



Bericht des BAZL betreffend die Förderung der Entwicklung und des Einsatzes von nachhaltigen Flugtreibstoffen

Im Rahmen der

Massnahme 5 des Aktionsplans 2021-2023 zur Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030

15.12.2022



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL

Bezugsquelle

In elektronischer Form: www.bazl.admin.ch

Auch in Französisch und italienisch erhältlich

12.2022

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Ausgangslage	7
1.1 Langfristige Klimastrategie der Schweiz	7
1.2 Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030	7
1.3 Einfluss des Luftverkehrs auf das Klima	8
1.4 Ambitionen des Luftfahrtsektors	9
2 Massnahmen zur Reduktion der Klimawirkung der Luftfahrt	11
2.1 Effizienzsteigernde Massnahmen	11
2.2 Nachhaltige Drop-in-Treibstoffe	11
2.3 Alternative Energiespeicher	12
2.4 Marktbasierte Massnahmen	13
2.5 Negativemissionstechnologien	14
2.6 Fazit	15
3 Nachhaltige Flugtreibstoffe	16
3.1 Biogene Treibstoffe	16
3.2 Synthetische Treibstoffe (PtL/StL)	18
3.3 Nachhaltigkeit der Herstellungspfade	19
3.4 Potenzial für Hochskalierung	21
3.5 Nationale Aspekte	23
4 Staatliche SAF-Förderung	26
4.1 Internationaler Kontext	26
4.2 Bestehende Schweizer Förderung	27
4.3 Absatzförderung	27
4.4 Bedarf für Entwicklungsförderung	31
4.5 Nachhaltigkeitskriterien	36
4.6 Handelsmodelle	37
5 SAF-Förderstrategie des BAZL	40
5.1 Zielsetzung	40
5.2 Massnahmen	41
Anhang A. Herstellungspfade alternativer Energiespeicher	45
A.1. Energie- und Ressourcenbedarf	45
A.2. Klimawirkung	45
A.3. Entwicklungsbedarf	46
Anhang B. Bestehende Schweizer Förderinstrumente für die Entwicklung von SAF	49
Anhang C. Instrumente zur Förderung eines SAF-Marktes	51
C.1. Anforderung an Instrumente	51
C.2. Steuern und Abgaben auf Tickets und CO ₂ -Emissionen	51
C.3. Emissionshandel und Offsetting	53
C.4. Einspeisevergütung	53
Anhang D. Standpunkt des Bundesrates bezüglich Negativemissionstechnologien	55
Literaturverzeichnis	56
Glossar	59
Abkürzungsverzeichnis	61

Zusammenfassung

Der Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen ist einer der vielversprechendsten Ansätze, um die Klimawirkung des Luftverkehrs deutlich zu senken. Der vorliegende Amtsbericht befasst sich mit der Förderung von Entwicklung und Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen in der Schweiz. Hintergrund ist der Aktionsplan 2021-2023 der «Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030», welche das BAZL mit der Erarbeitung eines solchen Berichts beauftragt (Massnahme 5). Dieser soll dazu auch als fachliche Grundlage für die Diskussionen über den Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen im Revisionsprozess des CO₂-Gesetzes dienen. Der Bericht zeigt die Ausgangslage der Klimawirkungen des Luftverkehrs auf, analysiert Handlungsoptionen und ordnet damit die Bedeutung von nachhaltigen Flugtreibstoffen zur Erreichung von Klimazielen im Luftverkehr ein: Als wichtigste, aber nicht einzige Massnahme. Um dieses Potenzial zu erfüllen, werden konkrete Ziele gesetzt und Massnahmen aufgezeigt.

Bei allen Flügen ab Flughäfen in der Schweiz wurden in den Jahren 2018 und 2019 pro Jahr insgesamt rund 5.7 Mio. Tonnen an Treibhausgasen (CO₂-Äquivalente) ausgestossen. Diese Emissionen machen gemäss Absatzprinzip rund 11 % der in der Schweiz von allen Quellen emittierten Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten aus. Um eine weitere Erwärmung des Klimas zu verhindern, ist auch im Luftverkehr eine Senkung der fossilen CO₂-Emissionen auf null notwendig. Dazu kommen Klimawirkungen von Stoffen, welche nicht als Treibhausgas erfasst werden, die sogenannten Nicht-CO₂-Emissionen. Auch diese sind im Rahmen von Massnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs zu berücksichtigen.

Die langfristige Klimastrategie der Schweiz sieht vor, dass der Luftverkehr der Schweiz «im Jahr 2050 netto möglichst keine klimawirksamen Emissionen mehr verursacht». Ähnliche Ziele haben sich verschiedene Akteure aus dem Luftfahrtsektor gesetzt. Einen Überblick über die denkbaren Ansätze bietet insbesondere die Schweizer «Road Map Sustainable Aviation». Demnach können Effizienzsteigerungen durch Innovationen am Fluggerät sowie im Betrieb eine wichtige Rolle spielen, die Emissionen jedoch alleine nicht ausreichend reduzieren. Dasselbe gilt für marktbasierte Massnahmen, wie sie in der Schweiz mit dem Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (COR-SIA) der ICAO sowie dem Emissionshandelssystem bereits im Einsatz sind.

Negativemissionstechnologien könnten künftig dazu beitragen, die Verwendung von fossilem Treibstoff in der Luftfahrt auszugleichen. Gemäss Bericht des Bundesrates (CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET), Mai 2022) sollen diese Technologien aber nicht anstelle von Massnahmen zur direkten Reduktion von fossilen Emissionen zur Anwendung kommen, sondern diese ergänzen. Vielmehr soll in allen Sektoren primär erneuerbare Energie eingesetzt und sparsam genutzt werden sowie der Abbau von endlichen Ressourcen vermieden werden.

Batterie-elektrische oder wasserstoffbetriebene Luftfahrzeuge können langfristig gewisse Emissionseinsparungen ermöglichen. Diese können jedoch frühestens in einigen Jahrzehnten erzielt werden, nach der Konstruktion und Zertifizierung von entsprechenden Flugzeugen, dem Ersatz wesentlicher Anteile der heutigen Flotte und dem Bereitstellen der benötigten Infrastruktur. Zunächst müssen Herausforderungen beim Speichern von ausreichend Energie an Bord überwunden und Fragen zur Klimawirkung dieser Technologien beantwortet werden.

Nachhaltige Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) können demgegenüber schon mit der heutigen Flugzeugflotte und Vertankungsinfrastruktur eingesetzt werden. Um als nachhaltig zu gelten, muss ihr Einsatz über den Lebenszyklus zu deutlichen Reduktionen von Treibhausgasemissionen führen und die gesamte Auswirkung auf die Umwelt vertretbar sein. Relevant für die Schweiz sind die Kriterien des Mineralölsteuergesetzes (MinöStG) sowie Artikel 35d des Umweltschutzgesetzes (USG) sowie die Kriterien der EU und der ICAO. Durch ihre Zusammensetzung helfen sie auch, die Klimaeffekte der Nicht-CO₂-Emissionen und die Luftbelastung an Flughäfen zu reduzieren. Dementsprechend weisen nationale und internationale Roadmaps SAF durchwegs eine zentrale Rolle bei der Erreichung von Emissionsreduktionszielen zu.

Bereits auf dem Markt erhältlich sind SAF aus biogenen Quellen. Diese können entweder aus biogenen Abfallstoffen (Altspeiseöl, tierische Fette) oder aus eigens angebauter Biomasse hergestellt werden. Die Umweltbilanz von letzteren ist jedoch oftmals kritisch. Zudem können sie eine Konkurrenz zu Nahrungs- und Futtermittelproduktion verursachen. Entsprechend kommen für die Nutzung in der Schweiz nur Treibstoffe aus biogenen Abfallstoffen in Frage. Diese sind jedoch durch die Verfügbarkeit der zugrundeliegenden Rohstoffe limitiert und können deshalb nur einen kleinen Teil des Kerosinbedarfs abdecken.

Noch in Entwicklung sind zurzeit Herstellungspfade für synthetische SAF basierend auf CO₂ und Wasser(stoff). Damit diese nachhaltig sind, dürfen für deren Herstellung keine fossilen Ressourcen verwendet werden, sondern nur Energie aus erneuerbaren Quellen. Entweder geschieht dies über Strom (Power-to-Liquid, PtL) oder direkt aus Sonnenenergie (Sun-to-Liquid, StL). Beide Produktionswege wurden global erst in vergleichsweise kleinen Demonstrationsanlagen umgesetzt. Somit stellen sich bei diesen Verfahren aktuell noch Fragen in Bezug auf Wirkungsgrad und Kosten. Die geplante Hochskalierung soll diese Punkte entscheidend verbessern. Mit der geeigneten Wahl von Standort und Primärenergie sind diese beiden Lösungen mittel- bis langfristig in Bezug auf Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sehr aussichtsreich. Die Schweiz ist dabei als Produktionsstandort jedoch kaum geeignet, da erneuerbare Energien (aus Sonne, Wind oder Wasserkraft) anderswo in grösseren Mengen verfügbar und bedeutend günstiger sind. Insgesamt weisen synthetische SAF damit das grösste Potenzial in der Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs bis 2050 auf, wie der Bundesrat dies auch bereits in der langfristigen Klimastrategie der Schweiz festhält.

Vor diesem Hintergrund werden in diesem Bericht drei Ziele für den Einsatz von SAF formuliert:

1. Potenzial von SAF bei der Reduktion der Klimawirkung der Luftfahrt ausschöpfen

2. Hochskalierung von nachhaltigen, kosteneffizienten SAF-Produktionspfaden unterstützen

3. Rahmenbedingungen für den Einsatz von SAF erleichtern

Das erste Ziel beinhaltet eine Verminderung der fossilen CO₂-Emissionen des Luftverkehrs durch den Einsatz von SAF in der Schweiz um mindestens 60 % bis 2050 (gegenüber einer Entwicklung ohne jegliche Massnahmen). Die restlichen Emissionen müssen über weitere Massnahmen reduziert werden, darunter Effizienzsteigerung, alternative Antriebsformen und ggf. NET. Das bedeutet, dass bis 2050 der Bedarf an fossilen Flugtreibstoffen durch SAF ersetzt werden oder mit NET ausgeglichen werden muss. Um einen SAF-Markt in der Schweiz zu etablieren, was mit bisherigen Massnahmen nicht gelungen ist, soll eine Beimischpflicht gesetzlich verankert werden. Sie soll Anbieter von Flugtreibstoffen in der Schweiz zur Beimischung von SAF verpflichten. Die konkreten Quoten dafür sowie die Nachhaltigkeitskriterien für die vertankten SAF legt der Bundesrat fest. Zentral ist dabei eine Ausrichtung auf entsprechende internationale Regulierungen, insbesondere diejenigen der EU, welche ebenfalls die Einführung einer Beimischpflicht plant.

Das zweite Ziel betrifft die Entwicklung von Produktionspfaden für SAF: Diese sollen rasch grosse Mengen nachhaltiger und günstiger Flugtreibstoffe bereitstellen können. Wissenschaft und Industrie sind sich einig, dass neben der Marktförderung von SAF auch die Entwicklung gefördert werden muss, damit die Hochskalierung der SAF-Produktion gelingt. Schweizer Akteure sind gerade in der Entwicklung von synthetischen Treibstoffen teils weltweit führend und können einen wesentlichen Beitrag dazu leisten. Um diese Chance zu nutzen, ist zeitnah eine entschiedene Förderung notwendig. Der Fokus soll dabei mittelfristig auf der Förderung von Pilot- und Demonstrationsanlagen mit Schweizer Beteiligung liegen, wodurch auch eine Lücke in den bestehenden Förderinstrumenten geschlossen wird. Ein Verzicht darauf würde bedeuten, dass das Erreichen von Klimazielen wesentlich vom Ausland abhängig ist. Zudem wird damit der Zugang zu einem starken Wachstumsmarkt gefährdet.

Das dritte Ziel betrifft den Abbau von Hürden, welche beim Einsatz von SAF in der Schweiz bestehen. So sollen technische Handelshemmnisse rasch abgebaut werden, welche bei der Einfuhr von SAF in die Schweiz bestehen wie auch bei der Erbringung von Nachhaltigkeitsnachweisen. Das Bundesamt für Zivilluftfahrt setzt sich gemeinsam mit den Partnerämtern weiterhin für eine optimale Vernetzung von Schweizer Stakeholdern ein. Ebenso engagiert sich das Bundesamt für Zivilluftfahrt auf internationaler Ebene für einen ambitionierten weltweiten Einsatz von SAF.

1 Ausgangslage

1.1 Langfristige Klimastrategie der Schweiz

2017 hat die Schweiz das Pariser Abkommen ratifiziert und sich damit verpflichtet, die Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 zu halbieren – davon ausgeschlossen ist jedoch der internationale Luftverkehr. Im Jahr 2019 hat der Bundesrat das ambitioniertere Ziel beschlossen, dass die Schweiz spätestens **ab 2050 netto keine Treibhausgasemissionen mehr verursachen** soll. Die Leitlinien für die Schweizer Klimapolitik wurden vom Bundesrat im Jahr 2021 mit der langfristigen Klimastrategie der Schweiz verabschiedet, welche strategische Ziele für die verschiedenen Sektoren festlegt¹. Darin ist auch der internationale Luftverkehr eingeschlossen. Teil der Klimastrategie ist der Einbezug von Emissionen aus dem Luftverkehr in das Netto-Null Ziel (siehe nachfolgender Kasten), soweit dies wissenschaftlich und technisch im Einklang mit den Angaben im Treibhausgasinventar möglich ist.

Zielsetzung 2050

Der internationale Luftverkehr ab der Schweiz soll im Jahr 2050 netto möglichst keine klimawirksamen Emissionen mehr verursachen. Das bedeutet:

- Die fossilen CO₂-Emissionen betragen Netto-Null.
- Die übrigen Klimawirkungen sinken oder werden mit anderen Massnahmen ausgeglichen.

1.2 Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030

Die Ausarbeitung von Massnahmen für den Luftverkehr ist in der Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030 (SNE 2030) des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE verankert. Die SNE 2030 stellt die Schweizer **Umsetzung der Agenda 2030 der UNO** dar. Sie zeigt auf, wie die 17 globalen Ziele für eine nachhaltige Entwicklung erreicht werden können. Einer der drei Schwerpunkte lautet «Klima, Energie und Biodiversität». Darunter fällt die Reduktion von Treibhausgasemissionen, eine effizientere Nutzung von Energie, der Ausbau von erneuerbaren Energien sowie der Erhalt, die nachhaltige Nutzung, Förderung und Wiederherstellung von biologischer Vielfalt.

Als Teil der SNE 2030 verabschiedet der Bundesrat in jeder Legislaturperiode einen Aktionsplan, welcher ausgewählte neue Massnahmen zur Umsetzung der SNE 2030 enthält. Der aktuelle Aktionsplan 2021-2023 wurde im Juni 2021 zusammen mit der SNE 2030 verabschiedet. Zu den 22 Massnahmen in diesem Plan gehört auch **die Entwicklung, Förderung und der Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen** und als erster Schritt die Erarbeitung der vorliegenden Strategie dazu:

¹ Bundesrat (2021). Darüber hinaus ist es möglich, dass ein Verminderungsziel im Rahmen der Gletscherinitiative oder dessen Gegenvorschlag in die Bundesverfassung aufgenommen wird. Die Volksabstimmung dazu wird nicht vor Ende 2022 stattfinden.

Massnahme 5 – Strategie zur Entwicklung, Förderung und dem Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen

Synthetische Flugtreibstoffe aus erneuerbaren Energiequellen stellen einen der vielversprechendsten Ansätze dar, um die Klimawirkung des Luftverkehrs massgeblich zu senken. Vor diesem Hintergrund erarbeitet das BAZL deshalb eine Strategie, um deren Entwicklung, Herstellung sowie Nutzung zu fördern. Heute steht noch keine Technologie bereit, um nachhaltige Flugtreibstoffe in grossen bis sehr grossen Mengen zu produzieren. Deshalb besteht Bedarf für eine gezielte Förderung der Forschung in diesem Bereich, damit die Herstellung mit geringer Klimawirkung, geringem Ressourcenverbrauch und geringen Produktionskosten möglich wird. Darüber hinaus können Anreize für den Einsatz dieser Treibstoffe gesetzt werden, welche den Markt für nachhaltige Treibstoffe möglichst wenig verzerren.

Im Rahmen der Umsetzung der Massnahme 5 zeigt der vorliegende Bericht zunächst den Handlungsbedarf in Sachen Klima im Luftfahrtbereich auf, gefolgt von einem Überblick verfügbarer technologischer Massnahmen. Damit wird aufgezeigt, welche Rolle nachhaltige Flugtreibstoffe beim Erreichen der Schweizer Klimaziele spielen. Daraufhin werden die involvierten Technologien im Detail beleuchtet sowie mögliche Instrumente zur Förderung von erneuerbaren Treibstoffen vorgestellt. Das Ergebnis besteht in einer Übersicht, wie die bestgeeigneten Instrumente umgesetzt werden können (im Rahmen der Teilrevision des CO₂-Gesetzes). Fokussiert wird dabei auf die kommerzielle, zivile Luftfahrt als Hauptverursacherin von Treibhausgasemissionen in der Aviatik. Beleuchtet wird aber auch die Situation der allgemeinen und militärischen Luftfahrt.

Nachhaltige Flugtreibstoffe werden dabei über den Zeitrahmen des Aktionsplans und der Strategie Nachhaltige Entwicklung bis 2030 hinaus bis zum langfristigen Horizont der langfristigen Klimastrategie der Schweiz (2050) untersucht. Dieser Betrachtungszeitraum ist angezeigt, da eine Hochskalierung von nachhaltigen Flugtreibstoffen Jahrzehnte dauern wird und Technologien entsprechend für diesen Zeitraum analysiert werden müssen. Damit eine kontinuierliche Transition zu nachhaltigen Treibstoffen bis 2050 erreicht werden kann, muss die Hochskalierung bis 2030 bereits im Gange sein, was wiederum das Inkrafttreten von entsprechenden gesetzlichen Grundlagen bis 2025 notwendig macht. Somit fällt die Ausarbeitung der dafür nötigen gesetzlichen Grundlagen in den Zeitraum des Aktionsplans 2021-2023. Aufgrund der dynamischen technologischen und politischen Entwicklung wird spätestens 2030 eine Aktualisierung dieses Berichts notwendig sein.

1.3 Einfluss des Luftverkehrs auf das Klima

Bei allen Flügen ab Flughäfen in der Schweiz wurden in den letzten beiden Jahren vor der Corona-Pandemie **pro Jahr rund 5.7 Mio. Tonnen an Treibhausgasen** (CO₂-Äquivalente) ausgestossen², wobei fast alle Treibhausgasemissionen ausserhalb des Schweizer Territoriums anfielen. Diese Treibhausgasemissionen machten rund 11 % der in der Schweiz von allen Quellen emittierten Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten aus².

Bei den Flugzeugemissionen ist **CO₂ das relevanteste Treibhausgas**. Die meisten der aktuell und in den nächsten Jahrzehnten ausgestossenen fossilen CO₂-Emissionen werden in über 100 Jahren immer noch eine erwärmende Klimawirkung entfalten, dies aufgrund der sehr langen Verweildauer von CO₂ in der Atmosphäre. Ein konstanter jährlicher Ausstoss von fossilem CO₂ würde also immer noch zu einer zunehmenden CO₂-Konzentration führen und damit eine verstärkte Erwärmung verursachen. Für einen

² Stand 2018 und 2019, nationale und internationale Flüge (ohne Basel-Mulhouse, da auf französischem Boden): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/zustand/daten/treibhausgasinventar/flugverkehr.html>

Stopp der künftigen Beiträge des Luftverkehrs zur Klimaerwärmung müssen die fossilen CO₂-Emissionen genau wie bei allen anderen Quellen tatsächlich null werden. Dazu einen Beitrag zu leisten ist die Kernanforderung an Massnahmen auf diesem Gebiet.

Die vom Luftverkehr verursachten Klimawirkungen gehen jedoch nicht alleine auf die genannten Treibhausgase zurück, sondern auch auf die sogenannten **Nicht-CO₂-Emissionen**. Die wesentlichen Nicht-CO₂-Emissionen aus dem Luftverkehr in Bezug auf Klimawirkung sind: die Emission von Feinstaub, Stickoxiden und Wasser (wobei Wasserdampf direkt eine untergeordnete Rolle spielt). Der entscheidende Effekt der Wasserdampfemissionen in Kombination mit Feinstaub ist die Anregung von Kondensstreifen und zusätzlicher Zirrenbewölkung. Besteht letztere nachts, so wirkt sie erwärmend, tagsüber jedoch kühlend. Insgesamt haben die Nicht-CO₂-Emissionen aus dem Luftverkehr in den letzten 20 Jahren zugenommen. Nach heutigen Schätzungen kann bei weiterer Zunahme deren tägliche Klimawirkung ein Mehrfaches der täglichen Wirkung von CO₂ betragen. Der wesentliche Unterschied ist, dass Nicht-CO₂-Emissionen zum Stopp der Erwärmungswirkung nicht auf null reduziert werden müssen, sondern eine Stabilisierung bereits ein deutlicher Fortschritt wäre. Dies ist eine Folge davon, dass sich diese Effekte im Laufe der Zeit nicht aufsummieren – im Gegensatz zu CO₂³. Weil CO₂- und Nicht-CO₂-Emissionen und ihre Wirkungen demnach nicht proportional zueinander sind, müssen sie bei Massnahmenprüfungen und beim Monitoring der jährlichen Emissions-Entwicklung getrennt voneinander betrachtet werden. Auch sind die Nicht-CO₂-Emissionen, anders als CO₂-Emissionen, nicht einfach proportional zum Treibstoffverbrauch und zum Kohlenstoffgehalt des Treibstoffs, sondern je nach Triebwerkstyp sehr unterschiedlich. Dies eröffnet Möglichkeiten für Massnahmen zur Senkung von Nicht-CO₂-Emissionen (siehe Abschnitt 2.1).

Mit Bezug auf die bisherige Emissionsentwicklung kann festgehalten werden, dass die Nachfrage nach Flugreisen und -transporten schneller zugenommen hat, als CO₂-Emissionen mit technischen Verbesserungen und weiteren Optimierungen reduziert werden konnten (siehe Abschnitt 2.1). Dies hat insgesamt zu einer Zunahme der Emissionen des Luftfahrtsektors geführt. Die Corona-Pandemie hat 2020-2021 ein zwischenzeitliches Nachfragetief verursacht. Ab 2022/23 wird wieder eine Zunahme der Nachfrage und somit der Emissionen erwartet⁴. Dennoch wurde in diesem Zusammenhang die Wachstumsprognose für den globalen Flugverkehr angepasst, von jährlich 4.2 % auf durchschnittlich 1.2-3.6 % für den Zeitraum 2018-2028⁵. Zwischen 2018 und 2050 werden durchschnittlich 2.9-4.2 % erwartet⁵, die Prognose weist jedoch weiterhin eine gewisse Unsicherheit auf.

1.4 Ambitionen des Luftfahrtsektors

In den letzten Jahren wurde immer deutlicher, welche Rolle der Luftverkehr bei der Erreichung von Klimazielen übernehmen kann und muss. Nach wie vor gilt die Luftfahrt als ein Sektor, in dem eine **Reduktion der Klimawirkung besonders herausfordernd** ist, da sich die Technologien dafür noch in der Entwicklung befinden. Dennoch haben zwischen 2020 und 2022 eine umfassende Reihe von Organisationen ambitionierte Ziele und Roadmaps (siehe weiter unten) vorgestellt, welche Wege aufzeigen, wie der Luftverkehr seinen Anteil zur Emissionsreduktion leisten kann. Auf die darin enthaltenen Massnahmen geht Kapitel 2 ein.

Die **Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO** verabschiedete im Oktober 2022 das Ziel, dass die internationale Luftfahrt bis 2050 Netto-null CO₂-Emissionen erreichen soll. Im Bericht zur Erreichbarkeit dieses Ziels werden verfügbare Massnahmen analysiert und deren Wirkung in verschiedenen Szenarien aufgezeigt. Darin nehmen nachhaltige Flugtreibstoffe eine zentrale Rolle ein, insgesamt werden für das Erreichen des Ziels jedoch auch Massnahmen ausserhalb des Sektors wie Negativemissi-

³ Neu (2021).

⁴ <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>

⁵ <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Post-Covid-Forecasts-Scenarios.aspx>

onstechnologien benötigt. Bereits länger in Kraft ist ein Ziel der ICAO, bis 2050 jährlich eine Effizienzsteigerung von 2 % zu erreichen⁶ und das Wachstum im Luftverkehrssektor ab 2020 CO₂-neutral gestalten. Dazu stehen verschiedene Massnahmen zur Verfügung, wie beispielsweise:

- Neue Technologien und Standards, insbesondere ist ein verschärfter CO₂-Standard für neue Flugzeugtypen und eine Verschärfung der Grenzwerte für Feinstaub und Stickoxide in Arbeit;
- Air Traffic Management (Luftverkehrssteuerung) und Betrieb, mit einem Fokus auf Interoperabilität und Tools zu diesem Zweck;
- Das globale Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation CORSIA (siehe Abschnitt 2.4);
- Der Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen, welche die ICAO durch diverse Initiativen unterstützt.

Weiter hat die **Air Transport Action Group (ATAG)** im Bericht **Waypoint 2050**⁷ aufgezeigt, dass die CO₂-Emissionen der Luftfahrt global bis 2050 halbiert werden können, verglichen mit 2005. So kann ein Netto-Null CO₂-Ziel im Luftfahrtsektor je nach Staat bis 2065 oder bereits vor 2060 erreicht werden. Präsentiert werden verschiedene Priorisierungen von Massnahmen: Ein Fokus auf Effizienzsteigerungen in Betrieb und Infrastruktur, nachhaltige Flugtreibstoffe, innovative Technologien (Batterien und Wasserstoff nur für kürzere Strecken) oder alternativ Kompensation ausserhalb des Sektors.

Für Europa haben Verbände als Vertreter von Airlines (A4E, ERA), Flughäfen (ACI EUROPE), Flugzeugherstellern (ASD Europe), Flugsicherung (CANSO) unter dem Titel **Destination 2050**⁸ eine Vision für Netto-Null CO₂-Emissionen aus der europäischen Luftfahrt ab 2050 vorgelegt. Die Massnahmen bestehen in erster Linie aus effizienzsteigernden Technologien und nachhaltigen Flugtreibstoffen sowie in zweiter Linie aus wirtschaftlichen Massnahmen und effizienterem Betrieb.

Zudem wurden von verschiedenen weiteren Organisationen Netto-Null CO₂-Ziele verabschiedet: So hat der **Airports Council International Europe (ACI EUROPE)**, der Verband der europäischen Flughäfen, für alle unter seiner Kontrolle stehenden Flughäfen ein Netto-Null CO₂-Ziel vorgesehen und entsprechende Massnahmen vorgeschlagen. Auf internationaler Ebene hat die **International Air Transport Association IATA** als Dachverband der Fluggesellschaften im Oktober 2021 ein Netto-Null CO₂-Ziel für die globale Luftfahrtindustrie ab dem Jahr 2050 beschlossen⁹.

Eine Analyse bezogen auf die Schweiz wurde mit der **Road Map Sustainable Aviation (RMSA)** erarbeitet¹⁰. In dieser von BAZL, BAFU und dem Aviation Research Center Switzerland (ARCS) in Auftrag gegebenen Studie zeigen diverse Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft Massnahmen für eine nachhaltige Luftfahrt auf und quantifizieren deren mögliche Wirkung. Insgesamt kann damit ein Netto-Null CO₂-Ziel im Schweizer Luftverkehr bis 2050 erreicht werden. Begleitend haben die Swiss, easyJet Switzerland, Aerosuisse sowie die Swiss Business Aviation Association (SBAA) eine Absichtserklärung veröffentlicht¹¹, in der sie sich zu den Zielen der langfristigen Klimastrategie der Schweiz bekennen und damit ebenfalls zu einem Netto-Null CO₂-Ziel bis 2050 (siehe Abschnitt 1.1). Effizienzsteigernden Massnahmen wird darin bis 2050 ein Potenzial für Emissionsreduktionen um 30 % zugewiesen, nachhaltigen Drop-in Treibstoffen gar eine Reduktion von über 50 %.

⁶ Long Term Aspirational Goal (LTAG), siehe ICAO CAEP (2022)

⁷ Air Transport Action Group (2020)

⁸ Royal Netherlands Aerospace Centre (2021)

⁹ <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>

¹⁰ Ecoplan (2021)

¹¹ <https://www.arcs.aero/sites/default/files/downloads/Absichtserklärung%20Sustainable%20Aviation.pdf>

2 Massnahmen zur Reduktion der Klimawirkung der Luftfahrt

Die Klimawirkung der Luftfahrt kann über verschiedene Ansätze reduziert werden. Um die ambitionierten Klimaziele der Schweiz in diesem Bereich erreichen zu können, stehen verschiedene technische Massnahmen zur Verfügung. Die folgenden Abschnitte bieten einen Überblick über die verfügbaren Ansätze und ihr Potenzial zur Emissionsreduktion.

2.1 Effizienzsteigernde Massnahmen

In den letzten Jahrzehnten hat die Luftfahrt ihre Energieeffizienz massgeblich gesteigert, die CO₂-Emissionen pro Tonne transportierter Nutzlast und pro Passagierkilometer haben dadurch deutlich abgenommen¹⁰. Diese bereits erfolgten Effizienzsteigerungen wurden insbesondere durch **technische Fortschritte in Flugzeugen und speziell deren Triebwerken** ermöglicht. Als Konsequenz davon ist die neuste Generation von Triebwerken heute schon nahe an der physikalisch höchstmöglichen Verbrennungseffizienz. Potenzial besteht jedoch noch bei der Umwandlung in Schub und in der Reduktion von Nicht-CO₂-Emissionen. Es braucht deshalb entsprechende Rahmenbedingungen und Massnahmen. Ein erster Schritt war die Entwicklung und globale Einführung einer Feinstaubzertifizierung für Flugzeugtriebwerke, an welcher das BAZL massgeblich beteiligt war. Diese erzeugt Druck auf die verbrennungstechnische Weiterentwicklung und führt zu einer Reduktion von ultrafeinem Russ, welcher bei der Wolkenbildung eine wichtige Rolle spielt. Weiter gesenkt werden müssen nicht nur Feinstaubemissionen, sondern auch der Ausstoss von weiteren Schadstoffen mit Klimawirkung, wie Stickoxiden. Neben Verbesserungen an den Triebwerken werden darüber hinaus diverse Konzepte erstellt, um die Aerodynamik von Flugzeugen zu verbessern, was alleine weitere 20 % Treibstoffersparnis und eine entsprechende Reduktion der CO₂-Emissionen mit sich bringen könnte. Die auf Luftfahrt-Klimawirkung spezialisierte Wissenschaft weist darauf hin, dass Nicht-CO₂-Emissionen nicht auf Kosten von mehr fossilen CO₂-Emissionen reduziert werden sollten¹².

Ebenso ist der **Betrieb der Flugzeuge** ausschlaggebend für den Treibstoffverbrauch pro Passagier- oder Tonnenkilometer. Dazu gehören Flugparameter wie Höhe, Geschwindigkeit sowie Routenwahl. Letztere ist in Europa weitgehend eingeschränkt durch den stark fragmentierten Luftraum. In diesem Bereich arbeitet die Initiative «Single European Sky»¹³ seit längerem an Verbesserungen, welche jedoch durch nationale Interessen erschwert werden. Verschiedene Konzepte versuchen, innerhalb der gegebenen Einschränkungen Verbesserungen zu erzielen, so zum Beispiel durch direktere Anflüge oder Optimierung der Flughöhe zur Verminderung von in der Nacht stark klimawirksamen, persistierenden Kondensstreifen. Relevant ist zudem die **Infrastruktur am Boden**, allem voran an Flughäfen. Hier kann zum Ziel der Emissionsreduktion bspw. die Energieversorgung auf erneuerbare Quellen umgestellt werden, sowohl für Gebäude wie auch für Fahrzeuge. Insgesamt kann damit jedoch nur ein geringer Anteil der Treibhausgasemissionen der Luftfahrt verhindert werden. Gemäss RMSA können Massnahmen in Betrieb und Bodeninfrastruktur die Emissionen des Luftverkehrs um 5-10 % senken.

2.2 Nachhaltige Drop-in-Treibstoffe

Es gibt bereits mehrere gleichwertige Alternativen für fossile Flugtreibstoffe, welche über ihren Lebenszyklus wesentlich weniger Treibhausgasemissionen verursachen und gewisse Nachhaltigkeitskriterien einhalten. Entscheidend ist dabei, dass sie ohne Veränderung am Fluggerät eingesetzt werden können und auch mit fossilem Flugtreibstoff gemischt werden können. Deswegen werden sie auch als Drop-in-Treibstoffe bezeichnet. In der Schweizer Gesetzgebung werden diese Treibstoffe als **erneuerbare Flugtreibstoffe** klassifiziert, kurz für **Treibstoffe aus erneuerbaren Quellen**. Der vorliegende Bericht

¹² <https://www.greenairnews.com/?p=1421>

¹³ https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky_en

verwendet den international etablierten Begriff SAF, kurz für Sustainable Aviation Fuels und analog **nachhaltige Flugtreibstoffe**. Für die Herstellung gibt es mehrere Optionen. Im Rahmen dieses Berichts werden diese aufgrund ihrer Energiequelle in zwei Kategorien eingeteilt:

Nachhaltige biogene Treibstoffe werden auf Basis von Biomasse hergestellt und nutzen diese als primäre Quelle von Kohlenstoff, Wasserstoff und Energie. Dadurch wird bei der Verbrennung dieser Treibstoffe direkt kein fossiles CO₂ ausgestossen. Als Rohstoff eignen sich jedoch nicht alle Arten von Biomasse. Vielmehr müssen bei der Wahl der Ausgangsstoffe und der Auslegung des Produktionspfades Treibhausgas (THG)-Emissionen und weitere negative Auswirkungen auf die Umwelt eingeschränkt werden. Die Implikationen davon werden in Kapitel 3 näher diskutiert.

Nachhaltige synthetische Treibstoffe hingegen verwenden primär nicht-biogene und ausschliesslich erneuerbare Energiequellen. Wird für die Erzeugung eines flüssigen Treibstoffs Elektrizität aus erneuerbaren Quellen (via Elektrolyse von Wasser) verwendet, so wird der Gesamtprozess **Power-to-Liquid**, kurz **PtL**, genannt. Alternativ ist ein Herstellungspfad in Entwicklung, welcher dafür direkt Sonnenenergie verwendet (**Sun-to-Liquid**, kurz **StL**). Die involvierten Technologien, Kohlenstoff- und Wasserstoffquellen werden in Kapitel 3 aufgezeigt. Synthetische Treibstoffe sind nicht in jedem Fall nachhaltig: Bereits eingesetzt werden Herstellungspfade auf Basis von Kohle oder Erdgas. Da diese grosse Mengen an fossilem CO₂ freisetzen, sind sie jedoch keinesfalls als nachhaltig zu bezeichnen und werden entsprechend im vorliegenden Bericht nicht weiter behandelt.

Die RMSA bezeichnet nachhaltige Drop-in-Treibstoffe als die **bedeutendste Massnahme zur Reduktion der Klimawirkung im Luftverkehr**. Bis der Einsatz dieser Treibstoffe über den gesamten Sektor die Emissionen wesentlich senken kann, müssen noch diverse Hindernisse überwunden werden. Dazu gehören je nach Technologie mangelnde Verfügbarkeit von Rohstoffen, ein hoher Energiebedarf, hohe Kosten oder ein tiefer Entwicklungsstand und damit verbunden hohe Technologierisiken. Diese Themen werden in Kapitel 3 diskutiert und in Anhang A vertieft. Kapitel 4-5 zeigen auf, welche Massnahmen heute bestehen und für die Zukunft geplant sind, um diese Hindernisse zu überwinden.

2.3 Alternative Energiespeicher

Seit Jahrzehnten werden alternative Energiespeicher untersucht, welche die Energie für Fliegen gänzlich ohne direkte CO₂-Emissionen bereitstellen können. So nutzen **batterie-elektrische Flugzeuge** Batterien als Energiespeicher und werden durch Elektromotoren angetrieben. Für diesen Ansatz existiert bereits eine Typenzulassung für ein Kleinflugzeug. Das Rekordhoch an Elektroflugzeugen, welche aktuell in Entwicklung sind, wird zu einer steten Zunahme von zugelassenen Flugzeugen führen. Ohne unerwartete Sprünge in der Batterieentwicklung (insbesondere in Bezug auf Gewicht und Sicherheit) bleibt der direkt-elektrische Antrieb jedoch auch langfristig auf kleinere Flugzeuge mit kürzeren Reichweiten limitiert. Auch wenn hohe Reichweiten erreicht werden können, wird dies durch das verglichen mit Kerosin erhöhte Gewicht des Energiespeichers mit Einbussen der Nutzlast einhergehen. Daraus resultiert ein höherer Energiebedarf pro Passagier respektive Nutzlast, was das Potenzial zur Klimawirkungsreduktion weiter einschränkt.

Ein weiterer möglicher Energiespeicher ist **Wasserstoff** in flüssiger Form (Kühlung auf -253°C), welcher in einem Tank an Bord mitgeführt wird. Für den Antrieb kann Wasserstoff direkt in Gasturbinen eingesetzt werden oder via Brennstoffzellen Strom produzieren, welcher in Elektromotoren für die Schuberzeugung genutzt wird (hybrid-elektrische Antriebe). Zurzeit werden Kleinflugzeuge als Versuchsträger für Wasserstoff-Technologie auf Basis von Druckspeichern eingesetzt. Grössere Flugzeuge mit Flüssigwasserstofftanks sind in Entwicklung, wobei hier neben der Sicherheit das Gewicht wie auch das Volumen der Energiespeicher technische Herausforderungen darstellen. Wasserstoffbetriebene Passagierflugzeuge

sind für Kurz- und Mittelstrecken durchwegs denkbar, für Langstreckenflugzeuge dürfte diese Technologie jedoch insbesondere aufgrund des benötigten Speichervolumens keine Alternative darstellen¹⁴.

Um die erreichbare Reduktion der Klimawirkung einschätzen zu können, müssen die kurzfristigen Effekte des auf Flughöhe ausgestossenen Wasserdampfs geklärt werden. Hohe Stickoxidemissionen müssen vermieden werden. Die wichtigste Voraussetzung für eine Reduktion der Klimawirkung ist die Vermeidung von fossilen Energiequellen bei der Herstellung des Wasserstoffs, wofür in diesem Kontext primär die Elektrolyse von Wasser mit Elektrizität aus erneuerbaren Quellen in Frage kommt¹⁵.

Zusammenfassend zeigt sich für alternative Energiespeicher das folgende Bild: Bis das Potenzial von Batterien und Wasserstoff zur Reduktion von Emissionen erreicht werden kann, müssen diese Energiespeicher zuerst weiterentwickelt, in Prototypen angewandt und dann die bestehende Flugzeugflotte ersetzt werden. Dazu wird umfangreiche Infrastruktur benötigt, von der Bereitstellung der notwendigen erneuerbaren Primärenergie, über den Transport und die Zwischenspeicherung, bis zur Versorgung an allen Flughäfen, welche von solchen Flugzeugen angeflogen werden sollen. Entsprechend nimmt das Potenzial zur Abdeckung des Transportbedarfs mit diesen Technologien in den nächsten Jahrzehnten nur langsam zu. Erwartet wird, dass das Kurzstreckensegment damit frühestens 2040 bedient werden kann und das Mittelstreckensegment frühestens 2050¹⁶. Dies heisst, dass bis 2040 (resp. 2050) die Flüge, welche für 97 % (resp. 73 %) des CO₂-Ausstosses verantwortlich sind, mit diesen Technologien nicht abgedeckt werden können¹⁷. Die Förderung von Schweizer Projekten von alternativen Energiespeichern in der Luftfahrt sollte diesem Umstand Rechnung tragen. Langfristig hingegen haben gewisse Studien für wasserstoffbetriebene Flugzeuge geringere Kosten pro reduzierte Klimawirkung als mit nachhaltigen Drop-in-Treibstoffen prognostiziert¹⁸. Die Vermeidung von Emissionen über den Lebenszyklus von batterie-elektrischen Flugzeugen ist abhängig von der weiteren Entwicklung der Technologie, insbesondere der Batterieherstellung, und kann heute entsprechend noch nicht quantifiziert werden.

2.4 Marktbasierte Massnahmen

Verschiedene Ansätze zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs bestehen darin, den Ausstoss von CO₂ mit einem Preis zu versehen, indirekt zu verteuern oder ausserhalb des Sektors zu kompensieren. So sieht das ICAO-Programm **CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)**¹⁹ vor, dass für fossile CO₂-Emissionen der internationalen Luftfahrt, welche diejenigen von 2019/2020 übersteigen, Kompensationszertifikate erworben werden müssen. Die Anzahl der Zertifikate, welche eine Fluggesellschaft erwerben muss, kann durch die Verwendung von SAF gesenkt werden. Die Reduktion der Kompensationsverpflichtung richtet sich dabei nach der im entsprechenden ICAO-Standard definierten Emissionsreduktion, welche die Emissionen bei der Herstellung des verwendeten Treibstoffs mitberücksichtigt. Zudem müssen Nachhaltigkeitskriterien eingehalten werden. Die Teilnahme an CORSIA ist für alle 193 ICAO-Mitgliedstaaten ab 2027 verpflichtend, das Programm läuft gemäss aktueller Planung bis 2035. Bisher haben 118 Staaten ihre freiwillige Teilnahme vor 2027 bestätigt, darunter die Schweiz.

¹⁴ Während Kerosintanks den Raum in den Flügeln weitgehend ausnützen können, ist dies für Wasserstofftanks nicht der Fall, da sie unter hohem Druck stehen und isoliert werden müssen.

¹⁵ Alternativ sind biogene Quellen denkbar (wobei dieselben Einschränkungen zutreffen wie bei biogenen Flüssigtreibstoffen, siehe Kapitel **Error! Reference source not found.**), sogenannter «blauer Wasserstoff» (fossil kombiniert mit NET, wobei dieselben Einschränkungen zutreffen wie in Abschnitt 2.5 diskutiert), oder direkt mit Solarenergie aus Wasser hergestellter Wasserstoff (was erst im Labor demonstriert werden konnte).

¹⁶ Eine frühere Eignung für die allgemeine Luftfahrt ist möglich.

¹⁷ Air Transport Action Group (2020)

¹⁸ Destination 2050 geht für Wasserstoff auf kürzeren Strecken von Kosten um 225 € pro Tonne vermiedenes CO₂ aus, verglichen mit 289 € für HEFA und 400-800 € für PtL. Quelle: Royal Netherlands Aerospace Centre (2021)

¹⁹ ICAO (2018)

Ebenfalls in Kraft ist das Schweizerische Emissionshandelssystem (EHS)²⁰, welches mit dem **Emissions Trading Scheme (ETS)** der EU verknüpft ist und die Abgabe von Emissionsrechten für CO₂-Emissionen auf Flügen innerhalb der Schweiz sowie aus der Schweiz in den Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) erfordert²¹. Flüge vom EWR in die Schweiz und innerhalb des EWR werden vom EHS der EU abgedeckt. Berücksichtigt wird auch hier die Verwendung von SAF, wobei Emissionen von SAF als zusätzlicher Anreiz mit null bewertet werden, ungeachtet der Emissionen, welche bei deren Herstellung anfallen. Nähere Angaben dazu sind in Abschnitt 4.1 zu finden.

Eine weitere marktbasierte Massnahme stellen Lenkungsabgaben auf Flugtickets dar, wie sie in der Schweiz im Rahmen des abgelehnten CO₂-Gesetzes geplant waren. Die Konsequenzen einer solchen Massnahme werden in Anhang C.1 näher diskutiert.

2.5 Negativemissionstechnologien

Eine direktere Alternative zur Kompensation besteht darin, gleich viel CO₂ wie bspw. in der Luftfahrt ausgestossen wird, aus der Atmosphäre zu entnehmen und langfristig zu binden. Diese Verfahren werden unter dem Begriff «**Negativemissionstechnologien**» (**NET**) zusammengefasst und ermöglichen es der Luftfahrt erst, effektiv einen Netto-Null Ausstoss von CO₂ zu erreichen.

NET sehen vor, CO₂ langfristig aus der Atmosphäre zu entfernen. Dementsprechend bestehen hier Ansätze aus zwei Schritten: Das **Einfangen von CO₂ und daraufhin das Speichern**. Für das Einfangen von CO₂ gibt es drei Möglichkeiten: Der Einsatz von Pflanzen, welche diesen Prozess mittels Photosynthese natürlich vollziehen; das Filtern von CO₂ mit geeigneten Anlagen aus der Umgebungsluft oder die Entnahme an biogenen Punktquellen (siehe Abschnitt 3.2). Auch für die langfristige Speicherung von CO₂ sind verschiedene Ansätze denkbar: So kann CO₂ in geologische Formationen wie beispielsweise inaktive Erdöl- und Erdgaslagerstätten eingebracht werden sowie entsprechend ersten Versuchen in Gesteinsformationen, in denen CO₂ im Laufe der Zeit permanent im Gestein gebunden wird. Beim Einsatz von Pflanzen kann auch direkt dafür gesorgt werden, dass fixiertes CO₂ nicht zurück in die Atmosphäre gelangt, beispielsweise durch die Produktion von Holzkohle und anschliessender langfristiger Einlagerung dieser Holzkohle.

Um bis im Jahr 2050 netto möglichst keine klimawirksamen Emissionen mehr zu verursachen, müssten auch Nicht-CO₂-Effekte berücksichtigt werden, was beispielsweise durch Entnehmen und Speichern von zusätzlichem CO₂ möglich ist. Gemäss der langfristigen Klimastrategie der Schweiz sollen NET als komplementäres Element für schwer vermeidbare Emissionen eingesetzt werden, sind dabei aber kein Ersatz für andere reduzierende Massnahmen²². Eine Studie der ETH Zürich weist daraufhin, dass NET verglichen mit synthetischen SAF einen geringeren Energiebedarf sowie tiefere Kosten mit sich bringen können²³. Die Realisierbarkeit konnte jedoch noch nicht in grossem Massstab nachgewiesen werden. Der Bundesrat hält in einem Bericht von 2022 zum Ausbau von NET zur Erreichung der langfristigen Klimaziele fest²⁴: «... CCS und NET [sind] zentrale Elemente, um das Ziel von Netto-Null Treibhausgasemissionen bis 2050 für die Schweiz zu erreichen. Sie sind nötig, um dannzumal schwer vermeidbare Emissionen klimaschädlich zu machen. Die Ansätze sind weitgehend bekannt, aber sie werden noch nicht aktiv in einem klimarelevanten Umfang genutzt.».

²⁰ Siehe Verordnung über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Verordnung) vom 30. November 2012, welche die Verfügbarkeit von Emissionsrechten regelt.

²¹ Ohne Änderung wird das ETS ab 2024 auch Flüge in den EWR sowie aus dem EWR heraus umfassen.

²² Bundesrat (2021), Bundesrat (2022)

²³ Becattini / Gabrielli / Mazzotti (2021)

²⁴ Bundesrat (2022)

2.6 Fazit

Bei der Analyse der identifizierten Massnahmen stimmen bestehende nationale und internationale Studien weitgehend überein. Für das Erreichen von Klimazielen im Luftfahrtsektor ist ein Zusammenspiel der verfügbaren Massnahmen notwendig, eine zentrale Rolle übernehmen in jedem Fall **nachhaltige Drop-in-Treibstoffe**.

3 Nachhaltige Flugtreibstoffe

Während bei der Verbrennung von fossilen Flugtreibstoffen CO₂ freigesetzt wird, welches zuvor für Jahrmillionen in der Erde gebunden war, zielen nachhaltige Flugtreibstoffe auf einen **kurzfristiger geschlossenen Kohlenstoffkreislauf**. Dies heisst, dass bei der Produktion gleich viel CO₂ aus der Atmosphäre abgeschieden werden sollte, wie bei der Verbrennung freigesetzt wird. Gänzlich CO₂-neutral sind nachhaltige Flugtreibstoffe jedoch auch dann nicht, da jeder Herstellungspfad gewisse Restemissionen mit sich bringt.

In diesem Kontext sind nachhaltige Flugtreibstoffe Treibstoffe, welche aus Rohstoffen und Energie aus erneuerbaren Quellen hergestellt werden, gewisse Nachhaltigkeitskriterien einhalten, und welche kerosinähnlich sind. Die geltenden Qualitätsanforderungen an Kerosin (typischerweise Jet-A1) müssen also erfüllt werden und die Treibstoffe müssen ohne Sicherheitseinbussen eingesetzt werden können. Heute sind verschiedene Herstellungspfade dafür zertifiziert, so dass diese Treibstoffe bereits fossilem Kerosin beigemischt werden können. SAF weisen jedoch geringe Unterschiede in der Zusammensetzung auf. So ist der Gehalt einer Molekülklasse, den Aromaten, in nachhaltigen Flugtreibstoffen wesentlich geringer oder gar Null. Dies kann bei zu hohem Beimischgrad materialtechnische Probleme in den gegenwärtig eingesetzten Flugzeugen verursachen. Entsprechend sind nachhaltige Flugtreibstoffe (abhängig vom Aromatengehalt des fossilen Anteils) bislang nur zu einer **maximalen Beimischung von 50 %** zugelassen²⁵. Für einen erneuerbaren Anteil von bis zu 100 % sind geringfügige Materialanpassungen im Treibstoffsystem notwendig. Testflugzeuge haben bereits erfolgreich Flüge mit 100 % erneuerbarem Treibstoff absolviert²⁶, Triebwerks- und Flugzeughersteller kündigen dies zunehmend für Flugzeugmodelle an, welche ab 2025 produziert werden²⁷.

Durch den tieferen Aromatengehalt sowie den fehlenden Schwefel entstehen bei der Verbrennung von SAF geringere Mengen an Feinstaub, was zu geringerer Wolkenbildung und geringeren Feinstaubemissionen an Flughäfen führt²⁸. Nachhaltige Flugtreibstoffe **können deshalb auch Nicht-CO₂-Effekte senken**, was ihre Bedeutung als Instrument zur Minderung der Klimawirkung der Luftfahrt verstärkt. Darüber hinaus verbessert dies auch die lokale Luftqualität, was insbesondere in der Umgebung von Flughäfen vorteilhaft ist.

Die folgenden Abschnitte bieten einen Überblick über die involvierten Technologien für biogene und synthetische SAF (Unterscheidung gemäss Abschnitt 2.2), eine vergleichende Potenzialanalyse sowie eine Einschätzung der Rolle, welche die Schweiz diesbezüglich spielen kann.

3.1 Biogene Treibstoffe

Treibstoffe, welche aus Biomasse hergestellt werden, weisen einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf auf. Sämtliches CO₂, welches bei der Verbrennung dieser Treibstoffe freigesetzt wird, haben zuvor Pflanzen für ihr Wachstum der Atmosphäre entnommen. Durch den Anbau (inklusive Bereitstellung der Anbaufläche) sowie den Raffinierungsprozess werden jedoch zusätzliche Treibhausgase freigesetzt, womit der Lebenszyklus **nicht gänzlich CO₂-neutral** ist. Diese Emissionen können vor allem bei Biomasse, die nur für die Produktion von Treibstoffen angebaut wird, erheblich sein. Dazu kommen weitere negative Auswirkungen auf die Umwelt wie z.B. die Anreicherung von Nährstoffen durch die Verwendung von Düngemitteln²⁹.

²⁵ https://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html

²⁶ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-10-this-a319neo-is-the-latest-to-test-100-saf>

²⁷ <https://boeing.mediaroom.com/2021-01-22-Boeing-Commits-to-Deliver-Commercial-Airplanes-Ready-to-Fly-on-100-Sustainable-Fuels>

²⁸ Brenn et al. (2015)

²⁹ Jeswani / Chilvers / Azapagic (2020)

Bei der Auswahl der Ausgangsstoffe wurde bereits eine grosse Entwicklung zurückgelegt: Biotreibstoffe der ersten Generation beruhen auf zucker-, stärke- oder ölhaltigen Nahrungs- und Futterpflanzen. Als Antwort zur daraus resultierenden **Konkurrenz gegenüber der Nahrungs- und Futtermittelproduktion** entstanden Biotreibstoffe der zweiten Generation: Diese werden aus Abfallstoffen biogenen Ursprungs hergestellt, was die energetische Verwertung bereits genutzter Ressourcen ermöglicht. Eine dritte Generation von Biotreibstoffen sieht bspw. Verwendung von eigens gezüchteten Algen als Rohstoff vor. Sollte die Verwertung von weiteren Abfallströmen nicht gelingen, müsste für eine weitere Skalierung Biomasse in erheblichem Ausmass angebaut werden. Verschiedene Pflanzenarten und Umwandlungsprozesse sind hier in Entwicklung. Die Herausforderung besteht hier zum einen im Land- und Wasserbedarf, den Kosten sowie den Auswirkungen auf das Klima und den weiteren durch den Anbau verursachten Umweltwirkungen. In der Schweiz wie auch in der EU sollen keine biogene Flugtreibstoffe eingesetzt werden, welche zu einer Konkurrenz mit der Nahrungs- oder Futtermittelproduktion führen, siehe Abschnitte 3.3 und 0.

Die Umwandlung von Biomasse in Flugtreibstoffe kann über verschiedene Prozesse realisiert werden: Am einfachsten ist die Umwandlung von Stoffen, welche bereits ähnliche Strukturen wie Kerosin aufweisen. Dies sind Fette und Öle, wie sie in Altspeiseöl (sowie tierischen Abfallstoffen) vorliegen. Der resultierende Treibstoff wird als **HEFA-SPK** (synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids) oder kurz HEFA bezeichnet und ist bereits auf dem Markt erhältlich. Die verfügbare Menge an Ausgangsstoffen ist dabei jedoch weitaus kleiner als die Menge, welche für einen vollumfänglichen Ersatz von fossilem Kerosin benötigt würde.

Die Verwendung von weiteren biogenen Abfallstoffen wie bspw. der Forstwirtschaft oder aus Hausmüll wird deshalb aktuell erforscht, hat aber noch nicht Marktreife erlangt. Dafür sind andere Umwandlungsprozesse wie **Alcohol to Jet** (AtJ) erforderlich³⁰. Dabei wird mittels Fermentation ein Alkohol als Zwischenprodukt gebildet, der mit Raffinierungsprozessen zu einem Flugtreibstoff umgewandelt werden kann. Die Herausforderung liegt hier bei der Steigerung der Effizienz und Reduktion der Kosten.

Die grösste Flexibilität in Bezug auf Ausgangsstoffe würde die sogenannte **Gasification / Fischer-Tropsch** (GFT) Synthese ermöglichen. Bei diesem Prozess wird Biomasse stark erhitzt und damit in einen gasförmigen Zustand umgewandelt. Dabei entsteht eine Mischung von Wasserstoff und Kohlenmonoxid (CO). Für die Umsetzung von Wasserstoff und CO zu Flugtreibstoffen ist die **Fischer-Tropsch-Synthese (FTS)** bereits etabliert³¹. Problematisch sind hier der vergleichsweise geringe Wirkungsgrad von rund 75 % sowie die geringe Kontrolle über die Endprodukte: Grundsätzlich entsteht dabei stets ein Gemisch von verschiedenen Kohlenwasserstoffen³². In der darauffolgenden Raffinierung werden diese getrennt und entweder im Prozess wiederverwendet oder zu verschiedenen Produkten gemischt, darunter Benzin, Kerosin und Diesel. Der Herstellungspfad via FTS ist bereits als Ersatz für Kerosin zertifiziert, die Nebenprodukte können u.a. im Strassen- oder Schiffsverkehr eingesetzt werden.

Nachhaltige biogene Flugtreibstoffe sind **bereits heute auf dem Markt erhältlich**, primär basierend auf der HEFA-Technologie. In Europa verfügt die Firma Neste (Finnland) über die grössten Produktionskapazitäten. Weltweit gehören auch die folgenden Firmen zu den Marktführern: Gevo (USA), Fulcrum (USA), Alder Fuels (USA), Shell (Vereinigtes Königreich), SG Preston (USA), Velocys (Vereinigtes Königreich) und Aemetis, Inc. (USA)³³.

³⁰ Eine Übersicht zu sämtlichen Herstellungspfaden in Entwicklung wurde von der Internationalen Energieagentur erarbeitet: IEA Bioenergy (2019)

³¹ Seit Jahrzehnten wird FTS zur Umsetzung in industriellem Massstab von Kohle sowie Erdgas zu nicht nachhaltigen synthetischen Treibstoffen genutzt.

³² Danish Energy Agency (2022)

³³ <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Offtake-Agreements.aspx>

3.2 Synthetische Treibstoffe (PtL/StL)

Nachhaltige synthetische Treibstoffe stellen einen vollwertigen Ersatz von fossilen Flugtreibstoffen mit deutlich reduzierter Klimawirkung über den gesamten Lebenszyklus dar, da ausschliesslich erneuerbare Energiequellen dafür eingesetzt werden. Bei der Produktion handelt es sich dabei insgesamt um eine Umkehr der Verbrennungsreaktion: Die Verbrennungsprodukte Wasser und CO₂ werden zu Treibstoff umgesetzt. Dafür muss jedoch ein Vielfaches der Energie, welche bei der Verbrennung frei wird, für die Herstellung eingesetzt werden. Aus diesem Grund ist bei einer Hochskalierung der Produktion auch der Ausbau der erneuerbaren Energien mit zu berücksichtigen. Durch sämtliche Prozessschritte, insbesondere die Bereitstellung der Energie, werden dennoch (fossile) CO₂-Emissionen verursacht. Damit sind auch synthetische Treibstoffe **nicht komplett CO₂-neutral**.

Der erste Schritt besteht in der **Bereitstellung von konzentriertem CO₂**. Die involvierten Technologien sind bereits hinreichend erforscht und kleinere Anlagen sind weltweit in Betrieb. Als Quellen kommen dafür die Atmosphäre oder Punktquellen in Frage. Die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre benötigt am meisten Energie und ist am teuersten. Einfacher ist dies an Orten, wo CO₂ in höherer Konzentration vorliegt. Punktquellen mit biogenem CO₂ wie Bioenergieanlagen sind dabei am vorteilhaftesten, da damit hergestellte Treibstoffe einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf aufweisen. Da diese Quellen jedoch nur sehr beschränkt vorhanden sind, kann auch auf nicht-biogene oder nicht vollständig biogene Punktquellen wie Zementwerke ausgewichen werden³⁴. Dabei gilt es festzuhalten, dass damit nicht gleichzeitig die Zementproduktion und die Treibstoffproduktion CO₂-neutral sein können. Vielmehr kann der gesamte CO₂-Ausstoss beider Systeme nur maximal halbiert werden. Die ökonomischen und ökologischen Vor- und Nachteile müssen demnach differenziert betrachtet werden, insbesondere bei der Anrechnung an marktbasierte Systeme.

In einem weiteren Schritt wird Wasser zu Wasserstoff umgesetzt und das abgeschiedene CO₂ zu CO reduziert. Hierfür wird der Grossteil der Energie benötigt. Der PtL-Prozess nutzt dafür Elektrizität³⁵, der StL-Ansatz verwendet direkt Sonnenenergie. Analog zum GFT Prozess (siehe Abschnitt 3.1) wird dieses Gasgemisch mit **Fischer-Tropsch Synthese (FTS)** und anschliessender Raffinierung zu Flugtreibstoff umgesetzt. Alternativ zum Pfad via CO und FTS kommt auch ein **Produktionspfad via Methanol** in Frage. Dabei wird CO₂ und Wasserstoff direkt zu Methanol umgesetzt und dieses weiter zu Treibstoffen verarbeitet. Dieser Prozess wurde industriell noch nicht umgesetzt, kann aber möglicherweise eine höhere Flexibilität, Effizienz oder auch Kontrolle über die Produkte erreichen. An dieser Technologie forscht bspw. das Schweizer Unternehmen Metafuels.

Heute sind erst **kleinere PtL- und StL-Anlagen zu Forschungs- und Demonstrationszwecken** in Betrieb. Zu diesen Anlagen gehört die «Energy System Integration»-Anlage (ESI), die in der Schweiz am Paul Scherrer Institut (PSI) steht. Im Jahr 2021 hat Atmosfair in Deutschland eine PtL Demonstrationsanlage in Betrieb genommen. 2022 ging ebenfalls in Deutschland eine StL-Versuchsanlage in Betrieb. Diese wird von Synhelion betrieben, einem Schweizer Spin-Off der ETH Zürich³⁶. Mit einer Produktionskapazität von (teils weit) unter 1 Tonne Flugtreibstoff pro Tag sind diese Anlagen jedoch noch nicht für eine wirtschaftliche Produktion geeignet, sondern dienen primär als Testplattformen für die Hochskalierung der involvierten Technologiebausteine. Grössere, kommerzielle Anlagen sind heute erst in Planung. Die Herausforderung der PtL- und StL-Technologie ist das Erreichen **geringerer Energieverluste sowie Produktionskosten**. Mit heutiger Technologie kann bestenfalls die Hälfte der einge-

³⁴ Sofern andere Sektoren ihre Klimaziele erreichen, wird die Verfügbarkeit von CO₂ aus Punktquellen, insbesondere nicht-biogenen, bis 2050 stark abnehmen.

³⁵ Um gesamthaft eine Reduktion der THG-Emissionen eines PtL-Treibstoffes erreichen zu können, muss der zur Herstellung verwendete Strom aus erneuerbaren Quellen stammen, vgl. Abschnitt 3.3.

³⁶ <https://synhelion.com/news/synhelion-receives-funding-from-german-federal-ministry-for-economic-affairs-and-energy>

setzten Energie zu PtL-SAF umgesetzt werden³². Bei der weiteren Entwicklung ist die Prozessintegration zentral, so fällt beispielsweise bei der FTS viel Abwärme an, welche vorgelagert für die Abscheidung von CO₂ eingesetzt werden kann und dabei zusätzlichen Energieinput minimiert.

Ebenfalls entscheidend ist die Standortwahl: Sämtliche benötigte Rohstoffe müssen günstig verfügbar sein, insbesondere auch Energie aus erneuerbaren Quellen. Diese muss günstig in grossen Mengen produziert, bei fluktuierenden Energiequellen gegebenenfalls zwischengespeichert und zur Produktionsanlage transportiert werden können. In der Schweiz können diese Voraussetzungen kaum erfüllt werden, europäisch wie auch global jedoch an diversen Standorten³⁷.

3.3 Nachhaltigkeit der Herstellungspfade

Um als nachhaltig klassifiziert zu werden, müssen SAF Herstellungspfade verschiedene Kriterien einhalten. Dieser Abschnitt geht auf die herausforderndsten ein, nämlich den Ressourcen- und Landbedarf sowie die Reduktion der Treibhausgasemissionen. Die regulatorische Umsetzung dieser Kriterien zeigt Abschnitt 0 auf.

Ein wichtiger Faktor für die Nachhaltigkeit ist der jeweilige **Ressourcenbedarf** in Bezug auf Land, Wasser und Rohstoffe. Während erneuerbare Primärenergiequellen (Sonne, Wind) global im Übermass vorhanden sind, ist die Nutzung davon wiederum mit hohem Land- und Rohstoffbedarf verbunden und konkurriert mit dem Bedarf von weiteren Sektoren. Somit kann ein hoher Land- oder Ressourcenbedarf das Potenzial eines Ansatzes stark limitieren. Auch wenn noch nicht über alle Ansätze genügend Daten vorliegen, um diese abschliessend zu vergleichen, sind dennoch bereits wichtige Schlussfolgerungen möglich.

Einen **Überblick über den Land- und Ressourcenbedarf** verschiedener Herstellungspfade von alternativen Treibstoffen bietet **Tabelle 1**. Den geringsten Bedarf an Land und Ressourcen verursachen dabei SAF aus biogenen Abfallstoffen, da deren Herstellung der Erstnutzung der Biomasse zugeordnet wird und entsprechend nur das Einsammeln sowie Raffinieren berücksichtigt wird. Da deren Potenzial jedoch durch die Verfügbarkeit der Rohstoffe limitiert ist, müssen auch weitere Technologien betrachtet werden.

Es zeigt sich somit, dass für den Ersatz der enorm grossen Energiemengen aus fossilen Quellen ein **bedeutender Flächenbedarf** anfällt. Unter den berücksichtigten Technologien ist der Wasser- und Landbedarf für Treibstoffe aus eigens angebaute Biomasse am höchsten. Um beispielsweise den gesamten Bedarf an Flugtreibstoffen in der Schweiz von 2019 mit Rapsöl abzudecken, wäre eine Fläche von rund 16 000 Quadratkilometern notwendig, was die gesamte Landwirtschaftsfläche der Schweiz übersteigt³⁸. Algenbasierte Treibstoffe können mit weniger Wasser und auf weniger Fläche hergestellt werden, wobei es sich hier nicht um fruchtbaren Boden handeln muss. Einen geringeren Bedarf an Wasser und Land weisen nachhaltige synthetische Treibstoffe auf – wenngleich auch im Fall von Photovoltaik oder StL die dafür benötigten Flächen enorm sind.

Ein zentrales Element der Nachhaltigkeit ist die **Reduktion der Treibhausgasemissionen** über den gesamten Lebenszyklus gegenüber fossilen Treibstoffen. Dazu gehören die Herstellung, Lieferkette sowie Verbrennung. Bei der Herstellung von Treibstoffen aus eigens angebaute Biomasse können diverse Emissionen entstehen, darunter CO₂, CH₄, und Stickoxide (inkl. N₂O). Die Menge dieser Emissionen ist abhängig von der verwendeten Pflanzenart sowie ihrem Anbau, wie in der obengenannten Analyse ersichtlich wird (vgl. Tabelle 1). Im Fall von Algenöl können die Treibhausgasemissionen gegenüber fossilem Kerosin beispielsweise nur um ca. 40 % gesenkt werden. Weitere Herstellungspfade mit eigens angebaute Biomasse wie Palmöl oder Rapsöl können höhere Emissionsreduktionen erreichen, jedoch auch deutlich geringere bis zu einer Zunahme von Emissionen verglichen mit fossilem

³⁷ Rojas / Crone / Löhle (2019), Ram et al (2020).

³⁸ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung.html>

Kerosin. Grund dafür ist die geänderte Landnutzung am Anbauort: Wenn beispielsweise Wald abgeholzt wird, um Biotreibstoffe herzustellen, entfällt die CO₂-senkende Wirkung der früheren Vegetation und gespeichertes CO₂ wird aus Biomasse und Boden freigesetzt. Neben der Konkurrenz zur Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln sind biogene Treibstoffe der ersten Generation auch aus diesen Gründen nicht als nachhaltig zu bezeichnen.

Produktionspfad	Landbedarf (m ² /L _{jet-fuel-eq} /Jahr)	Wasserbedarf (L _{H2O} /L _{jet-fuel-eq})	Emissionsreduktion vs. Kerosin*
Altspeiseöl (HEFA)	–	–	84% ₃
Palmöl (HEFA)	2.2 ₁	5'204 ₁	< 58% ₁
Rapsöl (HEFA)	7.4 ₁	5'724 ₁	< 55% ₁
Algenöl (HEFA)	0.9-2.3 ₁	497-1'839 ₁	43% ₁
Power-to-Liquid	~ 0.3 ₁	~ 6.7 ₂	< 95% ₂
Sun-to-Liquid	~ 0.2 ₂	~ 3.5 ₂	< 99% ₂

Tabelle 1: Bedarf an Land und Ressourcen sowie Emissionsreduktion von verschiedenen Herstellungspfaden alternativer Treibstoffe

Quelle 1: Schmidt / Weindorf et al. (2016)

Quelle 2: Treyer / Sacchi / Bauer (2021)

Quelle 3: ICAO (2022)

*verglichen mit Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus von Kerosin gemäss CORSIA, dabei werden Nicht-CO₂-Effekte mangels verlässlicher Daten nicht berücksichtigt

Treibstoffe aus biogenen Abfallstoffen können die Emissionen über den Lebenszyklus deutlich senken, da die Emissionen des Anbaus der Biomasse der Erstnutzung angerechnet werden. Somit fällt nur die Logistik zwischen Erst- und Zweitnutzung sowie die Raffinierung an. Verglichen mit fossilem Flugtreibstoff können Treibstoffe aus biogenen Abfallstoffen die Treibhausgasemissionen um bis zu 84 % senken.

Eine vom BAZL beim PSI in Auftrag gegebene Studie³⁹ hat gezeigt, dass **synthetische SAF** (PtL und StL) über ihren Lebenszyklus eine Emissionsreduktion von über 90 % erreichen können, dies hängt jedoch sehr stark von der CO₂-Intensität⁴⁰ der gesamten eingesetzten Primärenergie ab. So endet aktuell im Laufe der Produktion über die Hälfte der Primärenergie nicht im Treibstoff, sondern als Abwärme. Damit fällt die CO₂-Intensität der Primärenergie mehr als doppelt ins Gewicht und muss für eine namhafte Emissionsreduktion des Endprodukts sehr arm an fossilem CO₂ sein.

Zentral ist im Fall von PtL-Anlagen auch die **Berücksichtigung der gesamten Infrastruktur der Strom- und Wasserstoffversorgung**: Diese umfasst nicht nur die Stromquellen, sondern insbesondere auch den Transport und die Zwischenspeicherung bis zur Verwendung in der Herstellung von SAF. Sowohl bei der Erzeugung als auch beim Transport und der Zwischenspeicherung kann nicht auf existierende Infrastruktur gesetzt werden, da diese mit der bevorstehenden Elektrifizierung von anderen Sektoren bereits zunehmend ausgelastet ist und entsprechend ausgebaut werden müsste.

³⁹ Treyer / Sacchi / Bauer (2021)

⁴⁰ CO₂-Intensität bezeichnet die Masse an CO₂, welches bei der Produktion pro Energieeinheit ausgestossen wird.

3.4 Potenzial für Hochskalierung

Strategien gehen überwiegend davon aus, dass SAF die **Mehrheit des Kerosinbedarfs in 2050 abdecken kann**⁴¹. Welchen Beitrag dazu die jeweiligen Herstellungspfade leisten können, kann aufgrund von Einschränkungen in der Verfügbarkeit von Rohstoffen abgeschätzt werden. So ist HEFA auf öl- und fetthaltige Abfallstoffe angewiesen. Aus diesem Grund kann diese Technologie maximal rund 5 % des Treibstoffbedarfs abdecken⁴². Eine ähnliche Limitierung besteht im Fall von weiteren biogenen Treibstoffen. Hier ist jedoch die Einschränkung schwieriger zu quantifizieren, da noch unklar ist, für welche Rohstoffe sich nachhaltige Herstellungspfade etablieren können. Aber auch hier gehen Prognosen davon aus, dass (inklusive HEFA) maximal 50 % von biogenen Herstellungspfaden abgedeckt werden können⁴³. Im Fall von synthetischen SAF gibt es grundsätzlich keine Limitierung, da die Rohstoffe für die Herstellung zumindest global im Überfluss vorhanden sind. Einschränkend ist hier ausschliesslich der Ausbau der Nutzung von erneuerbarer Primärenergie. Für alle Produktionspfade besteht zudem eine Unsicherheit aufgrund der Entwicklung der globalen Energiesysteme: Die Verfügbarkeit von Biomasse und erneuerbarer Primärenergie ist abhängig vom Einsatz in anderen Sektoren.

Die prognostizierten Treibstoffkosten unterscheiden sich dabei stark zwischen verschiedenen Technologien. **Biogene SAF** können zu minimalen Verkaufspreisen von 1-2 \$/L hergestellt werden⁴³. Abhängig von den Kosten der benötigten Biomasse können diese Preise zwischen heute und 2050 ab- oder auch zunehmen. Die Rohstoffkosten können dabei auch kurzfristig stark schwanken, wie sich im Fall von HEFA-SPK bereits 2022 gezeigt hat. Für **synthetische SAF** ist in den nächsten Jahrzehnten eine deutliche Reduktion der Produktionskosten prognostiziert. Bedingt ist dies primär durch die Vergünstigung der Nutzung von erneuerbaren Energien sowie effizienteren Prozessen. So sollen die Kosten von heute 1.6-5.0 \$/L bis 2050 auf 1.2-2 \$/L reduziert werden⁴⁴. Haupttreiber für die Kosten sind die Quellen des CO₂ sowie der Energie. CO₂ aus Punktquellen ist deutlich günstiger als mittels Direct-Air-Capture, gemäss Prognosen jedoch im Jahr 2050 kaum noch in grossen Mengen verfügbar. Energiekosten sind stark ortsabhängig, am günstigsten ist eine Produktion an Standorten mit hoher Verfügbarkeit von Sonnen- oder Windenergie.

2021 wurden weltweit rund **80'000 Tonnen SAF** hergestellt⁴⁵, was 0.04 % des Kerosinbedarfs aller Fluggesellschaften im Jahr 2021 entspricht⁴⁶. Um die Mehrheit des Kerosinbedarfs im Jahr 2050 abdecken zu können, muss die **Produktion von SAF jährlich um rund 30 % zunehmen**. Bereits in Planung sind Projekte, welche bis 2030 rund 3 % des globalen Kerosinbedarfs produzieren können⁴⁷. 90 % der Produktion aus diesen Projekten entfällt auf HEFA, da dies der Methode mit dem geringsten Technologierisiko entspricht⁴⁷. Parallel müssen jedoch bereits diverse Demonstrationsanlagen die Produktion von weiteren biogenen sowie synthetischen SAF testen und weiterentwickeln, damit diese nach 2030 ihr Potenzial für die grossskalige Produktion erfüllen können. Die ICAO bietet eine Übersicht zu SAF-Projekten und aktualisiert diese regelmässig^{33,48}.

Um diese Hochskalierung zu ermöglichen, sind global Investitionen von jährlich rund 100 Mrd. \$ notwendig⁴³. Dies entspricht ca. 4 % der aktuellen globalen Investitionen im Energiebereich gemäss der Internationalen Energieagentur. Die **Finanzierung der Hochskalierung** ist aufgrund von verschiedenen Faktoren herausfordernd: Investitionen werden über den gesamten Zeitraum von Laborforschung bis zu kommerziellen Anlagen benötigt, eine Rendite kann aber frühestens mit einer zweiten oder dritten

⁴¹ In der Schweiz: Ecoplan (2021), in Europa: Royal Netherlands Aerospace Centre (2021), global: ICAO CAEP (2022), Air Transport Action Group (2020)

⁴² Basierend auf EU-weiter Analyse, Quelle: van Grinsven et al (2020)

⁴³ ICAO CAEP (2022)

⁴⁴ ICAO CAEP (2022), Rojas / Crone / Löchle (2019)

⁴⁵ <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>

⁴⁶ <https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/>

⁴⁷ Mission Possible Partnership (2022)

⁴⁸ <https://datastudio.google.com/s/iWy-HY00860>

kommerziellen Anlage erzielt werden. Zudem kann eine Anlage ab einer gewissen Grösse erst gebaut werden, wenn die gesamte Treibstoffproduktion dieser Anlage bereits verkauft ist. Dies zeigt das grosse Technologie- und damit Investitionsrisiko auf: Investitionsentscheide müssen dann getroffen werden, wenn die Technologie noch nicht gänzlich bekannt ist und Produktionskosten und damit Renditemöglichkeiten noch höchst ungewiss sind, insbesondere im Vergleich mit konkurrierenden Technologien. Flugzeugbetreiber stehen damit in einer herausfordernden Position: Sie können nicht auf einen existierenden Markt zurückgreifen, sondern müssen bei der Hochskalierung von SAF-Produktion aktiv mitarbeiten. Gefragt ist also eine **vertikale Integration**, eine Zusammenarbeit zwischen Produzenten und Verbrauchern, welche bislang in diesem Ausmass nicht notwendig war.

Die Skalierung von SAF und damit das Erreichen von Klimazielen in der Luftfahrt wird erst ermöglicht durch eine intensive **Entwicklung der involvierten Technologien**. Das Ziel dieser Entwicklung ist eine möglichst ökonomische und ökologische Bereitstellung von grossen Mengen SAF. Analog zu bereits etablierten Technologien im Bereich der erneuerbaren Energien können erwartete Lerneffekte abgeschätzt werden. Nur dank diesen auf intensiver Forschungstätigkeit beruhenden Lerneffekten können die oben erwähnten Kostensenkungen überhaupt erst erreicht werden. Technologien werden dabei auf mehreren Anlagegenerationen von Laborprototypen bis zur wirtschaftlichen Grossanlage kontinuierlich weiterentwickelt. Einen Überblick dazu bietet **Abbildung 1**, inklusive einer Übersicht wo Schweizer Projekte einen Beitrag dazu leisten können. Dabei sollte der Fokus auf einer möglichst raschen Reduktion des Technologierisikos liegen, um das Potenzial von Technologien früh abschätzen zu können. Um eine erfolgreiche Hochskalierung von SAF-Produktionen zu erreichen, muss dieses Risiko durch eine Diversifizierung der Entwicklung auf verschiedene Technologien minimiert werden. Die Technologieentwicklung in diesem Bereich wird entsprechend einen wesentlichen Anteil der Kosten für die Hochskalierung benötigen.

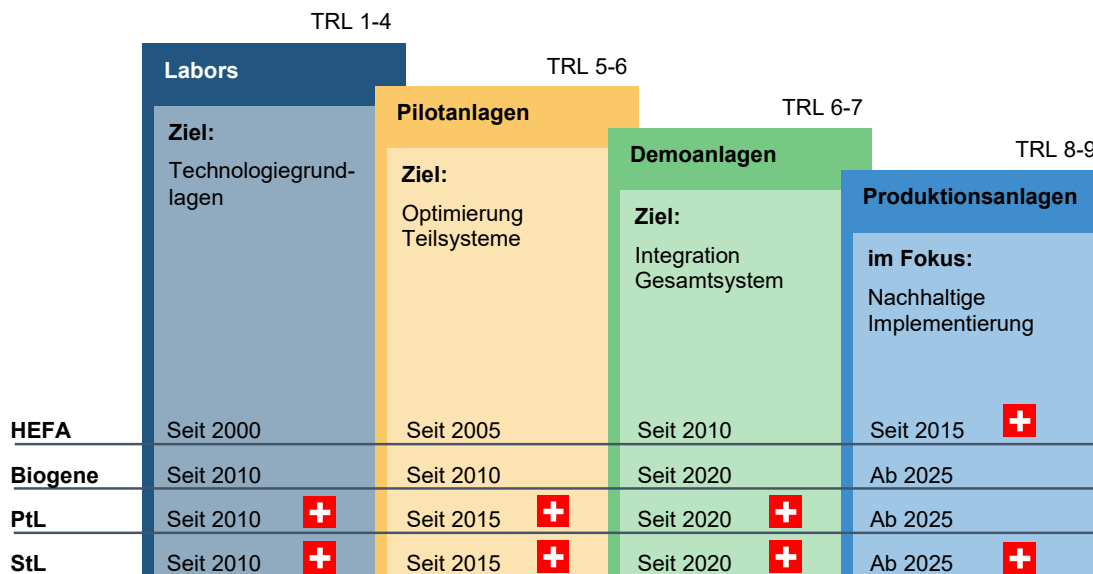


Abbildung 1: Überblick über die Phasen in der SAF-Entwicklung, aufgeteilt nach Zeitraum und Anlagentyp. TRL steht dabei kurz für Technology Readiness Level, Schweizerkreuze kennzeichnen laufende oder geplante Schweizer Projekte.

Nachhaltige synthetische Treibstoffe stellen sowohl international als auch für den Schweizer Markt die vielversprechendste Technologie dar. So bestehen keine unüberwindbaren Grenzen zur Hochskalierung und der Bedarf an Land und Ressourcen ist geringer als bei biogenem SAF, dafür ist der Bedarf an erneuerbaren Energien hoch und muss bei der Skalierung berücksichtigt werden. Dies entspricht auch der Haltung des Bundesrates, der in der langfristigen Klimastrategie der Schweiz festhält: «Im Betrachtungszeitraum bis 2050 dürfte der Einsatz von CO₂-neutralen synthetischen Treibstoffen die einzige wirkliche Alternative sein¹». Herstellungspfade von nachhaltigen biogenen Treibstoffen aus geeigneten (Abfall-)Rohstoffen werden jedoch auf absehbare Zeit ein wesentlicher Teil des internationalen Marktes bleiben. Für den Schweizer Markt kommen biogene SAF nur in Frage, wenn Nachhaltigkeitskriterien erfüllt werden und eine Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelerzeugung ausgeschlossen werden kann.

3.5 Nationale Aspekte

Langfristig wird kaum ein grosser Anteil des Schweizer Bedarfs an nachhaltigen Flugtreibstoffen durch **Eigenproduktion** gedeckt werden. Ausschlaggebend dafür sind wirtschaftliche Aspekte: So müssten die Rohstoffe und die benötigte Energie in der Schweiz verfügbar sein und wirtschaftlich konkurrenzfähig mit einer Produktion im Ausland. Für die Deckung des gesamten Schweizer Flugtreibstoffbedarfs durch **PtL**-Prozesse wären über 70 % des aktuell in der Schweiz produzierten Stroms notwendig⁴⁹. Für eine kommerzielle Produktion von SAF mittels PtL müsste also die Schweizer Produktion von Strom aus erneuerbaren Quellen stark ausgebaut werden, inklusive Transport und ggf. Speicherinfrastruktur. Dies ist innert nützlicher Frist nicht umsetzbar und aktuell in den Energieperspektiven 2050+ so auch nicht vorgesehen⁵⁰. Die Zusatzkosten einer Herstellung von PtL-Treibstoffen in der Schweiz verglichen mit global optimierten Produktionsstandorten sind noch ungewiss, eine erste Studie schätzt sie auf rund

⁴⁹ Der Wasserbedarf zur Herstellung dieser Menge synthetischen SAFs beträgt dagegen nur rund 0.3% des Trinkwasserbedarfs der Schweiz.

⁵⁰ Prognos / TEP Energy / Infrast / Ecoplan (2020)

30 %⁵¹. Eine in der Schweiz hochskalierte Produktion von **StL** ist ebenfalls undenkbar, da die benötigte Sonneneinstrahlung nicht erreicht wird⁵². **Biogene SAF** aus eigens angebaute Biomasse kommen mangels überschüssiger Anbaufläche sowie aufgrund der erwähnten Bedenken bzgl. Nachhaltigkeit nicht in Frage. Die verfügbaren biogenen Abfallstoffe sind (auch mit potenziellen zukünftigen Technologien) ebenfalls nicht ausreichend für eine Deckung des Schweizer Kerosinbedarfs. Eine kommerzielle Herstellung von SAF aus vorhandenen biogenen Abfallstoffen ist grundsätzlich möglich, herausfordernd ist auch hier die Wirtschaftlichkeit gegenüber einer Produktion im Ausland. So plant beispielsweise Helvol eine kommerzielle Anlage (siehe **Abbildung 3** in Abs. 4.4).

Eine wirtschaftliche Produktion ist insbesondere in Nischen möglich, in denen der Treibstoffherstellung in der Schweiz eine höhere Bedeutung zugemessen wird. Denkbar ist dies beispielsweise für die Luftwaffe, welche auf Basis des Aktionsplans Energie und Klima des VBS⁵³ ebenfalls auf SAF setzt. In diesem Rahmen soll die Abhängigkeit von fossilen Energiequellen reduziert werden und die Nutzung von erneuerbaren Energien ausgebaut werden, auch im Rahmen einer inländischen Energiegewinnung. Die Möglichkeiten einer teilweisen Deckung des Kerosinbedarfs durch lokale Herstellung werden aktuell in Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern untersucht.

Insgesamt ist zu erwarten, dass SAF vor allem aus Grossproduktion im Ausland stammt. Für das Schweizer Energiesystem ist durch die Hochskalierung der Nutzung von SAF in der Schweiz also kaum eine nennenswerte Belastung zu erwarten. Für die Herstellung im Ausland gilt es mit entsprechenden Nachhaltigkeitskriterien sicherzustellen, dass dabei auch das lokale Energiesystem nicht strapaziert wird (siehe Abs. 0). Grundsätzlich ist dies für jeden erwähnten Technologiepfad möglich. Ein positiver Effekt der Hochskalierung von SAF-Nutzung ist die Möglichkeit von erhöhter Versorgungssicherheit durch die Diversifizierung der Versorgung. Während die Verfügbarkeit von fossilen Ressourcen stark lokalisiert ist, 90 % der Produktion von Rohöl entfallen auf 22 Staaten⁵⁴, so kann SAF an wesentlich mehr Standorten produziert werden. Dies gilt insbesondere für synthetische SAF basierend auf der Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre.

Einen wichtigen Beitrag zur Hochskalierung von nachhaltigen Flugtreibstoffen kann die Schweiz durch **Forschung und Entwicklung** leisten. Im Bereich synthetische SAF verfügt die Schweiz über mehrere innovative Unternehmen, welche teilweise globale Marktführer sind (siehe auch Abs. 3.2 und 4.4). So hat Climeworks Technologie für die Abtrennung von CO₂ aus der Atmosphäre auf den Markt gebracht, was für die Herstellung von synthetischen SAF zentral ist und bereits in diesem Zusammenhang untersucht wird. Synhelion entwickelt die StL-Technologie und konnte diese bereits in einer Pilotanlage in Jülich (Deutschland) demonstrieren. Metafuels entwickelt eine Technologie zur Herstellung von synthetischen SAF, welche die geringe Effizienz und Selektivität von FTS umgehen soll. Airborn Fuels Switzerland untersucht die Möglichkeit einer kombinierten Anlage für die Produktion und Entwicklung von synthetischen SAF in der Schweiz. Die Machbarkeit einer Produktion von synthetischen SAF wird ebenfalls am Standort Payerne durch swiss aeropole analysiert. Dazu kommt langjährige Erfahrung von diversen technischen Forschungsinstituten. Climeworks und Synhelion als ETH Spin-Offs beruhen auf langjähriger Forschung der ETH Zürich. An der erwähnten Studie für den Standort Payerne ist die EPFL Wallis beteiligt. An Airborn Fuels Switzerland sind Forschende der ZHAW sowie der OST beteiligt. Zudem läuft seit 2021 eine gemeinsame Initiative von Empa und PSI namens «SynFuels», in deren Rahmen Schlüsseltechnologien für die Herstellung von SAF untersucht werden.

In diesen Projekten und Anlagen wird vor allem in der Schweiz weiteres Know-How geschaffen, welches die Hochskalierung dieser Technologien vorwärtstreiben kann. Sobald sich neue Technologien im Labor bewährt haben, werden grössere Pilotanlagen in der Schweiz benötigt. Darüber hinaus wird es für einen

⁵¹ Ram et al (2020)

⁵² Gemäss Synhelion reichen die im Wallis erreichten nationalen Maximalwerte von rund 1'400 kWh/m² zusammen mit den zu geringen Volllaststunden nicht aus für einen wirtschaftlichen Betrieb.

⁵³ <https://www.vbs.admin.ch/de/umwelt/umweltschutz/energie-und-klima.html>

⁵⁴ BP (2022)

weiteren Know-How-Gewinn unverzichtbar sein, PtL- wie auch StL-**Demonstrationsanlagen im Ausland** dort zu errichten, wo langfristig die Produktion stattfinden wird. Gerade auch an diesen Standorten gilt es, früh Erfahrungen mit der gesamten Wertschöpfungskette zu machen. Bisher konnte jedoch weltweit noch keine solche Anlage finanziert werden. Dies spricht dafür, dass verstärkt **multinationale Zusammenarbeit** notwendig ist. Die Schweiz kann diese fördern, indem sie sich in verschiedenen (insbesondere luftfahrtspezifischen) internationalen Gremien entschieden für die Hochskalierung von SAF einsetzt und eine aktive, koordinierende Rolle übernimmt. Die erwähnten Pilot- und Demonstrationsanlagen und eine Schweizer Beteiligung an einer weiteren Hochskalierung im Ausland werden in Abschnitt 4.4 näher erläutert.

4 Staatliche SAF-Förderung

Heute können (biogene) SAF in der Schweiz auf freiwilliger Basis vertankt werden, was für die Flugzeugbetreiber mit Zusatzkosten verbunden ist und somit nur in anteilmässig geringen Volumina geschieht. Mit dieser Ausgangslage ist das Erreichen der Schweizer Klimaziele im Luftfahrtsektor keinesfalls gewährleistet. Gefragt sind klare rechtliche Rahmenbedingungen, welche für alle beteiligten Akteure die richtigen Anreize setzen, damit der SAF-Markt über die nächsten Jahrzehnte schnell wachsen kann. Wie diese ausgestaltet werden sollten, damit sie möglichst effektiv sind und die ambitionierte Hochskalierung von SAF ermöglichen können, wurde in verschiedenen Studien untersucht⁵⁵. Diese Strategien sind sich alle ausnahmslos einig, dass eine **staatliche Förderung sowohl der Nachfrage als auch der Entwicklung notwendig** ist für das Erreichen von Klimazielen im Luftverkehr. Dieses Kapitel zeigt auf, welche Massnahmen auf internationaler und nationaler Ebene bereits bestehen sowie welcher Bedarf für eine weiterführende Förderung besteht.

4.1 Internationaler Kontext

Entscheidend für die Schaffung und den Einsatz von nachhaltigen Alternativen zu fossilen Flugtreibstoffen ist die Berücksichtigung von internationalen Entwicklungen. Für die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO stellen SAF einen wichtigen Pfeiler zur Senkung der Luftfahrtemissionen dar. So verabschiedete die ICAO bereits 2017 eine **2050 Vision for Sustainable Aviation Fuels**, worin sie «die Staaten, die Industrie und andere Interessengruppen [auffordert], bis 2050 einen signifikanten Anteil der konventionellen Flugtreibstoffe durch nachhaltige Flugtreibstoffe (SAF) zu ersetzen». Im **CORSIA**-Programm der ICAO führt die Verwendung von nachhaltigen Flugtreibstoffen zu einer Reduktion der Kompensationsverpflichtungen der Fluggesellschaften (siehe Abschnitt 2.4). Dabei enthält das ICAO-Regelwerk standardisierte Kriterien für die Bemessung der CO₂-Reduktionen von SAF. Im Bericht zu einem ambitionierten Klimaziel für die internationale Luftfahrt weist die ICAO unter allen untersuchten Massnahmen SAF das grösste Potenzial zu⁴³.

In der **EU** besteht mit dem ETS bereits eine gewisse Förderung von SAF (siehe Abschnitt 2.4). Ein deutlicher Ausbau dieser Förderung ist mit dem **Fit-for-55 Paket** vorgesehen, welches die Gesetzesvorschläge für das Reduzieren der Treibhausgasemissionen um 55 % bis 2030 enthält (relativ zum Emissionsniveau von 1990). Im Zusammenhang mit der Förderung sind drei Initiativen davon relevant: Eine **Änderung des ETS** sieht eine Reduktion der Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden Emissionsrechte ab 2024 um jährlich 4.2 % statt 2.2 % vor. Zusätzlich soll zwischen 2024 und 2026 der Anteil der kostenlos zugeteilten Emissionsrechte schrittweise auf null reduziert werden. Dies hat auch eine Auswirkung auf das EHS der Schweiz, welches mit dem ETS der EU gekoppelt ist: Basierend auf dem Abkommen mit der EU zur Verknüpfung der Emissionshandelssysteme⁵⁶ sind die beiden Systeme gleichwertig zueinander weiterzuentwickeln (Äquivalenzprinzip). Ebenso relevant für die Luftfahrt ist eine im Rahmen des «Fit-for-55» Pakets vorgeschlagene **Änderung der Energy Taxation Directive**: So soll Kerosin, welches auf intra-EU-Flügen verwendet wird, neu besteuert werden (siehe Anhang C.1). Dazu plant die EU, CORSIA nur auf Flügen ausserhalb des EWR anzuwenden und stattdessen nur das ETS der EU auf Flügen innerhalb des EWR und ins Vereinigte Königreich anzuwenden. Mit **ReFuelEU Aviation** ist in der EU ferner eine Beimischpflicht für nachhaltige Flugtreibstoffe vorgesehen. Die Details dieses Instruments werden in Abschnitt 4.3 diskutiert. Inwiefern jedoch das Fit-for-55 Paket durch den gesetzgeberischen Prozess noch abgeändert wird, ist aktuell ungewiss.

⁵⁵ Air Transport Action Group (2020), Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. (2020), Deutsche Bundesregierung (2021), Ecoplan (2021), ICAO CAEP (2022), Mission Possible Partnership (2022), Royal Netherlands Aerospace Centre (2021), WEF Clean Skies for Tomorrow (2021),

⁵⁶ Abkommen vom 23. November 2017 zwischen der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der Europäischen Union zur Verknüpfung ihrer jeweiligen Systeme für den Handel mit Treibhausgasemissionen

Die **USA** setzt indes auf absolute Vertankungsziele für SAF, Förderung für die Technologieentwicklung sowie Steuererleichterungen für SAF-Produzenten.

4.2 Bestehende Schweizer Förderung

Die bestehende Förderung von SAF in der Schweiz besteht aus zwei Elementen: Einer Förderung des Marktes durch eine Steuererleichterung sowie einigen Instrumenten welche eine gewisse Unterstützung der Entwicklung erlauben.

Im Rahmen des **Mineralölsteuergesetzes** (MinöStG) besteht in der Schweiz eine Absatzförderung für biogene Treibstoffe. Vorbehaltlich der Neuauflage des CO₂-Gesetzes besteht diese Förderung bis Ende 2024 (siehe Abs. 5.2). So können diese von einer Erleichterung der Mineralölsteuer profitieren, wenn sie gewisse Nachhaltigkeitskriterien einhalten (siehe Abschnitt 0). Für die Schweizer Luftfahrt hat diese Befreiung jedoch **keine grosse Bedeutung**, da 96 %⁵⁷ des Kerosinverbrauchs in der Schweiz auf den internationalen Luftverkehr entfallen, der bereits von der Mineralölsteuer befreit ist. Zudem konnte bisher in keinem Fall eine Steuererleichterung für biogene Flugtreibstoffe geltend gemacht werden, da dafür eine gesonderte Lieferkette notwendig wäre, sprich keine Mischung mit alternativen Treibstoffen aus nicht-nachhaltigen Rohstoffen erfolgen dürfte. Bisher konnte dies von keinem SAF-Lieferanten umgesetzt werden.

Ausserdem bestehen in der Schweiz bereits **Förderinstrumente im Bereich Energie- und Umweltforschung**, welche unter anderem für Entwicklungsprojekte im SAF-Bereich genutzt werden können. Konkret sind dies Beiträge aus der Grundfinanzierung der Hochschulen nach dem Hochschulförderungs- und -koordinationsgesetz (HFKG), dem Finanzierungsbeitrag an den ETH-Bereich, dem Schweizerischen Nationalfonds (SNF) sowie der Innosuisse Projekt- und Programmförderung. Dazu kommen Instrumente des BAFU, BAZL und BFE. Eine detailliertere Übersicht findet sich in Anhang B. Es bestehen also diverse Fördermassnahmen, von welchen die Entwicklung von nachhaltigen alternativen Flugtreibstoffen heute bereits profitieren kann, was nicht zuletzt auch den heutigen ausgezeichneten Stand des Schweizer Know-Hows auf diesem Gebiet ermöglicht hat. Dazu beigetragen hat auch die Spezialfinanzierung Luftverkehr des BAZL, welche die in Abschnitt 3.5 erwähnten Projekte von ZHAW/OST sowie Synhelion unterstützt. Da sich der Themenbereich nachhaltige Treibstoffe nicht klar von weiteren Themen abgrenzen lässt, ist eine genaue Quantifizierung der gesamten vorhandenen Fördermittel im Bereich SAF nicht möglich⁵⁸. Fest steht jedoch, dass der Förderbedarf für kommende Innovationsphasen in der Hochskalierung von SAF die vorhandenen Mittel übersteigt (vgl. Abs. 4.4).

4.3 Absatzförderung

Dieser Abschnitt vergleicht die verschiedenen Fördermassnahmen, welche die Etablierung eines Marktes für SAF unterstützen können. Er folgt einer Analyse der Technischen Universität Hamburg⁵⁹. Darin werden denkbare marktfördernde Instrumente soweit analysiert, dass eine indikative Einstufung bezüglich ihrer Eignung möglich wird. **Tabelle 2** bietet einen Überblick, wer die Adressaten des Instruments sind und somit die Verantwortung für die Umsetzung trägt sowie wer die Kosten davon übernimmt. Dabei zeigt sich, dass die diskutierten Instrumente einen weiten Bereich der Marktstruktur abdecken. Darüber hinaus fasst **Tabelle 2** die zentralen Anforderungen an Förderinstrumente zusammen, welche im Rahmen der Studie analysiert wurden: Effektivität, Einfluss externer Faktoren, statische und dynamische Effizienz (siehe Anhang B für eine detaillierte Ausführung). Die Autoren betonen dabei, dass diese vier Anforderungen nicht

⁵⁷ Quelle: https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Politik/Umwelt/co2_emissionen_grundsatzliches_zahlen.pdf.download.pdf/CO2-Emissionen_des_Luftverkehrs.pdf

⁵⁸ So sind beispielsweise Projekte zur Entwicklung der Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre oder Elektrolyse nicht direkt dem SAF-Bereich zuzuordnen, sind jedoch auf dem Gebiet von synthetischen SAF zentral.

⁵⁹ Bullerdiek / Kaltschmitt (2020)

abschliessend sind, somit auch keine quantitativ vergleichende Einschätzung der Eignung erlauben sondern lediglich eine erste indikative Einstufung.

Kriterium	Luftverkehrs- Steuer	CO ₂ -Steuer	EU ETS	CORSIA	Beimischungs- quote	THG- Minderungsquote	Festvergütung	Ausschreibungen
Effektivität	-	-	-	-	+	+	o	+
Einfluss Rohölpreis	Nicht anwendbar	-	-	-	+	+	o	+
Statische Effizienz	Nicht anwendbar	+	+	+	+	+	-	+
Dynamische Effizienz	Nicht anwendbar	+	o	+	o	+	-	+
Adressat Instrument	Fluggesellschaft				Kraftstoff-Inverkehrbringer		Kraftstoff-Hersteller	
Adressat Mehrkosten	Fluggesellschaft / Passagier						Fiskus	

Tabelle 2: Bewertung möglicher Förderinstrumente für den Einsatz nachhaltiger Flugtreibstoffe aus Bullerdiel / Kaltschmitt (2020)⁶⁰ Die untersuchten Instrumente wurden unter jedem Punkt qualitativ entweder als «hoch geeignet (+)», «durchschnittlich/neutral geeignet (o)» oder «gering geeignet (-)» eingestuft – oder als «nicht anwendbar», wo dies zutrifft.

Von den möglichen Instrumenten fallen mangels Umsetzbarkeit in der Schweiz diejenigen weg, bei welchen die entstehenden Kosten alleine vom Staat übernommen werden sollten (Festvergütungen und Ausschreibungen)⁶¹. Von den übrigbleibenden werden mit dem EHS/ETS und CORSIA beiden in der Schweiz aktiven Instrumenten eine geringe Eignung zugesprochen. Begründet ist dies mit dem hohen Preis des SAF-Einsatzes, verglichen mit Emissionsberechtigungen respektive Offsets. Von den alternativen Lenkungsinstrumenten schneiden Ticket- und CO₂-Steuern ebenfalls ungenügend ab. Die deutsche Luftverkehrsteuer, wie jede Ticketsteuer, bringt grundsätzlich keinen Anreiz für die SAF-Vertankung mit sich. Auch wenn ein solcher eingebaut wird, kann dies zu einer Marktverzerrung führen, wie im Rahmen der in der Schweiz vorgeschlagenen Flugticketabgabe erkannt wurde. Damit CO₂-Steuern die Etablierung eines SAF-Marktes effektiv unterstützen, müssten sie höhere Mehrkosten verursachen als das Vertanken von SAF. CO₂-Steuern in einer solchen Höhe sind insbesondere zu Beginn der Hochskalierung der SAF-Produktion undenkbar. Zudem schwankt die benötigte Höhe mit dem Preisniveau von Rohöl und SAF stark, was eine Planung deutlich erschwert. Als besonders geeignet haben sich dagegen Quotenmodelle herausgestellt, entweder basierend auf der vertankten Menge (energie-, masse- oder volumenbasierte Beimischungsquote) oder auf der damit erzielten Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Minderungsquote). Diese Ansätze werden folglich genauer ausgeführt, eine detaillierte Beschreibung der anderen erwähnten Massnahmen findet sich in Anhang C.

⁶⁰ Um die Lesbarkeit zu verbessern, wurde die Reihenfolge der Spalten angepasst.

⁶¹ Ebenfalls nicht umsetzbar und dementsprechend nicht berücksichtigt wurde der in den USA angewandte Ansatz von Steuererleichterungen für Produzenten: Da die Schweiz auf Import von SAF angewiesen ist, hätte dies nur eine marginale Wirkung.

Ein **Quotenmodell** schreibt Marktakteuren während einer gewissen Periode einen SAF-Mindestanteil vor. Die Verantwortung für das Erreichen der Quote kann entweder den Treibstofflieferanten oder den Fluggesellschaften auferlegt werden. Fluggesellschaften hier die Verantwortung zu übergeben, ist weniger effizient, da sie Treibstoff grösstenteils über den Umweg von Lieferanten bestellen, was für jede Fluggesellschaft an jedem Flughafen in einer administrativen Mehrbelastung resultieren würde. Für die Funktion eines Quotenmodells muss das Nichterreichen von Zielen wirtschaftlich grössere Nachteile mit sich führen als das Erreichen der Ziele. Ein Vertankungsziel sollte also **Sanktionen** für verpasste Quoten enthalten.

Für jede Technologie (biogene SAF, StL, PtL) bestehen **Unterschiede im Förderbedarf**: Die Einführung einer Quote über alle Technologien hätte zur Folge, dass jeweils die günstigste Variante eingesetzt wird. Dies hat den Nachteil, dass dadurch Skaleneffekte nur für diese Technologie auftreten (grösseres Produktionsvolumen führt zu tieferen Preisen). Damit vergrössert sich der Vorteil gegenüber anderen Technologien. Um dem entgegenzuwirken, gibt es den Ansatz von Multiplikatoren oder Subquoten. Multiplikatoren würden bedeuten, dass gewisse (weniger weit entwickelte) Technologien ein Mehrfaches an ein Vertankungsziel zählen, verglichen mit etablierten Technologien. Dieser Ansatz macht jedoch die Planung der erreichbaren Emissionsreduktion für den Gesetzgeber äusserst schwierig, zudem ist die Quantifizierung des Multiplikators schwierig: So müssten Unterschiede bzgl. Preis, Klimabilanz und allgemein Umweltauswirkungen ausgewogen werden. Alternativ können Subquoten dem unterschiedlichen Entwicklungsstand von einzelnen Herstellungspfaden Rechnung tragen. Dies würde heissen, dass für jede Technologie ein einzelnes Vertankungsziel besteht und somit der Wettbewerb auf Hersteller derselben Technologie beschränkt ist⁶². Damit kann die erreichbare Emissionsreduktion kurzfristig geplant werden und längerfristig die Technologieentwicklung zu Gunsten von Technologien mit hohem Potenzial gelenkt werden. Eine weitere Studie der Technischen Universität Hamburg kommt zum Schluss, dass Subquoten den geeignetsten Ansatz für eine Unterscheidung nach Technologie darstellen⁶³. Damit können die Technologierisiken für Treibstofflieferanten und -verbraucher gesenkt werden, die Investitionskosten für jede Technologie werden auf alle Nutzer verteilt.

Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass Quotenmodelle mittels **Tankering** (Tanktourismus) umgangen werden. Dies bezeichnet die Praxis, an Orten mit tiefen Kerosinpreisen zu viel Treibstoff zu tanken, damit am nächsten Flughafen mit höheren Preisen weniger getankt werden muss. Das führt zu erhöhtem Treibstoffverbrauch und somit zusätzlicher Klimabelastung, was es zu verhindern gilt. Falls sich der Treibstoffpreis durch eine Quote stark von umliegenden Staaten unterscheidet, müssen entsprechende Massnahmen gegen Tankering ergriffen werden. Tankering ist bei Flügen zwischen Gebieten mit SAF-Quote und Gebieten ohne Quote eine Gefahr, da dadurch ein beträchtlicher Preisunterschied entstehen kann. Dementsprechend ist es zentral, Quoten über Landesgrenzen hinweg anzugleichen oder wo dies nicht möglich ist, einen Mechanismus zur Vermeidung von Tankering vorzusehen.

Die **Effektivität** ist für Beimischungsquoten wie auch THG-Minderungsquoten gegeben, der Einsatz einer (wenn auch verschieden definierten) Menge SAF ist unabhängig von externen Faktoren wie dem Unterschied zwischen dem Preis von SAF und konventionellem Kerosin gewährleistet. Der Unterschied zwischen beiden Ansätzen besteht primär in den Anreizen für Hersteller. Während bei beiden durch den Wettbewerb zwischen Herstellern ein Anreiz für **Kostenminimierung** geschaffen wird, besteht dazu bei THG-Minderungsquoten ein stärkerer Anreiz für die **Minimierung der Klimawirkung**. Im Fall von Beimischungsquoten müssen hierfür Nachhaltigkeitskriterien definiert werden, welche jedoch auch nur in einem gewissen Bereich einen Anreiz schaffen können. Da bei beiden Ansätzen ein Anreiz für die Minimierung von weiteren Umweltbelastungen fehlt, muss dies in beiden Fällen von stringenten Nachhaltigkeitskriterien übernommen werden.

⁶² Im Fall von THG-Minderungsquoten kann dabei auch für NET eine Subquote enthalten sein.

⁶³ Bullerdiek / Neuling / Kaltschmitt (2021) kommt für THG-Minderungsquoten zu diesem Schluss, der jedoch auch für Beimischungsquoten zutrifft.

In Europa sind Quotenmodelle aktuell in verschiedenen Staaten implementiert oder in Planung, so bspw. in Deutschland, Finnland, Frankreich, den Niederlanden, Norwegen, Schweden und im Vereinigten Königreich⁶⁴. Der deutsche Ansatz fokussiert dabei auf synthetische SAF, wofür eine Quote im Gesetz verankert wurde⁶⁵. Ggf. werden jedoch Beimischpflichten auf nationaler oder regionaler Stufe in EU-Mitgliedstaaten durch einen Vorschlag der EU ersetzt. So bildet eine Beimischungsquote das Kernstück der ReFuelEU Aviation Initiative, welche Teil des **Fit-for-55 Pakets** ist⁶⁶ (siehe Abs. 4.1). Die in der EU vorgesehenen Quoten inkl. Vergleich mit der deutschen Subquote sind in **Abbildung 2** dargestellt. Zur Erreichung der Quote sind biogene Treibstoffe der ersten Generation ausgeschlossen. Der Gesetzesvorschlag der europäischen Kommission ist auf Flughäfen mit jährlich über einer Million Passagiere oder 100'000 Tonnen Fracht limitiert. Damit sind 95 % des (ab EU) abfliegenden Verkehrs miteingebunden aber kleine Flughäfen haben keine unnötig hohe administrative Bürde. Flugzeugbetreiber fallen nur darunter, wenn sie mindestens 729 Starts im Jahr ab diesen Flughäfen anbieten. Für die Erfüllung der Quote verantwortlich sind jedoch die Treibstofflieferanten (dies erleichtert die Umsetzung, da es bedeutend weniger Lieferanten als Flugzeugbetreiber gibt), hier gibt es auch keine Ausnahmen für kleinere Lieferanten. Als Konsequenz einer verfehlten Quote muss die fehlende Menge im Jahr darauf zusätzlich geliefert werden. Dazu kommt eine Strafe, welche mindestens das Doppelte des damit im ersten Jahr eingesparten Betrags beträgt. Vorgesehen ist auch ein Mechanismus zur Verhinderung von Tankering: So sieht dieses vor, dass 90 % des Kerosins, welches auf Flügen mit Abflug in der EU verbraucht wird, auch in der EU getankt werden muss. Im Rahmen dieser Massnahme besteht eine Meldepflicht für Airlines aggregiert nach Flughafen, sofern diese eine gewisse Grösse überschreiten (siehe oben).

⁶⁴ Eine Übersicht bietet WEF Clean Skies for Tomorrow (2020)

⁶⁵ Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013, Stand 24. September 2021, § 37a, Absatz 4a

⁶⁶ Ebenfalls Teil von Fit-for-55 ist die entsprechende Initiative für die Schifffahrt, FuelEU Maritime. Diese enthält eine THG-Minderungsquote, um die grössere Technologievielfalt in diesem Sektor nicht einzuschränken.

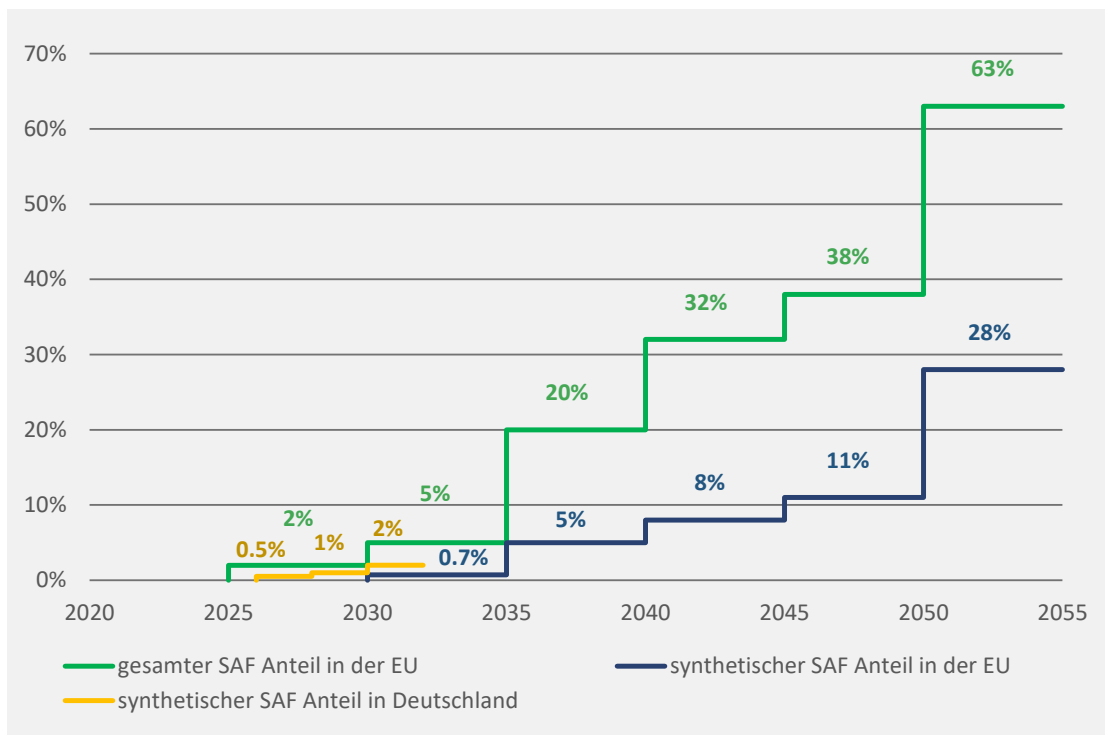


Abbildung 2: Geplante SAF Beimischquoten in der EU und bestehende Quote in Deutschland

Damit SAF ihr Potenzial für Emissionsreduktionen im Luftverkehr erreichen können, muss die Etablierung des SAF-Markts in der Schweiz und global wesentlich beschleunigt werden. Von den möglichen Massnahmen hat sich eine Beimischpflicht als am besten geeignet herausgestellt. Die anzustrebende Quote ist dabei entweder über die zu vertankende Menge definiert (Beimischungsquote) oder über die damit zu erreichende Emissionsreduktion (THG-Minderungsquote). THG-Minderungsquoten verfügen dabei über stärkere Anreize zur Emissionsreduktion, während Beimischquoten von Nachhaltigkeitskriterien begleitet werden müssen, um diesen Effekt zu gewährleisten. Im Hinblick auf die **Internationalität** des Luftfahrtsektors ist eine Beimischungsquote jedoch zu bevorzugen, damit das Schweizer Vorgehen keinen Alleingang ohne Abstimmung mit internationalen Partnern darstellt. Dafür sollten auch die Höhe der Quote und damit die Mehrkosten durch die Beimischung ungefähr denjenigen der umliegenden Staaten entsprechen. So kann ein internationaler Markt ohne Wettbewerbsverzerrung und entsprechende Nachteile für Schweizer Akteure etabliert werden, was für das Erreichen von Klimazielen aber auch für Flugzeug- und Flughafenbetreiber, Treibstoffhersteller und -lieferanten Planungssicherheit schafft.

4.4 Bedarf für Entwicklungsförderung

Um die in Abschnitt 3.4 aufgezeigte Hochskalierung rechtzeitig für das Erreichen von Klimazielen zu ermöglichen, hat das BAZL einen Bedarf für eine staatliche Förderung der Entwicklung identifiziert. Dies entspricht sämtlichen Quellen, welche eingangs in Kapitel 4 aufgelistet sind. Die Finanzierung der Entwicklung gänzlich der Industrie zu überlassen, würde mehrere Risiken mit sich bringen: So würden in den ersten Jahren primär Investitionen in risikoarme Technologien wie biogene SAF fließen. Damit würde ein Lock-In Effekt entstehen, Investitionen in risikoreichere Technologien für synthetische SAF fehlen und damit die Verfügbarkeit von SAF längerfristig gefährdet werden. Zudem würde das Potenzial für Effizienzsteigerungen der Herstellungspfade kaum optimal ausgenutzt und damit Lerneffekte nicht ausgelöst, was zu höheren Preisen und ggf. höherer Umweltbelastung führt.

Letztlich hätten Investoren und weitere Stakeholder ohne Zusatzmassnahmen keinen Anreiz, Forschungsergebnisse zu teilen, was zu verpasstem Potenzial für Emissionsreduktionen führt. Auch wenn die Aviatikindustrie die Entwicklung von SAF nicht alleine finanzieren wird, spielt sie dennoch eine zentrale Rolle, wie in Abschnitt 3.4 festgehalten. Dazu gehört insbesondere die Abnahme von Treibstoff aus ersten, noch nicht wirtschaftlichen Anlagegenerationen.

Diese Entwicklungsförderung ist – in der Schweiz wie auch international – bereits angelaufen. Aus Sicht BAZL ist der Bedarf dafür solange gegeben, wie eine wirtschaftliche Deckung des SAF-Bedarfs noch nicht möglich ist. Neben den Anlagen für HEFA-SAF (mit insgesamt stark limitiertem Potenzial) existiert weltweit noch keine wirtschaftliche Anlage für die Produktion von SAF. Bis dies der Fall ist, werden noch mehrere Generationen von Anlagen benötigt. Die Förderung dieser Entwicklung ausschliesslich anderen Staaten zu überlassen, hätte dabei eine nicht tragbare Abhängigkeit bei der Erreichung von Klimazielen zur Konsequenz. Wie das Beispiel von Synhelion zeigt (siehe Steckbrief), hätte dies auch eine Gefahr der Abwanderung von innovativen Schweizer Unternehmen zur Folge. Vielmehr soll hier auf eine möglichst aktive Zusammenarbeit gesetzt werden, um Synergien optimal auszunützen. Für die Hochskalierung von vielversprechenden SAF-Technologien müssen führende Technologien aus verschiedenen Staaten optimal kombiniert werden. Ein Beitrag der Schweiz ist dort am wahrscheinlichsten, wo bereits Know-How vorhanden ist.

Mit einer Förderung der SAF-Entwicklung durch die Schweiz (siehe auch Abs. 3.5) wird mehrfacher Nutzen geschaffen: Das Erreichen von Klimazielen wird erst mit dem Vertanken von SAF ermöglicht. Zudem profitiert der Forschungs- und Industriestandort Schweiz. Die Wertschöpfung besteht dabei in der Entwicklung selbst aber auch danach im Export der entwickelten Technologien. SAF entspricht einem vielversprechenden Wachstumsmarkt und damit einer grossen Chance für den Standort Schweiz. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Einsatz von Schweizer Technologien in Demonstrations- und später auch in Produktionsanlagen im Ausland. Im Rahmen der Entwicklungsförderung (Anschubfinanzierung) durch die Schweiz soll dies explizit möglich sein (siehe Abs. 5.2). Das Vertanken von SAF, welche in diesen Anlagen produziert werden, kann direkt ein Beitrag zum Erreichen der Schweizer Klimaziele leisten.

Aktuell gibt es nur einen Schweizer Akteur mit einem öffentlich angekündigten Projekt im Bereich **biogene SAF**. So hat Helvoil den Bau einer **Produktionsanlage** im Wallis angekündigt, wo Treibstoffe für den Strassen- und Luftverkehr aus Altspeiseöl hergestellt werden sollen (siehe Steckbrief in Abbildung 3). Der Förderbedarf für diese Anlage ist noch ungewiss, da die Wirtschaftlichkeit der Produktion noch unbekannt ist, wie auch der Forschungsaspekt im Bereich der Flugtreibstoffe.


<div>  <ul style="list-style-type: none"> • 2021 gegründet • Schweizer Produktion von Treibstoffen aus Altspeiseöl und tierischen Fetten geplant, darunter auch SAF • Ab 2024 Jahresproduktion von 80'000 t Treibstoff vorgesehen </div>			
2020-24	<ul style="list-style-type: none"> • Planung und Bau der Anlage • Optimierung des HEFA-Prozesses • Baugesuch wurde 2022 eingereicht 	\$ Eigene Finanzierung bis auf SAF-Teil gesichert	TRL 9
Ab 2024	<ul style="list-style-type: none"> • Produktion von jährlich ca. 100'000 t • Nutzung bestehender Infrastruktur • Einsatz als Forschungsplattform möglich 	\$ Investition von rund 100 Mio. CHF \$ Förderung durch UBS-Fonds \$ Förderbedarf für SAF-Herstellung besteht	TRL 9

Abbildung 3: Übersicht zu Entwicklungen im Bereich einer Schweizer Produktionsanlage für biogene SAF am Beispiel der Schweizer Firma Helvoil SA

Im Bereich **StL** kann der Förderbedarf bereits klar aufgezeigt werden (siehe **Abbildung 4**). Die zugrundeliegende **Forschung** an der ETH Zürich wurde durch Förderung von Seiten der Schweiz, Deutschland und der EU ermöglicht. Dazu gehört eine kleine Versuchsanlage auf dem Dach der ETH Zürich.

Ein nächster Schritt der Hochskalierung findet zwischen 2022 und 2024 in einer **Pilotanlage** in Jülich (Deutschland) statt, wobei ein Grossteil der Förderung durch Deutschland zur Verfügung gestellt wird. Dies zeigt die Gefahr einer Abwanderung von Schweizer Technologie. Eine nächstgrössere **Demonstrationsanlage** soll zwischen 2024 und 2026 in Spanien errichtet und betrieben werden. Eine Planungsstudie zu dieser Anlage wird bereits durch die Spezialfinanzierung Luftverkehr gefördert. Für die Markteinführung besteht eine Zusammenarbeit mit der Swiss, welche den in diesen Anlagen produzierten Treibstoff in ihrer Flotte einsetzen wird. Damit ist die bisherige Entwicklung von Synhelion ein Erfolgsbeispiel für das Potenzial von Schweizer Technologie. Die weitere Entwicklung soll nun dazu beitragen, das Technologierisiko schnellstmöglich zu minimieren, um das Potenzial dieser Technologie genauer bestimmen zu können. Sollte sich das Potenzial auf den nächsten Anlagegenerationen bestätigen, kann in einem nächsten Schritt zwischen 2025 und 2030 eine **erste Produktionsanlage** errichtet werden. Auch diese wird noch nicht wirtschaftlich sein und ggf. einen gewissen Förderbedarf aufweisen.

 Synhelion <ul style="list-style-type: none"> • 2016 als ETH Spin-Off gegründet • Weltweit führender Technologieprovider im Bereich StL • Ab 2030 Jahresproduktion von 700'000 t SAF vorgesehen 			
2010-20	<ul style="list-style-type: none"> • Prototypen (Zürich, Spanien) • Kleinmengen SAF produziert • Entwicklung von industriellen Komponenten 	\$ Förderung durch Schweiz, Deutschland und EU	TRL 1 ⇨ 5
2021-22	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyp auf Solarturm in Jülich (DE) • Produktion von Syngas demonstriert 	\$ Förderung durch Schweiz (0.33 Mio. CHF) und Deutschland (0.4 Mio. EUR) \$ Eigeninvestition von 15 Mio. CHF	TRL 5 ⇨ 6
2022-24	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotanlage in Jülich (DE) • Demonstration gesamter Prozesskette • Produktion von jährlich mehreren Tonnen 	\$ Förderung durch Schweiz (0.75 Mio. CHF) und Deutschland (3.9 Mio. EUR) \$ Eigeninvestition von 25 Mio. CHF \$ Abnahme von SAF durch Swiss	TRL 6 ⇨ 7
2024-26	<ul style="list-style-type: none"> • Demoanlage nahe Madrid (Spanien) • Planungsbeginn 2022, Baubeginn 2024 • Demonstration kommerzieller Produktion • Produktion von jährlich ca. 1'000 Tonnen 	\$ Förderung der Planung durch BAZL \$ Förderbedarf für Bau/Betrieb besteht \$ Investitionsvolumen noch unklar (erwartet ca. 20-40 Mio. CHF) \$ Abnahme von SAF durch Swiss und Lufthansa	TRL 7 ⇨ 9

Abbildung 4: Übersicht zu Entwicklungen im Bereich SAF via Sun-to-Liquid Route am Beispiel des Schweizer Technologieproviders Synhelion SA

Anders als im Fall von StL gibt es im Bereich PtL deutlich mehr relevante Technologien und entsprechende Akteure im internationalen Umfeld. Einen europäischen Überblick bietet eine Studie von Transport & Environment⁶⁷. Darin wird aufgezeigt, dass heute noch keine Produktionskapazitäten bestehen, in Betrieb ist einzig eine erste Pilotanlage in Deutschland. Es besteht also ein bedeutender Förderbedarf, um hier eine rasche Hochskalierung zu erreichen. In der Schweiz läuft seit 2021 ein gemeinsames dreijähriges **Forschungsprojekt** der Empa und dem PSI namens SynFuels. Dieses hat das Ziel, neue Prozesse für die Herstellung von synthetischen SAF zu entwickeln. Ebenfalls aktiv auf diesem Gebiet ist die Schweizer Firma Metafuels, welche eine alternative Syntheseroute via Methanol anstelle dem Fischer-Tropsch Pfad untersucht (siehe **Abbildung 5**). Für solche Projekte in einem frühen Stadium kann vielfach existierende Infrastruktur genutzt werden, wie der Energy System Integration (ESI) Plattform am PSI. Eine weitere Skalierung, wie sie in den nächsten Jahren zu erwarten ist, bedarf jedoch einer neuen Infrastruktur. Eine **Pilotanlage** könnte im Sinne eines Leuchtturmprojekts eine Bündelung der

⁶⁷ Transport & Environment (2022)

Schweizer SAF-Innovation auf einer Forschungsplattform ermöglichen. Neben der Entwicklung neuer Technologien besteht auch das Potenzial der Weiterentwicklung und Integration bestehender Technologie in der Schweiz. Eine **lokale Demonstrationsanlage** könnte die Technologieentwicklung noch weiterbringen und bereits heute kommerziell Treibstoffe produzieren.

Aktuell arbeiten mit Airborn Fuels Switzerland sowie swiss aeropole mehrere Akteure an der Evaluierung von Business Cases in diesem Gebiet. Die grösste Herausforderung besteht dabei in der Beschaffung von ausreichender Energie aus erneuerbaren Quellen, welche zusätzlich zur heutigen Produktion bereitgestellt werden sollte und das Schweizer Energiesystem nicht weiter belasten darf. Wirtschaftlich günstiger ist voraussichtlich eine **Demonstrationsanlage im Ausland** an einer Stelle mit einem höheren Potenzial für die Nutzung von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen. Insbesondere ist es von Vorteil, wenn eine Demonstrationsanlage an einem Ort gebaut wird, der für eine spätere Hochskalierung zu einer Produktionsanlage geeignet ist. Im Fokus einer Förderung durch die Schweiz steht auch bei Anlagen im Ausland Schweizer Technologie. Bei StL und PtL kann sich die (unwirtschaftliche) Entwicklung bis zu einer **ersten Produktionsanlage** erstrecken, wofür eine Förderung durch die Schweiz denkbar ist.


 <ul style="list-style-type: none"> • 2021 gegründet • Technologieprovider für Synthese von SAF aus Methanol • Ziel: Ersatz von ineffizienter Fischer-Tropsch Synthese 			
2020-24	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung neuartigen Katalysators • Optimierung des Prozesses 	\$ Eigene Finanzierung	TRL 1 → 3
2022-24	<ul style="list-style-type: none"> • Pilotanlage am PSI • Zertifizierung als SAF für Beimischung bis 10% angestrebt • Durchsatz von täglich ca. 100 l 	\$ Investitionsbedarf rund 10 Mio. CHF \$ Förderbedarf für Bau/Betrieb besteht	TRL 3 → 6
2024-26	<ul style="list-style-type: none"> • Demoanlage als Folgeprojekt • Zertifizierung als SAF für Beimischung bis und über 50% angestrebt • Produktion von jährlich ca. 4'000 t 	\$ Investitionsvolumen noch unklar (erwartet ca. 15-25 Mio. CHF) \$ Förderbedarf für Bau/Betrieb besteht	TRL 6 → 9

Abbildung 5: Übersicht zu Entwicklungen im Bereich SAF via Power-to-Liquid Route am Beispiel des Schweizer Technologieproviders Metafuels AG

Fest steht, dass **vorhandene Mittel aus bestehenden Instrumenten nicht ausreichen** für die Deckung dieses Förderbedarfs. Eine Lücke besteht insbesondere im Bereich der Finanzierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen bis zur Markteinführung. In diesen Phasen stehen die mit Abstand grössten Fördermittel (Hochschulbeiträge und SNF) nicht zur Verfügung. So summiert sich die Förderung durch die verbleibenden Instrumente auf einen weitaus kleineren Betrag. Wie oben aufgezeigt entspricht dies im Fall von synthetischen SAF den aktuellen Phasen der Entwicklung. Eine grafische Übersicht zu dieser Lücke der bestehenden Fördermittel bietet die Website «Innovationslandschaft» des BAFU⁶⁸. Da die bestehenden Mittel nicht eindeutig dem Bereich SAF zugeordnet werden können (siehe Abs. 4.2), lässt sich auch die Lücke darin nicht präzise beziffern. Fehlende Mittel fallen in den Bereich von 20-50 Mio. CHF jährlich, was rund 10 % der Förderung von Energieforschung in der Schweiz entspricht.

⁶⁸ Quelle (Stand 2016): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/bildung/umweltforschung/innovationslandschaft-umwelt-energie.html>

Bis zur Realisierung einer zusätzlichen Förderung müssen die bestehenden Instrumente in diesem Gebiet möglichst effektiv eingesetzt werden. Dafür gilt es, sämtliche Instrumente der Bundesverwaltung, welche auf diesen Bereich ausgerichtet sind, zu koordinieren und dieses Thema entsprechend zu priorisieren. Dazu gehört aus dem BAZL die Spezialfinanzierung Luftverkehr sowie aus dem BFE das Pilot- und Demonstrationsprogramm und SWEET (Swiss Energy Research for the Energy Transition). Geachtet wird dabei auf eine enge Kooperation der entsprechenden Ämter, um die Förderaktivitäten aufeinander abzustimmen. Vom Umfang her können schätzungsweise jährliche Mittel von 6-10 Mio. CHF eingesetzt werden. Damit ist eine Unterstützung von Forschungs- und Pilotanlagen möglich, sowie Planungsstudien zu Demonstrations- und ggf. Produktionsanlagen. Eine Unterstützung von letzteren über dieses Stadium hinaus wird damit jedoch kaum möglich sein.

Eine zusätzliche Förderung sollte eindeutig **subsidiär** gestaltet werden und primär zusätzliche Investitionen aus der Industrie auslösen. Dabei soll die Förderung nur dort eingesetzt werden, wo eine **zusätzliche Wirkung** im Vergleich mit bestehenden Projekten (auch im Ausland) erzielt werden kann. Die Hochskalierung von Produktionspfaden soll dabei nur dann gefördert werden, wenn diese die **Nachhaltigkeitskriterien** einhalten, welche einen Einsatz in der Schweiz ermöglichen (siehe Abschnitt 0). Diese zusätzliche Förderung soll einer **Anschubfinanzierung** entsprechen. Entsprechend ist die Förderung aufzuheben, sobald die gesamte Produktion von SAF den Bedarf wirtschaftlich decken kann, oder ausreichend Investitionen für diese Entwicklung bereitstehen.

Bis dahin ist die **Kompatibilität** mit bestehenden Instrumenten zentral, da diese auch weiterhin im Bereich von SAF eingesetzt werden sollten. Einfacher umsetzbar als die Schaffung neuer Instrumente wäre gegebenenfalls eine **Aufstockung von bestehenden Instrumenten**. Die Herausforderung dabei besteht in den Anforderungen an Instrumente, welche über die Innovationsphasen stark ändern können. So nimmt mit zunehmender Grösse von Anlagen das Investitionsvolumen zu, aber gleichzeitig das Investitionsrisiko und der anteilmässige Förderbedarf ab. Anstelle von a-fonds-perdu Mitteln, welche anfangs für Forschungsprojekte gefragt sind, würden für Anlagen in einem späteren Entwicklungsstadium beispielsweise Bürgschaften relevant.

Die grösste Herausforderung der Entwicklung von SAF ist aktuell das Fehlen von klaren, langfristigen **Rahmenbedingungen**. Dies betrifft insbesondere die Absatzförderung, wo die Grösse des Markts von ausstehenden politischen Entscheiden abhängig ist. In einem ersten Schritt sollte hier Klarheit geschaffen werden. Begleitend dazu wird auch ein Entscheid zur Förderung der Entwicklung benötigt (siehe Kapitel 5). Sobald diese vorliegen, gilt es ein detaillierteres Konzept zur Förderung auf diesem Gebiet zu erstellen. Dieses muss den Entwicklungen in diesem dynamischen Feld Rechnung tragen und den gesamten Entwicklungsprozess berücksichtigen, damit die Hochskalierung und entsprechende Emissionsreduktionen erreicht werden können.

Mit einer entschiedenen Entwicklungsförderung kann die Schweiz einen grossen Beitrag zur Weiterentwicklung der bestehenden SAF-Technologien leisten. Somit können die benötigten erneuerbaren Flugtreibstoffe rasch hergestellt und eingesetzt werden. Zudem können Schweizer Akteure, welche bereits teilweise weltweit führend sind, ihren Vorsprung halten und ausbauen. Dies entspricht einer grossen Chance für den Forschungs- und Wirtschaftsstandort Schweiz, bedarf jedoch eines koordinierten Förderkonzepts. Bis 2025 müssen dafür bestehende Förderinstrumente eingesetzt werden. Im Zeitraum nach 2025 werden für kostenintensive Anlagen der nächstgrösseren Generation jedoch zusätzliche substanzielle Mittel benötigt. Damit sollen Schweizer Technologien aus dem Labor auf Pilot- und Demoanlagen weiterentwickelt werden und schlussendlich in Produktionsanlagen weltweit eingesetzt werden. So kann ein Beitrag zur Versorgung der Schweiz mit SAF und damit das Erreichen von Klimazielen geschaffen werden.

4.5 Nachhaltigkeitskriterien

Damit SAF das Potenzial zur Reduktion der Umwelt- und Klimabelastung im Vergleich mit fossilen Treibstoffen tatsächlich erfüllen, müssen sie gewisse Nachhaltigkeitskriterien einhalten. Relevant sind für die Schweizer Luftfahrt die Kriterien des Mineralölsteuergesetzes (MinöStG) sowie des Umweltschutzgesetzes (USG), der EU sowie der ICAO. Letztere beiden sind ausschlaggebend für die Anrechenbarkeit an das EHS respektive CORSIA.

In der **EU** sind die Kriterien für nachhaltige Treib- und Brennstoffe in Artikel 29 der zweiten Version der Renewable Energy Directive (RED II) geregelt⁶⁹. Abgedeckt werden die folgenden Aspekte:

- Über den Lebenszyklus müssen biogene Treibstoffe mindestens 65 % weniger THG emittieren⁷⁰, verglichen mit fossilem Treibstoff.
- Die Nutzung von biogenen Rohstoffen muss umfassende Anforderungen und Kriterien einhalten, welche dem Schutz von biologischer Vielfalt, der Bodenqualität und insbesondere Böden mit hohem Kohlenstoffbestand dienen.
- Für synthetische Treibstoffe ist über den Lebenszyklus eine THG-Reduktion von mindestens 70 % gegenüber fossilem Treibstoff vorgeschrieben.

Während diese Richtlinien über alle Sektoren angewandt werden, soll im Luftverkehr gemäss ReFuelEU Aviation zusätzlich die Einschränkung gelten, dass SAF aus eigens angebaute Biomasse nicht an die Beimischpflicht angerechnet werden kann⁷¹.

Im Rahmen von **CORSIA** kann die Verwendung von nachhaltigen Treibstoffen zur Verminderung der Kompensationspflicht führen⁷². Die Reduktion der Kompensationspflicht entspricht dem Anteil der Emissionen, welche über den Lebenszyklus des nachhaltigen Treibstoffs eingespart werden, verglichen mit konventionellem, fossilem Treibstoff. Für eine Anrechnung eines Treibstoffs muss dieser die folgenden Richtlinien erfüllen:

- Über den Lebenszyklus müssen mindestens 10 % weniger THG emittiert werden, verglichen mit fossilem Treibstoff.
- Die Nutzung von biogenen Rohstoffen muss Richtlinien erfüllen, welche dem Schutz der Bodenqualität und insbesondere von Böden mit hohem Kohlenstoffbestand dienen.

Darüber hinaus müssen weitere Richtlinien zum Schutz der Umwelt und zu sozialen Themen befolgt werden.

In der Schweiz gelten zudem (in aktueller Fassung noch bis Ende 2024) die Anforderungen von Art. 12b des **Mineralölsteuergesetzes** (MinöStG) sowie Art. 19c der Mineralölsteuerverordnung (MinöStV), wenn ein nicht-fossiler Treibstoff⁷³ von der Mineralölsteuer befreit werden sollte (siehe Abschnitt 4.2):

⁶⁹ Richtlinie (EU) 2018/2001 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen

⁷⁰ Für Anlagen mit Inbetriebnahme vor 2021 gilt eine reduzierte Mindestminderungsquote von 60 %, bei Inbetriebnahme vor 2015 sogar nur 50 %.

⁷¹ Die einzige Ausnahme ist Algenöl aus an Land angebauten Algen: Dafür fällt kein Bedarf an fruchtbarem Boden an und somit keine direkte Konkurrenz zu Nahrungs- oder Futtermittelproduktion.

⁷² ICAO (2018)

⁷³ In MinöStG, MinöStV und Umweltschutzgesetz (USG) werden nachhaltige Treibstoffe aktuell unter den Begriff biogene Treibstoffe gefasst.

- Über den Lebenszyklus müssen mindestens 40 % weniger THG emittiert werden, verglichen mit fossilem Treibstoff.
- Über den Lebenszyklus darf die Umwelt gesamthaft höchstens 25 % mehr belastet werden, verglichen mit fossilem Treibstoff.
- Biogene Rohstoffe dürfen nicht auf Flächen angebaut werden, die nach 2007 umgenutzt wurden und vor der Umnutzung einen hohen Kohlenstoffbestand oder eine grosse biologische Vielfalt aufgewiesen haben.
- Diese Anbauflächen müssen zudem rechtmässig erworben sein.
- Treibstoffe müssen unter sozial annehmbaren Bedingungen produziert werden.
- Zusätzlich kann der Bundesrat die Anforderung einführen, dass die Produktion nicht zulasten der Ernährungssicherheit erfolgen darf.

Zudem sieht Art. 35d des **Umweltschutzgesetzes** (USG) aktuell vor, dass der Bundesrat ökologische oder soziale Anforderungen für die Inverkehrbringung erlassen kann, falls nicht-fossile Treibstoffe «in erheblichem Mass» ohne Erfüllung dieser Kriterien in Verkehr gebracht werden. Im Rahmen der Neuaufgabe des CO₂-Gesetzes sollen die in der Schweiz geltenden Nachhaltigkeitskriterien für eine Beimischquote denjenigen der EU angeglichen werden, siehe Kapitel 5.

4.6 Handelsmodelle

Beim Einsatz der bisherigen, geringen Mengen SAF hat sich die Versorgungskette von Produktion zu Vertankung als Herausforderung herausgestellt. Dabei muss die Nachverfolgbarkeit gewährleistet werden, damit die Nutzenden den Einsatz von SAF in marktbasierten Massnahmen anrechnen können (siehe Abschnitt 4.1). Grundsätzlich kann dafür SAF auf der gesamten Lieferkette **physisch segregiert** werden. Dies bedingt jedoch die Etablierung einer parallelen Infrastruktur, was ökonomisch und ökologisch ineffizient ist, insbesondere für Kleinmengen. Angestrebt werden sollte deshalb im Rahmen der Hochskalierung der SAF-Nutzung eine möglichst effiziente Nutzung der Infrastruktur, welche für den Transport von fossilem Kerosin bereits genutzt wird. Um die Nachverfolgbarkeit des nachhaltigen Anteils von Treibstoffgemischen über die Lieferkette zu gewährleisten, bieten sich verschiedene Handelssysteme an, welche bereits in anderen Sektoren erfolgreich angewendet werden⁷⁴. Dabei muss stets eine Doppelanrechnung der vertankten Mengen SAF in sämtlichen Anrechnungssystemen verhindert werden können. Relevant ist dabei die Abgrenzung zu fossilen Treibstoffen, aber auch gegenüber nicht-fossilen Treibstoffen aus Rohstoffen, welche Nachhaltigkeitskriterien nicht einhalten.

Ein naheliegender Ansatz besteht darin, SAF und andere Treibstoffe einmalig zu mischen und dieses **Gemisch** in die bestehende Infrastruktur einzuspeisen. Damit bleibt der nachhaltige Anteil klar verfolgbar. Beispielsweise kann ein Güterzug mit einem solchen Gemisch beladen werden.

In einem weiteren Ansatz kann bei der Vermischung von zwei Produkten und darauffolgender Aufteilung den jeweiligen Teilmengen einen gewissen SAF-Anteil zugewiesen werden, der vom physischen Anteil abweichen kann. Dabei muss jedoch die gesamte als nachhaltig bezeichnete Menge derjenigen vor der Vermischung entsprechen. Bezeichnet wird dieses System als **Massenbilanzierung**⁷⁵. Dieses kann beispielsweise bei Treibstoffverteilsystemen an Flughäfen eingesetzt werden: Eine Airline bezahlt für eine SAF-Lieferung, mischt diese dem (oft einzigen) Tanklager bei. Diese Airline kann sich dank einem massenbilanzierten Ansatz die Verwendung dieser SAF-Lieferung und die daraus resultierende Reduk-

⁷⁴ Handelssysteme zur Nachverfolgung von nachhaltigen Produktanteilen gibt es bspw. im Strom- und Gasmarkt sowie beim Handel mit Palmöl

⁷⁵ Der Begriff Massenbilanzierung wird in gewissen Kontexten nur für die Abgrenzung zwischen nicht-fossilen Treibstoffen mit unterschiedlichen Nachhaltigkeitseigenschaften verwendet, insbesondere im EU Kontext gemäss der Renewable Energy Directive (Richtlinie 2018/2001).

tion der CO₂-Emissionen vollumfänglich zuschreiben, obschon sämtliche Nutzer dieses Flughafens einen geringen Teil dieser SAF-Lieferung physisch nutzen. Dieses System bedingt eine Überwachung sämtlicher Transportschritte, existierende Infrastruktur kann jedoch vollumfänglich genutzt werden.

Ein weiterreichendes System namens **Book & Claim** sieht vor, dass nicht jeder Transportschritt, sondern nur die Eingänge und Ausgänge der Transportinfrastruktur überwacht werden. Damit wird der physische Warenfluss weitgehend vom (virtuellen) Handel mit Nachhaltigkeitszertifikaten entkoppelt.

Welches dieser Handelssysteme angewendet werden kann, ist abhängig vom Anrechnungssystem für die Verwendung von SAF. Einen Überblick dazu bietet **Tabelle 3**. Allgemein muss bei einem Import (oder Export) von Gemischen mit SAF- und fossilen Anteilen in die Schweiz der physische Anteil von SAF korrekt deklariert werden. Book & Claim resp. Massenbilanzierung ist dabei also zwischen SAF und fossilem Kerosin nicht möglich. Dies gilt für sämtliche Anrechnungssysteme, welche eine Vertankung von SAF in der Schweiz erfordern. Ausschlaggebend dafür ist das Zollrecht, welches die korrekte Deklaration von physisch unterscheidbaren Waren erfordert⁷⁶. Möglich ist hingegen die Massenbilanzierung zwischen verschiedenen nicht-fossilen Anteilen bei Produktion, Transport und Import bei den meisten Anrechnungssystemen (mit Ausnahme der Mineralölsteuererleichterung, siehe unten). Welche Handelssysteme innerhalb der Schweiz verwendet werden können, wird durch das anzuwendende Anrechnungssystem bestimmt, wobei die Handelssysteme analog zwischen nicht-fossilen Anteilen wie auch gegenüber fossilen Anteilen angewendet werden können.

Eine **Erleichterung der Mineralölsteuer** bedingt das Vertanken von SAF in der Schweiz, also entweder ein Import oder eine lokale Herstellung von SAF. Dabei ist gemäss BAZG auf der gesamten Lieferkette von Produktion bis Verwendung ein physisches Segregieren gegenüber alternativen Treibstoffen notwendig, welche die Nachhaltigkeitskriterien gemäss MinöStG nicht einhalten. Dies hat sich – zusammen mit der separaten Zertifizierung gemäss den Anforderungen des MinöStG – als Hindernis herausgestellt, da beides so nur in der Schweiz gefordert wird. So kann gemäss Angaben von Abnehmern bis dato kein Hersteller SAF in der geforderten segregierten Form mit den entsprechenden Zertifizierungen anbieten. Ein Import von SAF wurde bislang nur unter Verzicht auf die Steuererleichterung realisiert⁷⁷. Offen ist aktuell auch das Handelssystem innerhalb der Schweiz, welches für eine Steuererleichterung notwendig wäre.

Für eine Anrechnung im **Schweizer Emissionshandelssystem** sind die Bestimmungen des EU ETS ausschlaggebend²⁰. Demnach ist für eine Anrechnung in der Schweiz eine Vertankung in der Schweiz notwendig, im Inland kann Massenbilanzierung zwischen fossilen und SAF-Anteilen eingesetzt werden. Für eine mögliche zukünftige **Beimischpflicht** (siehe Abs. 5.2) ist dasselbe geplant, mit der Erweiterung, dass im Inland nicht nur Massenbilanzierung, sondern auch Book & Claim möglich sein soll.

Die Anrechnung von Emissionsreduktionen durch SAF an **CORSIA** erfolgt gemäss den **CORSIA Approved Sustainability Certification Schemes**. Aktuell sind zwei Systeme dafür zugelassen (ISCC, RSB), welche beide eine Massenbilanzierung zwischen fossilen und SAF-Anteilen erlauben. Für das Vermeiden von Doppelanrechnungen ist die Airline zuständig. Die Angabe von vertanktem SAF erfolgt im Emissionsbericht an den jeweiligen Heimatstaat der Airline, unabhängig vom Ort an dem SAF vertankt wird. Damit weist CORSIA gewisse Gemeinsamkeiten mit einem Book & Claim System auf. Entsprechend können sowohl Schweizer Operators wie auch Operators mit Sitz in anderen Staaten SAF entweder in die Schweiz importieren und hier verwenden, oder auch im Ausland verwenden.

⁷⁶ Beim Import von Biogas resp. Erdgas besteht dieselbe Einschränkung, da unterscheidbar. Im Gegensatz dazu ist ein virtueller Import von Grünstromanteilen möglich, da diese keine abweichenden physischen Eigenschaften aufweisen.

⁷⁷ Für Airlines ist dies von geringer Bedeutung, da der Grossteil der Treibstoffe im internationalen Luftverkehr verbraucht wird, welcher bereits von der Mineralölsteuer befreit ist. Eine grössere Bedeutung resultiert für Abnehmer welche im Inland operieren wie in der allgemeinen Luftfahrt und bei der Luftwaffe.

Die Anrechnung von SAF ist auch in weiteren, **freiwilligen Systemen** möglich, beispielsweise um das Erreichen von Emissionsreduktionszielen von Unternehmen nachzuverfolgen. Ausschlaggebend für die Anrechnung von SAF-Gebrauch in diesen Systemen sind die Anforderungen der jeweiligen Systeme, grundsätzlich ist hier keine lokale Vertankung notwendig. Ohne lokales Vertanken von SAF würde dies also bedeuten, dass fossiles Kerosin importiert, versteuert und verwendet wird, im entsprechenden System jedoch SAF-Verwendung angerechnet wird. Die entsprechende Menge SAF wird dafür im Ausland verwendet, jedoch ohne dass für diese Verwendung ein Aufpreis auf fossiles Kerosin bezahlt wird oder dieser SAF-Verbrauch an ein System angerechnet werden kann.

Es ist möglich, dass die Bestimmungen zum Handel mit SAF in der EU in den kommenden Jahren noch angepasst werden. Das EU Parlament hat der ReFuelEU Aviation Vorlage der EU Kommission die Möglichkeit eines «Flexibilisierungsmechanismus» angefügt. Abhängig von der Ausgestaltung eines solchen Mechanismus, könnte dies einen massenbilanzierten Ansatz oder auch Book & Claim innerhalb der EU ermöglichen. Zudem sieht die EU (wie auch der Schweizer Gesetzesvorschlag zur Beimischpflicht) vor, dass Massenbilanzierung zwischen SAF verschiedener Nachhaltigkeitskriterien ermöglicht werden soll.

Instrument	Anrechnung ohne lokale Vertankung	Anrechnung mit lokaler Vertankung	Handelssystem bei Produktion und Transport bis Import		Handelssystem innerhalb der Schweiz
			für versch. nicht-fossile Anteile	vs. fossile Anteile	
Erleichterung Mineralölsteuer	Nicht möglich	Möglich	Segregierung notwendig	Gemisch möglich	Ungewiss
Beimischpflicht gemäss Entwurf Neuauf- lage CO ₂ -Ge- setz	Nicht möglich	Möglich	Massenbilanzie- rung möglich	Gemisch möglich	Book & Claim möglich
EHS	Nur in Staat der Vertankung möglich, falls EU	In der Schweiz möglich	Massenbilanzie- rung möglich	Gemisch möglich	Massenbilanzie- rung möglich
CORSIA für Air- lines mit Sitz im Ausland	Nur in Heimatstaat möglich	Nur in Heimatstaat möglich	Massenbilanzie- rung möglich	Gemisch möglich	Massenbilanzie- rung möglich
CORSIA für Air- lines mit Sitz in der Schweiz	In der Schweiz möglich	In der Schweiz möglich	Massenbilanzie- rung möglich	Gemisch möglich	Massenbilanzie- rung möglich
Freiwillige Systeme	Global möglich	Global möglich	Massenbilanzie- rung möglich	Gemisch möglich	Book & Claim möglich

Tabelle 3: Übersicht zu Handelssystemen, welche für verschiedene markbasierte Massnahmen in der Schweiz erlaubt sind

In der Schweiz ist aktuell bei BAFU, BAZG, BAZL und BFE eine Plattform für die Nachverfolgung im Inland von Treibstoffen aus erneuerbaren Quellen in Arbeit; das **Register erneuerbare Treib- und Brennstoffe** (Register eTS/eBS). Dieses soll sämtliche in der Schweiz gehandelte nachhaltige Brenn- und Treibstoffe umfassen und bestehende Systeme für einzelne dieser Stoffe ersetzen. Damit kann es insbesondere auch zur Massenbilanzierung oder auch Book & Claim genutzt werden. Eine Nachverfolgung soll ab Import (resp. lokaler Herstellung) möglich sein und mit dem Mineralölsteuergesetz, dem EHS, CORSIA sowie zukünftigen Beimischquoten kompatibel sein. Verankert ist das Erstellen und der Betrieb des Registers im Energiegesetz. Eine Inbetriebnahme ist aktuell für 2024 vorgesehen.

5 SAF-Förderstrategie des BAZL

Dieses Kapitel zeigt die Ziele und Massnahmen auf, mit denen die Schweiz die Entwicklung und den Einsatz von nachhaltigen Flugtreibstoffen fördern kann, um die Klimawirkung des Luftverkehrs möglichst stark zu senken. Diese stellen die vielversprechendste Massnahme dar, um die Ziele der langfristigen Klimastrategie der Schweiz zu erreichen, jedoch nicht die einzige. Dafür müssen weitere Massnahmen im Sektor und darüber hinaus umgesetzt werden (vgl. Kapitel 2). Entsprechend der langfristigen Klimastrategie der Schweiz gelten die nachfolgenden Ziele und Massnahmen im Bereich SAF ebenfalls für den Zeitraum bis 2050 (vgl. Abschnitte 1.1 und 1.2). Die Ziele und Massnahmen sollen dabei den technischen und regulatorischen Entwicklungen regelmässig angepasst werden.

Der Bundesrat hat das UVEK am 17. September 2021 mit der Erarbeitung einer Neuauflage zum CO₂-Gesetz beauftragt («Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen»). Am 16. September 2022 hat der Bundesrat die Botschaft zur Revision herausgegeben. Abschnitt 5.2 zeigt auf, wie damit die gesetzlichen Grundlagen für die Umsetzung der Massnahmen geschaffen werden können.

5.1 Zielsetzung

1. Potenzial von SAF bei der Reduktion der Klimawirkung der Luftfahrt ausschöpfen

Entsprechend den Analysen im Rahmen der Schweizer «Road Map Sustainable Aviation»¹¹ soll die Schweiz das Potenzial von SAF zur Emissionsreduktion des Luftverkehrs ausschöpfen und damit bis 2050 mindestens 60 %⁷⁸ der fossilen CO₂-Emissionen aus dem Schweizer Luftverkehr vermindern (gegenüber einer Entwicklung ohne jegliche Massnahmen). Die restlichen Emissionen müssen über weitere Massnahmen reduziert werden, darunter Effizienzsteigerung, alternative Energiespeicher und ggf. NET.

2. Skalierung von nachhaltigen und kosteneffizienten SAF-Produktionspfaden unterstützen

Die Schweiz leistet einen Beitrag zu einer raschen Hochskalierung von SAF. Damit sollen Skaleneffekte baldmöglichst ausgenützt werden, um die Kosten der SAF-Produktion zu senken. Dabei müssen durchwegs strenge Nachhaltigkeitskriterien erfüllt werden, um Auswirkungen auf das Klima und die Umwelt gering zu halten. Konkret heisst dies, dass ein Fokus auf synthetische Flugtreibstoffe gesetzt wird und keine biogenen Flugtreibstoffe der ersten Generation eingesetzt werden.

3. Rahmenbedingungen für den Einsatz von SAF erleichtern

Aktuell bestehen diverse Hürden für den grossflächigen Einsatz von SAF. Insbesondere betrifft dies die Zertifizierung, von der Produktion über den Import bis zur Nutzung (ohne fossilen Anteil) in Triebwerken. Die Schweiz setzt sich aktiv ein, um diese Hindernisse abgestimmt auf internationale Entwicklungen bestmöglich abzubauen.

⁷⁸ Ziel entspricht Ergebnissen von diversen Studien, in der Schweiz: Ecoplan (2021), in Europa: Royal Netherlands Aerospace Centre (2021), global: ICAO CAEP (2022), Air Transport Action Group (2020)

5.2 Massnahmen

1. Ambitionierte Steigerung des SAF-Absatzmarkts mittels europäisch abgestimmter Beimischpflicht

Bis Ende 2021 wurden bereits erste Lieferungen SAF in die Schweiz importiert und vertankt. Um das erste Ziel zu erreichen und damit das hohe Potenzial, die Klimawirkung des Luftverkehrs zu senken (siehe Abschnitte 2.2 und 1.4), ist jedoch eine raschere Steigerung des Absatzmarktes notwendig.

Zur Etablierung eines SAF-Absatzmarktes in der Schweiz muss eine Massnahme eingeführt werden, welche die Vertankung von SAF für alle Anbieter und Nutzer von Flugtreibstoffen wirtschaftlich attraktiv macht. Am besten dafür geeignet ist eine Beimischpflicht (vgl. Abschnitt 4.3) als Grundlage für einen stabilen Absatzmarkt. Damit können die Risiken, welche mit der Investition in SAF-Produktionsanlagen verbunden sind, gesenkt werden. Ebenso sind die Lieferanten und Abnehmer von Flugtreibstoff für den Aufbau einer entsprechenden wirtschaftlichen Versorgung mit SAF verantwortlich. Aktuell fehlt in der Schweiz eine gesetzliche Grundlage für eine Beimischpflicht von SAF im Luftverkehr.

Die Ausgestaltung einer Beimischpflicht muss mit diesbezüglichen europäischen Richtlinien kompatibel sein. Abweichungen davon würden zu Wettbewerbsverzerrungen führen⁷⁹, was die Gefahr von Tankering sowie von Ausweichverkehr ins nahe Ausland mit sich bringt (siehe Abschnitt 4.3). Diese Konsequenzen sind mit einer Zunahme von Emissionen verbunden. Insbesondere müssen auch die Nachhaltigkeitskriterien an SAF mit den Kriterien der EU abgestimmt sein. Abweichungen davon würden die Verfügbarkeit von SAF für den Schweizer Markt gefährden, da die Schweiz stark auf Importe angewiesen ist⁸⁰. Auch eine europaweit harmonisierte Beimischpflicht führt jedoch zu unterschiedlichen Verpflichtungen auf Interkontinentalflügen. So muss auf einem Flug mit einer Zwischenlandung ausserhalb Europas nur auf dem ersten Teil des Fluges SAF eingesetzt werden, während Direktflüge auf dem gesamten Flug SAF verwenden müssen.

Zudem ist eine spezifische Förderung für synthetische SAF erforderlich, damit ihre Produktion rasch hochskaliert wird und somit so früh als möglich wirtschaftlich wird. Einem Lock-In auf beschränkt verfügbare biogene Treibstoffe soll damit vorgebeugt werden. Die Höhe der Quote soll jeweils auf mehrere Jahre im Voraus festgelegt werden, um eine ausreichende Investitionssicherheit für SAF-Hersteller, Lieferanten und Airlines als Nutzerinnen zu gewährleisten. Hingegen sind auch Vorkehrungen für eine allfällige unzureichende Verfügbarkeit der nachhaltigen Flugtreibstoffe zu treffen.

⁷⁹ Besonders relevant dabei sind ähnliche Bedingungen für die Landesflughäfen, da der Euroairport auch Flüge unter französischen Verkehrsrechten anbietet. Zu beobachten sind auch etwaige marktverzerrende Wirkungen durch eine Beimischpflicht im Langstreckensegment.

⁸⁰ Da in Europa ohnehin mit einer hohen Nachfrage zu rechnen ist, würden Produzenten SAF mit abweichenden Spezifikationen höchstens mit Zusatzkosten in die Schweiz liefern.

Im Vorschlag des UVEK zur Neuauflage des CO₂-Gesetzes ist eine Beimischpflicht enthalten (Art. 28j bis 28n). Die Anforderungen an SAF sowie die Höhe der Beimischquote soll auf Verordnungsebene geregelt werden, wobei auch die Möglichkeit einer Subquote für synthetische SAF vorgesehen ist. Entsprechend den Ausführungen in dieser Strategie – und den Plänen der EU – sind biogene Flugtreibstoffe nur zuzulassen, wenn sie keine Konkurrenz zur Produktion von Nahrungs- oder Futtermitteln verursachen (vgl. Abschnitt 0). Diese Vorkehrung deckt damit die Problematik ab, welche bisher im MinöStG durch soziale Nachhaltigkeitskriterien gesichert ist. Nachhaltigkeitskriterien für alle nachhaltigen Brenn- und Treibstoffe werden in USG Art. 35d geregelt. Die Höhe der Quote und die im Hinblick auf Nachhaltigkeit zugelassenen SAF richten sich dabei stark auf europäische Entwicklungen aus, insbesondere wird auf die Kompatibilität mit der ReFuelEU Aviation Initiative geachtet. Die Beimischpflicht richtet sich an sämtliche Anbieter von Flugtreibstoffen in der Schweiz, ungeachtet des Flugplatzes, an dem der Flugtreibstoff vertankt wird. Damit wird eine Marktverzerrung verhindert. Zur Durchsetzung der Beimischpflicht sollen Flugtreibstoffanbieter sanktioniert werden, welche diese Pflicht nicht erfüllen. Zudem wird die Gefahr von Tanktourismus berücksichtigt: Bei Bedarf sind entsprechende Massnahmen oder Sanktionen vorgesehen. Betroffen ist jedoch nur Kerosin und nicht Flugbenzin, da es dafür aktuell noch keine nachhaltige Alternative gibt und der geringe Absatz den bedeutenden Zusatzaufwand dafür nicht rechtfertigt. Als weitere Fördermassnahme sieht der Gesetzesvorschlag eine Weiterführung der Mineralölsteuererleichterung für SAF vor, was die Hürde für den Einsatz auf inländischen Flügen deutlich reduziert.

Gegebenenfalls ist auch mit der Forderung einer Übernahme der EU-Beimischpflicht im Rahmen des gemeinsamen Luftverkehrsabkommens zu rechnen. Die genauen Konsequenzen einer solchen Übernahme sind zurzeit noch ungewiss, da die europäische Beimischpflicht erst in Form eines Vorschlages der EU-Kommission vorliegt, der noch angepasst werden kann (siehe Abschnitt 4.3). Es ist jedoch davon auszugehen, dass in diesem Fall eine Regelung der Pflicht über das CO₂-Gesetz hinfällig würde. Ohne Anpassung des heute vorliegenden Vorschlags aus der EU wäre das Ziel dieser Strategie erfüllt, da die EU ebenfalls eine ambitionierte Hochskalierung mit expliziter Förderung von synthetischen SAF und griffigen Sanktionen vorsieht. Durch die Beimischungsquoten, welche gesamteuropäisch koordiniert sind, ist die Gefahr von Tankering minim. Ungewiss ist auch, ob die EU auf einer Übernahme ihrer Richtlinie besteht, wenn die Schweiz über ein äquivalentes Instrument verfügt, wie es in diesem Abschnitt dargelegt wird.

2. Umfassende Förderung von vielversprechenden SAF-Entwicklungsprojekten mit Schweizer Beteiligung

Wissenschaft und Industrie sind sich einig, dass eine erfolgreiche Hochskalierung von SAF neben Massnahmen auf der Abnahmeseite auch eine Unterstützung der Entwicklung benötigt. Entsprechend zeigt das BAZL in diesem Bericht den Bedarf für eine Förderung der Entwicklung auf (siehe Abs. 4.4). So sind im Laufe der Skalierung der Produktion deutliche Verbesserungen in Bezug

auf Kosteneffizienz und Klimawirkung zu erwarten. Die Skalierung, insbesondere von Produktionspfaden für synthetische SAF, welche noch nicht in industriellem Massstab umgesetzt wurden, sollte deshalb raschmöglichst beschleunigt werden. Eine ausbleibende Förderung würde die Verfügbarkeit von ausreichend SAF in Gefahr bringen und damit zu einer nicht tragbaren Abhängigkeit bei der Erreichung von Klimazielen führen. Eine entschiedene nationale Anschubfinanzierung birgt indes grosse Chancen: Die Schweiz verfügt über Forschungsinstitutionen und Unternehmen, welche in diesem Bereich teilweise weltweit führend sind.

Bestehende Instrumente haben einen wesentlichen Beitrag zum heutigen teils weltweit führenden Stand der Schweizer Forschung im Bereich SAF geführt. Für die Entwicklungsphasen der kommenden Jahre reichen die bisher verfügbaren Förderinstrumente jedoch nicht aus. Gerade im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen stehen aktuell am wenigsten Mittel zur Verfügung. Hier kann eine zusätzliche Förderung mehrfach Wertschöpfung herbeiführen: Zum einen wird der Forschungsstandort gestärkt, ebenso profitiert die Wirtschaft durch den darauffolgenden Export von in der Schweiz entwickelten Technologien in diesem starken Wachstumsmarkt. Dafür ist eine Zusammenarbeit von Wissenschaft, Industrie und Bund notwendig. Während ein Grossteil der Investitionen aus der Industrie stammen muss, ist ein subsidiäres Eingreifen des Bundes gefragt, um früh Technologierisiken zu senken und durch das Auslösen zusätzlicher Investitionen eine Hebelwirkung zu erreichen. Die Förderung ist auf dieses Ziel auszurichten und entsprechend wieder auszusetzen, sobald Technologien etabliert sind, welche den Bedarf nach Flugtreibstoffen ökologisch und ökonomisch tragbar decken können. Dabei muss ein Zusammenspiel mit existierenden Förderinstrumenten gewährleistet werden, wie auch mit einer Absatzförderung. So sind Nachhaltigkeitskriterien auch für Pilot- und Demonstrationsanlagen anzuwenden. Der in Schweizer Projekten produzierte Flugtreibstoff soll damit auf dem Schweizer Markt eingesetzt werden können.

Für eine effektive Förderung sind bestehende Instrumente des Bundes entsprechend zu koordinieren. Im Rahmen der SWEET-Ausschreibung des BFE zu erneuerbaren Treibstoffen konnte dies bereits umgesetzt werden: Ein enger Austausch zwischen BFE, BAZL und armasuisse hat dazu geführt, dass diese Ausschreibung Anliegen sämtlicher beteiligter Ämter berücksichtigen kann. So weist das VBS gemäss dem publizierten «Aktionsplan Energie und Klima» nachhaltigen (Flug-)Treibstoffen ebenfalls eine zentrale Rolle bei der Emissionsreduktion zu⁵³ und plant deren Einführung bzw. Beimischung. Eine Produktion von SAF in der Schweiz kann für das VBS als Abnehmer einen zusätzlichen Wert darstellen, da damit die Abhängigkeit von ausländischer Versorgung sinkt. Dies ist bereits bei Demonstrationsanlagen in der Schweiz als zusätzliche Wertschöpfung zu berücksichtigen. Einen Beitrag zur Förderung kann auch die Spezialfinanzierung Luftverkehr des BAZL leisten, so entsprechen SAF einem Schwerpunkt des aktuellen Mehrjahresprogramms. Mehrere Projekte konnten in diesem Bereich bereits unterstützt werden.

Im Rahmen der Neuauflage des CO₂-Gesetzes ist auch eine zusätzliche Förderung der Entwicklung von synthetischen SAF vorgesehen. Verankert ist diese in Art. 103b des Luftfahrtgesetzes (LFG). Vorgesehen ist eine plafondserhöhende Förderung von jährlich 20 Mio. CHF. Abs. 3 hält die Kriterien fest, welche besonders vielversprechende Massnahmen kennzeichnen. Dies ist ein hohes Potenzial in Bezug auf eine langfristige Reduktion von THG-Emissionen, eine langfristige Kosteneffizienz, ein grosses Anwendungspotenzial sowie eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit. Dazu gehören insbesondere Projekte mit Partnern über die gesamte Herstellungskette. Zudem soll der Fokus auf Schweizer Technologie und Wertschöpfung in der Schweiz liegen. Unterstützt werden können jedoch explizit auch Anlagen im Ausland.

Parallel zur Behandlung der Neuauflage des CO₂-Gesetzes im Parlament sind in BAZL, BAFU und BFE bereits Arbeiten in Gang, welche den Einsatz von potenziellen zusätzlichen Mitteln konkretisieren. Wenn möglich sollen diese Mittel zur Aufstockung existierender Instrumente genutzt werden und nicht ein neues Instrument schaffen. Dabei gilt es insbesondere, die sich über die Entwicklungsphasen ändernden Anforderungen an Förderinstrumente zu beachten.

3. Aktive Unterstützung der Zusammenarbeit von sämtlichen beteiligten Stakeholdern auf nationaler und internationaler Ebene

Entscheidend für die Wirksamkeit der Instrumente (Beimischpflicht und Entwicklungsförderung) ist die Abstimmung auf bereits existierende und geplante Umweltmassnahmen im Luftverkehr. Im Hinblick darauf sowie auf Ziel 3 dieser Strategie werden diese Massnahmen ergänzt durch unterstützende Aufgaben der Bundesverwaltung.

Dazu gehört die **Vernetzung von Schweizer Stakeholdern**. Entsprechend der erwähnten zentralen Rolle der Entwicklung von synthetischen SAF in der Schweiz betrifft dies insbesondere die Bündelung der Schweizer Innovationskraft. Hier wurde bereits eine Initiative zur Abstimmung zwischen Schweizer Forschungsinstituten, der Energiebranche und der Luftfahrtbranche gestartet.

In der Bundesverwaltung steht die **Etablierung des nationalen Registers erneuerbare Brenn- und Treibstoffe** bevor. Dieses ist bei BAFU, BAZG und BFE angesiedelt und wird auch im Bereich Flugtreibstoffe die Nachverfolgung von Treibstofflieferungen und Anrechnung davon an marktbasierte Massnahmen erleichtern. Damit verbunden ist auch die Bearbeitung von Hindernissen beim Import von SAF (siehe Abschnitt 0).

Langfristig ist es möglich, dass ein **internationaler Flexibilisierungsmechanismus** in Kraft tritt (erläutert in Abschnitt 4.6). In dieser Sache muss die Bundesverwaltung entsprechende Entwicklungen verfolgen und gegebenenfalls unterstützen, sodass ein funktionierendes System auch für die Schweiz zugänglich ist.

International ist eine **Begleitung der Entwicklung und Zertifizierung** von neuen Herstellungspfaden, Triebwerken und Systemen in Flugzeugen im Bereich SAF notwendig. Konkret erfolgt dies mit Vertreterinnen und Vertretern der Industrie und in entsprechenden internationalen Gremien, in welchen Expertinnen und Experten des BAZL und des BFE die Schweiz vertreten. Darüber hinaus ist die **Zusammenarbeit (Facilitation) auf internationaler Ebene** zu unterstützen. Dies stellt einen weiteren Beitrag zur Erreichung von Ziel 2 dar. Insbesondere wird dabei auf die Weiterentwicklung von CORSIA und ähnlichen Instrumenten gesetzt, neue Erkenntnisse in Bezug auf Umweltwirkung von SAF (insbesondere Nicht-CO₂-Emissionen) abgeholt und der Förderbedarf für internationale Projekte im Bereich Demonstrations- und Produktionsanlagen für SAF eruiert.

Für diese Massnahme ist keine Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen notwendig, entsprechend enthält die Gesetzesvorlage keine diesbezüglichen Artikel.

Anhang A. Herstellungspfade alternativer Energiespeicher

Dieser Anhang beinhaltet eine vertiefte Analyse von alternativen Energiespeichern in der Luftfahrt, zusammen mit den aktuellen und geplanten Aktivitäten von verschiedenen Akteuren auf dem Weg dorthin.

A.1. Energie- und Ressourcenbedarf

Ein wichtiger Faktor in der Umsetzbarkeit von alternativen Energiespeichern ist der jeweilige Ressourcenbedarf in Bezug auf Primärenergie, Land, Wasser und Rohstoffe. Während Primärenergiequellen (Sonne, Wind) global im Übermass vorhanden sind, ist die Nutzung davon wiederum mit hohem Rohstoffbedarf und Produktionskosten verbunden und konkurriert mit dem Bedarf von weiteren Sektoren. Somit kann ein hoher Energie- oder Ressourcenbedarf das Potenzial einer Technologie stark limitieren. Auch wenn noch nicht über alle Ansätze genügend Daten vorliegen, um diese abschliessend zu vergleichen, sind doch schon wichtige Schlussfolgerungen möglich.

In Bezug auf den Primärenergiebedarf sind die Wirkungsgrade aller Prozessschritte ausschlaggebend und somit auch ein Fokuspunkt für deren Entwicklung. Grundsätzlich ist hier die Reihenfolge klar: Wenn Stromproduktion direkt und ohne vorherige Speicherung zum Laden der Batterien verwendet werden kann, weisen batterie-elektrische Flugzeuge den geringsten Bedarf an Primärenergie auf. Darauf folgen Wasserstoffflugzeuge, da nur die Effizienz der Elektrolyse und der Komprimierung resp. Verflüssigung zu Buche schlägt. PtL und StL folgen als nächstes, da hier auch CO₂ als Rohstoff benötigt wird und die darauffolgenden Prozessschritte dazukommen. Herstellungspfade biogener SAF folgen zum Schluss, da die äquivalenten biologischen Prozesse weniger effizient sind.

Die Betrachtung der Wirkungsgrade ist für die Beurteilung des gesamten Energiebedarfs hingegen nicht ausreichend, da nicht alle Varianten gleich viel Energie für einen Flug benötigen: So sind batterie-elektrische sowie Wasserstoffflugzeuge voraussichtlich bedeutend schwerer als die jeweiligen Äquivalente mit Flüssigtreibstoffen als Energiespeicher. So würde eine aktuelle Studie⁸¹ beispielsweise für Wasserstoffflugzeuge bei Langstreckenflugzeugen mit einer 23 % höheren Masse rechnen, resultierend in einem 42 % höheren Energiebedarf. Mit genaueren Zahlen ist hier erst im Laufe der Markteinführung von kommerziellen Flugzeugen mit alternativen Energiespeichern zu rechnen.

A.2. Klimawirkung

Batteriebetriebene Flugzeuge verursachen durch ihren Betrieb vergleichsweise am wenigsten Emissionen, sofern der eingesetzte Strom eine tiefe CO₂-Intensität aufweist. Unklar ist jedoch, wie stark der Bedarf an Rohstoffen für den ganzen elektrischen Antriebsstrang, die Produktion der Batterie und der Ladeinfrastruktur hier ins Gewicht fallen. Dies ist abhängig von der CO₂-Intensität der Rohstoffgewinnung und des zukünftigen Rohstoffrecyclings, den Energiequellen der Batterieproduktion sowie der Lebensdauer der Batterie. Für die Batterien bzw. den elektrischen Antriebsstrang fällt ein beträchtlicher Bedarf an Rohstoffen an, wobei ein Grossteil davon erstmalig aus der Erde extrahiert werden muss. Berücksichtigt werden muss dabei auch die Ladeinfrastruktur inklusive Speichereinrichtungen zur Bereitstellung von grossen elektrischen Ladeleistungen. Da für die kommerzielle Luftfahrt hier noch keine geeigneten Systeme existieren, kann im Vergleich zum Aufwand im Fall von erneuerbaren Treibstoffen hier noch keine abschliessende Aussage gemacht werden.

⁸¹ McKinsey & Company (2020).

Auch für wasserstoffbetriebene Flugzeuge ist die CO₂-Intensität der Primärenergie relevant, ausschlaggebend sind hier jedoch auch andere Faktoren: Während Wasserstoffflugzeuge kaum CO₂ ausstossen, ist die Menge von produziertem Wasserdampf höher als bei konventionell betriebenen Flugzeugen. Ausgestossener Wasserdampf kann die Bildung von Kondensstreifen und Zirkuswolken bzw. deren Absorption von Wärmestrahlung eventuell verstärken und einen wichtigen Effekt auf das Klima aufweisen. Dies ist jedoch stark abhängig von der Flughöhe und im Fall von Wasserstoffflugzeugen noch nicht durch Messungen präzisiert. Dazu kommt bei der Verbrennung in Gasturbinen die Emission von Stickoxiden: Deren Menge ist abhängig von der genauen Konstruktion der Turbine und somit noch unbekannt. Im Fall von Brennstoffzellen entfallen die Stickoxidemissionen, dafür sind die heute verfügbaren Systeme in der Leistung limitiert, schwerer und erhöhen somit den Energieverbrauch des Flugzeugs.

Ein Überblick über die erreichbare Reduktion der Klimawirkung von Emissionen bietet Abbildung 6: Kennzeichnet wird die Reduktion mit 0 (keine Änderung), - (teilweise Senkung), -- (deutliche Senkung), --- (Wegfall), beziehungsweise ? (Änderung unklar).

CO ₂	PM	NO _x	H ₂ O	Total	
--	---	---	---	--	Batterie-elektrisch
--	---	?	?	-	Flüssigwasserstoff
--	-	o	o	--	Power to Liquid (PtL)
--	-	o	o	--	Sun to Liquid (StL)
-	-	o	o	-	Biomass to Liquid (BtL)
---	o	o	o	---	Negativemissionstechnologien (NET)

Abbildung 6: Qualitative Übersicht zur Nettoreduktion der Klimawirkung von Emissionen (CO₂ sowie nicht-CO₂) bei Einsatz der jeweiligen technologischen Ansätze

A.3. Entwicklungsbedarf

Batterie-elektrische Flugzeuge

Entscheidend für die Eignung eines Energiespeichers für kommerzielle Flugzeuge ist die Energiedichte, d. h. wieviel Gewicht und Volumen die Speicherung der benötigten Energie einnimmt. Heute verfügbare Hochleistungsbatterien sind im Vergleich mit Kerosin extrem schwer und gross: Pro Kilogramm des gesamten Batteriesystems kann nur 1/60 der Energie von Kerosin gespeichert werden und auch pro Kubikmeter nur 1/20⁸². Elektromotoren sind zwar bis zu doppelt so effizient wie Gasturbinen und benötigen dementsprechend nur etwa die Hälfte der Energie – die erreichbaren Werte sind aber dennoch viel zu klein für einen Einsatz. Forschung dazu ist im Gange, jedoch zeigen aktuelle Prognosen ebenfalls «nur» Hinweise auf eine Verdoppelung der Energiedichte. Eine lange Lebensdauer von Hochleistungsbatterien in Flugzeuganwendungen wird aus Umwelt- und aus ökonomischer Sicht sehr wichtig sein. Fortschritte sind auch bei der Leistungsdichte notwendig. Dies betrifft den gesamten Antriebsstrang mit Kabeln und Umrichtern von der Batterie bis zum Motor. Die Bedeutung der Energie- und Leistungsdichte nimmt ab

⁸² Bundesamt für Zivilluftfahrt (2020)

für Flugzeuge mit geringerer Nutzlast, Geschwindigkeit und Reichweite. Dies erklärt, weshalb heute bereits Kleinflugzeuge mit Elektroantrieb zugelassen sind und grössere (Langstrecken-)Passagierflugzeuge noch nicht realisierbar sind.

Zusätzliche Hindernisse auf dem Weg zu kommerziellen Elektroflugzeugen bestehen in der Sicherheit und dem Wärmemanagement. Das grösste Risiko stellt ein Batteriebrand dar. Fortschritte dazu wurden in den letzten Jahrzehnten in der Automobilindustrie und im Bereich von portablen Elektrogeräten gemacht. Gemäss einer Studie auf diesem Gebiet sind Systeme, welche einen Brand verhindern könnten jedoch aktuell zu schwer für einen Einsatz in der Luftfahrt⁸³. Die Herausforderung im Wärmemanagement besteht darin, die benötigte Wärme für die Passagierkabine sowie die Enteisungsvorrichtungen bereitzustellen, wobei verglichen mit konventionellen Triebwerken ungleich viel weniger Abwärme zur Verfügung steht.

Verglichen mit einem konventionell angetriebenen Flugzeug sind einige Anpassungen notwendig. So muss die Integration des Antriebs inkl. Energieversorgung auf Elektromotoren angepasst werden, was besonders bei früherer Verwendung von Gasturbinen einen Unterschied macht. Dazu kommt der Prozess des Aufladens am Boden: Kritisch ist hier der Zeitbedarf, da schnelles Laden zu einer kürzeren Lebensdauer der Batterie führt und bei vielen grossen Flugzeugen einen exorbitant hohen Leistungsbedarf mit sich bringt. Kritisch ist hier auch die Vorbereitungsphase: Der Ersatz einer konventionellen Flotte von Flugzeugen ist erst möglich, wenn diese Infrastruktur an sämtlichen angeflogenen Flughäfen vorhanden ist. Denkbar wäre auch der Austausch von leeren Batterien durch volle, dies limitiert jedoch die Integration der Batterien in das Flugzeug und bringt dazu hohe Anforderungen an die Flughafeninfrastruktur mit sich. Ebenfalls erforderlich ist bei einem grossflächigen Einsatz von Elektroflugzeugen ein Konzept, wie die benötigte elektrische, teilweise kurzzeitig sehr hohe Ladeleistung aus erneuerbaren Quellen auf Flughäfen bereitgestellt wird («power-on-demand»). Weil die Leistung der meisten erneuerbaren Quellen (insbesondere Sonne- und Windstrom) stark variiert bzw. unzuverlässig ist, braucht es enorme Stromspeicher, welche in der Lage sind, kurzzeitig sehr hohe elektrische Leistungen zum Aufladen von Flugzeugen abzugeben. Resultierende Belastungen für das Energiesystem müssen dabei berücksichtigt werden.

Mit dem Pipistrel Velis Electro erhielt 2020 das weltweit erste Elektroflugzeug seine Musterzulassung⁸⁴. Aufgrund seiner kurzen maximalen Flugzeit von 50 Minuten zzgl. 10 Minuten Reserve wird dieser Zweiplätzer primär als Ausbildungsflugzeug verwendet. Zurzeit sind über 200 elektrische Flugzeuge in Entwicklung⁸⁵, darunter sind mit dem Vierplätzer Smartflyer SFX1 und dem senkrechtstartenden Zweiplätzer aEro von Dufour Aerospace auch Schweizer Projekte. Bekannt wurde durch die erste (etappenweise) Weltumrundung eines einsitzigen elektrischen Flugzeuges auch das in der Schweiz entwickelte Experimentalflugzeug Solar Impulse 2.

Flüssigwasserstoff

Die zentrale Herausforderung beim Einsatz von Wasserstoff als Flugtreibstoff ist die Speicherung. An sich (ohne Tank) weist Wasserstoff pro Kilogramm die dreifache Energie von Kerosin auf. Problematisch ist jedoch der Energieinhalt pro Liter (Volumen): Für die kommerzielle Luftfahrt sinnvolle Werte werden da nur von Flüssigwasserstofftanks erreicht⁸⁶. Doch auch diese sind, verglichen mit Kerosin, heute noch viermal schwerer und fünfmal grösser. Da der Wasserstoff darin auf -253°C gekühlt ist, muss der Tank gut isoliert werden. Zudem müssen die Materialermüdung durch Druckänderungen bei Ladezyklen sowie durch die direkte Einwirkung von Wasserstoff berücksichtigt werden. Deshalb ist nicht jede Bauform

⁸³ Courtin / Hansman (2018)

⁸⁴ <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-79969.html>

⁸⁵ Thomson (2020).

⁸⁶ Für Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt mit tieferer Reichweite resp. Nutzlast kommen auch Drucktanks in Frage.

möglich. Der Tank kann beispielsweise nicht wie im Fall von Kerosin in den Flügeln platziert werden. Somit müsste die gesamte Konstruktion des Flugzeugs angepasst werden.

Für die Motorisierung grosser Flugzeuge kommen aufgrund des Leistungsbedarfs auch längerfristig nur Gasturbinen in Frage. Die Triebwerke müssen für die Verbrennung von Wasserstoff angepasst werden, weil sich dieser bei der Verbrennung anders verhält als Kerosin. Da die Verbrennung mit Hilfe von Luft und bei sehr hohen Temperaturen geschieht, entstehen ohne spezielle Massnahmen bei der Wasserstoffverbrennung hohe Stickoxidemissionen. Entsprechende Technologien zu deren Reduktion in Wasserstoffbrennern befinden sich noch im Laborstatus⁸⁷. Da die Entwicklung erst eingesetzt hat und Messungen zur Klimawirkung der hauptsächlichen Emissionen, nämlich Wasserdampf, noch fehlen, ist die Gesamtklimawirkung von Wasserstoffflugzeugen weitgehend unbekannt.

Insbesondere für kleinere Flugzeuge ist – aufgrund des geringeren Leistungs- und Reichweitenbedarfs – auch ein alternativer elektrischer Antrieb mit Brennstoffzellen und Elektromotoren in Entwicklung. Davon verspricht sich die Forschung einen höheren Wirkungsgrad und eine tiefere Klimawirkung. Grundsätzlich ist es sogar denkbar, anstelle von einem direkten Ausstoss von Wasserdampf, diesen zuerst zu kondensieren, was die Klimawirkung weiter reduzieren könnte. Hier besteht jedoch noch Entwicklungsbedarf im Leichtbau von Brennstoffzellen. Die antriebsseitig benötigten Anpassungen entsprechen denjenigen von Elektroflugzeugen.

Wasserstoffflugzeuge bringen aufgrund des kryogenen oder Hochdruck-Tanks verglichen mit Kerosin ein stärkeres Gefährdungspotenzial mit sich. Bei einem Versagen von Dichtungen verdampft Wasserstoff rasch, was ein bedeutendes Explosionsrisiko mit sich bringt. Dieses ist zwar grösser als im Fall von Kerosin, nimmt jedoch im Freien auch wieder schneller ab. Somit müssen Massnahmen gefunden werden, wie Transport und Lagerung im Flughafenumfeld, der Tankvorgang sowie sämtliche möglichen Notfälle im Flug sicher gehandhabt werden können. Diese Problematik wurde in mehreren Studien untersucht, bisher wurde noch kein Problem als unlösbar beschrieben⁸⁸.

Für einen grossflächigen Einsatz von Wasserstoff in Flugzeugen ist der Aufbau einer komplett neuen Infrastruktur notwendig: Wie bei sämtlichen alternativen Energiespeichern beginnt dies bei der Bereitstellung der Primärenergie aus erneuerbaren Quellen. Völlig neu muss die Produktion sowie die Verteilung auf Flughäfen inklusive der Zwischenspeicherung und Verflüssigung aufgebaut werden. Der Umgang mit Wasserstoff ist technisch herausfordernd, da dieser leichtflüchtig ist und auf viele Materialien versprödhend wirkt. Dazu muss auf eine geeignete Integration in das bestehende Energiesystem geachtet werden. Nicht zu vernachlässigen sind dabei die Energieverluste, welche besonders bei der Elektrolyse, der Verflüssigung und dem Transport, respektive der längerfristigen Speicherung anfallen. Kritisch wird v.a. die Umstellungsphase auf Wasserstoff sein: Damit eine Route geflogen werden kann, müssen bereits beide Flughäfen die benötigte Infrastruktur aufweisen. Somit wird über den Zeitraum der Umstellung die Infrastruktur für Kerosin parallel zur neuen für Wasserstoff aufrechterhalten werden müssen.

Bereits erfolgreich getestet wurden verschiedene Kleinflugzeuge mit Wasserstoffdrucktank, Brennstoffzelle und Elektromotor: Entwickelt wurden diese von Boeing (Fuel Cell Demonstrator), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR: Hy4) sowie dem Startup Zeroavia. Letzteres treibt die Entwicklung von kleineren Wasserstoffflugzeugen voran, während das DLR mit dem Electric Flight Demonstrator grössere Versuchsträger plant. Die grössten Wasserstoffflugzeuge, welche entsprechend kryogene Speicherung des Wasserstoffs benötigen, sind im Rahmen des ZEROe Projekts von Airbus zurzeit in Planung.

⁸⁷ Mit der TU-155 hatte Russland den Flüssig-Wasserstoffantrieb mit Gasturbinen an einem grösseren Flugzeug untersucht und demonstriert. Stickoxidreduktion war dabei hingegen kein Thema.

⁸⁸ Airbus (2003), McKinsey & Company (2020).

Anhang B. Bestehende Schweizer Förderinstrumente für die Entwicklung von SAF

In der Schweiz bestehen diverse Förderinstrumente im Bereich Energie- und Umweltforschung, welche für Entwicklungsprojekte im SAF-Bereich genutzt werden können. Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über diese Instrumente. Der grösste Anteil der bestehenden staatlichen Förderinstrumente im Bereich Energie stammt aus der **Grundfinanzierung der Hochschulen nach dem HFKG (SR 414.20) und dem Finanzierungsbeitrag an den ETH-Bereich**. Dieser liegt in der Grössenordnung von 140 Mio. CHF für den Bereich Energie, respektive 500 Mio. CHF für den Bereich Umwelt⁸⁹. Dazu kommen Mittel aus dem **Schweizerischen Nationalfonds (SNF)**, im Bereich von 35 Mio. CHF für den Bereich Energie, respektive 116 Mio. CHF für den Bereich Umwelt⁹⁰. Ebenso stehen über die **Innosuisse Projekt- und Programmförderung** im Bereich Energie Mittel von 38 Mio. CHF zur Verfügung, respektive 12 Mio. CHF im Bereich Umwelt. Diese Beiträge entfallen jedoch allein auf die Grundlagen- und angewandte Forschung sowie Laborprototypen.

Schnittstellen existieren insbesondere im Bereich Energieforschung bzw. Innovationsforschung mit mehreren Programmen des **BFE**. So fördert das BFE subsidiär Forschungsprojekte, die dem Schwerpunkt des aktuellen Energieforschungskonzepts entsprechen. Im Vordergrund stehen anwendungsorientierte und entwicklungsnahe Forschungsprojekte. Ende November 2020 publizierte die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE das **Energieforschungskonzept des Bundes für die Jahre 2021 bis 2024**. Schwerpunkte liegen dabei u.a. auf einer «effizienten Sektorkoppelung» und auf «industriellen Prozessen», dies schliesst die «Reduktion der CO₂-Emissionen im kommerziellen Luftverkehr durch den Einsatz erneuerbarer Treibstoffe» ein. Aufgeführt als Forschungsthema im Bereich Mobilität/Substitution fossiler Brennstoffe ist zum Beispiel das Ableiten von Szenarien für die Errichtung von Synthese- und Verteilungsinfrastruktur synthetischer Treibstoffe im Strassen-, See- und Luftverkehr. Ausserdem fördert das BFE im Rahmen des Pilot- und Demonstrationsprogramms (**P+D Programm**) «die Entwicklung und Erprobung von neuen Technologien, Lösungen und Ansätzen im Bereich der sparsamen und effizienten Energienutzung, der Energieübertragung und -speicherung sowie der Nutzung erneuerbarer Energien.» Zu erwähnen sind an dieser Stelle auch die Schweizer Kompetenzzentren für Energieforschung (**Swiss Competence Centers for Energy Research, SCCER**), welche von 2013 bis 2020 Forschung in verschiedenen Aspekten im Zusammenhang mit der Energiewende betrieben haben. Zum Thema nachhaltige Flugtreibstoffe bestehen mehrere Schnittstellen mit den SCCER-Zentren. Abgelöst wurden die SCCER-Zentren durch das Förderprogramm **SWEET (Swiss Energy research for the Energy Transition)**. Ziel von SWEET ist ab 2021 die Förderung von Innovationen, die zur erfolgreichen Umsetzung der Energieperspektiven 2050+ und der Erreichung der Schweizer Klimaziele nötig sind. SWEET deckt einen grossen Teil des Innovationszyklus ab – von der Grundlagenforschung über die anwendungsnahe Forschung bis hin zur Umsetzung. Über die Gesamtlaufzeit des Förderprogramms ist aktuell die Verteilung von 136.4 Mio. CHF auf Fördermassnahmen im gesamten Energiebereich geplant.

Das BAZL fördert über die **Spezialfinanzierung Luftverkehr** Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich Umwelt. Im Jahr 2019 wurden mit total 2.2 Mio. CHF vor allem Projekte aus der angewandten Forschung unterstützt. Basierend auf dem «Bundesgesetz über die Verwendung der zweckgebundenen Mineralölsteuer und weiterer für den Strassen- und Luftverkehr zweckgebundener Mittel (MinVG)» und der entsprechenden Verordnung (MinLV) dürfen ausschliesslich freiwillige Massnahmen unterstützt werden, dazu sollten sie ihre Wirkung oder ihren Nutzen in der Schweiz erzielen. Im Bereich Umweltschutz nennt das MinVG u.a. die Bereiche Schutz vor Lärmeinwirkungen, Schutz von Schadstoffemissionen der Luftfahrtinfrastruktur und Luftfahrzeuge, Forschungsarbeiten Auswirkungen des Luftverkehrs auf die

⁸⁹ Quelle (Stand 2016): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/bildung/umweltforschung/innovationslandschaft-umwelt-energie.html>

⁹⁰ Stand 2014-2016, ebd.

Umwelt, Massnahmen an Luftfahrzeugen zum Schutz vor Lärm- und Schadstoffimmissionen sowie Entwicklung umweltschonender Flugverfahren. Die Höhe der einzelnen Beträge bemisst sich gemäss MinLV nach Nutzen-Ziel-Verhältnis, wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit der Gesuchsteller sowie Eigeninteresse des Gesuchstellers.

Diese Anforderungen führten bisher dazu, dass im Bereich Umwelt vergleichsweise wenig Gesuche eingingen und der jährliche Betrag jeweils nicht ausgeschöpft wurde. Im Bereich SAF gingen bereits diverse Gesuche ein, von denen einige positiv beurteilt werden konnten und mit Mitteln von rund 5 Mio. CHF unterstützt wurden. Die Unterstützung von SAF-Projekten entspricht einem Schwerpunkt des aktuellen Mehrjahresprogrammes der Spezialfinanzierung⁹¹.

Im BAFU bestehen mit dem **Technologiefonds** und der **Umwelttechnologieförderung** (inklusive **flankierenden Massnahmen**) aktuell weitere Programme, von welchen nachhaltige Treibstofftechnologien profitieren können. Verteilt sind diese auf die Innovationsphasen angewandte Forschung bis Marktdiffusion und Export. In der Summe stehen rund 36 Mio. CHF zur Verfügung⁹², welche auf sämtliche Umweltthemen aufgeteilt werden.

⁹¹ <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/themen/finanzhilfen-luftverkehr/mehrjahresprogramm.html>

⁹² Davon fallen 25 Mio. auf den Technologiefonds, welcher ein Bürgschaftsinstrument ist.

Anhang C. Instrumente zur Förderung eines SAF-Marktes

C.1. Anforderung an Instrumente

Vier zentrale Anforderungen an Fördermassnahmen für nachhaltige Treibstoffe wurden in einer Publikation der Technischen Universität Hamburg analysiert⁹³ (siehe folgender Abschnitt): Die Effektivität, der Einfluss externer Grössen, statische sowie dynamische Effizienz.

Die **Effektivität** beschreibt die Wirksamkeit eines Instruments, nämlich, ob das vorgegebene Ziel erreicht wird. In diesem Fall besteht das Ziel darin, den SAF-Nutzungsanteil signifikant zu steigern, respektive eine gewisse Emissionsreduktion durch SAF-Nutzung zu erzielen. Dies stellt eine zentrale Anforderung dar, worauf verschiedene Förderinstrumente sorgfältig zu prüfen sind.

Verschiedene Förderansätze sind unterschiedlich empfindlich auf **externe Einflüsse**. Es gilt also zu analysieren, wie stark die Zielerreichung der Instrumente von sich verändernden wirtschaftlichen Gegebenheiten abhängig sind. Dazu gehört insbesondere der Preisunterschied zwischen konventionellen und nachhaltigen Flugtreibstoffen, welcher wiederum beispielsweise vom Rohölpreis und dem aktuellen Zinsniveau bestimmt wird.

Die **Kosteneffizienz** (auch statische Effizienz genannt) bewertet, ob die eingesetzten Mittel den bestmöglichen Beitrag zur Zielerreichung leisten. Dies beinhaltet insbesondere, ob jeweils aktuell die kosteneffizienteste Technologiekombination eingesetzt wird und zwar am bestgeeigneten Standort.

Um auch langfristig eine hohe Effizienz des Instruments zu gewährleisten, spielt die sogenannte **dynamische Effizienz** eine wichtige Rolle. Darin ist enthalten, ob ein Instrument die richtigen Anreize setzt, um den technologischen Fortschritt zu Gunsten von sinkenden Produktionskosten und Umwelteinflüssen zu lenken.

Als weitere relevante Aspekte für eine Entscheidung werden in derselben Quelle «Umsetzungsgeschwindigkeit, regulatorische resp. gesetzliche Modalitäten, Anpassungsfähigkeit, Administrationserfordernisse» genannt.

C.2. Steuern und Abgaben auf Tickets und CO₂-Emissionen

Mit der 2011 eingeführten deutschen **Luftverkehrssteuer** werden Passagiere auf kommerziellen Flügen mit Start in Deutschland besteuert. Die Höhe der Abgabe richtet sich nach der Flugstrecke zwischen Deutschland und Zielland (in drei Distanzklassen) und beträgt aktuell zwischen 12 und 59 Euro. Ziel dieser Steuer ist primär das Beeinflussen des Mobilitätsverhaltens, welches in einer Reduktion des Verkehrsaufkommens resultieren sollte. Sie ist hingegen nicht geeignet, Anreize zur Vertankung von SAF zu schaffen, da Flüge mit SAF genauso besteuert werden wie Flüge mit konventionellem Flugtreibstoffen.

Im Rahmen der 2021 abgelehnten CO₂-Gesetzesrevision war in der Schweiz eine **Flugticketabgabe** geplant, um Anreize für ein nachhaltigeres Mobilitätsverhalten zu setzen und dadurch eine Emissionsreduktion zu erzielen. Ausschlag für die Höhe der Lenkungsabgabe hätte die Flugdistanz sowie die Beförderungsklasse gegeben, was in Werten zwischen 30 und 120 Franken resultiert hätte. Dem Grundsatz einer Lenkungsabgabe entsprechend wäre mindestens die Hälfte der Einnahmen der Bevölkerung zurückbezahlt worden, der Rest hätte einen Klimafonds alimentiert, welcher wiederum unter anderem SAF-

⁹³ Bullerdiek / Kaltschmitt (2020)

Forschung subventioniert hätte. Dieser Ansatz bringt mehrere Herausforderungen mit sich (siehe auch RMSA¹⁰):

- Es muss darauf geachtet werden, dass die Gesetzgebung am EuroAirport Basel nicht umgangen werden kann, indem Flüge unter französischen an Stelle von Schweizer Verkehrsrechten durchgeführt werden. Damit entfielen die Abgaben, was eine Wettbewerbsverzerrung zur Folge hätte und womöglich die Effektivität der Massnahme einschränken würde.
- Die Abgabehöhe sollte proportional zu den verursachten Emissionen festgelegt werden. Eine Abstufung nach Distanzklassen führt nicht in jedem Fall dazu und kann darüber hinaus – abhängig vom jeweiligen Geschäftsmodell – gewisse Fluggesellschaften deutlich stärker belasten als andere.
- Die wirtschaftlichen Auswirkungen auf Gesellschaften mit anteilmässig vielen Flügen aus der Schweiz sind zu beachten, da diese die erhöhten Kosten auf deutlich weniger Passagiere verteilen können.

Ein Anreiz zur Vermeidung von klimaschädlichen Emissionen in der Luftfahrt kann direkt durch eine **CO₂-Steuer** (oder allgemein einer Treibstoff- oder Treibhausgassteuer) gesetzt werden. Damit diese in der Förderung von SAF wirksam ist, müssen dabei zwingend die Emissionen bei der Herstellung berücksichtigt werden, da im Flug allein die CO₂-Emissionen von SAF denjenigen von konventionellem Flugtreibstoff entsprechen. Die ICAO empfiehlt jedoch ausdrücklich, statt Steuern nur zweckgebundene, an die effektiv entstandenen Kosten geknüpfte Abgaben auf Emissionen und sonstige Umweltauswirkungen von internationalen Flügen zu erheben⁹⁴. Treibstoff, welcher für internationale Flüge getankt wird, ist gemäss ICAO von sämtlichen Steuern und Abgaben zu befreien⁹⁵. Entsprechend kamen solche Steuern bislang erst auf innerstaatlichen Flügen zum Einsatz.

Eine solche Steuer ist mit der überarbeiteten **Energy Taxation Directive** im Fit-for-55 Paket der europäischen Kommission enthalten. So soll Kerosin auf Flügen innerhalb der EU zu einem Mindestsatz von 10.75 €/GJ besteuert werden, was pro Liter ca. 38 Cent entspricht. Diese Regelung soll nach einer Übergangsfrist von zehn Jahren eingeführt werden, während welcher der Mindestsatz von 0 jährlich um 1.075 €/GJ erhöht werden soll. Für Biotreibstoffe beträgt der Mindestsatz 5.38 €/GJ, für erneuerbare Treibstoffe nicht-biogenen Ursprungs gar nur 0.15 €/GJ. Durch diesen Unterschied besteht ein Anreiz zur Verwendung von SAF, der jedoch direkt vom Preisunterschied zwischen SAF und konventionellem Flugtreibstoff abhängt.

In der Schweiz erfüllt die **Mineralölsteuer** diesen Zweck. So schreiben Mineralölsteuergesetz (MinöStG) und Mineralölsteuerverordnung (MinöStV) auf Flugpetrol eine Steuer von aktuell 44 Rappen pro Liter vor, zuzüglich einem Mineralölsteuerzuschlag von 30 Rappen pro Liter. Während ein Teil der Mineralölsteuer in die allgemeine Bundeskasse fliesst, fließen 50 % davon sowie 100 % des Mineralölsteuerzuschlages in die Spezialfinanzierung Luftverkehr gemäss Art. 87b BV (siehe Abschnitt 4.2). Steuererleichterungen für nachhaltige Flugtreibstoffe sind dabei theoretisch möglich, womit dieses Instrument zumindest auf Inlandflügen (rund 4 % des Kerosinbedarfs in der Schweiz) eine gewisse Lenkungswirkung hätte, in der Praxis können SAF-Hersteller jedoch SAF aktuell nicht wie gefordert segregiert und mit den notwendigen Nachhaltigkeitsnachweise liefern (siehe Abschnitt 0).

⁹⁴ ICAO (1996)

⁹⁵ ICAO (2000)

C.3. Emissionshandel und Offsetting

Die SAF-Fördermechanismen im Rahmen von CORSIA und dem europäischen Emissionshandelssystem wurden beide bereits im Abschnitt 4.1 erläutert. Gemäss den Autoren⁹⁶ «sind das EU ETS sowie CORSIA aus heutiger Sicht ungeeignet, eine breite Markteinführung erneuerbarer Flugkraftstoffe zu forcieren, da der Erwerb von Emissionsrechten (EU ETS) oder Offsets (CORSIA) gegenüber der Nutzung erneuerbarer Flugkraftstoffe deutlich geringere Opportunitätskosten aufweist». Die **Effektivität** ist in beiden Fällen direkt von den Preisen von konventionellem Kerosin, SAF sowie den Emissionen abhängig.

Sowohl CORSIA als auch das ETS führen dazu, dass sich unter den SAF-Anbietern die kostengünstigste Variante durchsetzt. Damit ist ein klarer Anreiz für **Kosteneffizienz** vorhanden. Bei CORSIA besteht sogar ein Anreiz für eine Maximierung der Emissionsreduktion, da nur die durch den SAF-Einsatz vermiedenen Emissionen von der Kompensationspflicht befreit sind. Ein solcher Anreiz fehlt beim ETS, da in diesem Rahmen der SAF-Einsatz mit null Emissionen angerechnet werden kann. Hier werden stattdessen stringente Nachhaltigkeitskriterien eingesetzt, um die Klimawirkung wie auch allgemeine Umweltbelastungen zu kontrollieren.

C.4. Einspeisevergütung

Einspeisevergütungen bestehen aus staatlichen Subventionen für Hersteller, proportional zur produzierten Menge SAF. Dabei können zwei verschiedene Ansätze verfolgt werden: Eine **Festvergütung** ist unabhängig von der gelieferten Menge und allfälliger Konkurrenz, die Höhe der Vergütung bleibt konstant. **Ausschreibungsmodelle** hingegen beruhen auf Ausschreibungen von gewissen Liefermengen, wobei die Anbieter Angebote einreichen können. Der Staat kann bei der Erteilung des Zuschlags günstigeren Angeboten Priorität geben, sollte dabei aber sämtliche Elemente von Nachhaltigkeitskriterien inklusive Emissionsreduktion berücksichtigen. Einspeisevergütungsmodelle können damit die Konkurrenzfähigkeit von neuen Herstellungspfaden beschleunigen. Ein bestehendes Beispiel ist die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV), mit dem die Schweiz die Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen fördert. Einspeisevergütungen sind analog auch für die Etablierung des SAF-Marktes denkbar, Empfänger wären in diesem Fall SAF-Hersteller.

Anstelle von Liefermengen können analog zu THG-Minderungsquoten statt Beimischungsquoten eine gewisse THG-Reduktion (z.B. pro Liter vertanktem Treibstoff) ausgeschrieben werden. Damit wird ein Anreiz gegeben, THG-Reduktion möglichst kosteneffizient zu erreichen. Wie bei THG-Minderungsquoten können auch hier NET gefördert werden, wenn dies gewünscht ist.

Die tatsächlich erreichbare Produktion von SAF ist bei Festvergütungen stark abhängig von der Höhe der Vergütung sowie dem Preis von konventionellen Treibstoffen. Somit ist die **Effektivität** schwer vorherzusagen. Zu tief angesetzte Vergütung führt zu einer nicht ausreichenden Wirkung, möglich ist aber auch eine Übererfüllung bei zu hoch angesetzter Vergütung. Durch die mengenmässige Beschränkung und den Wettbewerb um Einspeisevergütungen können Ausschreibungsmodelle hingegen eine hohe Effektivität erreichen. Dabei weisen sie auch eine geringere Abhängigkeit von externen Effekten wie verändernden Treibstoffpreisen auf, bei steigenden Mehrkosten (von SAF vs. fossilem Kerosin) würde dies allein zu höheren Vergütungen führen.

Durch die konstante Vergütung gibt es zwischen Herstellern keinen Wettbewerb, welcher die **Kosteneffizienz** fördern würde. Der Anreiz für Kostenminimierung besteht für Hersteller allein im Bestreben zur Optimierung der Gewinnmargen. Um einen zusätzlichen Anreiz für die Weiterentwicklung der Technologie zu setzen, müssten Vergütungen degressiv angesetzt werden, also über die Zeit abnehmen. Anreize zur Minimierung der THG-Intensität oder der Umweltbelastung bestehen in diesem Ansatz keine. Auch

⁹⁶ Bullerdiek / Kaltschmitt (2020)

hier müssen dafür Nachhaltigkeitskriterien zu Hilfe genommen werden. Durch den Wettbewerb zwischen Herstellern schaffen Ausschreibungsmodelle hingegen klare Anreize zur Kostenoptimierung. Auch langfristig müssen Hersteller mit diesem Ansatz in Optimierung der Technologie investieren, um konkurrenzfähig zu bleiben. Wird dabei nicht eine Liefermenge, sondern eine THG-Reduktion ausgeschrieben, besteht sogar ein direkter Anreiz zur Reduktion der Klimawirkung. Anreize zu verbesserter Klima- und Umweltperformance können auch geschaffen werden, wenn die Vergütung aufgrund von diesen, und nicht nur wirtschaftlichen Gesichtspunkten vergeben wird

Da bei einer Einspeisevergütung der Staat einen wesentlichen Anteil der Mehrkosten von SAF übernimmt, müsste eine Geldquelle etabliert werden, welche die dafür benötigten beträchtlichen finanziellen Mittel zur Verfügung stellt. Dies wird nicht ohne **neue (Zuteilung von) Steuern oder Abgaben** möglich sein. Gegen Einspeisevergütungen spricht die Tatsache, dass die Schweiz kaum namhaften Mengen an SAF selbst produzieren wird; diese Subventionierung würde also grösstenteils ins Ausland fließen. Zudem ist es fraglich, ob der Bund so aktiv in den Handel mit SAF einsteigen möchte. Einspeisevergütungen wurden in diesem Bereich auch international bislang nicht eingesetzt. Grundsätzlich geeignet wäre dieses Instrument als Ergänzung einer allgemeinen Quotenlösung, zur Unterstützung einzelner Technologien, anstelle einer Subquote oder Multiplikatoren.

Anhang D. Standpunkt des Bundesrates bezüglich Negativemissionstechnologien

Am 2. September 2020 hat der Bundesrat einen Bericht zur Bedeutung von NET in der Schweizer Klimapolitik veröffentlicht⁹⁷, welcher einen Überblick zu den jeweiligen Technologien bietet. Die darin präsentierte Strategie sieht vor, NET da einzusetzen, wo Emissionen nicht verhindert werden können (Landwirtschaft, Kehrlichtverbrennungsanlagen, Zementwerke). Ob NET zum Ausgleich von Emissionen in der Luftfahrt eingesetzt werden sollten, muss laut diesem Bericht im Kontext der folgenden Prinzipien beurteilt werden⁹⁸:

- Das **Vorsorgeprinzip**: NET sollten zum Ausgleich von Luftfahrtemissionen nur dann eingesetzt werden, wenn Massnahmen zur direkten Vermeidung von Emissionen sich als nicht geeignet erweisen.
- Aus dem **Verursacherprinzip** kann abgeleitet werden, dass die Luftfahrt für den Ausgleich ihrer Emissionen verantwortlich ist und somit auch die Kosten dafür zu tragen hat.
- **Bekämpfung an der Quelle** besagt, dass eine Senkung der Emissionen Vorrang hat vor dem Ergreifen von Massnahmen zu deren Ausgleich.
- Eine **ganzheitliche Betrachtungsweise** verlangt, dass diejenige Massnahme gewählt wird, welche zur grössten Senkung der Umweltbelastung führt.
- Das **Kooperationsprinzip** zeigt auf, dass eine Zusammenarbeit der Luftfahrt mit anderen Sektoren für den Ausgleich von Emissionen denkbar ist.

Das Vorsorgeprinzip sowie die Bekämpfung an der Quelle sprechen also grundsätzlich gegen den Einsatz von NET zum Ausgleich von Emissionen der Luftfahrt, solange Massnahmen zur direkten Vermeidung von Emissionen eingesetzt werden können. Dieser Ansatz wurde in einem neuen Bericht des Bundesrates im Mai 2022 bestätigt⁹⁹. Dabei müssen jedoch im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise die Umweltauswirkungen wie auch die Kosten aller möglichen Massnahmen gegeneinander aufgewogen werden. Sollten diese allesamt für den Einsatz von NET sprechen, stellen diese dennoch eine valable Option dar.

⁹⁷ Bundesrat (2020).

⁹⁸ Ebd., Bundesamt für Umwelt (2013).

⁹⁹ Bundesrat (2022)

Literaturverzeichnis

Air Transport Action Group (2020): Waypoint 2050. Genf.

Airbus Deutschland (2003): Cryoplane. Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis. Final Report. Hamburg.

Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. (2020): Nachhaltige Flugkraftstoffe Status, Optionen, Handlungsnotwendigkeiten. aireg Roadmap zur Markteinführung von Sustainable Aviation Fuels. Berlin.

Becattini Viola / Gabrielli Paolo / Mazzotti Marco (2021): Role of Carbon Capture, Storage, and Utilization to Enable a Net-Zero-CO₂-Emissions Aviation Sector. Industrial & Engineering Chemistry Research.

BP (2022): Statistical Review of World Energy. 71. Edition. London.

Brenn Benjamin / Durdina Lukas / Siegrist Frithjof / Beyerle Peter / Bruderer Kevin / Rindlisbacher Theo / Rocci-Denis Sara / Andac M. Gurhan / Zelina Joseph / Penanhoat Olivier / Wang Jing (2015): Effects of Fuel Aromatic Content on Nonvolatile Particulate Emissions of an In-Production Aircraft Gas Turbine. Environmental Science & Technology.

Bullerdiek Nils / Kaltschmitt Martin (2020): Analyse und Bewertung vorhandener und alternativer Lenkungsinstrumente zur Markteinführung erneuerbarer Flugkraftstoffe. Zeitschrift für Energiewirtschaft. Wiesbaden.

Bullerdiek Nils / Neuling Ulf / Kaltschmitt Martin (2021): A GHG reduction obligation for sustainable aviation fuels (SAF) in the EU and in Germany. Journal of Air Transport Management.

Bundesamt für Umwelt (2013): Umweltrecht kurz erklärt. Das Umweltrecht des Bundes im Überblick. Bern.

Bundesamt für Zivilluftfahrt (2020): Faktenmaterial Elektrisches Fliegen. Ittigen.

Bundesrat (2020): Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein? Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens Goumaz vom 12. Dezember 2018. Bern.

Bundesrat (2021): Langfristige Klimastrategie der Schweiz. Bern.

Bundesrat (2022): CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET), Bern.

Courtin Christopher / Hansman John (2018): Safety Considerations in Emerging Electric Aircraft Architectures. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta GA.

Danish Energy Agency (2022): Technology Data Renewable Fuels. Kopenhagen.

Deutsche Bundesregierung (2021): PtL-Roadmap. Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. Berlin.

Ecoplan (2021): Schweizer «Road Map Sustainable Aviation». Bern.

Europäische Kommission (2011): Beschluss der Kommission vom 26. September 2011 über Benchmarks für die kostenlose Zuteilung von Treibhausgasemissionszertifikaten an Luftfahrzeugbetreiber gemäß Artikel 3e der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union. 2011/638/EU. Brüssel.

ICAO (1996): Council Resolution on environmental charges and taxes. 9. Dezember 1996. Montreal.

ICAO (2000): ICAO's Policies on taxation in the field of international air transport (Doc 8632). Dritte Edition. Montreal.

ICAO (2018): Convention on International Civil Aviation, Annex 16 – Environmental Protection, Volume IV – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). Montreal.

ICAO (2022): CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels. Montreal.

ICAO CAEP (2022): Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO₂ emission reductions. Montreal.

IEA Bioenergy (2021): Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges. Für IEA Bioenergy Task 39.

Jewswani Harish K. / Chilvers Andrew / Azapagic Adisa (2020): Environmental sustainability of biofuels: a review. Proceedings of the Royal Society A.

McKinsey & Company (2020): Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Für Clean Sky 2 JU und Fuel Cells and Hydrogen 2 JU. doi:10.2843/471510. Luxemburg.

Mission Possible Partnership (2022): Making net-zero aviation possible. An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy.

Neu Urs (2021): Die Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen auf das Klima. In: Swiss Academies Communications 16 (3).

Pechstein Jan / Bullerdiek Nils / Kaltschmitt Martin (2019): A "book and Claim"-Approach to account for sustainable aviation fuels in the EU-ETS – Development of a basic concept. Energy Policy.

Prognos / TEP Energy / Infras / Ecoplan (2020): Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht, im Auftrag des Bundesamts für Energie. Bern.

Ram M., Galimova T., Bogdanov D., Fasihi M., Gulagi A., Breyer C., Micheli M., Crone K. (2020): Powerfuels in a Renewable Energy World – Global volumes, costs and trading 2030 to 2050. LUT Universität und Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Lappeenranta, Berlin.

Rojas Diego / Crone Kilian / Löhle Sebastian / Siegemund Stefan (2019): Global Alliance Powerfuels. Powerfuels in Aviation. Für Deutsche Energie-Agentur. Berlin.

Royal Netherlands Aerospace Centre (2021): Destination 2050. Amsterdam.

Schmidt Patrick / Weindorf Werner / Roth Arne / Batteiger Valentin / Riegel Florian (2016): Power-to-Liquids – Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. Für das Deutsche Umweltbundesamt. München.

Thomson Robert (2020): Electrically propelled aircraft development exceed 200 for the first time. Roland Berger Insights. London.

Transport & Environment (2022): Analysis of green jet fuel production in Europe. Brüssel.

Treyer Karin / Sacchi Romain / Bauer Christian (2021): Life Cycle Assessment of synthetic hydrocarbons for use as jet fuel: "Power-to-liquid" and "Sun-to-liquid" processes. Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen. In Auftrag des BAZL

Van Grinsven Anouk / van den Toorn Emiel / van der Veen Reinier / Kampman Bettina (2020): Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU. CE Delft. Delft.

WEF Clean Skies for Tomorrow (2020): Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation. Insight Report. Cologne.

WEF Clean Skies for Tomorrow (2021): Sustainable Aviation Fuel Policy Toolkit. Cologne.

Glossar

Beimischpflicht, Beimischquote	Gesetzliche Verpflichtung zur Beimischung eines gewissen Anteils von nachhaltigen Treibstoffen
Biogene SAF	Nachhaltige biogene Flugtreibstoffe bezeichnen SAF, deren Energiegehalt hauptsächlich aus biogenen Quellen stammt.
Book & Claim	Eine Handelseption, welche den physischen Warenfluss vom Handel mit Nachhaltigkeitszertifikaten entkoppelt
Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)	Ein marktbasiertes ICAO-Programm mit dem Ziel, Wachstum des internationalen Luftverkehrs ab 2020 CO ₂ -neutral zu gestalten
Demonstrationsanlage	Anlage in eher später Entwicklungsphase zur Erprobung von systemischen Aspekten einer Technologie, üblicherweise im Massstab 1:1
EU Emissions Trading Scheme (EU ETS)	Marktbasiertes Instrument, welches Emissionsrechte versteigert, verknüpft mit demjenigen der Schweiz
International Civil Aviation Organisation (ICAO)	Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO ist eine Sonderorganisation der UN mit Sitz in Montreal.
Massenbilanzierung	Handelseption mit rechnerischer Zuordnung von Nachhaltigkeitseigenschaften bei vermischten Stoffströmen
Negativemissions-technologien (NET)	NET ist ein Sammelbegriff für Technologien, welche durch ihren Einsatz die Konzentration von CO ₂ in der Atmosphäre reduzieren können.
Netto-Null	Gleichgewicht zwischen Ausstoss und Aufnahme, meist in Zusammenhang mit CO ₂ oder andern Treibhausgasen
Nicht-CO ₂ -Emissionen	Nicht-CO ₂ -Emissionen bezeichnen sämtliche Klimaeffekte, welche nicht auf CO ₂ -Emissionen beruhen. Dabei handelt es sich nicht nur um Treibhausgase.
Pilotanlage	Anlage in eher früher Entwicklungsphase zur Erprobung von technischer Machbarkeit, in der Regel beschränkt auf Teilsysteme
Power-to-Liquid (PtL)	Power-to-Liquid bezeichnet Technologien zur Produktion von flüssigen Treibstoffen, wobei Elektrizität als Energieinput genutzt wird.
Schweizer Emissions-handelssystem (CH EHS)	Marktbasiertes Instrument, welches Emissionsrechte versteigert, verknüpft mit demjenigen der EU
Schweizer Road Map Sustainable Aviation (RMSA)	Von BAFU und BAZL in Auftrag gegebene Studie zur Defossilisierung des Luftverkehrs in der Schweiz.

Sun-to-Liquid (StL)	Sun-to-Liquid bezeichnet Technologien zur Produktion von flüssigen Treibstoffen, wobei direkt Sonnenenergie als Energiequelle genutzt wird.
Sustainable Aviation Fuels (SAF)	Im Rahmen dieses Berichts werden Flugtreibstoffe, welche als Ersatz von fossilen Flugtreibstoffen eingesetzt werden können, aus Rohstoffen und mit Energie aus erneuerbaren Quellen hergestellt werden sowie gewisse Nachhaltigkeitskriterien einhalten, als nachhaltige Flugtreibstoffe oder kurz SAF (Sustainable Aviation Fuels) bezeichnet. In der Schweizer Gesetzgebung werden diese Treibstoffe als «erneuerbare Flugtreibstoffe» bezeichnet, kurz für «Flugtreibstoffe aus erneuerbaren Quellen».
Synthetische SAF	Nachhaltige synthetische Flugtreibstoffe bezeichnen SAF, deren Energiegehalt hauptsächlich aus nicht-biogenen Quellen stammt.
Treibhausgas	Treibhausgase umfassen sämtliche Gase, welche zum Treibhauseffekt der Erde beitragen.

Abkürzungsverzeichnis

EHS	Schweizer Emissionshandelssystem
(EU) ETS	(European Union) Emission Trading Scheme, EU Emissionshandelssystem
NET	Negativemissionstechnologien
PtL	Power-to-Liquid, nachhaltige synthetische Treibstoffe aus erneuerbarem Strom
SAF	Sustainable Aviation Fuel(s), nachhaltige Flugtreibstoffe
StL	Sun-to-Liquid, nachhaltige synthetische Treibstoffe aus Sonnenenergie
THG	Treibhausgas