



# Wasserstoff als neuer Energieträger in der Luftfahrt

---

SYSTÖK – Policy Brief

## Policy Brief

# Wasserstoff als neuer Energieträger in der Luftfahrt

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Luftverkehr

Markus Kühlen, Klaus Lütjens, Thorsten Ehlers, Axel Claßen, Janina Scheelhaase,  
Florian Wozny, Sven Maertens

Institut für Vernetzte Energiesysteme

Jonas Eschmann, Patrick Jochem

Institut für Fahrzeugkonzepte

Benjamin Frieske

Institut für Verkehrsforschung

Gunnar Knitschky

Erstellt im Rahmen des Impulsprojektes:  
Strategische Optionen für Energieträger im Verkehr (SYSTÖK)

Die Transformation der Antriebstechnologie leistet einen integralen Beitrag für eine zukunftssichere und klimaverträgliche Wirtschaft. Das DLR-Projekt SYSTÖK analysiert diese Transformation aus techno-ökonomischer Sicht. Das DLR gibt in acht Policy Briefs einen kompakten Überblick über die aktuelle und zukünftige Rolle von wasserstoffbasierten Antrieben und geeigneter Substitute im Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr. Die

Policy Briefs führen die Erkenntnisse aus zahlreichen DLR-Forschungsprojekten und weiteren wissenschaftlichen Quellen zusammen. Die Policy Briefs richten sich an die Politik, Verbände und Unternehmen. Auch der interessierten Öffentlichkeit geben sie in aller Kürze Orientierung zu aktuellen techno-ökonomischen Fragen der klimaverträglichen Mobilität von morgen.

## Inhaltsverzeichnis

Management Summary	3
Thesen 1 – 6	4
Handlungsempfehlungen	8
Literaturverzeichnis	10

## Management Summary

Grüner Wasserstoff, das heißt nachhaltig aus erneuerbarer Energie erzeugter Wasserstoff, ist ein möglicher zukünftiger Energieträger für eine klimaverträgliche Luftfahrt. Dieses Policy Brief beleuchtet in sechs Thesen die wesentlichen Vor- und Nachteile von grünem Wasserstoff insbesondere im Vergleich zu fossilem Kerosin, Biomasse-basiertem und nachhaltig, synthetisch erzeugtem Kerosin (Sustainable Aviation Fuel, SAF) sowie Batteriestrom.

Die Klimawirkung von grünem Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt ist deutlich geringer als die von fossilem Kerosin und auch geringer als beim Einsatz von SAF. In der Herstellung wird grüner Wasserstoff günstiger und weniger energieintensiv sein als SAF, weil zusätzliche Produktionsschritte entfallen. Das geringe Gewicht von Wasserstoff ist grundsätzlich vorteilhaft für den effizienten Einsatz in Flugzeugen. Die Integration von Systemen zur Speicherung und Nutzung von flüssigem Wasserstoff unter Einhaltung der hohen Sicherheitsstandards der Luftfahrt ist jedoch technisch anspruchsvoll und könnte diesen Gewichtsvorteil weitgehend kompensieren.

Mit den existierenden Flugzeugen und der bestehenden Energieinfrastruktur an den Flughäfen ist Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt nicht kompatibel – ähnlich wie Batteriestrom, aber im Unterschied zu SAF. Für die Entwicklung und den Betrieb von Wasserstoff-Flugzeugen sind folglich umfangreiche und teure technologische Entwicklungen und Anpassungen der Infrastruktur notwendig. Im Vergleich zu fossilem Kerosin werden die Herstellungskosten von grünem Wasserstoff auf absehbare Zeit höher sein. Durch die politischen Rahmenbedingungen, wie die Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, kann die Konkurrenzfähigkeit von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt allerdings beeinflusst werden.

Insgesamt kann grüner Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt klimaverträglicher und energieeffizienter sein als SAF. Kurz- und mittelfristig ist die große Verbreitung von Wasserstoff in

der Luftfahrt aufgrund der technologischen und infrastrukturellen Herausforderungen schwer vorstellbar. Langfristig ist die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von Wasserstoff-Flugzeugen eine zwingende Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt. Um die noch bestehenden Herausforderungen und Unsicherheiten hinsichtlich des Einsatzes von Wasserstoff in der Luftfahrt zu adressieren, spricht dieses Policy Brief folgende **Handlungsempfehlungen** aus:

- Die Erzeugung und der Import von grünem Wasserstoff sollten verstärkt werden. Denn grüner Wasserstoff wird bereits vor der möglichen Einführung von Wasserstoff-Flugzeugen für die nachhaltige Produktion von synthetisch erzeugtem SAF benötigt.
- Eine stärkere Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Maßnahmen und Anreize zur Vermeidung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten sollten mindestens europäisch, idealerweise global einheitlich die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von klimaverträglichen Energieträgern wie grünem Wasserstoff stärken.
- Die Forschung und Entwicklung von Technologien für Wasserstoff-Flugzeuge sollte weiter intensiv vorangetrieben werden.
- Für die frühzeitige Reduktion der Klimawirkung sollte als evolutionäre Maßnahme die Einführung von SAF verfolgt werden. Um die Klimawirkung weiter zu reduzieren, sollte ergänzend die Einführung von grünem Wasserstoff angestrebt werden.

## Thesen

### 1. Die Klimawirkung von Wasserstoff-Flugzeugen ist im Vergleich zu Flugzeugen mit fossilem Kerosin oder SAF besonders niedrig

Die Klimawirkung der Luftfahrt wird durch die Emission von CO<sub>2</sub> und die sogenannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte verursacht. Letztere umfassen mehrere klimawirksame Effekte, welche aus der Emission von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Wasserdampf und Rußpartikeln resultieren. Wasserdampf trägt hierbei insbesondere durch die Bildung von Kondensstreifen und daraus entstehenden Zirruswolken zur Klimawirkung bei.

Bei klimaneutral produziertem, grünem Wasserstoff können sowohl die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei seiner Herstellung als auch bei der Verwendung im Flugzeug vermieden werden.

Inwieweit die Klimawirkung durch NO<sub>x</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt verringert werden kann, hängt von der eingesetzten Antriebstechnologie ab. Während bei Verwendung von Brennstoffzellen gar kein NO<sub>x</sub> emittiert wird, können bei der Verbrennung von Wasserstoff in Gasturbinenriebwerken immer noch Stickoxide freigesetzt werden. Bei schadstoffarmer Auslegung der Wasserstoffgasturbinen können die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Vergleich zu fossilem Kerosin oder SAF allerdings deutlich reduziert werden (Agarwal et al. 2019, Silberhorn et al. 2022).

Die Klimawirkung aus der Emission von Wasserdampf steigt dagegen bei wasserstoffbasierten Antriebstechnologien deutlich an. Die in der Klimawirkung bedeutsamere Bildung von Kondensstreifen kann jedoch gemäß bisherigen Simulationen aufgrund der geringeren Menge an Rußpartikeln im Abgasstrahl von Wasserstoffgasturbinenriebwerken moderat und bei Brennstoffzellen deutlich reduziert werden (Gierens 2021). Hier bestehen aber noch hohe Unsicherheiten.

In der Summe liegt die verbleibende Klimawirkung bei der Verwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen bei unter 20 Prozent und bei der Verbrennung von Wasserstoff in Gasturbinenriebwerken bei etwa 40 Prozent des Wertes konventioneller Antriebstechnologien mit fossilem Kerosin (vgl. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking 2020, Tabelle S. 76). Die genaue verbleibende Klimawirkung hängt hierbei von dem Technologiestand, der Flugmission sowie der Klimametrik, welche für die Quantifizierung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte verwendet wird, ab.

Auch konventionelle Triebwerke haben bei weiterer Technologieentwicklung ein deutliches Optimierungspotenzial bezüglich ihrer Klimawirkung (Pouzolc et al. 2021). Sowohl bei der Verwendung von fossilem Kerosin als auch in noch höherem Maße bei SAF könnten die Emission von NO<sub>x</sub> und die Bildung von Kondensstreifen zukünftig deutlich reduziert werden; im Vergleich zur Verwendung von Wasserstoff allerdings weniger deutlich.

Insgesamt bietet grüner Wasserstoff größere Potenziale, die Klimawirkung der Luftfahrt zu reduzieren als fossiles Kerosin oder SAF.

### 2. Flüssiger, grüner Wasserstoff wird hinsichtlich Produktion und Transport in der Summe günstiger sein als synthetisch erzeugtes SAF

Durch die energieintensive Produktion von grünem Wasserstoff und die anschließenden zusätzlichen Produktionsschritte zur Gewinnung synthetischer Kraftstoffe ergibt sich aus heutiger Sicht eine eindeutige, ansteigende Kostenhierarchie: fossiles Kerosin, grüner Wasserstoff, Biomassebasiertes SAF sowie strombasiertes, synthetisch erzeugtes Kerosin (e-SAF) (ITF 2023). Die Verfügbarkeit von biomassebasiertem SAF wird allerdings durch die für dessen Produktion benötigten Reststoffe begrenzt. Für den ökonomischen Vergleich nachhaltiger Energieträger im globalen Luftverkehr sind daher primär die Produktionskosten von Wasserstoff und e-SAF von Interesse.

Die reinen Produktionskosten für grünen, gasförmigen Wasserstoff liegen derzeit noch bei mehr als 130 Euro je Megawattstunde. Diese könnten sich aber in sonnenreichen Ländern, bei weiter fallenden Preisen der Photovoltaik-Module und Elektrolyseure, bis zum Jahr 2030 in Richtung 85 Euro entwickeln. Für die Verwendung des Wasserstoffs als Kraftstoff in der Luftfahrt sind zusätzlich die Verflüssigung und der Transport vom Produktionsort bis zu den Flughäfen notwendig. Nach aktuellen Kostenabschätzungen würden die Verflüssigung, die Zwischenlagerung und die Transportkosten zum Beispiel zwischen Nordafrika und einem deutschen Überseehafen circa 75 Euro je Megawattstunde kosten. Die Verteilung innerhalb Deutschlands und die Bereitstellung am Flughafen mit den dafür notwendigen Infrastrukturen und Fahrzeugen würden circa zehn Euro je Megawattstunde kosten (Raab et al. 2024). In der Summe könnte flüssiger, grüner Wasserstoff für die Betankung eines Flugzeugs im Jahr 2030 somit circa 170 Euro je Megawattstunde kosten. Im Vergleich zu grünem Wasserstoff fallen bei e-SAF, neben der benötigten CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft (Direct-Air-Capture), höhere Investitions- und Betriebskosten für den technisch aufwendigeren und energieintensiveren Herstellungsprozess an. Daher führt eine vergleichbare Berechnung für e-SAF zu 65 Prozent höheren Kosten von circa 280 Euro je Megawattstunde (vgl. Raab und Dietrich 2023).

Aufgrund der Neuheit der Märkte für grünen Wasserstoff und e-SAF sind die Kostenabschätzungen allerdings mit großer Unsicherheit verbunden (vgl. IEA 2022, Raab und Dietrich 2023). Diese Unsicherheit beruht insbesondere auf der volatilen Kostenentwicklung für Investitionen in die Produktions- und Distributionsinfrastruktur, der schwer abschätzbaren Nutzungsdauer dieser Infrastrukturen sowie der Verfügbarkeit dafür benötigter Vorprodukte und seltener Metalle. Zusätzlich sind für die zukünftigen Betreiber von Wasserstoff-Flugzeugen nicht die Herstellungskosten der Energieträger, sondern ausschließlich die resultierenden Marktpreise relevant. Hierbei kann eine knappe Verfügbarkeit der nachhaltigen Energieträger oder eine geringe Anzahl an Markt-

akteuren auf der Angebotsseite zu höheren Preisen führen.

### 3. Unter Vorbehalt einer effizienten Technologieintegration bieten die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff für die Luftfahrt Vorteile gegenüber anderen nachhaltigen Energieträgern

Die Luftfahrt stellt aufgrund der flugmechanischen Zusammenhänge zwischen Gewicht, Auftrieb, Luftwiderstand und Schub eines Flugzeugs besondere Anforderungen an die genutzten Energieträger. Die Energieeffizienz der Flugzeuge wird insbesondere durch den Energiegehalt pro Gewicht, die sogenannte gewichtsbezogene Energiedichte, und den Energiegehalt pro Volumen, die sogenannte volumenbezogene Energiedichte, der genutzten Energieträger beeinflusst.

Im Vergleich der klimaverträglichen Energieträger SAF, Batteriestrom und Wasserstoff besitzt SAF die beste volumenbezogene und eine gute gewichtsbezogene Energiedichte. Es wird bereits in begrenzter Menge in der Luftfahrt eingesetzt, kann dem fossilen Kerosin als Drop-in-Kraftstoff beigemischt werden und ist weitgehend kompatibel mit der bestehenden Flugzeugflotte sowie der bestehenden Infrastruktur an den Flughäfen. Allerdings ist die Gesamtenergieeffizienz von SAF, betrachtet von der Gewinnung bis zur Fortbewegung (Well-to-Wake, WtW), im Vergleich zu Batteriestrom oder Wasserstoff gering, da bei der Herstellung von SAF und seiner Verbrennung in den Flugzeugtriebwerken hohe Umwandlungsverluste auftreten.

Die Nutzung von Batteriestrom hingegen ermöglicht die beste Energieeffizienz (WtW), und im Flugbetrieb treten keine schädlichen oder klimawirksamen Emissionen auf. Der Einsatzbereich von rein batterieelektrischen Antriebskonzepten in der Luftfahrt beschränkt sich daher, selbst bei moderater Weiterentwicklung in den nächsten Dekaden, auf Klein- und Regionalflugzeuge. Ergän-

zend könnte Batteriestrom in hybrid-elektrischen Flugzeugen zum Einsatz kommen, die zur Erhöhung der Reichweite zusätzlich über eine Gasturbine zur Verbrennung von SAF verfügen.

Wasserstoff besitzt ohne Berücksichtigung des Tanks eine 2,8-mal höhere gewichtsbezogene Energiedichte als SAF sowie eine circa 180-mal höhere gewichtsbezogene Energiedichte als derzeitige Lithium-Ionen-Batterien. Diese hohe gewichtsbezogene Energiedichte ist einer der wesentlichen Vorteile von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt. Während Wasserstoff bei Raumtemperatur und Normaldruck gasförmig ist, erfordert der effiziente Einsatz in der Luftfahrt Wasserstoff in flüssiger Form. Nur mit flüssigem Wasserstoff können ein ausreichend leichtes Tanksystem sowie eine ausreichend hohe volumenbezogene Energiedichte des Wasserstoffs erreicht werden. Selbst in flüssiger Form ist die volumenbezogene Energiedichte von Wasserstoff allerdings 4-mal niedriger als die von Kerosin oder SAF. Dies führt nach bisherigen Studien zu größeren Tanks, einer größeren Flugzeughülle und einem größeren aerodynamischen Widerstand. Zudem verursacht die Integration von Systemen zur Speicherung und Nutzung von flüssigem Wasserstoff – unter Einhaltung der hohen Sicherheitsstandards der Luftfahrt – eine erhöhte Systemmasse im Flugzeug, sodass der Gewichtsvorteil von Wasserstoff weitgehend kompensiert wird. Dennoch ist die benötigte Gesamtenergie (WtW) beim Einsatz von Wasserstoff-Flugzeugen aufgrund der deutlich effizienteren Produktion von grünem Wasserstoff geringer als beim Einsatz von SAF (Huete, 2022; Wöhler, 2023). Insgesamt führen die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff für die Luftfahrt somit, unter Vorbehalt der Technologieintegration, zu Vorteilen hinsichtlich der Energieeffizienz (WtW) im Vergleich zu anderen nachhaltigen Energieträgern.

#### 4. Der Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt bedarf weiterer technologischer Entwicklungen

Der Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt kann mittels zweier verschiedener Antriebstechnologien erfolgen. Einerseits kann eine Brennstoffzelle genutzt werden, um elektrische Energie zum Antrieb von Elektromotoren bereitzustellen, die über Propeller in Schub umgewandelt wird. Trotz der höheren Energieeffizienz ist dieses Antriebskonzept aufgrund der vergleichsweise niedrigen gewichtsbezogenen Leistungsdichte auf Klein- und Regionalflugzeuge begrenzt. Andererseits kann Wasserstoff, ähnlich dem bisherigen Verfahren für Kerosin, direkt in dafür noch zu entwickelnden Gasturbinenverbrennern verbrannt werden. Die erforderliche Bereitstellung höherer Leistungsdichten für größere Flugzeuge kann mit dieser Triebwerkstechnologie erreicht werden.

Wasserstoff in flüssiger Form, wie er für den effizienten Einsatz in der Luftfahrt erforderlich ist, wird bei minus 253 °C und bei einem Druck von ein bis vier bar in kryogenen Tanks gespeichert. Für die Zertifizierung von Flüssigwasserstofftanks und deren Integration im Flugzeug ist allerdings noch viel Entwicklungsarbeit erforderlich. Zum einen stellen sichere und leichte kryogene Tanks, wie sie für die Luftfahrt erforderlich sind, höchste technische Anforderungen an Material, Design und Isolierung. Zum anderen muss bei flüssigem Wasserstoff aufgrund der geringeren Energiedichte ein viermal so großes Tankvolumen im Flugzeug untergebracht werden wie bei Kerosin. Infolge der notwendigen Bedruckung und Isolation von Flüssigwasserstofftanks sind zudem Tankformen mit möglichst geringer Oberfläche vorzuziehen, so dass eine Unterbringung der Tanks in den Tragflächen schwieriger ist als bei Kerosin. Für die effiziente Integration von Wasserstoff als Energieträger in Flugzeugen sind daher angepasste und neuartige Ansätze im Flugzeugentwurf erforderlich und zu erproben.

Insgesamt eignet sich Wasserstoff besonders als Energieträger für den Regional- und Kurzstreckenbereich (DLR, 2024). Langfristig wären mit der

weiteren Technologieentwicklung voraussichtlich auch längere Distanzen möglich. Aufgrund der weitreichenden technischen Unterschiede zu kerosinbetriebenen Flugzeugen ist ein Nachrüsten der bestehenden Flugzeugflotte mit Wasserstoffantrieben nur in Ausnahmefällen möglich. Die notwendige Forschung und Entwicklung von Technologiebausteinen für Flugzeuge mit Wasserstoffantrieb umfasst leichte, sehr gut isolierende Flüssigwasserstofftanks, schadstoffarme Wasserstoffgas-turbinen, Brennstoffzellen mit hohen Leistungsdichten und Elektromotoren mit entsprechenden Kühlsystemen (ATI 2022). Grundbedingung eines kommerziellen Einsatzes von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt ist die Übertragbarkeit der hohen systemtechnischen Sicherheitsstandards von kerosinbetriebenen Flugzeugen auf Wasserstoff-Flugzeuge (Nøland 2021).

## 5. An den Flughäfen sind hohe Investitionen und geeignete Flächen für neue Infrastrukturen notwendig, um Wasserstoff-Flugzeuge betanken zu können

Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt wird flüssig oder gasförmig gelagert und verteilt. Mit den an den Flughäfen vorhandenen Tank- und Betankungsanlagen für Kerosin lässt sich Wasserstoff nicht verarbeiten. Stattdessen wird eine eigene Versorgungslogistik mit einer speziellen Lager- und Distributionsinfrastruktur benötigt (Braun und Claßen 2023).

Grundsätzlich kann Wasserstoff über alle Verkehrsträger und mit allen Verkehrsmitteln transportiert werden. Über lange Entfernungen kann Wasserstoff unkomprimiert über Pipelines, komprimiert in Hochdruckflaschen oder verflüssigt per Schiff, in Kryotankwagen auf der Schiene oder Straße transportiert werden. Über kurze Entfernungen wird Wasserstoff häufig über Transferleitungen oder per Lkw transportiert.

Ausschlaggebend für die Wahl der Versorgungswege zur Bereitstellung von Wasserstoff an einem

Flughafen sind dessen Verkehrsanbindung, Standortbedingungen und Verbrauchsmengen (ATI 2022). Geringe Verbrauchsmengen können, zum Beispiel in der Einführungsphase oder bei sehr kleinen Flughäfen auch dauerhaft, per Lkw befriedigt werden. Hohe Verbrauchsmengen können über die massenleistungsfähigen Transportwege Pipeline, Schiene oder Binnenschiff bereitgestellt werden. Die systembedingt gasförmige Wasserstoffversorgung per Pipeline erfordert eine Verflüssigungsanlage am Flughafen oder in direkter Nähe. Solche Anlagen haben neben einem hohen Flächenverbrauch auch einen sehr hohen Energiebedarf in Form von elektrischem Strom. Um zusätzliche Umwandlungsverluste bei bereits verflüssigt importiertem Wasserstoff zu vermeiden, ist die gasförmige Wasserstoffversorgung per Pipeline primär für regional produzierten Wasserstoff sinnvoll.

Die Treibstofflagerinfrastruktur an Flughäfen dient grundsätzlich dazu, den erforderlichen Kraftstoff am Flughafen vorzuhalten und einen unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Dafür puffern die Tanklager in der Regel den Treibstoffbedarf von drei Tagen ab. Der an dieser Stelle bereits für die Betankung ins Flugzeug verflüssigte Wasserstoff wird bei minus 253 °C kryotechnisch gelagert. Hieraus ergeben sich spezielle technische Anforderungen an die Lagertanks, besonders an deren Form, Größe und Isolierung.

Die Feindistribution des Wasserstoffs vom Tanklager zum Flugzeug übernehmen spezielle Tankfahrzeuge; leistungsfähiger ist der Einsatz flächiger Unterflurbetankungssysteme.

Diese Infrastrukturen, besonders die Kryotanks und Verflüssigungsanlagen, benötigen einen erheblichen Platzbedarf dort, wo Flächen knapp und wertvoll sind, und sie sind nur mit erheblichen Investitionen und langfristiger Planung der Flughafenbetreiber umzusetzen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Flächen für die Wasserstoffinfrastruktur bei parallelem Betrieb mit Kerosin oder SAF zusätzlich zu denen der konventionellen Tankinfrastrukturen benötigt werden.

## 6. Die Konkurrenzfähigkeit von Wasserstoff in der Luftfahrt sollte durch eine globale Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie durch Anreize zur Vermeidung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten gestärkt werden

Wasserstoffbetriebene Flugzeuge stehen in wirtschaftlicher Konkurrenz zu Flugzeugen, die mit anderen, nachhaltigen Energieträgern wie SAF und Batteriestrom oder mit herkömmlichem, fossilem Kerosin angetrieben werden. Die Konkurrenzfähigkeit von Wasserstoff in der Luftfahrt wird, neben den Herstellungskosten der Energieträger und den Investitionskosten für die Technologieentwicklungen und Infrastrukturanpassungen, auch von den politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen beeinflusst.

Bei den derzeitigen Marktpreisen fossiler Energieträger ist die Wirtschaftlichkeit von grünem Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt nicht gegeben. Daher muss der Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt durch politische Maßnahmen unterstützt werden. Grundsätzlich bieten sich hierfür – will man von Seiten der Politik nicht auf Ge- und Verbote zurückgreifen – einerseits direkte Subventionen an Fluggesellschaften und Flughäfen an und andererseits indirekte Maßnahmen, zum Beispiel mit Hilfe von Preisreizen.

Eine dieser indirekten Maßnahmen ist die Bepreisung von klimarelevanten Emissionen. Bereits seit 2012 werden im Europäischen Wirtschaftsraum die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luftverkehrs im Rahmen eines Emissionshandels bepreist. Bis Anfang des Jahres 2028 soll ein Bericht und gegebenenfalls ein Gesetzesvorschlag vorliegen, wie auch die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Luftverkehrs im Europäischen Wirtschaftsraum in den Emissionshandel miteinbezogen werden können (EU 2023/958, Abschnitt 11).

Alle nicht-fossilen Antriebstechnologien und insbesondere Wasserstoff mit seiner besonders geringen Klimawirkung würden von einer stärkeren Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie von Maßnahmen und Anreizen zur Vermeidung der

Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte profitieren. Gleichzeitig würden auch für konventionelle Flugzeuge Anreize gesetzt werden, Technik und Betrieb klimafreundlich zu gestalten. Bei einem CO<sub>2</sub>-Preis in Höhe von 400 Euro je emittierter Tonne CO<sub>2</sub> – der sich nach 2050 durchaus im internationalen Umfeld ergeben könnte (IPCC 2018, S. 152) – würde grüner Wasserstoff etwas günstiger als SAF und deutlich günstiger als fossiles Kerosin sein (ICCT 2022). Die Konkurrenzfähigkeit von Wasserstoff in der Luftfahrt wäre damit gegeben. Bei zusätzlichen Maßnahmen und Anreizen zur Vermeidung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte kann Wasserstoff bereits bei einem niedrigeren CO<sub>2</sub>-Preis gegenüber SAF und fossilem Kerosin vorteilhaft sein.

Aufgrund der internationalen Natur des Luftverkehrs sollten politische und regulatorische Rahmenbedingungen zur Unterstützung von Wasserstoff-Flugzeugen mindestens europäisch einheitlich, idealerweise global einheitlich gestaltet werden. Auf europäischer Ebene ist es wichtig, dass die Regelungen für Fluggesellschaften und Flughäfen innerhalb und außerhalb der Europäischen Union wettbewerbsneutral sind. Nur so lässt sich verhindern, dass Regulierungen umgangen werden und Wettbewerbsnachteile für die europäische Luftverkehrsindustrie entstehen.

## 7. Handlungsempfehlungen

Aus den vorgestellten Thesen leiten sich die folgenden vier Handlungsempfehlungen ab, um den potenziell vorteilhaften Einsatz von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt zu unterstützen und die noch bestehenden Herausforderungen zu adressieren:

**Handlungsempfehlung 1: Die Erzeugung und der Import von grünem Wasserstoff** sollten verstärkt werden. Dies ist eine essentielle Bedingung für einen erfolgreichen Markthochlauf von Wasserstoff im Luftverkehr. Gleichzeitig wird grüner Wasserstoff für die nachhaltige Produktion von synthetisch erzeugtem SAF benötigt und kann auch abseits der Luftfahrt zur Dekarbonisierung verwendet werden. Eine ausreichende Verfügbar-

keit von möglichst günstigem, grünem Wasserstoff ist demnach von höchster Bedeutung. Hier sind die Unternehmen und die Politik gleichermaßen aufgefordert, Bezugsquellen und Produktionsmöglichkeiten von grünem Wasserstoff aufzubauen und zu finanzieren. Gemeinsame Pilotprojekte mit verschiedenen Wasserstoff nachfragenden Unternehmen und Wasserstoffproduzenten können hierfür wichtige erste Schritte sein. Insbesondere die Aspekte der Versorgungssicherheit und Resilienz sowie die Kosten der jeweiligen Lösung sollten bei der Beurteilung der verschiedenen Erzeugungs- und Beschaffungsoptionen eine große Rolle spielen.

**Handlungsempfehlung 2:** Durch eine stärkere **Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen** sowie durch **Maßnahmen und Anreize zur Vermeidung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten** sollte die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von klimaverträglichen Energieträgern wie grünem Wasserstoff gestärkt werden. Durch die geringere Klimawirkung von grünem Wasserstoff kann so ein teilweiser Ausgleich für die höheren Investitions- und Betriebskosten von Wasserstoff-Flugzeugen im Vergleich zu konventionellen Flugzeugen mit fossilem Kerosin oder SAF entstehen. Gleichzeitig würden auch für konventionelle Flugzeuge Anreize gesetzt, Technik und Betrieb hinsichtlich der Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten zu optimieren. Aufgrund der internationalen Natur des Luftverkehrs sollten die stärkere Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Maßnahmen und Anreize zur Vermeidung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte hierbei, wie auch andere politische und regulatorische Rahmenbedingungen zur Unterstützung von Wasserstoff-Flugzeugen, **mindestens europäisch** einheitlich, **idealerweise global einheitlich** gestaltet werden. Auf europäischer Ebene sollte auf eine wettbewerbsneutrale Ausgestaltung für Fluggesellschaften und Flughäfen inner- und außerhalb der Europäischen Union geachtet werden. Nur so können die Umgehung einer Regulierung sowie Wettbewerbsnachteile für die europäische Luftverkehrsindustrie vermieden werden. Hierbei sollten politische und regulatorische Rahmenbedingungen **mit hoher und langfristiger Planungssicherheit** einhergehen, um Anreize für privatwirtschaftliche Investitionen entlang der

gesamten Wertschöpfungskette zu setzen. Idealerweise sollte die Planungssicherheit aufgrund der langen Entwicklungs- und Betriebsdauer von Flugzeugen mehrere Jahrzehnte betragen, damit sich die für die Technologie- und Infrastrukturentwicklung erforderlichen hohen Investitionen amortisieren können.

**Handlungsempfehlung 3:** Die **Forschung und Entwicklung** an Technologien für Wasserstoff-Flugzeuge sollte weiter intensiv vorangetrieben werden. Das primäre Ziel hierbei sollte die Erhöhung des Technologiereifegrads von benötigten Technologiebausteinen, wie zum Beispiel leichten, sehr gut isolierenden Flüssigwasserstofftanks, sein. Die öffentlich geförderte Forschung und Entwicklung sollte schnellstmöglich die noch bestehenden technologischen, ökonomischen und ökologischen Unsicherheiten in der Gesamtbilanz von Wasserstoff-Flugzeugen adressieren, um langfristige privatwirtschaftliche Investitionen anzuziehen. Im besonderen Fokus sollte die Übertragbarkeit der sehr hohen Sicherheitsstandards von kerosinbetriebenen Flugzeugen auf Wasserstoff-Flugzeuge liegen. Mit der parallelen Technologieentwicklung und -einführung in den Bereichen Wasserstoffproduktion, Wasserstoff-Flugzeug und Flughafeninfrastruktur sollte der zukünftige Markthochlauf von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt unterstützt werden.

**Handlungsempfehlung 4:** Insgesamt sollte die Klimawirkung der Luftfahrt **frühzeitig** durch die **vermehrte Einführung von SAF** reduziert werden und **langfristig ergänzend grüner Wasserstoff** als neuer Energieträger in der Luftfahrt die Klimawirkung weiter reduzieren. Hierdurch werden die wesentlichen Vorteile von SAF und grünem Wasserstoff bestmöglich kombiniert. SAF ist weitgehend mit der bestehenden Flugzeugflotte sowie den existierenden Infrastrukturen kompatibel und kann sogar dem fossilen Kerosin als Drop-in-Kraftstoff beigemischt werden, wodurch ein evolutionärer Entwicklungspfad zu einer nachhaltigeren Luftfahrt entsteht. Grüner Wasserstoff als neuer Energieträger in der Luftfahrt besitzt das Potenzial, langfristig effizienter, kostengünstiger und klimaverträglicher zu sein als SAF.

## Literaturverzeichnis

Aerospace Technology Institute (ATI) (2022), Hydrogen Infrastructure and Operation <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-CST-POS-0035-Airports-Airlines-Airspace-Operations-and-Hydrogen-Infrastructure.pdf>

Aerospace Technology Institute (ATI) (2022), Technology Roadmaps: Technology Pathways to Enable Zero-Carbon Emission Flight (FZO-IST-MAP-0012), <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-IST-MAP-0012-FlyZero-Technology-Roadmaps.pdf>

Agarwal et al. (2019), Injector design space exploration for an ultra-low NO<sub>x</sub> hydrogen micromix combustion system, Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, <https://doi.org/10.1115/GT2019-90833>

Braun und Claßen (2023), Qualitative risk assessment for future hydrogen-enabled airports, Transportation Research Procedia (75), Seiten 86-95, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.12.011>

DLR (2024), Luftfahrtstrategie des DLR, Executive Summary, <https://www.dlr.de/de/medien/publikationen/broschueren/2024/executive-summary-die-luftfahrtstrategie-des-dlr.pdf>

EU Richtlinie (EU) 2023/958 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG in Bezug auf den Beitrag des Luftverkehrs zum gesamtwirtschaftlichen Emissionsreduktionsziel der Union und die angemessene Umsetzung eines globalen marktbasierten Mechanismus, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0958>

Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (2020), Hydrogen-powered aviation – A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050, <https://data.europa.eu/doi/10.2843/471510>

Gierens (2021), Theory of Contrail Formation for Fuel Cells, Aerospace, <https://doi.org/10.3390/aerospace8060164>

Huete et al. (2022), Impact of tank gravimetric efficiency on propulsion system integration for a first-generation hydrogen civil airliner, The Aeronautical Journal, 126(1302), 1324–1332, <https://doi.org/10.1017/aer.2022.60>

International Council on Clean Transportation (ICCT) (2022), Performance analysis of evolutionary hydrogen-powered aircraft, <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/01/LH2-aircraft-white-paper-A4-v4.pdf>

International Energy Agency (IEA) (2022), Global Hydrogen Review 2022, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

IPCC (2018), Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 93-174, <https://doi.org/10.1017/9781009157940.004>

International Transport Forum (ITF) (2023), Sustainable Aviation Fuels: Policy Status Report, <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/sustainable-aviation-fuels-policy-status-report.pdf>

Nøland (2021), Hydrogen Electric Airplanes: A disruptive technological path to clean up the aviation sector, IEEE Electrification Magazine, 9(1), 92–102, <https://doi.org/10.1109/MELE.2020.3047173>

Pouzolz et al. (2021), Evaluation of the Climate Impact Reduction Potential of the Water-Enhanced Turbofan (WET) Concept, Aerospace 2021, <https://doi.org/10.3390/aerospace8030059>

Raab und Dietrich (2023), Techno-economic assessment of different aviation fuel supply pathways including LH2 and LCH4 and the influence of the carbon source, Energy Conversion and Management, Volume 293, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117483>

Raab et al. (2024), Aviation fuels of the future – A techno-economic assessment of distribution, fueling and utilizing electricity-based LH2, LCH4 and kerosene (SAF), Energy Conversion and Management: X, Volume 23, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100611>

Silberhorn et al. (2022), Climate Impact Reduction Potentials of Synthetic Kerosene and Green Hydrogen Powered Mid-Range Aircraft Concepts, Appl. Sci., <https://doi.org/10.3390/app12125950>

Wöhler et al. (2023), Design and Assessment of Long Range Aircraft Concepts with focus on Fossil Kerosene, Sustainable Aviation Fuel and Liquid Hydrogen as Energy Carriers, AIAA AVIATION 2023 Forum, <https://doi.org/10.2514/6.2023-3229>

## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das deutsche Forschungs- und Technologiezentrum für Luft- und Raumfahrt. In seinen Kerngebieten entwickelt das DLR Technologien für Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr, sowie Sicherheits- und Verteidigungsforschung. Ein breites Spektrum an Ergebnissen und Innovationen bringen Nutzen für Industrie und Wirtschaft, Behörden und Verwaltung sowie für öffentliche Stakeholder. Durch einen intensiven Wissensaustausch und gezielten Technologietransfer stellt sich das DLR seiner Verantwortung gegenüber der Gesellschaft. Dazu wird es mit Mitteln des Bundes gefördert. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger arbeiten als Managementeinrichtungen für Forschungs- und Industrieförderung.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 51 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für die daraus resultierenden Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 11.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall. Wir entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft und tragen durch den Technologietransfer dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

## Impressum

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Institut für Verkehrsforschung  
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin  
[www.dlr.de/vf](http://www.dlr.de/vf)

Autoren:

Markus Kühlen, Klaus Lütjens, Thorsten Ehlers,  
Axel Claßen, Janina Scheelhaase, Florian Wozny,  
Sven Maertens

Institut für Luftverkehr  
Linder Höhe, 51147 Köln

Jonas Eschmann, Patrick Jochem  
Institut für Vernetzte Energiesysteme  
Carl-von-Ossietzky-Straße 15, 26129 Oldenburg

Benjamin Frieske  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Gunnar Knitschky  
Institut für Verkehrsforschung  
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

Stand: Januar 2025

## DLR.de

Bilder DLR (CC-BY 3.0),  
sofern nicht anders angegeben

<https://elib.dlr.de/215863/>