



WASSERSTOFF
KOMPASS



MOBILITÄT UND TRANSPORT

Luftverkehr





WASSERSTOFF KOMPASS

ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

- Regulatorischer Rahmen
- Zielgerichteter H₂-Einsatz
- Fachkräftesicherung
- Akzeptanz und Sicherheit
- Klima und Ressourcen

BEREITSTELLUNG

- H₂-Erzeugung
- H₂-Import
- Infrastruktur

INDUSTRIEZWEIGE

- Stahlindustrie
- Chemische Industrie
- Raffinerien
- Zementindustrie
- Glasindustrie

MOBILITÄT UND TRANSPORT

- Kraftfahrzeuge
- Schifffahrt
- Luftverkehr
- Schienenverkehr

ENERGIEVERSORGUNG

- Gebäudewärme
- Prozesswärme
- Stromsystem

GLOSSAR

1 Generelle Aspekte der Luftfahrt

- 2 Besondere Herausforderungen bei der Defossilisierung
- 3 Ökonomische Aspekte
- 3 Versorgungssicherheit
- 4 Endenergiebedarf
- 4 Treibhausgasemissionen
- 5 Wasserstoffbedarfe

5 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- 5 Nicht-CO₂-Effekte
- 5 Speicherung, Transport und Sicherheit
- 6 Energieträger im Vergleich
- 6 Technische Fragestellungen

7 Handlungsoptionen (Wasserstoff)

- 7 Brennstoffzellenelektrische Flugzeuge
- 12 Wasserstoff-Flugzeugturbine
- 15 CO₂-neutrales Kerosin im Flugverkehr

21 Handlungsoptionen (andere Technologien)

- 21 Batterieelektrische Flugzeuge
- 23 Flugroutenoptimierung

25 Literatur

Luftverkehr

- › Die Defossilisierung des Luftverkehrs ist besonders herausfordernd, da hier weite Strecken zurückgelegt werden und das zur Verfügung stehende Gewicht für Treibstoff oder Batterien eingeschränkt ist.
- › Zusätzlich machen Nicht-CO₂-Effekte einen Großteil des Treibhauseffekts aus. Diese können auch nur teilweise durch die Wahl einer alternativen Antriebsart vermieden werden.
- › Technologische Lösungen umfassen batterieelektrische Antriebe sowie erneuerbar gewonnene Energieträger wie Wasserstoff und nachhaltige Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuel – SAF).

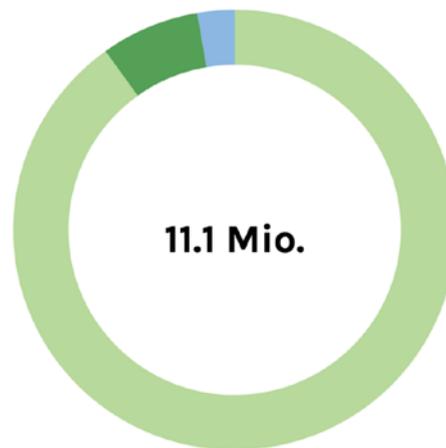
Generelle Aspekte der Luftfahrt

Der Luftverkehr ist in den vergangenen Jahrzehnten enorm gewachsen – in Europa wuchs die Anzahl der Flüge um durchschnittlich vier Prozent pro Jahr.^[1] Die Corona-Pandemie hat dieses Wachstum abrupt gestoppt, aber für Deutschland geht der Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft langfristig von einem dynamischen Wachstum aus. Entwicklungen wie ein verstärktes Klimabewusstsein, bessere Schnell- und Nachtzugverbindungen, mehr Remote-Treffen sowie gestiegene Energiepreise könnten die Wachstumsraten zumindest abschwächen.

Besondere Herausforderungen bei der Defossilisierung

Der Luftverkehr betrifft überwiegend die Passagierbeförderung. Im Jahr 2019 waren von den 11,1 Millionen Flügen in Europa 90 Prozent Passagier-, 3 Prozent Fracht- und 7 Prozent Businessflüge.^[1]

Verteilung der Flüge in Europa 2019
Anzahl an Flügen, die in Europa abgeflogen sind.^[1]



Passagierflüge Businessflüge Frachtflüge

Trotz der ständigen Effizienzsteigerung der Flugzeuge hat sich der Kraftstoffbedarf dabei zwischen 1990 und 2018 mehr als verdoppelt. Haupttreiber dafür ist der internationale Flugverkehr, insbesondere bei Flugdistanzen von 1.000 bis 5.000 Kilometern. In diesem Segment haben sich die Flugzeugkilometer zwischen 1990 und 2018 nahezu vervierfacht.^[3]

Die besondere Herausforderung bei der Defossilisierung der Luftfahrt ist einerseits ihre starke internationale Prägung und andererseits die Bedeutung nationaler Rechtsprechungen. Beispielsweise wird nur der nationale Luftverkehr im deutschen Klimaschutzgesetz betrachtet und internationale Flüge sind gemäß internationalen Abkommen von allen Steuern befreit. Dies macht eine effiziente und wirtschaftlich tragfähige Defossilisierung des Flugsektors komplex.

Darüber hinaus müssen alternative Energieträger höchste Sicherheitsanforderungen erfüllen und gleichzeitig eine hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichte aufweisen, um auch Langstreckenflüge zu ermöglichen.

Zusätzlich verursachen Flugzeuge Kondensstreifen und NO_x-emissionen und tragen damit zum Treibhauseffekt bei. Diese Emissionen würden bei den heutigen Flugzeugmustern und Antriebstechniken auch nach Umstieg auf CO₂-neutrales Kerosin weiter auftreten.

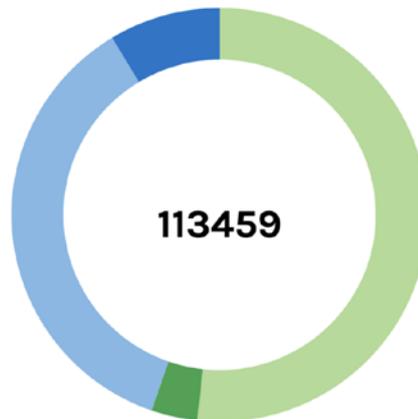
Diese Nicht-CO₂-Effekte haben einer aktuellen Studie zufolge eine doppelt so hohe Klimawirkung wie das ausgestoßene CO₂.^[2]

Mit Blick auf die angestrebte Klimaneutralität liegt hier also eine doppelte Herausforderung vor: Zum einen ist es nicht klar, wie stark technische Lösungen wie biogene oder synthetische Kraftstoffe zur Klimaneutralität beitragen können. Zwar legen neue Forschungsergebnisse nahe, dass die Nicht-CO₂-Effekte bei biogenen oder synthetischen Kraftstoffen geringer ausfallen würden.^[6] Doch eine tatsächliche Klimaneutralität ist ohne Kompensationsmaßnahmen nach aktuellem Kenntnisstand nicht zu erreichen. Zum anderen erhöht das erwartete starke Wachstum den Druck, besonders schnell klimaschonende Lösungen in die Anwendung zu bringen.

Ökonomische Aspekte

Die Luftfahrt ist ein relevanter Beschäftigungsfaktor in Deutschland. Allerdings gehen Zahlen der verschiedenen Quellen deutlich auseinander. 2014 waren nach der Bundesagentur für Arbeit 113.450 Personen sozialversicherungspflichtig in der Luftverkehrsbranche beschäftigt.^[7]

Beschäftigte in der Luftfahrt nach Bereich
nach Bundesagentur für Arbeit in 2014 ^[7]



■ Personenbeförderung in der Luftfahrt ■ Güterbeförderung in der Luftfahrt ohne Raumfahrt ■ Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen für Flugzeuge
■ Erbringung von sonst. Dienstleistungen für die Luftfahrt (Schleppen)

Nach Angaben des Bundesverbands der Deutschen Luftverkehrswirtschaft sichert die Luftfahrt aktuell über 684.000 direkte und indirekte Arbeitsplätze.^[8]

Der Umsatz der Luftfahrt in Deutschland betrug zwischen 2012 und 2019 zwischen 12 und 14,5 Milliarden Euro und entsprach 2019 0,36 Prozent des Bruttoinlandsprodukts.^{[9][10]}

Versorgungssicherheit

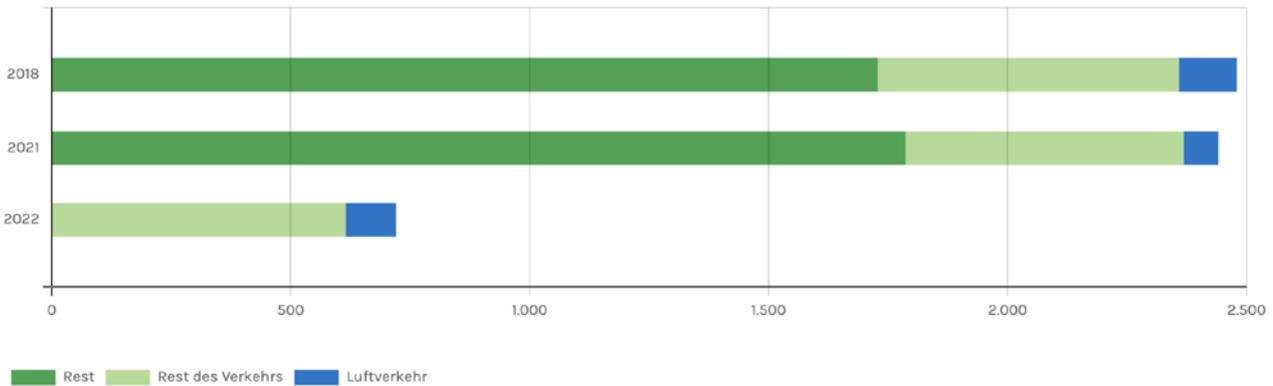
Der breite Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe hätte im Vergleich zur aktuellen Situation keine grundlegende Änderung der Energieimportabhängigkeit Deutschlands zur Folge. Eine Teilelektrifizierung würde wiederum den Primärenergiebedarf und somit die Energieimportabhängigkeit Deutschlands verringern.

Endenergiebedarf

Die Luftfahrt wurde durch die Pandemie besonders stark beeinträchtigt und ist noch nicht wieder auf repräsentative Zahlen zurückgekehrt. Daher werden hier neben den aktuellen auch die Zahlen für 2018 angegeben. Im Jahr 2018 wurden in Deutschland 121 Terawattstunden Kerosin verbraucht, was fünf Prozent des Endenergieverbrauchs entspricht.^[13]

Endenergieverbrauch

Anteil des Luftverkehrs am deutschen Endenergieverbrauch im Jahr 2018, 2021 sowie 2022 in TWh.^{[13] [25]} (Der Gesamtendenergieverbrauch ist für 2022 noch nicht bekannt.)

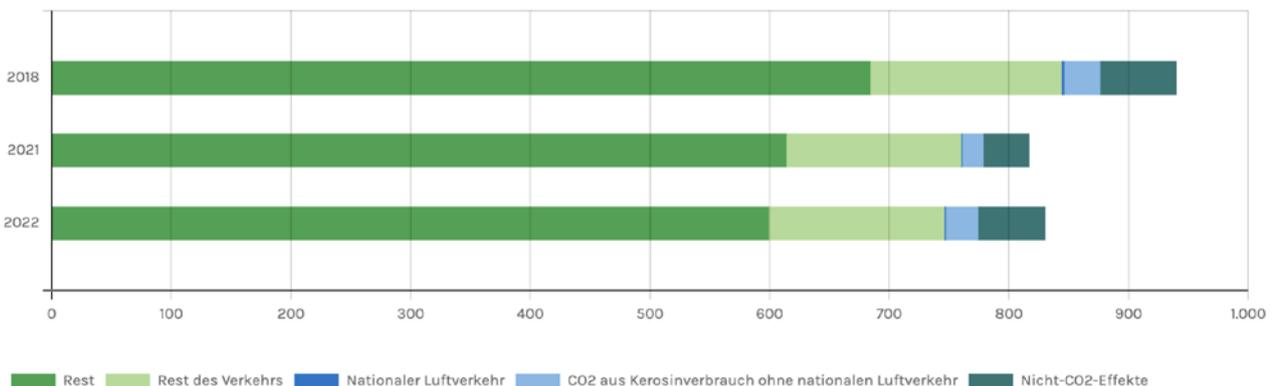


Treibhausgasemissionen

Der nationale Luftverkehr trägt im Jahr 2022 etwa eine Million Tonnen CO₂-Äquivalente (Äq.) und im Jahr 2018 etwa 2 Millionen Tonnen CO₂-Äq. zu den nationalen Treibhausgasemissionen bei.

Treibhausgasemissionen

Anteil des nationalen Luftverkehrs sowie des CO₂-Ausstoßes vom verbrauchten Kerosin an den deutschen Treibhausgasemissionen in Millionen Tonnen CO₂-Äq.^{[3] [13] [25] [38]} Die Nicht-CO₂-Effekte wurden als doppelt so groß wie der CO₂-Ausstoß angenommen.^[2]



Wasserstoffbedarfe

Zukünftige Bedarfe von Wasserstoff und aus Wasserstoff gewonnenem E-Kerosin lassen sich aufgrund der verschiedenen technischen Optionen für die Luftfahrt noch nicht abschließend einschätzen.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Nicht-CO₂-Effekte

- › Wie stark ist die Klimawirkung von Nicht-CO₂-Effekten (vor allem Kondensstreifen-Zirren, NO_x)?
- › Wie wirken sich synthetische Kraftstoffe auf die Bildung von Kondensstreifen-Zirren und NO_x-Emissionen aus?
- › Welche anderen Maßnahmen können ergriffen werden, um diese Effekte abzufedern?
- › Wie lassen sich Wettervorhersagen verbessern, sodass Regionen mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Bildung von Kondensstreifen-Zirren umflogen werden können?
- › Welche Maßnahmen beim Flugverkehrsmanagement und bei der Flugplanung können die Klimawirkung des Luftverkehrs reduzieren? Insbesondere könnte überprüft werden, inwieweit Flüge tagsüber stattfinden können, um Kondensstreifen-Zirren mit kühlender Wirkung zu kreieren.
- › Wie wirken sich neue Technologien auf die Schallemissionen insbesondere bei Start und Landung aus?

Speicherung, Transport und Sicherheit

- › Wie kann Wasserstoff an Bord eines Flugzeugs sicher und platzeffizient gespeichert werden?
- › Wie können Flughafenprozesse inklusive Betankung sicher gestaltet werden?
- › Wie kann ein initiales Netz zur Betankung von Flugzeugen mit alternativen Energieträgern geschaffen werden? Welche Standorte sind dafür besonders geeignet?
- › Machbarkeitsstudien: Für beispielhafte Flughäfen sollte geprüft werden, ob ausreichende Netzkapazitäten zur Versorgung von batterie- oder wasserstoffbetriebenen Flugzeugen zur Verfügung stehen. Aufgrund kurzer Umschlagzeiten sind hohe Ladeleistungen und kurze Tankzeiten (Kompressorleistung und Hochdruck-Puffertank) notwendig.

- › Wie kann die Infrastruktur am Flughafen bei einer sich verändernden Flugzeugflotte mitwachsen?
- › Welche Protokolle müssten erarbeitet und welche Vorgänge müssten bei Unfällen beachtet werden?
- › Inwieweit können Book-and-Claim oder der Handel von Zertifikaten einen physischen Transport von alternativen Kraftstoffen ersetzen?

Energieträger im Vergleich

- › Was sind die Anwendungsbereiche heute und in Zukunft für batterieelektrisches, wasserstoffbasiertes oder E-Fuel-basiertes Fliegen?
- › Wie können verschiedene Technologien angemessen miteinander verglichen werden, um die Klimawirkung sinnvoll zu bepreisen?
- › Welche Distanzen sollten mit Flugzeugen zurückgelegt werden und wo gäbe es Alternativen?

Technische Fragestellungen

- › Wie müssten Turbinen gestaltet werden, dass sie entweder reinen oder beigemischten Wasserstoff verbrennen können?
- › Wie müssten Turbinen für E-Kerosin optimiert werden, sodass dieses möglichst effizient verbrannt wird?
- › Wie kann die Bestandsflugzeugflotte nach- beziehungsweise umgerüstet werden, um alternative Energieträger zu nutzen?
- › Bei der Bereitstellung großer Mengen Wasserstoff bei gleichmäßig hohem Druck an verschiedenen Gates: Wird ein zentraler Kompressor genutzt? Wie können Druckleitungen sicher ausgelegt werden? Wie kann eine Leckage detektiert werden? Sind Nachverdichter an den Gates sinnvoll?

PUBLIKATION

- › Wasserstoff-Kompass (2022): Klimaneutralität in der Luftfahrt.
https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Meta-Analyse_Flugverkehr_.pdf

Handlungsoptionen Wasserstoff

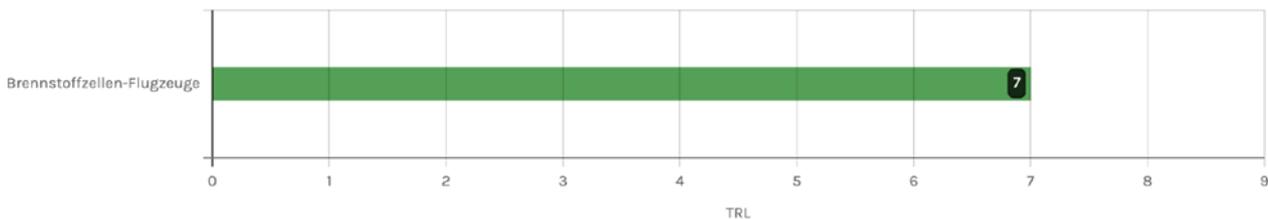
Brennstoffzellenelektrische Flugzeuge

Strom zum Betrieb von Elektromotoren in Flugzeugen kann aus Wasserstoff in Brennstoffzellen erzeugt werden. Um Volumen zu sparen, wird dabei der Wasserstoff in flüssiger Form, bei unter minus 250 Grad Celsius, in einem Tank an Bord mitgeführt. Mithilfe eines brennstoffzellenelektrischen Antriebs können sowohl CO₂- als auch Nicht-CO₂-Effekte vermieden werden.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad von brennstoffzellenelektrischen Flugzeugen liegt zwischen 7 und 8 (erfolgreiche Testflüge).^{[18] [34]}



Voraussetzungen

- › Eine entsprechende H₂-Infrastruktur muss auf ausreichend vielen Flughäfen vorhanden sein.
- › Wasserstoff muss ausreichend dicht und sicher an Bord des Flugzeugs gespeichert werden, was eine Anpassung oder Überarbeitung des Flugzeugdesigns erfordert.
- › Musterzulassungen sind erforderlich für neue Flugzeugdesigns sowie neue Komponenten.
- › Die Leistung und Leistungsdichte von Brennstoffzellen müssen ausreichend erhöht werden (auf über 2 Megawatt pro Tonne), um Startgewichte zu ermöglichen, die mit den angestrebten Kapazitäten und Reichweiten übereinstimmen.
- › Im Vergleich zum straßengebundenen Verkehr, wo der Einsatz von Brennstoffzellen fortgeschritten ist, müssen Brennstoffzellen im Luftverkehr für niedrigen Sauerstoff-Partialdruck und Ansaugtemperaturen bis zu minus 50 Grad Celsius angepasst werden.

Vorteile

- › Die Energiedichte von H₂ ist höher als bei Batterien und dementsprechend ist die Reichweite höher. Zum Beispiel sind Brennstoffzellen-Flugzeuge für 2027 mit 1.800 Kilometer Reichweite und 40 bis 80 Sitzplätzen ^[19] oder für 2035 mit 1.800 Kilometer Reichweite und bis 100 Sitzplätzen geplant. ^[22]
- › Ein Elektroantrieb beseitigt die CO₂-Emissionen sowie die Nicht-CO₂-Effekte (NO_x und Kondensstreifen). Der von der Brennstoffzelle erzeugte Wasserdampf hat eine sehr geringe Klimawirkung.
- › Elektroantriebe werden innovative und effizientere Flugzeugsdesigns ermöglichen.

Nachteile

- › Die volumetrische Energiedichte ist niedriger als bei Kerosin und begrenzt das Einsatzfeld voraussichtlich auf Kurz- und Mittelstreckenflüge. Die höhere Effizienz von Elektroantrieben und entsprechend auch effizienteren Flugzeugdesigns kompensieren zum Teil die relative niedrige volumetrische Energiedichte von Wasserstoff.
- › Wasserstoff als brennbares Gas erfordert entsprechende Sicherheitsstandards.
- › Drucktanks lassen sich nur schwer in aktuelle Flugzeugdesign integrieren.
- › Flüssigtanks sind in der Entwicklung anspruchsvoll und weisen einen Technologiereifegrad von circa 6 auf. ^[20]

Folgen

- › Anwohner*innen werden entlastet, da elektrische Motoren deutlich leiser als konventionelle Verbrenner sind.
- › Es können neue Flugzeiten ermöglicht werden, die aktuell aufgrund des Lärmschutzes nicht möglich wären.

Ökonomische Aspekte

Für einen brennstoffzellenelektrischen Viersitzer werden Treibstoffkosteneinsparungen von 30 Prozent und Gesamtkosteneinsparungen von 40 Prozent gegenüber einem konventionellen Viersitzer prognostiziert. ^[14]

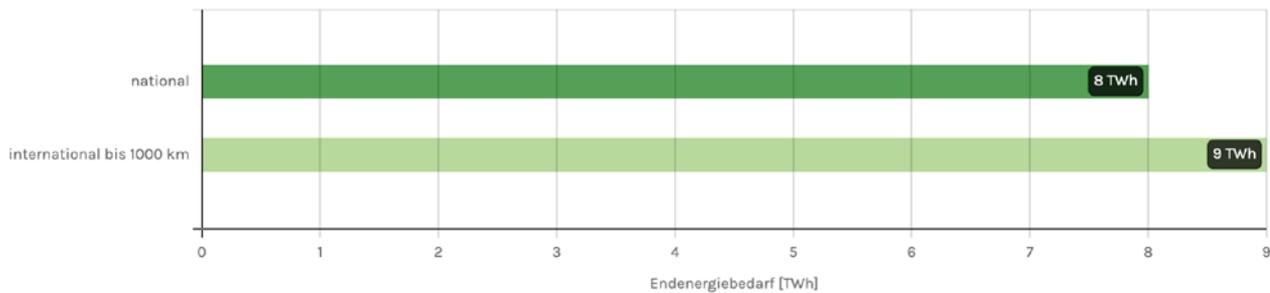
Endenergiebedarf

Durch Modellierung wurde die Verkehrsleistung (in Personenkilometer) für 2018 in national, international bis 1.000, zwischen 1.000 und 5.000, zwischen 5.000 und 10.000 sowie über 10.000 Kilometer Flugdistanz aufgeteilt. ^[3] Mit Reichweiten von bis zu 1.800 Kilometer könnten Brennstoffzellenelektrische Flugzeuge nationale und internationale bis 1.000 Kilometer Flugdistanz ersetzen.

Im Jahr 2018 haben diese Flüge 17 Terawattstunden Kerosin verbraucht. ^[3] 8 Terawattstunden fielen bei nationalen Flügen und 9 Terawattstunden bei internationalen Flügen bis 1.000 Kilometer Flugdistanz an.

Endenergiebedarf

von nationalen und internationalen Flügen bis 1.000 km Flugdistanz im Jahr 2018.



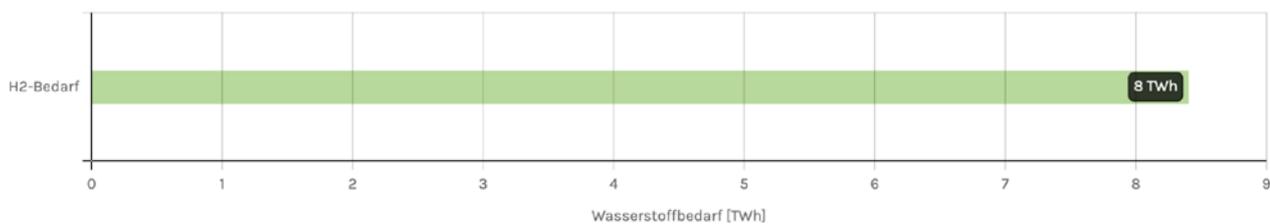
Wasserstoffbedarfe

Ein theoretisches Konzept für ein brennstoffzellenelektrisches Flugzeug mit einer Kapazität von 75 Passagieren, einer Reichweite von 1.500 Kilometern und einem Verbrauch von 0,79 Kilogramm H₂ pro 100 Personenkilometer wurde entwickelt.^[42]

Im Jahr 2018 machten nationale und internationale Flüge bis 1.000 Kilometer Flugdistanz 32 Milliarden RPK aus.^[3] Mit dem theoretischen brennstoffzellenelektrischen Flugzeugskonzept^[42] würde dies 8,4 Terawattstunden H₂ entsprechen.

Wasserstoffbedarfe

bei brennstoffzellenelektrischen Flugzeugen für alle Strecken bis 1.000 Kilometer, gemäß einem theoretischen Flugzeugskonzept.^[42]



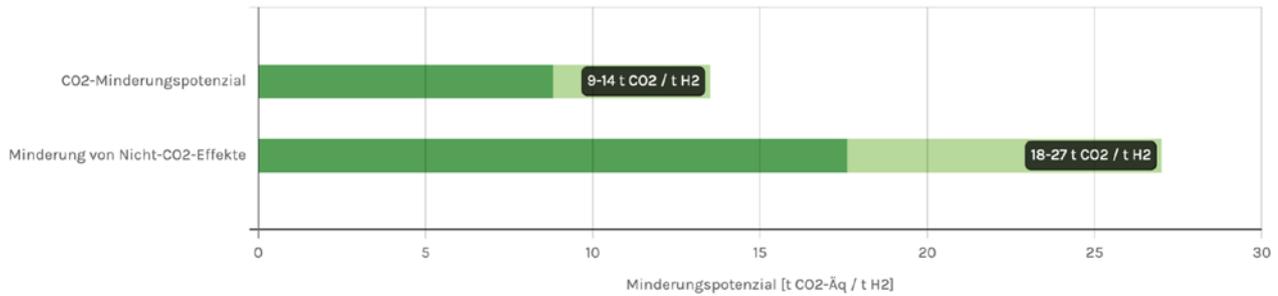
Minderungspotential

Es können 8,8 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm H₂ eingespart werden.^[42] Mit Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten, die beim brennstoffzellenelektrischen Fliegen verhindert werden, steigt das Minderungspotenzial auf bis zu 26,4 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Kilogramm H₂.

Das Minderungspotenzial steigt bei kleineren Flugzeugen. Für einen Viersitzer können 13,5 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm H₂ beziehungsweise 40,5 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Kilogramm H₂ mit Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten eingespart werden. (Eigene Berechnung aus dem Vergleich zwischen einem konventionellen^[33] und einem geplanten brennstoffzellenelektrischen Viersitzerflugzeug.^[14])

Minderung des Erwärmungseffekts in Tonnen CO₂-Äquivalent pro Tonne Wasserstoff

Die CO₂-Minderungspotenzial von brennstoffzellenelektrischen Flugzeugen liegt zwischen 8,8 und 13,5 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm H₂. Die Minderungspotenzial von den Nicht-CO₂-Effekte, die mit brennstoffzellenelektrischen Flugzeugen beseitigt werden, liegt zwischen 26,4 und 40,5 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Kilogramm H₂.



Akteur*innen

- > Brennstoffzellenhersteller
- > Elektroantriebhersteller
- > Flugzeugbauer
- > Flugsicherung und Luftfahrtbehörden (Zulassungen)
- > Fluglinien
- > Flughäfen

AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > Hydrogen Aviation Lab <https://www.lufthansa-technik.com/en/hydro-lab>

MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Steuerliche Bevorzugung von Wasserstoff

Kerosin ist in Europa und weltweit nahezu vollständig steuerbefreit. Wenn Wasserstoff als Alternative in der Luftfahrt etabliert werden soll, sollte dieser daher auch steuerbefreit werden.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Europäische Union

**MASSNAHME****> Internationale Harmonisierung**

Der nationale Anteil des Flugverkehrs ist gering und verliert zunehmend an Bedeutung. Für die Einführung alternativer Kraftstoffe ist daher eine internationale Koordination und Harmonisierung mit Blick auf die finanziellen, regulatorischen und technischen Rahmenbedingungen notwendig.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Europäische Union

MASSNAHME**> Book and Claim**

Book and Claim bezeichnet ein Accounting-System, mit welchem Emissionen weltweit verrechnet werden können. Der Grundgedanke dieses Systems ist es, dass es nicht sinnvoll wäre, nachhaltigen Kraftstoff an einem Ort zu erzeugen und dann weltweit zu transportieren, wenn dieser auch lokal verbraucht werden kann. So könnte klimaneutraler Kraftstoff außerhalb von Europa beziehungsweise an europäischen Orten mit hohem Erneuerbare-Energien-Potenzial erzeugt und verbraucht werden. Die eingesparten Treibhausgasemissionen wiederum könnten international gehandelt werden. Eine Kopplung mit dem Emissionshandelssystem der Europäischen Union wäre gegebenenfalls möglich beziehungsweise sollte angestrebt werden.

INITIATOREN

- > Internationale Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization, ICAO),
- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Europäische Union

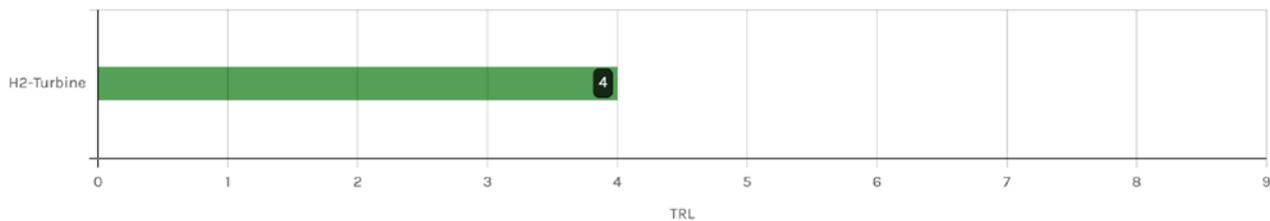
Wasserstoff-Flugzeugturbine

Wasserstoff (H₂) kann als Kraftstoff in Flugzeugturbinen verwendet werden. Dabei wird zumeist flüssiger Wasserstoff im Flugzeug gespeichert und die Energie in einer H₂-Turbine thermisch umgesetzt.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad von Wasserstoff-Flugzeugturbinen liegt bei 4.^[34]



Voraussetzungen

- › Eine entsprechende H₂-Infrastruktur muss an ausreichend vielen Flughäfen vorhanden sein.
- › Der H₂ muss ausreichend dicht und sicher an Bord des Flugzeugs gespeichert werden, was eine Anpassung oder Überarbeitung des Flugzeugdesigns erfordert.
- › Musterzulassungen sind erforderlich für neue Flugzeugdesigns sowie neue Komponenten.

Vorteile

- › Eine direkte Verwendung von H₂ in Turbinen ist effizienter als eine Umwandlung zu synthetischem Kerosin, dessen Bereitstellung 45 Prozent mehr Strom als die von flüssigem H₂ benötigt.^[21]
- › Es wird kein CO₂ in der Prozesskette freigesetzt.

Nachteile

- › Bei der Nutzung einer Turbine entstehen Nicht-CO₂-Effekte. Insbesondere können NO_x-Emissionen höher als bei Kerosin sein.
- › Die volumetrische Energiedichte von H₂ begrenzt das Einsatzfeld voraussichtlich auf Flüge bis circa 3.700 Kilometer.^[22]
- › Wasserstoff als brennbares Gas (in Verbindung mit Sauerstoff) erfordert entsprechende Sicherheitsstandards.
- › Drucktanks lassen sich nur schwer in das aktuelle Design von Flugzeugen integrieren.
- › Flüssigtanks sind in der Entwicklung anspruchsvoll und weisen einen TRL von circa 6 auf.^[20]
- › Neue Flugzeugdesigns und -bauteile erfordern Typzulassungen.

Folgen

> Strecken bis circa 3.700 Kilometer können mit Flugzeugen ohne antriebsbedingte CO₂-Emissionen geflogen werden.^[22]

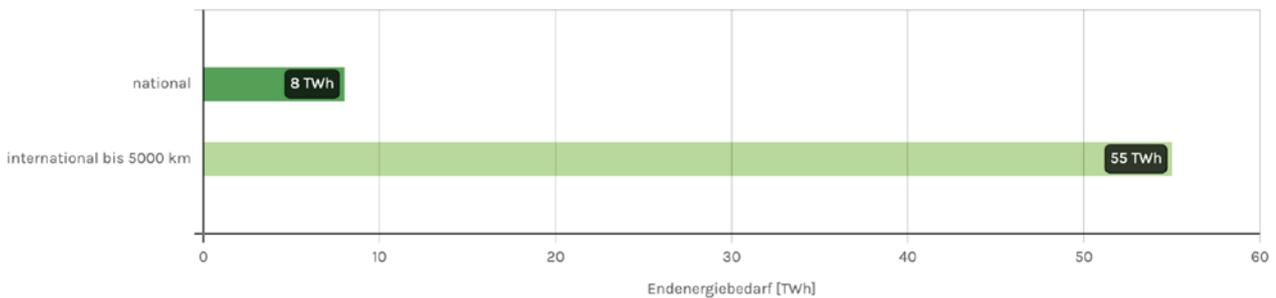
Endenergiebedarf

Durch Modellierung wurde die Verkehrsleistung (in Personenkilometer) für 2018 in national, international bis 1.000, zwischen 1.000 und 5.000, zwischen 5.000 und 10.000 sowie über 10.000 Kilometer Flugdistanz aufgeteilt.^[3] Die Reichweite H₂-Turbinenflugzeugen von bis zu 3.700 Kilometer betreffen die Kategorien nationale und internationale Flüge bis 5.000 Kilometer Flugdistanz.

Im Jahr 2018 haben diese Flüge 63 Terawattstunden Kerosin verbraucht.^[3]

8 Terawattstunden fielen bei nationalen Flügen und 55 Terawattstunden bei internationalen Flügen bis 5.000 Kilometer Flugdistanz an.

Endenergiebedarf



Wasserstoffbedarfe

Um alle Flüge bis 5.000 Kilometer Distanz mit H₂-Turbinen zu absolvieren, würden 63 Terawattstunden H₂ benötigt, sofern die gleiche Effizienz wie bei Kerosinturbinen angenommen wird.

Wasserstoffbedarfe

bei H₂-Turbinen-Flugzeugen für alle Strecken bis 5.000 Kilometer.



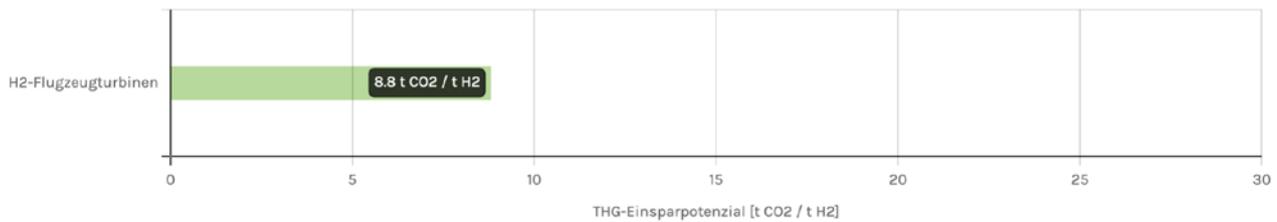
Minderungspotential

Es können 8,8 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm H₂ eingespart werden.

Nicht-CO₂-Effekte werden bei H₂-Flugzeugturbinen nicht komplett verhindert.

Treibhausgasminderungspotenzial in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

bei H₂-Turbinen-Flugzeugen, sofern die gleiche Effizienz wie bei Kerosinturbinen angenommen wird.



Akteur*innen

- > Turbinenhersteller
- > Flugzeugbauer
- > Flugsicherung und Luftfahrtbehörden (Zulassungen),
- > Fluglinien
- > Flughäfen

AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > Erprobung von Wartungs- und Bodenprozessen für wasserstoffbetriebene Flugzeuge
<https://www.lufthansa-technik.com/en/hydro-lab>

MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Steuerliche Bevorzugung von Wasserstoff

Kerosin ist in Europa und weltweit nahezu vollständig steuerbefreit. Wenn Wasserstoff als Alternative in der Luftfahrt etabliert werden soll, sollte dieser daher auch steuerbefreit werden.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz,
- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Europäische Union

MASSNAHME

> Internationale Harmonisierung

Der nationale Anteil des Flugverkehrs ist gering und verliert zunehmend an Bedeutung. Für die Einführung alternativer Kraftstoffe ist daher eine internationale Koordination und Harmonisierung mit Blick auf die finanziellen, regulatorischen und technischen Rahmenbedingungen notwendig.

INITIATOR

- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr

MASSNAHME

> Book and Claim

Book and Claim bezeichnet ein Accounting-System, mit welchem Emissionen weltweit verrechnet werden können. Der Grundgedanke dieses Systems ist es, dass es nicht sinnvoll wäre, nachhaltigen Kraftstoff an einem Ort zu erzeugen und dann weltweit zu transportieren, wenn dieser auch lokal verbraucht werden kann. So könnte klimaneutraler Kraftstoff außerhalb von Europa beziehungsweise an europäischen Orten mit hohem Erneuerbare-Energien-Potenzial erzeugt und verbraucht werden. Die eingesparten Treibhausgasemissionen wiederum könnten international gehandelt werden. Eine Kopplung mit dem Emissionshandelssystem der Europäischen Union wäre gegebenenfalls möglich beziehungsweise sollte angestrebt werden.

INITIATOREN

- > Internationale Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization, ICAO),
- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Europäische Union

CO₂-neutrales Kerosin im Flugverkehr

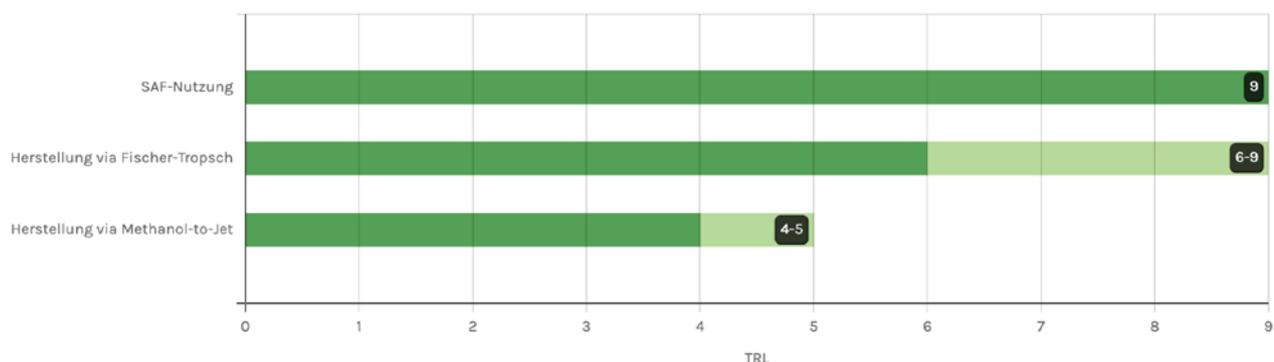
Bei der Herstellung von CO₂-neutralem Kerosin, auch nachhaltige Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuel – SAF) genannt, wird dieselbe Menge an CO₂ aus der Atmosphäre entzogen, wie bei der Verbrennung später in konventionellen Flugzeugen wieder ausgestoßen wird. Die Nicht-CO₂-Effekte bleiben bestehen.

SAF kann entweder aus CO₂ und H₂ (synthetisches Kerosin durch das Fischer-Tropsch- oder Methanol-to-Jet-Verfahren) oder aus Biomasse hergestellt werden. Eine aktuelle Studie geht davon aus, dass der Bedarf an CO₂-neutralem Kerosin im Jahr 2050 mit zwei Prozent Biokerosin gedeckt wird.^[23]

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad der Nutzung von SAF in konventionellen Flugzeugen liegt bei 9, da SAF fast identisch zu konventionellem Kerosin ist. Der Technologiereifegrad der Herstellung von synthetischen Kerosin durch Fischer-Tropsch- oder Methanol-to-Jet-Verfahren liegt zwischen 6 und 9 beziehungsweise 5 und 6.



Voraussetzungen

- › Der Atmosphäre entzogenes CO₂ muss in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen.

Vorteile

- › Synthetisches Kerosin kann CO₂-neutral im Flugverkehr eingesetzt werden, sofern der für die Synthese notwendige Kohlenstoff zuvor der Atmosphäre entzogen wurde.
- › Synthetisches Kerosin verbrennt sauberer als fossiles Kerosin. Daher werden auch die Nicht-CO₂-Effekte teilweise reduziert.
- › Vorhandene Infrastruktur und Bestandsflugzeugflotten können ohne oder mit minimalen Anpassungen weiterverwendet werden.
- › Die hohe Energiedichte und hohe Sicherheit von Kerosin im Flugverkehr bleiben erhalten.

Nachteile

- › Die Strom-zu-Kerosin-Kette ist weniger energieeffizient als die Strom-zu-H₂-Kette oder die Direktelektrifizierung.
- › Die verfügbare Menge an Biomasse ist begrenzt. Die Produktion von Biokerosin konkurriert mit anderen Anwendungen wie der Nahrungsmittelproduktion oder der chemischen Industrie.
- › Die Produktion von Biokerosin benötigt inklusive Pflanzenanbau eine siebzigmal größere Nettofläche als die Produktion von synthetischem Kerosin, wenn dabei auch die Nettofläche für die Erzeugung des erneuerbaren Stroms berücksichtigt wird.^[23]
- › Klimaneutrales Fliegen ist durch CO₂-neutrales Kerosin allein nicht möglich, da Nicht-CO₂-Effekte bestehen bleiben.

Folgen

- › Weitere Maßnahmen sind notwendig, um die Nicht-CO₂-Effekte zu verhindern oder zu kompensieren.

Ökonomische Aspekte

Eine aktuelle Studie schätzt den Preis für synthetisches Kerosin auf 1,33 bis 1,90 Euro pro Kilogramm im Jahr 2030 und auf 0,76 bis 0,88 Euro pro Kilogramm im Jahr 2050.^[23]

Der durchschnittliche Kerosinverbrauch in Deutschland wird auf 3,5 Liter pro 100 Personenkilometer geschätzt.^[3] Dies bedeutet Kosten von 3,72 bis 5,32 Euro pro 100 Personenkilometer im Jahr 2030 und 2,13 bis 2,46 Euro pro 100 Personenkilometer im Jahr 2050.

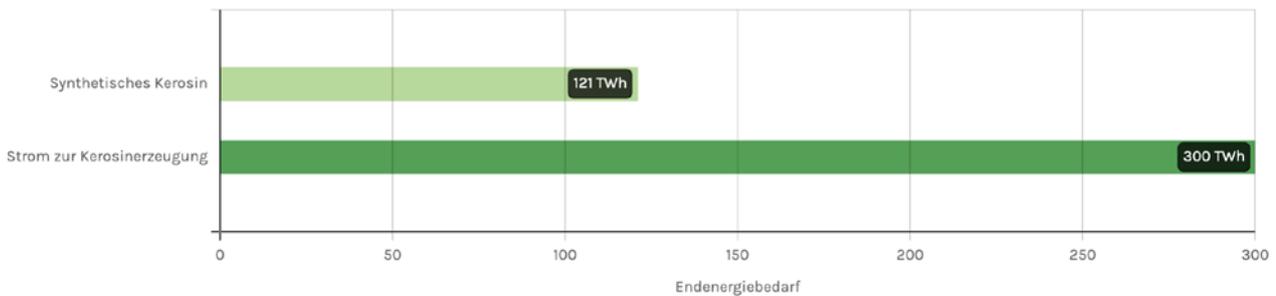
Versorgungssicherheit

Europa wird aller Wahrscheinlichkeit nach synthetisches Kerosin importieren müssen, um über ausreichende Mengen zu akzeptablen Preisen zu verfügen. Die Importabhängigkeit gegenüber dem Status quo wird somit nicht grundlegend verringert. Allerdings könnte eine Diversifizierung der Bezugsländer die Versorgungssicherheit positiv beeinflussen.

Endenergiebedarf

Endenergiebedarf

Um den gesamten deutschen Bedarf an Kerosin des Jahres 2018 zu decken, würden 121 Terawattstunden CO₂-neutrales Kerosin benötigt. Die Herstellung von 121 Terawattstunden synthetischem Kerosin benötigt über 300 Terawattstunden Strom, einschließlich der Abscheidung von CO₂ aus der Luft (englisch Direct Air Capture, DAC). (Eigene Berechnung aus Quellen^{[35][36][44]})



Wasserstoffbedarfe

H₂-Bedarfe

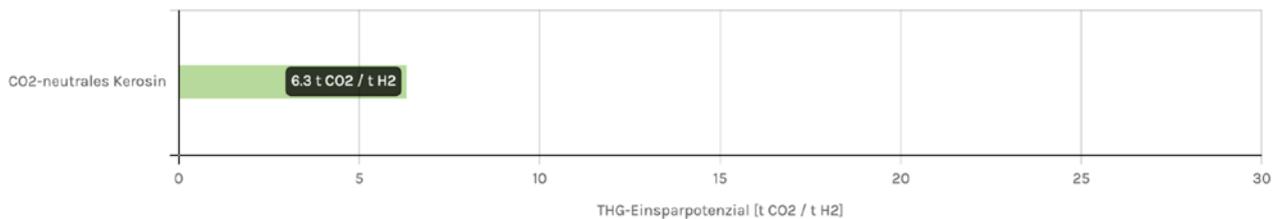
Die Herstellung von 121 Terawattstunden synthetischen Kerosin benötigt 168 Terawattstunden H₂ (eigene Berechnung aus Quellen^{[35][44]}). Beim Import von synthetischem Kerosin fallen diese Wasserstoffbedarfe nicht (vollständig) in Deutschland an.



Minderungspotential

Treibhausgaserminderungspotential in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Durch die Nutzung von synthetischem Kerosin in konventionellen Flugzeugturbinen können 6,3 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm H₂ eingespart werden.



Akteur*innen

- > Flugzeugbauer
- > Airlines
- > Flughäfen

AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

Mehrere Produktionsanlagen für synthetisches Kerosin sind in Deutschland angekündigt oder in Betrieb: ^[37]^[43]

- > KEROSyN100
<https://www.kerosyn100.de/>
- > HyKero
<https://xfuels.de/hykero/>
als Teil des IPCEI-Projekts
- > LHyVE Erzeugung
<https://lhyve.de/#vision>
- > DAWN
<https://synhelion.com/solar-fuels-and-plants/solar-fuel-plants>
- > E-Kerosin-aus-der-Luft
<https://www.airliners.de/rostock-green-airport/60436>
- > Technologie-Plattform-PtL
<https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/02/strombasierte-kraftstoffe-dlr-waehlt-leuna-als-standort-fuer-technologie-plattform-ptl-aus>
- > Green Fuels Lausitz
<https://durchatmen.org/2022/07/20/3-neue-synthetische-kerosin-fabriken-in-der-lausitz/>
- > Concrete Chemicals
<https://www.concrete-chemicals.eu/>
- > SAF@STR
<https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/klimaneutrale-kraftstoffe-co2-aus-der-zementherstellung-als-rohstoff-geeignet/>

Schwesterprojekte über Biokerosin aus Algen:

- > AUFWIND – Algenproduktion und Umwandlung in Flugzeugtreibstoffe: Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Demonstration
<https://doi.org/10.2314/GBV:870496352>
- > OptimAL – Optimierte Algen für nachhaltige Luftfahrt
<https://doi.org/10.2314/KXP:1667612778>

MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Quotenregelung für synthetische Flugkraftstoffe

Quotenregelungen schreiben eine Mindestmenge an nachhaltigen Flugkraftstoffen (sustainable aviation fuel, SAF) vor. Um eine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion zu vermeiden, listet die Europäische Union eine Reihe von biogenen Quellen, die im Rahmen der Quotenregelung zugelassen sind.

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



- > Im Stakeholder-Dialog befürwortete eine knappe Mehrheit langfristig angelegte, sukzessiv steigende Quoten.
- > Die Stakeholder*innen waren uneins, für welche Sektoren die Quoten gelten sollten.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr

MASSNAHME

> Internationale Harmonisierung

Der nationale Anteil des Flugverkehrs ist gering und verliert zunehmend an Bedeutung. Für die Einführung alternativer Kraftstoffe ist daher eine internationale Koordination und Harmonisierung mit Blick auf die finanziellen, regulatorischen und technischen Rahmenbedingungen notwendig.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Europäische Union

MASSNAHME**> Book and Claim**

Book and Claim bezeichnet ein Accounting-System, mit welchem Emissionen weltweit verrechnet werden können. Der Grundgedanke dieses Systems ist es, dass es nicht sinnvoll wäre, nachhaltigen Kraftstoff an einem Ort zu erzeugen und dann weltweit zu transportieren, wenn dieser auch lokal verbraucht werden kann. So könnte klimaneutraler Kraftstoff außerhalb von Europa beziehungsweise an europäischen Orten mit hohem Erneuerbare-Energien-Potenzial erzeugt und verbraucht werden. Die eingesparten Treibhausgasemissionen wiederum könnten international gehandelt werden. Eine Kopplung mit dem Emissionshandelssystem der Europäischen Union wäre gegebenenfalls möglich beziehungsweise sollte angestrebt werden.

INITIATOREN

- > Internationale Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization, ICAO)
- > Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Europäische Union

MASSNAHME**> Steuerliche Bevorzugung von CO₂-neutralem Kerosin**

Kerosin ist national wie international größtenteils steuerbefreit.^[30] Aus Sicht des Umweltbundesamts ist diese weitestgehende Steuerbefreiung eine umweltschädliche Subvention in Höhe von 8,3 Milliarden Euro Kosten im Jahr 2018.^[32] Sollte politisch entschieden werden, Kerosin höher zu besteuern, könnten CO₂-neutrale Alternativen von der Besteuerung ausgenommen werden.^[28] Dabei wäre eine weltweite Kerosinbesteuerung wirkungsvoller als eine nationale oder europäische Steuer. Denn es bestünde das Risiko, dass Wettbewerbsnachteile für europäische Fluggesellschaften entstehen oder Flüge sich in das nicht oder weniger steuerbelastete Ausland verlagern.^{[29][30][31]}

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Europäische Union

Handlungsoptionen Andere Technologien

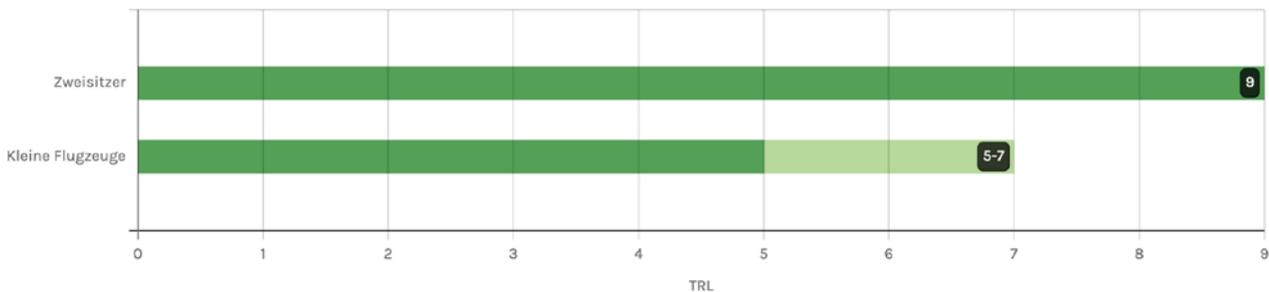
Batterieelektrische Flugzeuge

Mithilfe eines batterieelektrischen Antriebs können sowohl CO₂- als auch Nicht-CO₂-Effekte vermieden werden. Batterieelektrisches Fliegen ist insbesondere für die Kurzstrecke, den regionalen Flugverkehr und für Nischenanwendungen wie die Pilotenausbildung, die Hobby-Fliegerei oder urbane Luftmobilität (Lufttaxis mit senkrechten Start- und Landefähigkeiten) attraktiv.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad von batterieelektrischen Flugzeugen liegt bei 9 für Zweisitzer (Flugzeug mit Typzulassung und in Produktion^[15] seit 2020), bei zwischen 5 und 7 für kleine Flugzeuge^[34] (erfolgreicher Testflug für einen Neunsitzer^[16]), und deutlich niedriger für große Flugzeuge.



Voraussetzungen

- › Standardisierte Batterielösungen
- › Gewährleistung der notwendigen Strominfrastruktur auf ausreichend vielen Flughäfen.
- › Musterzulassungen für neue Flugzeugsdesigns und Einzelkomponenten.
- › Insbesondere müssen Batterien den strengen Sicherheitsanforderungen im Flugverkehr genügen. Heute werden bereits Batterien zur Notstromversorgung mitgeführt, die allerdings deutlich geringere Leistungen haben, als es für einen Antrieb notwendig wäre.

Vorteile

- › Die Energieeffizienz eines batterieelektrischen Antriebs ist höher als bei allen anderen Optionen.
- › Es werden sowohl CO₂-Emissionen als auch Nicht-CO₂-Effekte (NO_x und Kondensstreifen) vermieden.
- › Elektroantriebe ermöglichen innovative und effizientere Flugzeugsdesigns.

Nachteile

› Die niedrige Energiedichte von Batterien beschränkt die Reichweite von Flugzeugen. Angekündigte Projekte wollen Flugzeuge mit 10 bis 30 Sitzplätzen und Reichweiten von 300 bis 500 Kilometern umsetzen.^{[16][39][40][41]} Allerdings kompensieren die höhere Effizienz von batterieelektrischen Antrieben und entsprechend auch die effizienteren Flugzeugsdesigns zumindest in Teilen die niedrige Energiedichte von Batterien.

Folgen

- › Anwohner*innen werden entlastet, da Elektromotoren deutlich leiser als konventionelle Verbrenner sind.
- › Es können neue Flugzeiten ermöglicht werden, die aktuell aufgrund des Lärmschutzes nicht möglich sind.

Ökonomische Aspekte

Ein Strompreis von 15 Cent pro Kilowattstunde würde ein Betriebspreis von 1,5 Euro pro 100 Personenkilometer bedeuten.

Versorgungssicherheit

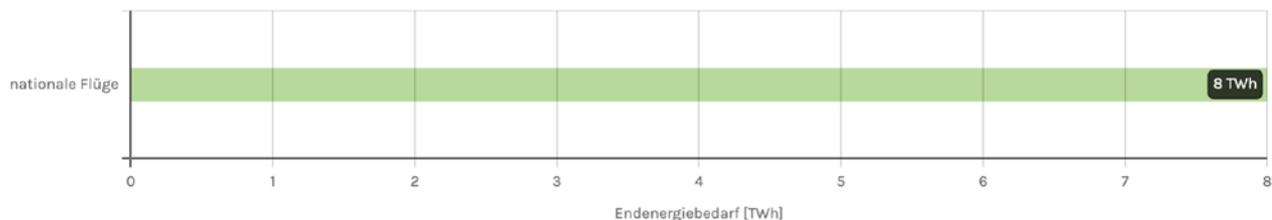
Die Direktelektrifizierung ermöglicht eine vereinfachte inländische beziehungsweise innereuropäische Energieversorgung im Luftverkehr (weniger Energieimporte von außerhalb Europas); sie ist dabei hoch effizient, was den Primärenergiebedarf verringert.

Endenergiebedarf

Mit Reichweiten bis zu 500 Kilometern könnten batterieelektrische Flugzeuge nationale Flüge ersetzen. Im Jahr 2018 haben nationale Flüge 8 Terawattstunden Kerosin verbraucht.^[3]

Endenergiebedarf

von nationalen und internationalen Flügen bis 1.000 km Flugdistanz im Jahr 2018.



Ein batterieelektrisches Flugzeug würde circa 10 Kilowattstunden Strom pro 100 Personenkilometer verbrauchen (eigene Berechnungen ausgehend von einem sich noch in der Entwicklung befindenden Neunsitzerflugzeug).^[17] Im Jahr 2018 machten nationale Flüge 9,8 Milliarden RPK aus.^[3] Mit dem oben genannten Neunsitzerflugzeug würde dies einen Verbrauch von 0,98 Terawattstunde Strom bedeuten.

Minderungspotential

Batterieelektrische Flugzeuge haben ein Minderungspotential von 2 Kilogramm CO₂ pro Kilowattstunde Strom. Mit Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte, die mit batterieelektrischen Flugzeugen beseitigt werden, steigt das Minderungspotential bis zu insgesamt 6 Kilogramm CO₂ pro Kilowattstunde Strom.

Akteur*innen

- › Batteriehersteller
- › Elektroantriebhersteller
- › Flugzeugbauer
- › Flugsicherung und Luftfahrtbehörden (Zulassungen)
- › Fluglinien
- › Flughäfen
- › Flugschulen
- › Städte (Flugtaxi)

Flugroutenoptimierung

Die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte (insbesondere durch Kondensstreifen und NO_x-Emissionen) ist im Flugverkehr etwa doppelt so groß wie die der reinen CO₂-Emissionen.^[2] Durch Flugroutenoptimierungen ließen sich Kondensstreifen deutlich reduzieren.

Voraussetzungen

- › Es werden hochaufgelöste und aktuelle Wettervorhersagen benötigt.

Vorteile

- › Die Maßnahme ist ohne Modifikation der Flugzeuge umsetzbar.
- › Der zusätzliche Treibstoff- und Zeitbedarf für die geänderten Routen ist vergleichsweise gering.

Nachteile

- › Das Konzept ist nur dort umsetzbar, wo der Luftraum nicht stark ausgelastet ist.

Folgen

- › Der Kraftstoffbedarf erhöht sich leicht bei klimaoptimierten Routen.

Ökonomische Aspekte

Die Mehrkosten werden auf einen niedrigen zweistelligen Prozentbereich geschätzt.^[26] Allerdings bestehen hier große Unsicherheiten.

Versorgungssicherheit

Die Versorgungssicherheit wird durch diese Option kaum beeinflusst, da die zusätzlichen Kraftstoffbedarfe verhältnismäßig gering sind.

Endenergiebedarf

Die Datenlage ist unklar. Während Teoh et al. von einem zusätzlichen Kraftstoffbedarf von unter einem Prozent für eine große Wirkung am Beispiel Japans ausgehen,^[27] sprechen Mannstein et al. von Mehrkosten im zweistelligen Prozentbereich,^[26] wobei der zusätzliche Kerosinbedarf nicht explizit abgeschätzt wird.

Minderungspotential

Nur ein Teil der Nicht-CO₂-Effekte lässt sich auf diesem Wege in Deutschland vermindern, da der Luftraum in Deutschland stark ausgelastet ist. Möglich wäre dies lediglich in den Stunden von 01:30 Uhr bis 04:30 Uhr.^[26]

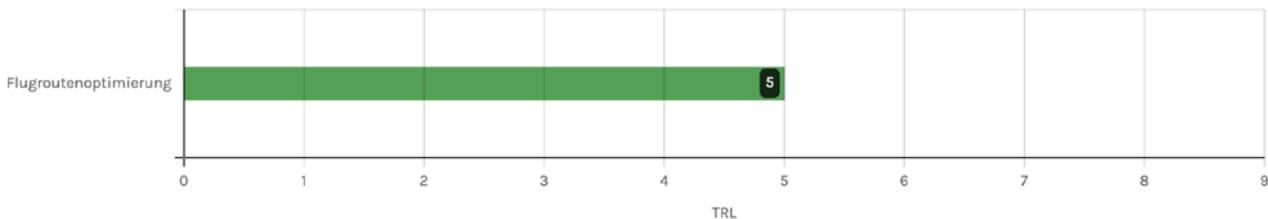
Akteur*innen

- > Regulator
- > Fluggesellschaften

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad der Flugroutenoptimierung liegt bei 5.^{[26][27]}



Literatur

- [1] **Eurocontrol: Aviation Outlook 2050**, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023.
<https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-aviation-outlook-2050>
- [2] **Lee et al. (2021):** The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environment*, 244, 117834.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- [3] **Umweltbundesamt (2020):** Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-29_texte_116-2020_tremod_2019_0.pdf
- [4] **Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (2021):** Bericht über das erste Halbjahr 2021. https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2021/08/20210810_Halbjahreszahlen-2021-1.pdf
- [5] **Boeing (2021):** Commercial Market Outlook.
https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/market/assets/downloads/CMO%202021%20Report_13Sept21.pdf
- [6] **Voigt et al. (2021):** Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness, *Communications Earth & Environment*, 2, 114 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s43247-021-00174-y>
- [7] **Hans Böckler Stiftung (2016):** Branchenanalyse Luftverkehr.
https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-006380/p_study_hbs_326.pdf
- [8] **Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (2016):** Luftfahrt sichert mehr als 800.000 Arbeitsplätze in Deutschland.
<https://www.bdl.aero/de/themen-positionen/bedeutung-des-luftverkehrs/luftfahrt-sichert-mehr-als-800-000-arbeitsplaetze-in-deutschland/>
- [9] **Statista (2023):** Umsatz der Branche Luftfahrt in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025.
<https://de.statista.com/prognosen/924756/luftfahrt-umsatz-in-deutschland>
- [10] **Destatis (2022):** Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/bruttoinland-vierteljahresdaten-xls-ab-1970.xlsx?__blob=publicationFile
- [12] **Wasserstoff-Kompass (2022):** Klimaneutralität in der Luftfahrt.
https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Meta-Analyse_Flugverkehr_.pdf
- [13] **AGEB: Bilanzen 2018 und 2021**, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023.
<https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/>
- [14] **Greentech.LIVE, 2022:** Wasserstoff-Flugzeug APUS i-2 Prototyp bei Hannover Messe, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.techfieber.de/green/2022/05/26/wasserstoff-flugzeug-apus-hannover-messe/>
- [15] **Pipistrel: Velis Electro**, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023.
<https://www.pipistrel-aircraft.com/products/velis-electro/>

- [16] **Rains, Taylor, 29.09.2022:** One of the newest electric planes of the future just took its first test flight— meet Alice, Business Insider. <https://www.businessinsider.com/eviations-aircraft-of-the-future-just-took-first-flight-alice-2022-9>
- [17] **Wikipedia:** Eviation Alice, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Eviation_Alice
- [18] **ZeroAvia:** With First Flight and More, ZeroAvia Turns a Corner in 2023, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://zeroavia.com/blogs/first-flight-and-more/>
- [19] **ZeroAvia:** Homepage, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.zeroavia.com/>
- [20] **Gloyer-Taylor Laboratories:** Composites, zuletzt aufgerufen am: 11.08.2023. <https://www.gtlcompany.com/what-we-do/composites/>
- [21] **FlyZero (2022):** Our Vision for Zero-Carbon Emission Air Travel. <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-ALL-REP-0004-FlyZero-Our-Vision-for-Zero-Carbon-Emission-Air-Travel.pdf>
- [22] **Airbus (2022):** How hydrogen and other technologies shape the future of aviation. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/07/Wasserstoff-Vollversammlung_Wie-Wasserstoff-und-andere-Technologien-die-Zukunft-der-Luftfahrt-veraendern_06.07.22.pdf
- [23] **dena Deutsche Energie-Agentur (2022):** E-Kerosene for Commercial Aviation. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/STUDY_E-Kerosene_for_Commercial_Aviation.pdf
- [24] **Lufthansa:** 04.10.2021, From test tube to barrel – Lufthansa invests in first industrially produced carbon-neutral, electricity-based kerosene made in Germany [Pressemitteilung]. <https://newsroom.lufthansagroup.com/en/from-test-tube-to-barrel---lufthansa-invests-in-first-industrially-produced-carbon-neutral-electricity-based-kerosene-made-in-germany/>
- [25] **AG Energiebilanzen e.V. (2023):** Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2022. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_Jahresbericht2022_20230413-02_dt-1.pdf
- [26] **DLR und Lufthansa (2011):** Umweltgerechte Flugrouten-Optimierung (UFO). <https://edocs.tib.eu/files/e01fb15/83771561X.pdf>
- [27] **Teoh et al. (2020):** Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption, Environ. Sci. Technol., 54, 5, 2941–2950. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.9b05608>
- [28] **Bundesministerium der Finanzen:** Steuerpflicht von Prämien aus der Treibhausgasminierungs-Quote, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Steuerarten/Einkommensteuer/steuerpflicht-von-praemien-aus-der-thg-quote.html>
- [29] **Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (2021):** Making the EU »Fit for 55« reform agenda a success for climate protection in aviation. https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2022/05/20220210-Positionspapier-Fitfor55_f_English.pdf
- [30] **Neiva et al. (2021):** Study on the taxation of the air transport sector, European Commission – DG Taxation and Customs Union, ED 14102, 2.1. <https://taxation-customs.ec.europa.eu/system/files/2021-07/Aviation-Taxation-Report.pdf>

- [31] **Transport & Environment (2020):** Kerosene taxation: How to implement it in Europe today. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_06_Kerosene_taxation_briefing.pdf
- [32] **Umweltbundesamt (2021):** Umweltschädliche Subventionen in Deutschland, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/umweltschaedliche-subventionen-in-deutschland#umweltschaedliche-subventionen>
- [33] **Plane and Pilot:** Cirrus SR22-G3, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.planeandpilotmag.com/article/cirrus-sr22-g3/>
- [34] **International Energy Agency:** ETP Clean Energy Technology Guide, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?selectedSector=Aviation>
- [35] **Energy.nl:** Fischer-Tropsch fuel production, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://energy.nl/data/fischer-tropsch-fuel-production/>
- [36] **Fasihi, Mahdi; Efimova, Olga und Breyer, Christian (2019):** Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants, Journal of Cleaner Production, 224, 957-980 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- [37] **PtX Lab Lausitz (2023):** PtL-Anlagen in Deutschland. https://ptxlablausitz.de/fileadmin/ptx/Dateien/Demonstrationsanlage/PtL_Anlagen_in_Deutschland_Stand_Juli_2023.pdf
- [38] **Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022):** Verkehr in Zahlen 2022/2023. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?__blob=publicationFile
- [39] **Aura Aero:** ERA, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://aura-aero.com/en/era/#characteristics>
- [40] **Heart Aerospace:** ES-30, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://heartaerospace.com/es-30/>
- [41] **SCYLAX:** E10, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.scylax.eu/the-scylax-e10>
- [42] **FlyZero, Aerospace Technology Institute (2022):** Zero-Carbon Emission Aircraft Concepts. <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-AIN-REP-0007-FlyZero-Zero-Carbon-Emission-Aircraft-Concepts.pdf>
- [43] **Bundesregierung (2021):** PtL-Roadmap – Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile
- [44] **Energy.nl:** CO-production via reverse water gas shift, zuletzt aufgerufen am: 06.09.2023. <https://energy.nl/data/co-production-rwgs/>

Beteiligte Institutionen



acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

www.acatech.de



DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Die DECHEMA ist das kompetente Netzwerk für chemische Technik und Biotechnologie in Deutschland. Sie vertritt als gemeinnützige Fachgesellschaft diese Gebiete in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Die DECHEMA fördert den technisch-wissenschaftlichen Austausch von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen, Organisationen und Generationen und bündelt das Know-how von über 5.500 Einzel- und Fördermitgliedern. Sie engagiert sich in (inter-)nationalen technischen Expertengremien und ist in öffentlich geförderten F&E-Projekten sowie der Auftragsforschung aktiv. Dabei koordiniert sie große Forschungsverbünde und ist in verschiedenen Fördermaßnahmen für die Begleitforschung verantwortlich.

www.dechema.de

Autor*innen

- > **Dr. Jens Artz**
Teamleiter DECHEMA
- > **Dr. Benjamin Baur**
Referent Stakeholder-Dialog acatech
- > **Marie Biegel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Dr. Dominik Blaumeiser**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Jasper Eitze**
Teamleiter acatech
- > **Dr. Alexandra Göbel**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Tamara Hanstein**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Christopher Hecht**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **Thomas Hild**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Florian Hölting**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **David Knichel**
Wissenschaftlicher Referent acatech
- > **Valerie Kwan**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Jördis Lemke**
Teamassistentin acatech
- > **Dr. Michaela Löffler**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Andrea Lübcke**
Teamleiterin acatech
- > **Alena Müller**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Lars Ole Reimer**
Redakteur Multimedia acatech
- > **Dr. Damien Rolland**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Anna Runkel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Emre Yildirim**
Studentische Hilfskraft acatech

Ansprechpartner*innen acatech

- > **Jasper Eitze**
eitze@acatech.de
- > **Dr. Andrea Lübcke**
luebcke@acatech.de

Ansprechpartner*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**
jens.artz@dechema.de
- > **Dr. Michaela Löffler**
michaela.loeffler@dechema.de



WASSERSTOFF KOMPASS

IMPRESSUM

Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft

Herausgebende

**acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.**

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0) 89 / 52 03 09-0
F +49 (0) 89 / 52 03 09-900
info@acatech.de
www.acatech.de

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
T +49 (0) 69 / 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums / acatech

Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather,
Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
Vorstand i.S.v. § 26 BGB:
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz, DECHEMA

Redaktion

Jasper Eitze, Dr. Andrea Lübcke / acatech
Dr. Jens Artz, Dr. Michaela Löffler / DECHEMA

Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH, www.lindner-steffen.de

Bildnachweis

AdobeStock: AA+W

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie dem
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens
(FKZ 03EWT002).

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im März 2024 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-245-8

www.wasserstoff-kompass.de

Empfohlene Zitierweise

acatech, DECHEMA (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft,
Frankfurt am Main 2023, ISBN: 978-3-89746-245-8
<https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#>



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages