

Alternative Treibstoffe für die Luftfahrt Mit Designertreibstoffen zu weniger Emissionen

Satellitenbilder der vergangenen Wochen zeigen, wie stark die Luftverschmutzung während der Corona-Krise zurückgegangen ist. Die starke Drosselung von Wirtschaft und Verkehr sorgt dafür, dass deutlich weniger schädliche Gase in die Atmosphäre gelangen. Das hat auch mit dem Rückgang der Luftfahrt zu tun. Denn hier gelangen klimaschädliche Schadstoffe wie Kohlendioxid (CO₂), (Ruß-)Partikel und Stickoxide (NO_x) durch die Verbrennung rohbölbasierter Treibstoffe (Kerosin) direkt in die unteren Atmosphärenschichten der Erde: in die Troposphäre, in der das Wettergeschehen stattfindet, und in die Stratosphäre. Im Schnitt liegt der Anteil der Luftfahrt an der Erderwärmung bei etwa drei bis fünf Prozent. Es ist anzunehmen, dass sich das jährliche Wachstum der Branche von durchschnittlich fünf Prozent auch nach der Krise fortsetzt, wodurch die Emissionen weiter steigen. Deswegen wird auch jetzt weiter nach Möglichkeiten gesucht, diese Zunahme zu verlangsamen und sogar zurückzufahren. Hierfür kommen kurz- und mittelfristig nur alternative erneuerbare Treibstoffe in Frage.

Doch worin besteht die Klimawirkung der Luftfahrt überhaupt? Um das zu beantworten müssen mehrere Emissionen betrachtet werden: Durch den Ausstoß von CO₂ wird die natürliche Gaszusammensetzung der Erdatmosphäre verändert. Dies führt zu einem veränderten Strahlungshaushalt der Erdatmosphäre, die sich dadurch kontinuierlich aufwärmt. Darüber hinaus beeinflussen Rußpartikel den Strahlungshaushalt in der Erdatmosphäre. An ihnen kann Wasserdampf kondensieren, der zur Bildung von Kondensstreifen führt, aus denen sich in Reiseflughöhen langlebige Zirruswolken bilden können. Diese wiederum verhindern, dass Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht. Außerdem entstehen während der Verbrennung eines Treibstoffs aufgrund von Reaktionen mit dem in der Luft vorhandenen Stickstoff Stickoxide. Diese führen in der Troposphäre zur Bildung von Ozon – ebenfalls ein starkes Treibhausgas. Eine Erhöhung der Ozonkonzentrationen in der Troposphäre muss auch wegen der möglichen toxischen Wirkung auf Menschen und Pflanzen vermieden werden. Das in der Stratosphäre befindliche Ozon ist hingegen dringend notwendig, da es die UV-Strahlung der Sonne abschwächt. Ein weiteres Abfallprodukt bei der Verbrennung von Treibstoffen 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 diese Emissionen in erster Linie durch die Verbrennung des Treibstoffs entstehen, gilt es Alternativen zu finden. Es wird bereits viel am Einsatz von Batterien in Flugzeugen geforscht, analog zur Elektromobilität im Straßenverkehr. Mit der Größe und dem Gewicht der gegenwärtig vorhandenen Batterietechnologie kann jedoch noch kein herkömmliches Passagierflugzeug betrieben werden, erst recht nicht auf Langstrecken. Ähnliches gilt auch für hybrid-elektrische Konzepte. Die Realisierung dieser Konzepte ist mittelfristig nur für Kleinflugzeuge möglich. Auch wird bereits darüber diskutiert, ob es nicht möglich wäre, den Betrieb am Boden, 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.

Eine weitere Möglichkeit ist der Austausch des bisherigen Treibstoffs. Hier ist Wasserstoff (H₂) eine oft genannte Alternative, da sein direktes Verbrennungsprodukt Wasser ist – sowohl CO₂ als auch Partikelemissionen gäbe es nicht. Allerdings hat Wasserstoff eine wesentlich geringere volumetrische Energiedichte als herkömmliche Flugtreibstoffe. Dazu braucht es neuartige Tank- und Speicherkonzepte, die Neukonstruktionen von Flugzeugen und eine zusätzliche Versorgungsinfrastruktur an Flughäfen erfordern würden. Zudem blieben bei der Verbrennung von Wasserstoff die Probleme der Stickoxidbildung und der deutlich erhöhte Eintrag von Wasserdampf in die Erdatmosphäre bestehen.

Ersatz rohölbasierter Treibstoffe

Die derzeit beste Lösung zur Minderung der Schadstoffemissionen im Luftverkehr liegt in der Verwendung erneuerbarer alternativer synthetischer Treibstoffe (SAFs – sustainable alternative fuels). Diese können unter Verbrauch von CO₂ 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 ausgewählte Eigenschaften haben, wie beispielsweise einen höheren Energieinhalt oder eine deutlich reduzierte Neigung zu Partikelemissionen. Dies gelingt über die Veränderung der chemischen Zusammensetzung dieser sogenannten „Designer-Treibstoffe“. Im Rahmen des ECLIF-Projekts (Emission and Climate Impact of Alternative Fuels) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der amerikanischen Luft- und Raumfahrtagentur NASA wurde bereits in mehreren Flugmesskampagnen gezeigt, dass mit derartig designten Treibstoffen die Bildung von Schadstoffen am Boden und in der Luft reduziert wird.

Um die Kompatibilität zum Jet A-1 und zu den gegenwärtig verwendeten Triebwerken zu gewährleisten, muss jeder neue Treibstoff zertifiziert werden. Aktuell gibt es sechs verschiedene alternative synthetische Treibstoffe, die mit einem Volumenanteil von bis zu 50 Prozent (abhängig von der Herstellungsart) für die Beimischung zu Jet A-1 zugelassen sind. Für die Reduktion der CO₂-Emissionen sind dabei die verwendeten Rohstoffe und das Produktionsverfahren entscheidend.

Alternative erneuerbare Treibstoffe werden unter Nutzung und somit dem Verbrauch von CO₂ hergestellt – entweder indem CO₂ selbst als Ausgangsstoff dient oder durch die Verwertung von Biomasse als Kohlenstoffquelle, da Pflanzen für ihr Wachstum CO₂ aufnehmen, um den Kohlenstoff in ihre Struktur einzubauen oder Speicherstoffe wie Zuckermoleküle anzulegen. Wird aus diesem pflanzlichen Material Treibstoff gewonnen und unter Freisetzung des zuvor der Atmosphäre entnommenen CO₂ verbrannt, entsteht ein Kohlenstoffkreislauf, der nicht zur Erhöhung der globalen Netto-CO₂-Emissionen beiträgt. Um aber das Ziel der CO₂-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 CO₂ einzusparen, müssen erneuerbare Energiequellen bei den Verfahren zur Treibstoffgewinnung eingesetzt werden.

Herstellung von Treibstoff aus CO₂

Je nach Ressource und Herstellungsverfahren lassen sich zwei Arten erneuerbarer alternativer Treibstoffe unterscheiden: Power-to-Liquid (PtL) und Biomass-to-Liquid (BtL). Während sich hinter PtL-Treibstoffen neben erneuerbarem Strom nur Wasser und CO₂ als Rohstoffe verbergen, basieren die BtL-Treibstoffe auf einer Vielzahl von Rohstoffen. Für die BtL-Technologien werden in erster Linie Abfälle aus der Forst- und Landwirtschaft sowie alte Speiseöle und -fette verwendet. Auch kommunale Abfälle können als Rohstoff dienen. Hinzu kommen die Möglichkeiten der Verwertung von Biogas (vor allem Bio-Methan) aus landwirtschaftlichen Reststoffen und der Gewinnung von Öl aus Algen.

Die Herstellung alternativer Treibstoffe aus Wasser und CO₂ im PtL-Prozess basiert im Wesentlichen auf der Nutzung von erneuerbarer Energie zur Herstellung von Synthesegas – einer Mischung aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO). Zum einen wird Wasser durch Elektrolyse in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) aufgespalten. Zum anderen wird zur Herstellung von CO das Treibhausgas CO₂ genutzt. Hier gibt es mehrere Möglichkeiten: Bei einer Niedertemperatur-Elektrolyse wird CO₂ an der Kathode zu CO reduziert, während an der Anode Wasser (H₂O) zu Sauerstoff (O₂) oxidiert. Dabei entsteht an der Kathode neben CO auch H₂ und damit die Synthesegasmischung. Bei dem Verfahren der sogenannten Hochtemperatur-Co-Elektrolyse wird ein Teil des Wasserstoffs noch während der Wasserelektrolyse dazu verwendet, CO₂ in CO zu konvertieren. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, diese Verfahren voneinander zu trennen und in einem separaten Prozessschritt, das CO₂ mittels eines Teils des Wasserstoffs aus der Wasserelektrolyse zu CO umzusetzen.

Dieses bildet zusammen mit dem übrigen Wasserstoff dann ein Synthesegas. Ein vielversprechender Ansatz ist die Nutzung von CO₂ aus der Luft oder aus Punktquellen, wie zum Beispiel Lüftungsanlagen großer Gebäudekomplexe und Fabriken. Dieses sogenannte Direct-Air-Capture(DAC)-Verfahren wurde bereits erfolgreich demonstriert; an seiner Weiterentwicklung wird intensiv gearbeitet.

Bei der anschließenden sogenannten Fischer-Tropsch-Synthese wird das Synthesegas über mehrere Stufen zu Kohlenwasserstoffen und damit zu einem synthetischen Treibstoff umgesetzt. Das Verhältnis von H₂ 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 haben die Zertifizierung für die Beimischung zum Jet A-1 in Höhe von maximal 50 Prozent.

Synthesegas selbst kann auch mittels Solarenergie CO₂-frei erzeugt werden, wie es 2014 im Rahmen des Forschungsprojekts SOLAR-JET mit dem Sonnenofen des DLR erfolgreich gezeigt wurde. Hierfür werden die benötigten Prozesstemperaturen von über 1.500 Grad Celsius direkt durch Nutzung konzentrierter Solarstrahlung erzeugt. Durch diesen Solarreaktor werden dann gemeinsam Wasserdampf und Kohlendioxid geleitet. Treibstoff, der aus dem so erzeugten Synthesegas hergestellt wird, wird daher auch als „Solar Fuel“ bezeichnet.

Neue Treibstoffe aus Biomasse

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 (bevorzugt „grünem“) Wasserstoff zu alternativen Treibstoffen umgesetzt (Hydrierung). Das Produkt wird HEFA-Kerosin (Hydrotreated Esters and Fatty Acids) genannt, das entsprechend seiner Zertifizierung Jet A-1 zu maximal 50 Prozent zugemischt werden darf. Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens führt zum sogenannten CH-Kerosin (CH = Catalytic Hydrothermolysis), das Anfang des Jahres ebenfalls die Zertifizierung für eine maximal mögliche 50-prozentige Beimischung erhalten hat.

Bei Rest- und Abfallstoffen aus der Forst- und Landwirtschaft handelt es sich zumeist um holzartiges (sogenanntes lignocellulosehaltiges) Material. Der einfachste aber auch energieintensivste Weg ist auch hier die Umsetzung zu Synthesegas und die anschließende Herstellung von FT-Treibstoffen. Bestimmte Bestandteile der Lignocellulose können auch in Zuckermoleküle aufgespalten und mittels beispielsweise Hefen in Alkohole umgesetzt werden. Der so über mehrere Prozessschritte erzeugte Treibstoff wird als Alcohol-to-Jet (AtJ) bezeichnet. Je nachdem wie dieser chemisch zusammengesetzt ist, wird wie bei den FT-Treibstoffen zwischen AtJ-SPK und AtJ-SKA unterschieden. AtJ-SPK hat bereits die Zulassung für eine bis zu 50-prozentige Beimischung zu Jet A-1. Der AtJ-SKA-Treibstoff befindet sich noch in der Testphase.

Als dritte Möglichkeit bietet sich für lignocellulosehaltiges Material 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 befinden sich diese noch in der Testphase für die Zertifizierung.

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 Produkt der Fermentation nur leicht mit Wasserstoff hydriert werden. Farnesan darf als Reinstoff dem Jet A-1 nur in Volumenanteilen von maximal zehn Prozent zugemischt werden.

Heutiger Einsatz erneuerbarer alternativer Treibstoffe

Obwohl weltweit zahlreiche Testflüge und Messungen bewiesen haben, dass synthetische alternative Treibstoffe genauso effizient und sicher wie Jet A-1 sind, ist deren Einsatz in der kommerziellen Luftfahrt mit etwa 0,003 Prozent bislang 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 das einzige, das im kontinuierlichen Betrieb einen alternativen Jet-Treibstoff herstellt. Hierbei handelt es sich um ein HEFA-Kerosin. 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 durch die aufwändige Herstellung entstehen. Auch wäre die Verfügbarkeit der Rohstoffe gegenwärtig nicht ausreichend, um die Produktion komplett auf erneuerbare Treibstoffe umzustellen. Nur neue internationale Rahmenbedingungen können deshalb eine durchdringende Markteinführung ermöglichen. Dann könnten Anlagen mit größeren Kapazitäten gebaut und die Betreiber mehr in die Optimierung der Produktionsverfahren investieren. Mit entsprechender Bepreisung von CO₂-Emissionen ließe sich der Anteil an umweltfreundlichem Kerosin im Flugverkehr deutlich erhöhen.

Integration in den Luftverkehr

Die alternativen Treibstoffe lassen sich nahtlos in die Infrastruktur eines jeden Flughafens integrieren. Ihre Verträglichkeit miteinander und die Integration in den Flughafenbetrieb wurden 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 erstmalig gezeigt. Dabei wurden Mischungen aus mehreren verschiedenen synthetischen Treibstoffen mit Jet A-1 am Flughafen Leipzig/Halle eingesetzt und vermessen.

Erneuerbare alternative Treibstoffe können so ohne große Umstände zu einem CO₂-neutralen Luftverkehr führen. Zu einer CO₂-Reduktion in der Atmosphäre führen sie aber nur dann, wenn in ihrer Produktion Maßnahmen zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung ergriffen werden. Stickoxid-Emissionen sind bei der in Luft erfolgenden Verbrennung dieser Zukunftstreibstoffe jedoch nicht zu vermeiden. Auch sind alternative Treibstoffe auf absehbare Zeit nicht in gleichem Maße verfügbar wie rohbölbasiertes Jet A-1. Deshalb ist es weiterhin dringend notwendig, den Treibstoffverbrauch insgesamt zu reduzieren. Dazu gehören zum einen die immer effizienter werdenden Triebwerke, eine verbesserte Aerodynamik, um den Luftwiderstand zu verringern sowie die Verwendung leichterer Werkstoffe, um das Gesamtgewicht zu reduzieren. Optimierte Betriebsabläufe am Flughafen und im Flugverkehr bieten weitere Möglichkeiten, Treibstoff einzusparen. Auch die Nutzung von neuartigen Verbrennungskonzepten wie dem sogenannten Jet-stabilisierten Verbrennungsverfahren (auch bekannt als FLOX® – flameless oxidation) für flüssige Treibstoffe, das zu geringeren Temperaturspitzen und damit zu geringeren Stickoxid-Werten führt, ermöglicht die Reduktion von Schadstoffen.

Entscheidend für die Umsetzung aller Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sind verlässliche und einheitliche internationale Rahmenbedingungen, gefördert durch die nationalen Regierungen. Diese sind eine entscheidende Voraussetzung für die Schaffung der notwendigen Produktionsanlagen und -kapazitäten für alternative Treibstoffe, mit denen sich die Klimaauswirkungen des Luftverkehrs zukünftig nennenswert reduzieren lassen.

*Sandra Richter
Marina Braun-Unkhoff
Clemens Naumann
Uwe Riedel
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)*