



Wasserstoff für die Luftfahrt in Deutschland

1. EINLEITUNG

Der Weg hin zu einer klimaneutralen Luftfahrt bedarf neben evolutionären Verbesserungen auch radikaler Schritte bei Technologien in vielen Bereichen sowie entsprechender Infrastrukturen. Neben revolutionären Flugzeug- und Antriebskonzepten spielen auch nachhaltige Energieträger (synthetische Kraftstoffe, Wasserstoff etc.), geänderte Flugrouten und auch Verkehrsverlagerungen eine wichtige Rolle.

Gerade mit Blick auf das globale Wachstum des Flugverkehrs bildet die deutliche Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks des Luftverkehrs eine zentrale Aufgabe für Forschung, Industrie und Gesellschaft. Die Luftfahrt ist heute für etwa 2,5 % des weltweiten anthropogenen CO₂-Ausstoßes verantwortlich. Zählt man die Effekte von Nicht-CO₂-Emissionen wie Wasserdampf und Stickoxid hinzu, erhöht sich der Einfluss des Luftverkehrs auf die globale Erderwärmung auf rund 3,5 %¹. Deutschland hat 2019 nach der Emissionsberichterstattung an die Klimarahmenkonvention etwa 2 Mio. to CO₂ durch die nationale und etwa 30 Mio. to CO₂ durch die internationale Luftfahrt emittiert.

Eine Studie von Eurocontrol von Oktober 2020² gibt wichtige Hinweise für die Verteilung der Flüge sowie der entsprechenden CO₂-Emissionen: Flüge mit Strecken von über 1.500 km machen nur knapp 25 % aller Flüge im Eurocontrol Raum aus, sie verursachen aber über drei Viertel aller CO₂ Emissionen; die Zahl der Flüge unter 500 bis 600 km liegt dagegen bei über 30 %, sie repräsentieren aber nur 4,3 % der CO₂ Emissionen. Die Flüge für die dazwischenliegenden Entfernungen verursachen damit etwa 20 % der gesamten Flugverkehrsemissionen. Diese Strukturen machen deutlich, dass eine differenzierte Betrachtung der verschiedenen Flugsegmente auch mit Blick auf Technologien und Kraftstoffkonzepte sehr wichtig ist.

Die Vision für die Zukunft der Luftfahrt ist das emissionsfreie Flugzeug (Zero Emission Aircraft) – ein Luftfahrzeug, das sowohl im Flug- als auch im Bodenbetrieb keine Schadstoffe emittiert. Dieses ambitionierte Ziel erfordert substanzielle Forschungen und langfristige Entwicklungen in den Bereichen nachhaltige Energieträger, disruptive Flugzeugkonzepte und Komponenten sowie alternative Antriebskonzepte.

Die evolutionäre Weiterentwicklung von Triebwerken in Verbindung mit nachhaltigen Bio- und synthetischen Kraftstoffen* (Sustainable Aviation Fuels = SAF) ermöglicht bereits kurzfristig einen signifikant emissionsreduzierten Luftverkehr. So könnten bestehende Flugzeuge kurzfristig verstärkt biogene

* Die Produktionsverfahren von synthetischen Kraftstoffen werden hier nicht weiter erläutert, da diese Gegenstand weiterer Arbeiten innerhalb des Nationalen Wasserstoffrates sind.

Flugkraftstoffe auf Abfall- und Reststoffbasis und langfristig strombasiertes, synthetisches Kerosin einsetzen. Drop-in-Kraftstoffe benötigen keine Änderungen am Triebwerk und können bereits heute die CO₂-Emissionen um mehr als 50 % reduzieren. Durch weiterentwickelte Kraftstoffe können zudem 50 bis 70 % der Ruß- und Partikelemissionen vermieden werden. Die Wirkungen von Drop-in-Kraftstoffen lassen sich durch höhere Beimischungsraten als 50 % maximieren. Hindernisse für eine Einführung in großen Mengen sind derzeit die Produktionskapazität und die Herstellungskosten. Near-Drop-in-Kraftstoffe³ können durch Co-Optimierung von Kraftstoff und Brenner die CO₂-Emissionen um bis zu 80 % (Net-Emissions), die Ruß- und Partikelemissionen um bis zu 90 % und die NOx-Emissionen um beinahe 100 % reduzieren.

Weitere signifikante Verbesserungen sind durch die Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff möglich, denn dadurch können die Emissionen von CO₂, Ruß und Aerosolvorläufern auf null reduziert werden. Die Effekte des emittierten Wasserdampfes auf seine Klimarelevanz, auch in Abhängigkeit unterschiedlicher Flughöhen sind noch nicht ausreichend genug erforscht.

Neben diesen Vorteilen mit Blick auf die Emissionen kann Wasserstoff wegen seiner möglichen Kostenvorteile im Vergleich zu synthetischen Kraftstoffen (eine Umwandlungsstufe weniger und wegfallender Bedarf an klimaneutralem CO₂) neben SAF eine wichtige Rolle spielen. Die spezifischen Herausforderungen für den Wasserstoffeinsatz im Flugverkehr u.a. durch die geringere Energiedichte werden aber dazu führen, dass insbesondere auf der längeren Mittelstrecke und der Langstrecke SAF verstärkt zum Einsatz kommen muss. Kurzfristig kann auch in diesem Streckenbereich sowie auf der Mittelstrecke bis 1.500 km mit SAF eine deutliche Reduktion der Emissionsbelastung erreicht werden, mittel- und langfristig müssen die Klima- und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile von Wasserstoff und SAFs sorgfältig abgewogen werden.

2. PERSPEKTIVEN UND HERAUSFORDERUNGEN MIT DEM ENERGIETRÄGER WASSERSTOFF

Wasserstoff-Antriebe können die Auswirkungen auf das Klima erheblich verringern. Wasserstoff eliminiert CO₂-Emissionen im Flug und kann kohlenstofffrei hergestellt werden. Berücksichtigt man auch Nicht-CO₂-Emissionen und die Unsicherheiten bei diesen Effekten, so zeigen neueste Schätzungen, dass die Wasserstoff-Direktverbrennung die Klimaauswirkungen im Flug um 50 bis 75 %⁴ reduzieren könnte und ein mit den Turbinen gekoppelter Brennstoffzellenantrieb weitere Effizienzgewinne bringt. Für den breiten Einsatz von Flugzeugen mit Wasserstoff-Antrieb müssen mehrere technologische u. wirtschaftliche Probleme gelöst werden:

- ◆ Steigerung der Gesamteffizienz mit leichteren Tanks und leistungsfähigen Brennstoffzellensystemen,
- ◆ Speicherung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff (LH₂) im Flugzeug,
- ◆ Entwicklung von Triebwerken, die Wasserstoff mit geringen NOx-Emissionen verbrennen können, und effizienter Betankungstechnologien, die mit denen für Kerosin vergleichbar sind,
- ◆ Entwicklung und Aufbau der Flüssig-Wasserstoff-Infrastruktur an den Flughäfen,
- ◆ Entwicklung effizienter Boden-, Wartungs- und Reparaturprozesse parallel zur Entwicklung der Flugzeuge und der neuen Komponenten,
- ◆ systemische Einbindung der Wasserstoffversorgung in die Energieinfrastruktur der jeweiligen Weltregionen (Europa),
- ◆ Zulassung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen und von Wasserstoff als Flugtreibstoff für die Luftfahrt.

3. EINSATZBEREICHE VON FLUGZEUGEN MIT H₂-ANTRIEB

Setzt man die erfolgreiche Bewältigung dieser Herausforderungen voraus, so eignet sich aus heutiger Sicht der H₂-Antrieb am besten für Regional-, Kurzstrecken- und ggf. Mittelstreckenflugzeuge. Für welche Streckensegmente welche Art des H₂-Antriebs am besten geeignet ist, lässt sich heute nicht abschließend sagen. Das liegt aber nicht nur am Antrieb, sondern hängt auch mit der Versorgung mit LH₂ im Flugzeug zusammen (Tank und Tankintegration, Kraftstoffversorgung etc.) und hat somit auch Auswirkungen auf Flugzeug-Design und -Auslegung.

Auch wenn H₂ als Energieträger für den Luftverkehr technisch machbar ist, scheint er aus wirtschaftlicher Sicht weniger geeignet für evolutionäre Langstrecken-Flugzeuge. Insbesondere die Größe der Wasserstofftanks, der damit verbundenen größeren Flugzeugarchitektur und daraus resultierendem höheren Energiebedarf würden zu deutlich höheren Kosten pro Passagier führen. Allerdings könnten neue Flugzeugkonstruktionen (z. B. Blended-Wing-Body) völlig neue Optionen eröffnen, doch von der Inbetriebnahme eines solchen Flugzeugs ist man vermutlich noch zwei bis drei Jahrzehnte entfernt.

4. MACHBARKEIT UND VORTEILE

Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsanalysen zeigen, dass Wasserstoff ein wesentlicher Bestandteil der zukünftigen Technologie der Luftfahrt sein kann. Wenn Flugzeuge mit H₂-Antrieb in Segmenten eingesetzt werden, in denen sie das kostengünstigste Mittel zur Dekarbonisierung sind, könnten sie bis 2050 ein optimistisches Marktpotential von 35 bis 40 % erreichen.⁴ Wenn SAF die anderen 65 bis 60 % der Flugzeuge antreiben, würden die Klimaauswirkungen der Luftfahrt enorm sinken und somit die von der EU und von ATAG festgelegten CO₂-Reduktionsziele in greifbare Nähe rücken. Konkrete Abschätzungen zu den Klimaauswirkungen sind in Bezug auf die Wasserdampfemissionen aus Sicht der Wissenschaft frühestens in vier bis fünf Jahren möglich.

5. PRODUKTION, INFRASTRUKTUR UND VERSORGUNG

Die Versorgungs- und Betankungs-Infrastruktur erfordert jedoch erheblichen Aufwand und Koordination – neben dem Aufbau der Flüssig-Wasserstoffkapazitäten auch die lokale Versorgung in den Flughäfen. In dem oben genannten Marktpotential würde die weltweite Nachfrage der Luftfahrt nach LH₂ bis 2040 ca. 10 Millionen to (> 330 TWh) pro Jahr⁴ betragen, in Europa einige 100.000 to (> 3 TWh).

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von LH₂ in der Luftfahrt gegenüber herkömmlichem Kerosin müssen die Sicherheitsvorschriften für Handhabung und Verwendung neu bewertet und überarbeitet werden. Zudem müssen H₂-Produzenten, Logistikunternehmen, Flughäfen, Flugzeughersteller und Fluggesellschaften eng zusammenarbeiten, um sicherzustellen, dass Produktion, Logistik, und die Entwicklung von Infrastruktur und Versorgung sowie der Roll-out von Flugzeugen gleichzeitig erfolgen.

Bei einer erfolgreichen Markteinführung von H₂-Flugzeugen ab ca. 2035 würden voraussichtlich bis 2050 auch H₂-Flugzeuge mit einer Mittelstrecken-Reichweite eingeführt, was zu einer noch höheren Nachfrage der Luftfahrt nach LH₂ führen würde, die nennenswert jenseits der oben genannten 10 Millionen to pro Jahr läge. Damit einher ginge ein erheblicher Mehraufwand für die Wasserstoffversorgung in der

Luftfahrt, aber auch für die Flughafenbetankungsinfrastruktur. Auch wenn diese Änderungen für alle Stakeholder, insbesondere für die Flughäfen erheblich sind, sind bei der Implementierung mögliche technische Einschränkungen zu berücksichtigen.

6. EMPFEHLUNGEN DES NATIONALEN WASSERSTOFFRATES

Es sind mutige Schritte von Forschung, Industrie und Politik erforderlich, um einen Pfad zur Dekarbonisierung und Defossilierung durch Wasserstoff in der Luftfahrt einzuleiten. Die Branche muss heute den Weg der Kommerzialisierung einschlagen, denn die Entwicklung und Zertifizierung von Flugzeugen dauert mehr als zehn Jahre und eine substanzielle Flottenerneuerung mindestens weitere zehn Jahre. Um zu einer neuen Antriebstechnologie zu wechseln, braucht es eine ambitionierte Sektor-Roadmap für Forschung und Innovation (F&I), deren Aktivitäten von der Politik nachhaltig gefördert werden müssen (Wasserstoff-Strategie und Förderprogramme des Bundes), begleitet von langfristig stabilen politischen Rahmenbedingungen.

Der Nationale Wasserstoffrat empfiehlt deswegen:

- ◆ Entwicklung eines langfristigen, politisch europaweit-abgesicherten Planes zur Dekarbonisierung des Sektors, der die Potentiale von Wasserstoff und SAF reflektiert und gleichzeitig der Komplexität der Luftfahrt, ihrer internationalen Verflechtungen, den volkswirtschaftlichen Implikationen sowie den enorm hohen Sicherheitsanforderungen Rechnung trägt.
- ◆ Im Rahmen der Überarbeitung der RED II-Richtlinie (EC 2018/2001) müssen Maßnahmen, die zu einer verstärkten direkten Nutzung von Wasserstoff in der Luftfahrt führen, adäquat berücksichtigt werden. Es ist dabei auf die lange Vorlaufzeit dieser disruptiven Technologie zu achten.
- ◆ Gleichzeitig sollte die RED II-Richtlinie so weiterentwickelt werden, dass sie ein anspruchsvolles Ambitionsniveau für die Dekarbonisierung der verwendeten Energieträger in der nationalen wie europäischen Luftfahrt für den Zeitraum bis 2040 mit Zwischenzielen für 2030 und 2035 festlegt. Dabei sind die Mobilitätsverlagerung und die Notwendigkeit einer kosteneffizienten Emissionsreduktion zu berücksichtigen.
- ◆ Die Forschung insbesondere im Bereich der Triebwerks- und Brennkammerentwicklung sowie der Materialforschung im Umfeld des tiefkalten Wasserstoffs ist deutlich zu intensivieren. So sind z. B. Strukturmaterialien, die tiefkalten Wasserstoff widerstehen, und ihre Isolierungen ebenso von Bedeutung wie die Wechselwirkung von gasförmigem Wasserstoff mit metallischen und polymeren Materialien.
- ◆ Darüber hinaus ist die Forschung zur Klimawirkung des ausgestoßenen Wasserdampfes zu intensivieren. Der Kenntnisstand sowohl zur Modellierung als auch der Wirkung in der oberen Atmosphäre muss verbessert werden.
- ◆ Die Bodenprozesse und effiziente Wartungs- und Reparaturtechnologien sind ebenso wie die notwendige Infrastruktur zu entwickeln und aufzubauen, für Flughäfen ist ein Anschluss an das deutsche H₂-Netz vorzusehen.
- ◆ Neue Sicherheitsstandards und -prozesse für Flugzeuge mit LH₂-Onboard-Speicherung sind zu definieren sowie der Aufbau von Logistik, Infrastruktur und Versorgung zu koordinieren. Die F&I-Aktivitäten und -Finanzierungen sollten sich auf folgende Schlüsselbereiche konzentrieren:
 - Reifmachung der erforderlichen Flugzeugkomponenten einschließlich der LH₂-Kraftstoffspeicherung und -versorgung an Bord der Flugzeuge
 - LH₂-taugliche Flugzeugsysteme zuerst für die Kurz- und Mittelstrecke, später nach intensiver technischer Prüfung ggf. auch für die Langstrecke

- Auf- und Ausbau von Produktion, Infrastruktur und Versorgung mit Flüssig-Wasserstoff
- Schaffung eines rechtlichen Rahmens für das gesamte System (Flugzeug, Infrastruktur etc.), Analyse zur Optimierung von Hydrogen Hubs mit anschließendem Aufbau
- Unterstützung bei und Vorbereitung der Zulassung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen sowie der Zulassung von Wasserstoff als Treibstoff in der Luftfahrt in den dafür zuständigen internationalen Gremien.

Diese Maßnahmen sollten in die Förderung eines möglichst frühzeitig beschlossenen Demonstratorprogramms und in die Durchführung eines Pilotprojekts münden, beides finanziert aus den Mitteln des EK-Fonds. Ein geeignetes Programm für die Bereitstellung von SAF und den dafür zusätzlich benötigten Wasserstoff muss gemeinsam mit der petrochemischen Industrie entwickelt werden.

VERWENDETE QUELLEN

- ¹ D.S. Lee et al.: The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, Atmospheric Environment 244 (2021) 117834, Elsevier, 2020
- ² Eurocontrol – Aviation Intelligence Unit: Think Paper No. 7, October 2020
- ³ Als Near-Drop-in-Kraftstoffe werden hier Kraftstoffe bezeichnet, die bis zu 100 % ggf. mit geringfügigen Anpassungen im Treibstoffsystem des Flugzeugs und in den Triebwerken einsatzfähig sind (DLR, 2018)
- ⁴ McKinsey: Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 (May 2020)



DER NATIONALE WASSERSTOFFRAT

Mit der Verabschiedung der Nationalen Wasserstoffstrategie hat die Bundesregierung am 10. Juni 2020 den Nationalen Wasserstoffrat berufen. Der Rat besteht aus 26 hochrangigen Expertinnen und Experten der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft, die nicht Teil der öffentlichen Verwaltung sind. Die Mitglieder des Wasserstoffrats verfügen über Expertise in den Bereichen Erzeugung, Forschung und Innovation, Dekarbonisierung von Industrie, Verkehr und Gebäude/Wärme, Infrastruktur, internationale Partnerschaften sowie Klima und Nachhaltigkeit. Der Nationale Wasserstoffrat wird geleitet durch Katherina Reiche, Parlamentarische Staatssekretärin a. D.

Aufgabe des Nationalen Wasserstoffrats ist es, den Staatssekretärsausschuss für Wasserstoff durch Vorschläge und Handlungsempfehlungen bei der Umsetzung und Weiterentwicklung der Wasserstoffstrategie zu beraten und zu unterstützen.

◆ Kontakt: info@leitstelle-nws.de