit-for-55 Legislation. Studie im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL), unterstützt von der Fédération Nationale de l'Aviation et de ses Métiers (FNAM). Online verfügbar unter https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2025/02/Fit-for-55-mitigation-measures-report-final.pdf, zuletzt geprüft am 23.02.2026.

Stuber, Nicola; Forster, Piers; Rädel, Gaby; Shine, Keith (2006): The importance of the diurnal and annual cycle of air traffic for contrail radiative forcing. In: *Nature* 441 (7095), S. 864–867. DOI: 10.1038/nature04877.

Teoh, Roger; Schumann, Ulrich; Gryspeerdt, Edward; Shapiro, Marc; Molloy, Jarlath; Koudis, George et al. (2022a): Aviation contrail climate effects in the North Atlantic from 2016 to 2021. In: *Atmos. Chem. Phys.* 22 (16), S. 10919–10935. DOI: 10.5194/acp-22-10919-2022.

Teoh, Roger; Schumann, Ulrich; Voigt, Christiane; Schripp, Tobias; Shapiro, Marc; Engberg, Zebediah et al. (2022b): Targeted Use of Sustainable Aviation Fuel to Maximize Climate

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Benefits. In: *Environmental science & technology* 56 (23), S. 17246–17255. DOI: 10.1021/acs.est.2c05781.

U.S. Government (2025): 26 U.S. Code § 45Z - Clean fuel production credit. Online verfügbar unter https://www.law.cornell.edu/uscode/text/26/45Z, zuletzt geprüft am 06.02.2026.

Umweltbundesamt (2025): German Informative Inventory Report 2025. Online verfügbar unter https://iir.umweltbundesamt.de/2025/, zuletzt aktualisiert am 08.04.2025, zuletzt geprüft am 05.03.2026.

van Seters, Daan; Grebe, Stefan; Faber, Jasper (2024): Health Impacts of Aviation UFP Emissions in Europe. Online verfügbar unter https://www.transportenvironment.org/uploads/files/CEDelft_Final_Study.pdf, zuletzt geprüft am 11.02.2026.

Westerhoff, Jürgen (2010): Wilhelmshaven: Raffinerie schließt - 400 Jobs weg. Online verfügbar unter https://www.nwzonline.de/wirtschaft/wilhelmshaven-wilhelmshaven-raffinerie-schliesst-400-jobs-weg_a_1,0,742138367.html#, zuletzt aktualisiert am 18.10.2010, zuletzt geprüft am 16.03.2026.

Winkler, Ulf; Merkel, Maik; Weinhold, Kay; Wiedensohler, Alfred; Bretschneider, Lutz; Gerling, Lars et al. (2026): Einfluss der Großflughäfen auf zeitliche und räumliche Verteilungen von Ultrafeinstaub kleiner 100 nm im Großraum Berlin. Unter Mitarbeit von Umweltbundesamt.

Wirtschaftsverband Fuels & Energie e.V. (en2x) (2025): Archiv der amtlichen Mineralöldaten. Online verfügbar unter https://en2x.de/service/statistiken/mineraloelabsatz/, zuletzt geprüft am 06.02.2026.

Woeldgen, Elisabeth; Teoh, Roger; Stettler, Marc E. J.; Malina, Robert (2025): Sustainable Aviation Fuel Deployment Strategies in Europe: Supply Chain Implications and Climate Benefits. In: *Environmental science & technology* 59 (25), S. 12447–12457. DOI: 10.1021/acs.est.5c02364.

Zschocke, Alexander (2014): Abschlussbericht zu dem Vorhaben Projekt BurnFAIR. Arbeitspakete 1.1 bis 1.4. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Berichte/Abschlussbericht_BurnFAIR.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2026.

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Anhang

Fragenkatalog der Stakeholder-Befragung

SAF-Produktion

- Welche Herausforderungen gibt es bei der SPK-SAF-Herstellung?
- Welche Feedstocks kommen für die SPK-SAF-Herstellung in Frage?
- Wie hoch ist der Vorteil bei den Lebenszyklusemissionen von SPK-SAF im Vergleich zu fossilem Treibstoff und anderen SAFs?
- Wie wirkt sich SPK-SAF auf lokale Schadstoffemissionen aus (NO_x, Ruß, SO_x)?
- Wie schätzen Sie Produktionskosten, Preise und die langfristige Verfügbarkeit von SPK-SAF ein?
- Über welche Distributionsketten (z. B. Pipeline, Schiene, Schiff, Lkw) werden Jet A-1 und SAF derzeit transportiert, und inwieweit ist diese Infrastruktur für 100 % SPK-SAF geeignet?
- Müssen bestehende Distributionsketten modifiziert oder dupliziert werden, um Jet A-1, SAF-Mischungen und 100 % SPK-SAF parallel zu liefern?
- Unterscheidet sich die Handhabung von 100 % SPK-SAF hinsichtlich Transport, Lagerung oder Qualitätssicherung von der von Jet A-1 oder SAF-Mischungen, und welche Sicherheitsvorschriften gelten?
- Wie beeinflussen Transportarten, Entfernung und geografische Lage die Vertriebskosten, und wie verhalten sich die Investitions- und Betriebskosten für Kraftstoffdistributionsanlagen und -fahrzeuge im Vergleich?

Distribution, Flughafeninfrastruktur und Betankung

- Wie erfolgt heute die Anlieferung, Lagerung und Qualitätskontrolle von Flugkraftstoff an Flughäfen? (JIG2, RCQ/COQ…)
- Wie läuft der Betankungsprozess von Flugzeugen heute ab, und welche Prozessschritte sind sicherheits- oder zeitkritisch?

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

- Welche sicherheitsrelevanten Standards gelten bei der Treibstoffhandhabung, und wie müssten diese bei der Einführung von 100 % SPK-SAF angepasst werden?
- Welche zusätzlichen Anforderungen oder Anpassungen wären notwendig, um 100 % SPK-SAF in den bestehenden Betankungsprozess zu integrieren?
- Welche Bestandteile umfasst die bestehende Flughafeninfrastruktur zur Kraftstofflagerung und -verteilung, und welche zusätzlichen Anlagen wären erforderlich, um 100 % SPK-SAF zu integrieren?
- Wie hoch sind die Investitions- und Betriebskosten sowie die Lebensdauer der bestehenden bzw. zusätzlichen Anlagen und Fahrzeuge und welche Anreizmechanismen könnten Flughäfen motivieren, in SPK-SAF-fähige Infrastruktur zu investieren?
- Wie unterscheiden sich die Betankungsprozesse je nach Verteilungsweg (z. B. Pipeline vs. Tankwagen), und welche Vor- und Nachteile haben diese Systeme in Bezug auf Effizienz, Kosten und Sicherheit? (Fuel Flow Rate, Kapazität…)

<u>Flugzeug- und Triebwerkshersteller</u>

- Wie ist der aktuelle Stand der Pläne der Hersteller hinsichtlich der Kompatibilität neuer Flugzeug-/Triebwerkstypen mit 100 % SPK-SAF?
- Können bestehende Flugzeug-/Triebwerksmodelle für 100 % SPK-SAF zertifiziert oder nachgerüstet werden – und welche technischen oder finanziellen Kosten sind damit verbunden?
- Welche Kosten würden den Fluggesellschaften für die Nachrüstung oder den Austausch inkompatibler Flugzeuge/Triebwerke entstehen, und welche Auswirkungen hätte die 100-%ige SPK-SAF-Kompatibilität auf den Preis der Hersteller für neue Flugzeuge/Triebwerke?
- Welche betrieblichen Auswirkungen hätte die Verwendung von 100 % SPK-SAF aus Sicht der Flugzeug-/Triebwerkshersteller auf Flughäfen und Fluggesellschaften?
- Gibt es weitere Auswirkungen zu berücksichtigen, wie z. B. Änderungen der Wartungskosten/verringerte Ablagerungen von Verbrennungsrückständen?

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR

Fluggesellschaften

- Ist die Betankung von Widebody-Flugzeugen durch Tankfahrzeuge ein operatives Problem?
- Wie wird heute Treibstoff im operativen Betrieb getestet?
- Wie funktioniert die Logistik von SAF?
- Wie stehen Sie zur Situation, dass aktuell maximal 50 % SAF-Blend zugelassen sind, aber ReFuelEU Aviation 70 % in 2050 vorschreibt?
- Ist 100 % SAF-SPK günstiger herzustellen als SPK-A-SAF?
- Welche wirtschaftlichen oder regulatorischen Anreize könnten Airlines dazu bewegen, verstärkt SPK-SAF einzusetzen, und wie können sie sich gegen steigende Treibstoffpreise absichern (z. B. Hedging, Lieferverträge)?
- Welche weiteren Themen sollten in der Studie behandelt werden?

Markt & Regulatorik

- Haben Sie sich mit Non-drop-in-Kraftstoffen (100 % SPK-SAF) bereits beschäftigt und ggf. bereits eine Position hierzu?
- Wie schätzen Sie die langfristigen Perspektiven von SPK-SAF im Vergleich zu anderen synthetischen oder biogenen SAFs ein?
- Inwiefern können nicht-CO_2-Effekte (z. B. Kondensstreifen, NO_x) in künftige Regelwerke oder Flexibilitätsmechanismen integriert werden?
- Welche Kompensations- oder Anrechnungsmechanismen könnten beim Einsatz von SPK-SAF in bestehenden Emissionssystemen (z. B. ETS, CORSIA, freiwillige Emissionsminderungen) berücksichtigt werden?
- Wie könnten staatliche oder marktwirtschaftliche Mechanismen (z. B. Förderprogramme, CO_2-Bepreisung, Zertifikatehandel) den Hochlauf von SPK-SAF beschleunigen?
- Wie bewerten Sie Flexibilitätsmechanismen, wie z. B. „Book & Claim“?

GESAMTKONZEPT ERNEUERBARE KRAFTSTOFFE
Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Koordiniert durch: NOW
Projektträger: VDI VDE IT FNR