

## **Erneuerbare alternative Treibstoffe für die Luftfahrt**

Autoren: Sandra Richter, Marina Braun-Unkhoff, Clemens Naumann, Uwe Riedel

Der Klimawandel ist seit vielen Monaten eines der Top-Themen in der Öffentlichkeit und betrifft dabei im besonderen Maße auch die Luftfahrt. Klimaschädliche Schadstoffe wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Partikel und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) gelangen durch die Verbrennung rohböbasiertes Treibstoffe (Kerosin) direkt in die unteren Atmosphärenschichten der Erde, die Troposphäre, in der das Wettergeschehen stattfindet, und auch in die Stratosphäre. Gegenwärtig liegt der Anteil der Luftfahrt an der Erderwärmung je nach Schätzung zwar lediglich bei etwa drei bis fünf Prozent, doch das jährliche Wachstum der Branche von anderthalb bis zwei Prozent führt ohne Gegenmaßnahmen zwangsläufig zu einer weiteren Zunahme der Emissionen. Derzeit wird nach Möglichkeiten gesucht, diese Zunahme aufzuhalten und sogar die Emissionen zurückzufahren. Hierfür kommen kurz- und mittelfristig nur alternative erneuerbare Treibstoffe in Frage.

Doch worin besteht die Klimawirkung der Luftfahrt überhaupt? Durch die Emission von Kohlendioxid wird die natürliche Gaszusammensetzung der Erdatmosphäre verändert. Dies führt zu einer Beeinflussung des Strahlungshaushalts in der Erdatmosphäre, die sich dadurch kontinuierlich aufwärmt. Darüber hinaus beeinflussen Rußpartikel in der Erdatmosphäre den Strahlungshaushalt. An ihnen kann Wasserdampf kondensieren, was zur Bildung der typischen Kondensstreifen führt, aus denen in Reiseflughöhen langlebige Zirruswolken entstehen können. Diese verhindern, dass Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht. Außerdem entstehen während der Verbrennung Stickoxide aufgrund von Reaktionen mit dem in der Luft vorhandenen Stickstoff. Stickoxide sind im Gegensatz zum Kohlendioxid zwar kein Treibhausgas, führen aber in der Troposphäre, zur Bildung von Ozon. Dieses starke Treibhausgas beeinflusst ebenfalls den Strahlungshaushalt. Eine Erhöhung von Ozonkonzentrationen in der Troposphäre muss wegen der möglichen toxischen Wirkung auf Menschen und Pflanzen vermieden werden, während das in der Stratosphäre befindliche Ozon dringend notwendig ist, da es die lebensgefährliche UV-Strahlung der Sonne absorbiert. Ein weiteres Abfallprodukt bei der Verbrennung von Treibstoff ist Wasserdampf, der durch den direkten Eintrag in die Atmosphäre ebenfalls als Treibhausgas wirkt – allerdings ist diese Menge im Vergleich zum viel höheren natürlichen Wassergehalt der Atmosphäre von untergeordneter Bedeutung.

### **Minderung von Emissionen in der Luftfahrt**

Da die Emissionen in erster Linie durch die Verbrennung des Treibstoffs entstehen, gilt es, Alternativen zu finden. Es wird bereits viel am Einsatz von Batterien geforscht, analog zur Elektromobilität im Straßenverkehr. Für ein- bis viersitzige Flugzeuge wurde die Machbarkeit bereits demonstriert. Allerdings haben Batterien noch eine wesentlich geringere Energiespeicherdichte als flüssiger Flugtreibstoff. Mit der Größe und dem Gewicht der gegenwärtig vorhandenen Batterietechnologie könnte daher kein herkömmliches Passagierflugzeug betrieben werden, erst recht nicht auf Langstrecken. Ähnliches gilt auch für hybrid-elektrische Konzepte, bei denen nur ein Teil der Antriebsenergie elektrisch aus einer Batterie oder einer Brennstoffzelle bezogen wird, der andere Teil nach wie vor durch Verbrennung, zum Beispiel durch einen von einer Mikrogasturbine angetriebenen Generator, bereitgestellt werden muss. Die Realisierung dieser Konzepte, und somit auch eine deutliche Minderung der Emissionen, sind mittelfristig nur für Kleinflugzeuge möglich. Auch wird bereits darüber diskutiert, ob es nicht möglich ist, den Betrieb am Boden (Flughafen), wie zum Beispiel das Rollen zur Startbahn

(Taxi), rein elektrisch zu bewerkstelligen und/oder den energieintensiven Start (Take-off) durch einen zusätzlichen Elektroantrieb zu unterstützen. Dadurch könnten der Treibstoffverbrauch gesenkt und gleichzeitig die Emissionen in Flughafennähe deutlich reduziert werden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Austausch des bisherigen Treibstoffs durch solch einen, der wesentlich weniger Schadstoffe emittiert. Hier ist der Einsatz von Wasserstoff ( $H_2$ ) eine oft genannte Alternative, da sein direktes Verbrennungsprodukt Wasser ist – sowohl  $CO_2$  als auch Partikelemissionen gäbe es nicht. Allerdings lässt sich Wasserstoff (unter Normalbedingungen gasförmig) nicht einfach in bestehende Flugzeugtanks füllen, da seine volumetrische Energiedichte wesentlich geringer ist als die der flüssigen Flugtreibstoffe. Das würde neuartige Tank- und Speicherkonzepte erforderlich machen, wofür wiederum eine Neukonstruktion von Flugzeugen und eine zusätzliche Versorgungsinfrastruktur an Flughäfen notwendig wären. Zudem blieben bei der Verbrennung von Wasserstoff die Stickoxidbildung und der so deutlich erhöhte Eintrag von Wasserdampf in die Erdatmosphäre bestehen.

### **Ersatz von rohölbasierten Treibstoffen**

Die derzeit beste und einzige Lösung zur Minderung der Schadstoffemissionen im Luftverkehr liegt in der Verwendung erneuerbarer alternativer synthetischer Treibstoffe (SAFs – sustainable alternative fuels). Diese können unter Verbrauch von  $CO_2$  hergestellt und so entwickelt werden, dass sie in ihren Eigenschaften dem rohölbasierten Treibstoff Jet A-1 (Kerosin) nahezu identisch sind. Ein entscheidender Vorteil in der Herstellung synthetischer Treibstoffe ist die Möglichkeit, diese gezielt zu entwickeln (designen), sodass sie bestimmte ausgewählte Eigenschaften haben, wie beispielsweise einen höheren Energieinhalt oder deutlich reduzierte Partikelemissionen. Dies gelingt über die Veränderung der chemischen Zusammensetzung. So kann ein optimierter Treibstoff hergestellt werden, dessen Eigenschaften denen des Jet A-1 möglichst ähnlich sind, aber gleichzeitig die Bildung von Verbrennungszwischenprodukten, die zur Rußbildung führen, vermieden wird. Die Verbrennung solcher „Designer-Treibstoffe“ führt dann zu weniger Emissionen. Im Rahmen des ECLIF-Projekts (Emission and Climate Impact of Alternative Fuels) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde in mehreren Flugmesskampagnen unter Beteiligung der amerikanischen Luft- und Raumfahrtagentur NASA erstmalig erfolgreich untersucht und gezeigt, dass und inwieweit sich derartig designte Treibstoffe mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen auf die Bildung von Schadstoffen am Boden und in der Luft auswirken.

Um die Kompatibilität zum Jet A-1 und zu den gegenwärtig verwendeten Triebwerken zu gewährleisten, muss jeder neue Treibstoff zertifiziert werden. Aktuell sind fünf verschiedene alternative synthetische Treibstoffe für die Zumischung zu Jet A-1 bis maximal 50 Prozent (abhängig von der Herstellungsart) zugelassen. Wie aber kann es gelingen, dass ein solch kompatibler synthetischer Treibstoff, nicht zur Erhöhung der  $CO_2$ -Emissionen führt sondern sogar zu einer Reduktion? Hier sind die verwendeten Rohstoffe und das Produktionsverfahren entscheidend. Alternative erneuerbare Treibstoffe werden unter Nutzung und somit Verbrauch von  $CO_2$  hergestellt – entweder direkt, indem  $CO_2$  selbst als Ausgangsstoff dient, oder indirekt durch die Verwertung von Biomasse als Kohlenstoffquelle, da Pflanzen für ihr Wachstum  $CO_2$  aus ihrer Umgebung (Atmosphäre) aufnehmen, um den Kohlenstoff in ihre Struktur einzubauen oder Speicherstoffe anzulegen. Wird aus diesem pflanzlichen Material Treibstoff gewonnen und verbrannt, unter Freisetzung des zuvor der Atmosphäre entnommenen  $CO_2$ , entsteht ein Kohlenstoffkreislauf, der nicht zur Erhöhung der globalen Netto- $CO_2$ -Emissionen beiträgt. Um aber das Ziel der  $CO_2$ -Neutralität zu erreichen, muss die gesamte Prozesskette betrachtet werden: Neben der Verbrennung des Treibstoffs sind das in erster Linie dessen Herstellung einschließlich der

Aufarbeitung der Rohstoffe und die Distribution. Um auch hier CO<sub>2</sub> einzusparen, müssen erneuerbare Energiequellen (Wind, Wasserkraft und Sonnenenergie) bei den Verfahren zur Treibstoffgewinnung eingesetzt werden.

### **Arten erneuerbarer alternativer Treibstoffe (SAF)**

Je nach Ressource und Herstellungsverfahren lassen sich grundlegend zwei Arten alternativer erneuerbarer Treibstoffe unterscheiden: Power-to-Liquid (PtL) und Biomass-to-Liquid (BtL). Während sich hinter PtL-Treibstoffen neben erneuerbarem Strom nur Wasser und CO<sub>2</sub> als Rohstoffe verbergen, basieren die BtL-Treibstoffe auf einer Vielzahl von Rohstoffen, die auf unterschiedliche Art und Weise zu Treibstoffen umgesetzt werden können. Um bei der Verwendung von Biomasse die Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelindustrie sowie dem damit verbundenen Landnutzungswechsel (indirekt und direkt) zu vermeiden, werden für neuere BtL-Technologien nur Rest- und Abfallstoffe aller Art verwendet. In erster Linie sind das Abfälle aus der Forst- und Landwirtschaft sowie alte Speiseöle und -fette. Aber auch kommunale Abfälle können als Rohstoff für die Treibstoffherstellung dienen. Hinzu kommen die Möglichkeiten der Verwertung von Biogas aus landwirtschaftlichen Reststoffen und der Gewinnung von Öl aus Algen, die im Vergleich zu anderer Biomasse ein erhebliches CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial sowie drastisch höhere Erträge pro Anbaufläche haben.

Die Herstellung alternativer Treibstoffe aus Wasser und CO<sub>2</sub> im PtL-Prozess basiert dagegen im Wesentlichen auf der Nutzung von erneuerbarer und überschüssiger Energie zur Herstellung von Synthesegas – einer Mischung aus Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO). Zum einem wird Wasser durch Elektrolyse in Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) aufgespalten. Zum anderen wird zur Herstellung von CO das Treibhausgas CO<sub>2</sub> genutzt. Hier gibt es mehrere Möglichkeiten: Bei einer Niedertemperatur-Elektrolyse wird CO<sub>2</sub> an der Kathode zu CO reduziert, während an der Anode Wasser (H<sub>2</sub>O) zu Sauerstoff (O<sub>2</sub>) oxidiert. Dabei entsteht an der Kathode neben CO auch H<sub>2</sub> und damit direkt die Synthesegasmischung. Bei dem Verfahren der sogenannten Hochtemperatur-Co-Elektrolyse wird ein Teil des Wasserstoffs noch während der Wasserelektrolyse dazu verwendet, das CO<sub>2</sub> in CO zu konvertieren. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, diese Verfahren voneinander zu trennen und in einem separaten Prozessschritt das CO<sub>2</sub> mittels eines Teils des Wasserstoffs aus der Wasserelektrolyse zu CO umzusetzen. Dieses bildet zusammen mit dem übrigen Wasserstoff dann ein Synthesegas (H<sub>2</sub> und CO in einem bestimmten Verhältnis). Ein vielversprechender Ansatz ist die Nutzung von CO<sub>2</sub> aus der Luft oder aus Punktquellen, wie zum Beispiel Lüftungsanlagen großer Gebäudekomplexe oder Zementfabriken. Dieses sogenannte Direct-Air-Capture(DAC)-Verfahren wurde bereits erfolgreich demonstriert; an seiner Weiterentwicklung wird weltweit intensiv gearbeitet.

Bei der anschließenden Fischer-Tropsch-Synthese (benannt nach ihren Erfindern Franz Fischer und Hans Tropsch, die das Verfahren 1925 am damaligen Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohleforschung entwickelten) wird das Synthesegas dann über mehrere Stufen zu einem synthetischen Treibstoff umgesetzt. Das Verhältnis von H<sub>2</sub> zu CO in der Synthesegasmischung sowie die Prozessbedingungen (Druck und Temperatur) sind wesentliche Stellschrauben zur Beeinflussung und Einstellung der jeweiligen chemischen Zusammensetzung eines spezifischen Treibstoffs. Aktuell gibt es zwei Arten von Fischer-Tropsch(FT)-Treibstoffen: FT-SPK (Synthetic Paraffinic Kerosene) und FT-SKA (Synthetic Kerosene with Aromatics). Beide sind für die Zumischung zum Jet A-1 in Höhe von bis zu 50 Prozent zertifiziert, das sogenannte FT-SPK bereits seit zehn Jahren.

Synthesegas kann aber auch mittels Solarenergie CO<sub>2</sub>-frei erzeugt werden, beispielsweise in Anlagen wie dem Sonnenofen des DLR. Hierfür werden die benötigten hohen Prozesstemperaturen,

typischerweise von über 1.500 Grad Celsius, direkt durch geschickte Nutzung des Sonnenlichts erzeugt, um ein als Katalysator fungierendes Metalloxid in Metall- und Sauerstoffionen zu spalten. Durch diesen Solarreaktor werden dann gemeinsam Wasserdampf und Kohlendioxid geleitet. Der aus dem hierbei erzeugten Synthesegas hergestellte Treibstoff wird daher auch als „Solar Fuel“ bezeichnet. So ist es 2014 im Rahmen des von der EU geförderten SOLAR-JET-Projekts gelungen, erstmalig unter Nutzung der Sonnenenergie ein erneuerbares synthetisches Kerosin herzustellen, wenn auch bis jetzt noch in äußerst geringen Mengen.

Für die Herstellung von BtL-Treibstoffen ist das jeweilige Verfahren abhängig von der Art der Biomasse. Bei der Verwendung von kommunalen Abfällen oder Biogas als Ausgangsmaterialien kann das Synthesegas nur über das Fischer-Tropsch-Verfahren zu synthetischem Treibstoff umgewandelt werden. Dienen Pflanzenöle oder alte Speiseöle und -fette als Ausgangsmaterial, werden diese durch die Reaktion mit Wasserstoff (Hydrierung) zu alternativen Treibstoffen umgesetzt. Das Produkt wird HEFA-Kerosin (Hydrotreated Esters and Fatty Acids) genannt, das dem Jet A-1 zu 50 Prozent zugemischt werden darf. Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens führt zum sogenannten CH-Kerosin (benannt nach dem Herstellungsprozess Catalytic Hydrothermolysis), das sich derzeit in der Zertifizierungsphase befindet.

Bei Rest- und Abfallstoffen aus der Forst- und Landwirtschaft handelt es sich zumeist um holzartiges, sogenanntes lignocellulosehaltiges Material, das aufgearbeitet werden muss. Der einfachste aber auch energieintensivste Weg ist auch hier die Umsetzung zu Synthesegas und die anschließende Herstellung von Fischer-Tropsch-Treibstoffen. Bestimmte Bestandteile der Lignocellulose (Strukturgerüst trockener Biomasse) können aber auch (genauso wie übrigens auch Stärke) in Zuckermoleküle aufgespalten und biotechnologisch bei der Fermentation mittels beispielsweise Hefen in Alkohole umgesetzt werden. Der aus Alkoholen dann über mehrere Prozessschritte erzeugte Treibstoff, der aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen bestehen kann, wird als Alcohol-to-Jet (AtJ) bezeichnet. Je nachdem wie der spezifische AtJ-Treibstoff chemisch zusammengesetzt ist, wird wie bei den FT-Treibstoffen zwischen AtJ-SPK (Synthetic Paraffinic Kerosene) und AtJ-SKA (Synthetic Kerosene with Aromatics) unterschieden. AtJ-SPK ist bereits für eine 50-prozentige Zumischung zertifiziert. Der AtJ-SKA-Treibstoff befindet sich noch in der Testphase für die Zulassung; allerdings gab es bereits einen erfolgreichen Flug in einem Passagierflugzeug.

Kohlenwasserstoffe selbst können auch direkt durch Fermentation aus zuckerbasierten Verbindungen produziert werden. Für die Herstellung der synthetischen Zumischkomponente Farnesan (mehrfach verzweigter Kohlenwasserstoff, der zur Gruppe der Alkane gehört) muss das eigentliche Produkt der Fermentation (Farnesen – chemisches Gerüst hat Doppelbindungen, gehört daher zur Gruppe der Alkene) nur leicht mit Wasserstoff hydriert werden. Das Farnesan allein darf als Reinstoff (keine mehrkomponentige Mischung im Gegensatz zu den angesprochenen alternativen Jet-Treibstoffen) dem Jet A-1 nur in Anteilen von bis zu zehn Prozent zugemischt werden.

Für die Umwandlung von lignocellulosehaltigem Material in einen alternativen Treibstoff gibt es als dritte Möglichkeit die Umsetzung mit Wasserstoff in einem sowohl katalytischen als auch thermochemischen Prozess. Die nach diesen Verfahren hergestellten Treibstoffe heißen Hydrotreated Depolymerized Cellulosic Jet (HDCJ) und Hydrodeoxygenated Synthetic (Aromatic) Kerosene (HDO-S(A)K). Wie das AtJ-SKA und auch das CH-Kerosin, befinden sich diese noch in der Testphase für die Zertifizierung zur Verwendung als alternative Treibstoffe in der Luftfahrt.

## **Heutiger Einsatz erneuerbarer alternativer Treibstoffe (SAF)**

Obwohl es weltweit bereits zahlreiche Testflüge und Messungen gab, die eindrucksvoll nachgewiesen haben, dass synthetische alternative Treibstoffe genauso effizient und sicher wie Jet A-1 sind, diesen eins zu eins ersetzen können und weit weniger Schadstoffe emittieren, ist deren Einsatz in der kommerziellen Luftfahrt momentan mit etwa 0,003 Prozent äußerst gering. 2017 wurden weltweit etwa 273 Millionen Tonnen Jet-A-1-Kerosin verfliegen, die Menge an verbrauchten synthetischen Treibstoffen dagegen liegt gegenwärtig bei nur etwa 8.000 Tonnen pro Jahr (circa zehn Millionen Liter). Über 90 Prozent der Menge an alternativen Treibstoffen werden am Flughafen von Los Angeles getankt – geliefert vom in der Nähe ansässigen Treibstoffproduzenten World Energy (AltAir Paramount). Das Unternehmen ist momentan das einzige, das im kontinuierlichen Betrieb einen alternativen Jet-Treibstoff herstellt. Hierbei handelt sich um ein HEFA-Kerosin, das aus nicht für die Nahrungsmittelproduktion verwertbaren Pflanzenölen sowie Öl- und Fettabfällen hergestellt wird. Die restlichen etwa zehn Prozent der Mengen an alternativen Treibstoffen kommen von dem finnischen Raffinerieunternehmen Neste, das ebenfalls HEFA-Kerosine herstellt, und dem US-Unternehmen Gevo, das in Texas ein ATJ-SPK produziert.

Der Hauptgrund für den geringen Anteil an erneuerbaren Treibstoffen sind die hohen Kosten, die gegenwärtig noch mit der Herstellung einhergehen und den alternativen Treibstoff verteuern. Aufgrund des hohen Kostendrucks wegen der starken Konkurrenz im globalen Luftverkehr besteht nur eine geringe Nachfrage. Selbst wenn es eine verstärkte Nachfrage nach alternativen Treibstoffen gäbe und diese in größeren Mengen hergestellt werden würden, so stünden sie immer noch im Wettbewerb zu rohölbasiertem Kerosin. Ohnehin wäre die Verfügbarkeit der Rohstoffe gegenwärtig nicht ausreichend, um die Produktion komplett auf erneuerbare Treibstoffe umzustellen. Umso mehr ist die Schaffung verbindlicher und einheitlicher Rahmenbedingungen auf internationaler Ebene für die weltweite Verwendung neuer Treibstoffe unerlässlich für eine durchdringende Markteinführung. Dann könnten Anlagen mit größeren Kapazitäten gebaut und die Betreiber mehr in die Optimierung der Produktionsverfahren und in zukunftssträchtige Technologien wie das Power-to-Liquid-Verfahren investieren. Die verbindliche und angemessene Bepreisung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist hierbei ein wichtiges Mosaiksteinchen. Dadurch könnten die Kosten und somit auch die Preise für alternative Treibstoffe gesenkt und so der Anteil an umweltfreundlichem Kerosin im Flugverkehr deutlich erhöht werden. Heutige Prognosen gehen davon aus, dass bis 2022 die weltweiten Produktionskapazitäten auf über vier Milliarden Liter gesteigert werden könnten, was dann immerhin einem Prozent der Menge des weltweit verfliegenen Kerosins bezogen auf 2017 entspräche.

## **Bewertung erneuerbarer alternativer Treibstoffe – heute und morgen**

Erneuerbare alternative Treibstoffe in der Luftfahrt könnten also kurz- und mittelfristig einen deutlichen Beitrag zur Reduzierung der Emissionen und damit zu einer Verminderung der durch die Luftfahrt verursachten Klimawirkung leisten. Hierbei ist zwischen der Art der Emissionen zu unterscheiden: Für die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist das Herstellungsverfahren entscheidend. Nur wenn Kohlendioxid entweder direkt durch das Power-to-Liquid-Verfahren oder indirekt durch die Verarbeitung von Biomasse wieder im Treibstoff gebunden wird und dabei gleichzeitig die notwendige Energie für die Herstellung aus erneuerbaren Energiequellen (Wind-, Wasser- und/oder Sonnenenergie) bereitsteht, ist es möglich, durch den daraus resultierenden Kohlenstoffkreislauf einen quasi CO<sub>2</sub>-neutralen Treibstoff herzustellen. Da alternative Energiequellen bereits integrativer Bestandteil der Entwicklung des PtL-Verfahrens sind, sind die daraus gewonnenen Treibstoffe gegenwärtig die vielversprechendste

Lösung, um die mit der Luftfahrt verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Zukunft nachhaltig zu senken. Am Markt gegenwärtig verfügbar sind bislang nur geringe Mengen an BtL-Treibstoffen, die eine bessere CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweisen als rohölbasiertes Jet A-1. Die Herstellung der synthetischen erneuerbaren alternativen Treibstoffe hat zudem einen einzigartigen Vorteil: Die Zusammensetzung des Treibstoffs kann gezielt so verändert werden („Designertreibstoff“), dass während der Verbrennung möglichst wenige Rußvorläufermoleküle gebildet werden. So gelingt es, die Emissionen von Rußpartikeln zu minimieren. Dieses Ziel wird mit den bereits verfügbaren BtL-Treibstoffen nachweislich erreicht.

Alternative Treibstoffe lassen sich zudem nahtlos in die Infrastruktur eines jeden Flughafens integrieren. Es macht keinen Unterschied, ob Jet A-1 mit nur einem einzigen alternativen Treibstoff oder mit mehreren unterschiedlichen Treibstoffen gemischt wird, solange jeder einzelne synthetische Treibstoff zertifiziert ist. Die Verträglichkeit der Treibstoffe unterschiedlicher Herkunft und die Integration in den Flughafenbetrieb wurde 2019 im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und aireg (aviation initiative for renewable energy in germany) initiierten Projekts DEMO-SPK gezeigt, in dem Mischungen aus mehreren verschiedenen synthetischen Treibstoffen mit Jet A-1 innerhalb eines Forschungs- und Demonstrationsvorhabens am Flughafen Leipzig/Halle eingesetzt und vermessen wurden.

Erneuerbare alternative Treibstoffe können zu einem CO<sub>2</sub>-neutralen Luftverkehr führen. Zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Atmosphäre führen sie nur dann, wenn in ihrer Produktion Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung oder Wandlung zu elektrischer Energie aus Biomasse ergriffen werden. Allerdings sind Stickoxid-Emissionen bei der Verbrennung dieser Zukunfts-Treibstoffe derzeit nicht zu vermeiden. Auch sind alternative Treibstoffe auf absehbare Zeit nicht in gleichem Maße verfügbar sein wie Jet A-1. Deshalb sind Maßnahmen notwendig, um den Treibstoffverbrauch insgesamt zu reduzieren. Dazu gehören zum einen die immer effizienter werdenden Triebwerke mit verbesserter Technologie zur Treibstoffeinbringung und Mischung in der Brennkammer. Gleichzeitig ist eine verbesserte Aerodynamik notwendig, um den Luftwiderstand zu verringern, und die Verwendung leichterer Werkstoffe, um das Gesamtgewicht zu reduzieren. Als Beispiel für die Umsetzung dieser Maßnahmen sei die A320neo von Airbus genannt, die im Vergleich zu ihrer Vorgängerin, der A320, einen um 15 Prozent geringeren Verbrauch aufweisen kann. Optimierte Betriebsabläufe am Flughafen sowie im Flugverkehr selbst bieten weitere Möglichkeiten, Treibstoff einzusparen. Auch die Nutzung von neuartigen Verbrennungskonzepten, wie dem sogenannten Jet-stabilisiertem Verbrennungsverfahren (auch bekannt als FLOX® – flameless oxidation), das zu geringeren Temperaturspitzen und damit zu geringeren Stickoxid-Werten führt, bieten weitere vielversprechende Möglichkeiten für die Reduktion von Schadstoffen.

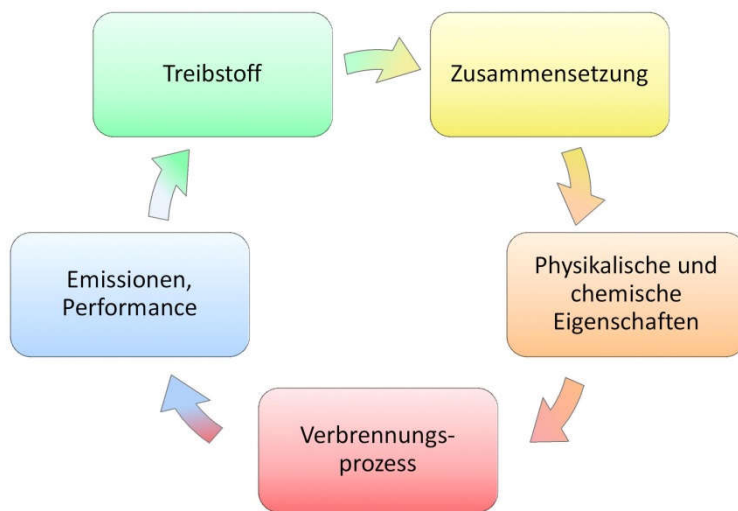
Entscheidend für die nachhaltige Markteinführung erneuerbarer alternativer Flugtreibstoffe wird die Lösung des Henne-Ei-Problems sein. Verlässliche und einheitliche internationale Rahmenbedingungen, gefördert durch nationale Regierungen, sind eine entscheidende Voraussetzung für die Schaffung der notwendigen Produktionsanlagen und Produktionskapazitäten für alternative Kraftstoffe. Nur so lassen sich die Klimaauswirkungen des Luftverkehrs zukünftig nennenswert reduzieren.

Bild 1



Schadstoffe werden durch Flugzeuge in Reiseflughöhe direkt in die unteren Atmosphärenschichten emittiert und tragen so zur Erderwärmung bei. Im Rahmen des Projekts ECLIF wurde untersucht, wie im Einzelnen sich die Zusammensetzung der Treibstoffe auf die Emissionen auswirkt.

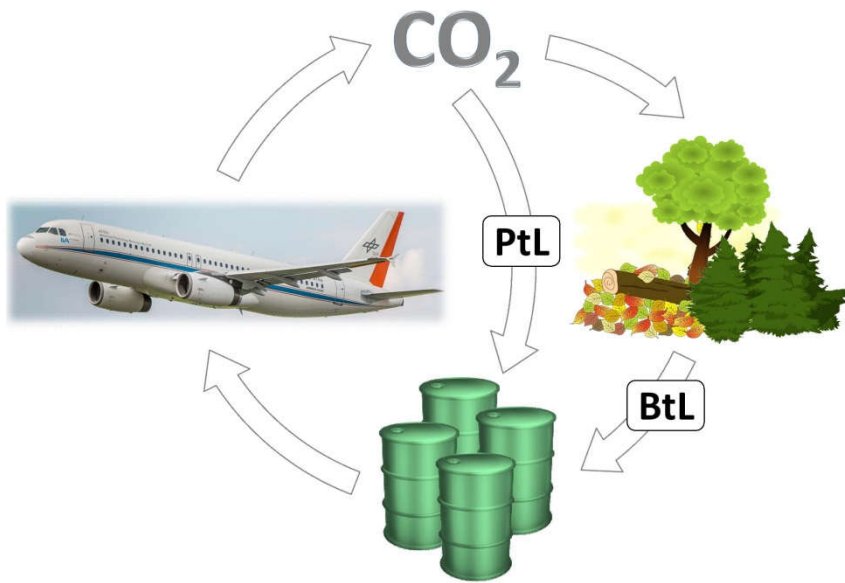
Bild 2



Zusammenhang zwischen Treibstoff und Emissionen: Die Treibstoff-Zusammensetzung bestimmt die Eigenschaften eines Treibstoffs. Jeder Treibstoff hat ein charakteristisches Verbrennungsverhalten, einschließlich der Emissionen. Das Wissen über das Emissionsverhalten eines Treibstoffs kann bei bekannter Zusammensetzung genutzt werden, um neue Treibstoffe gezielt zu designen.

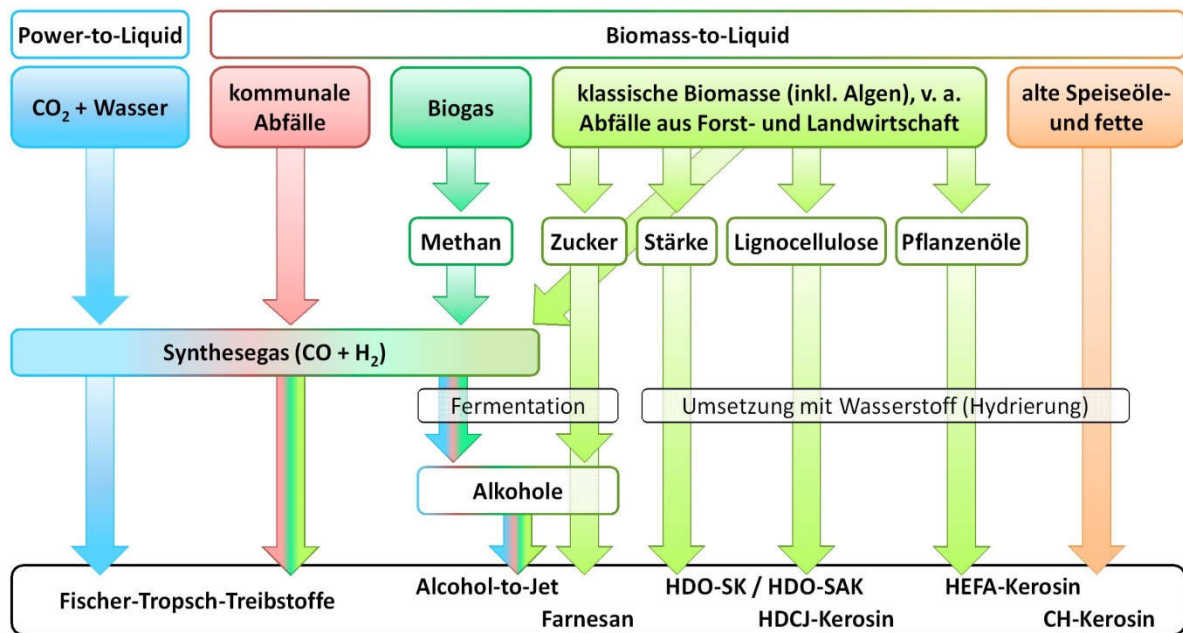


Bild 3



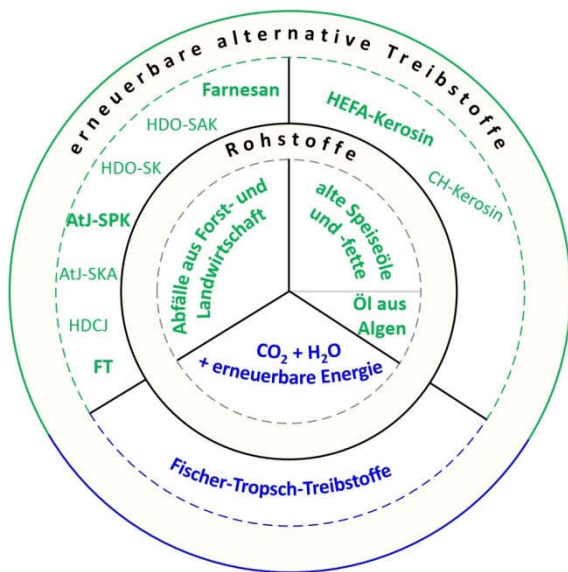
Durch die Etablierung eines Kohlenstoffkreislaufs und durch den Einsatz alternativer Treibstoffe können die Netto- $\text{CO}_2$ -Emissionen von Flugzeugen drastisch gesenkt werden.

Bild 4



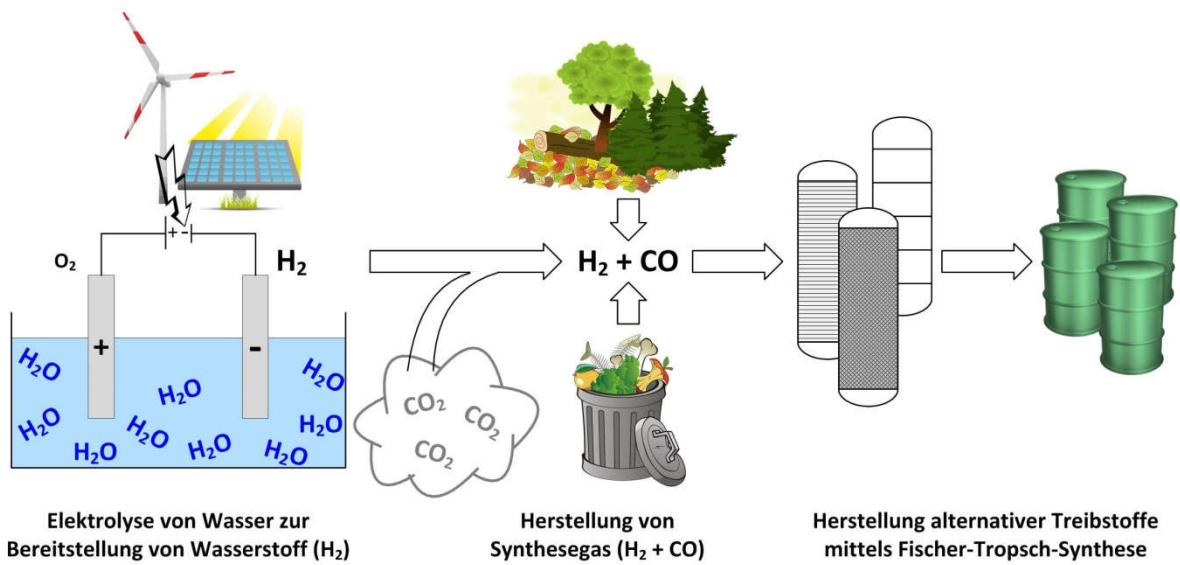
Übersicht zu den möglichen Ausgangsstoffen für die Herstellung von erneuerbaren alternativen Treibstoffen (SAF) mit wichtigen Zwischenprodukten (Abkürzungen: CH – Catalytic Hydrothermolysis, HDCJ – Hydrotreated Depolymerized Cellulosic Jet, HDO-S(A)K – Hydrodeoxygenation Synthetic (Aromatic) Kerosene, HEFA – Hydrotreated Esters and Fatty Acids)

Bild 5



Zusammenfassung der bekannten alternativen Treibstoffe und deren Ausgangsstoffe, die fett geschriebenen Treibstoffe sind für die Beimischung zum rohölbasierten Jet A-1 zugelassen (Abkürzungen: AtJ – Alcohol-to-Jet, CH – Catalytic Hydrothermolysis, FT – Fischer-Tropsch(-Treibstoff), HDCJ – Hydrotreated Depolymerized Cellulosic Jet, HDO-S(A)K – Hydrodeoxygenation Synthetic (Aromatic) Kerosene, HEFA – Hydrotreated Esters and Fatty Acids, SKA – Synthetic Kerosene with Aromatics, SPK – Synthetic Paraffinic Kerosene)

Bild 6



Die Herstellung alternativer Treibstoffe durch Fischer-Tropsch-Synthese nach dem Power-to-Liquid-Verfahren aus Wasser und  $CO_2$  durch Nutzung von erneuerbarem Strom, ergänzt durch die Umsetzung von Biomasse.