

Wasserstoff in der Luftfahrt

Brandenburger Wasserstofftag 2025

Dr.-Ing. Frank Arnold

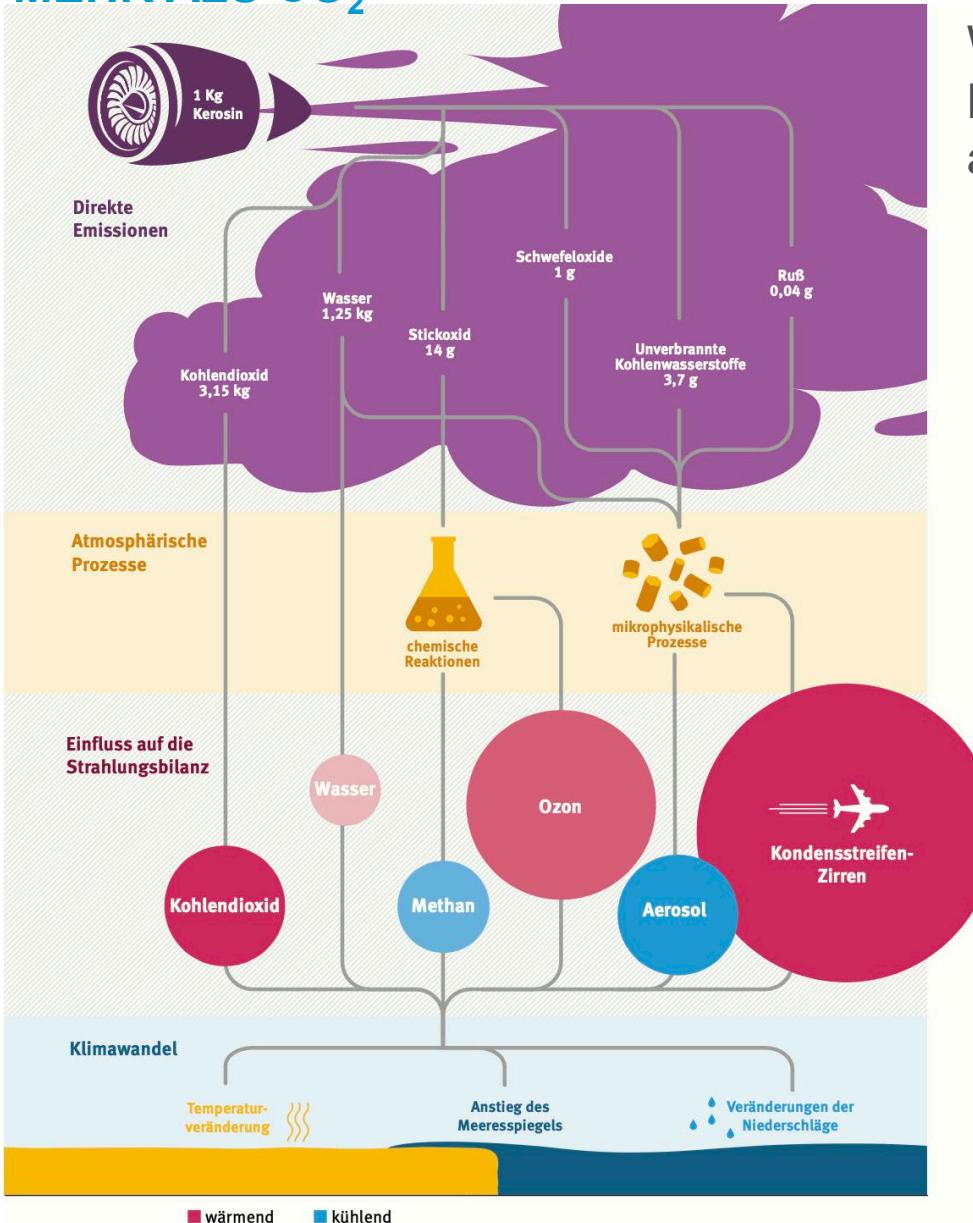
chesco ZWE

(zentrale wissenschaftliche Einrichtung BTU)

Forschungskoordinator

LUFTFAHRT UND KLIMAWANDEL

MEHR ALS CO₂



Center for Hybrid
Electric Systems
Cottbus

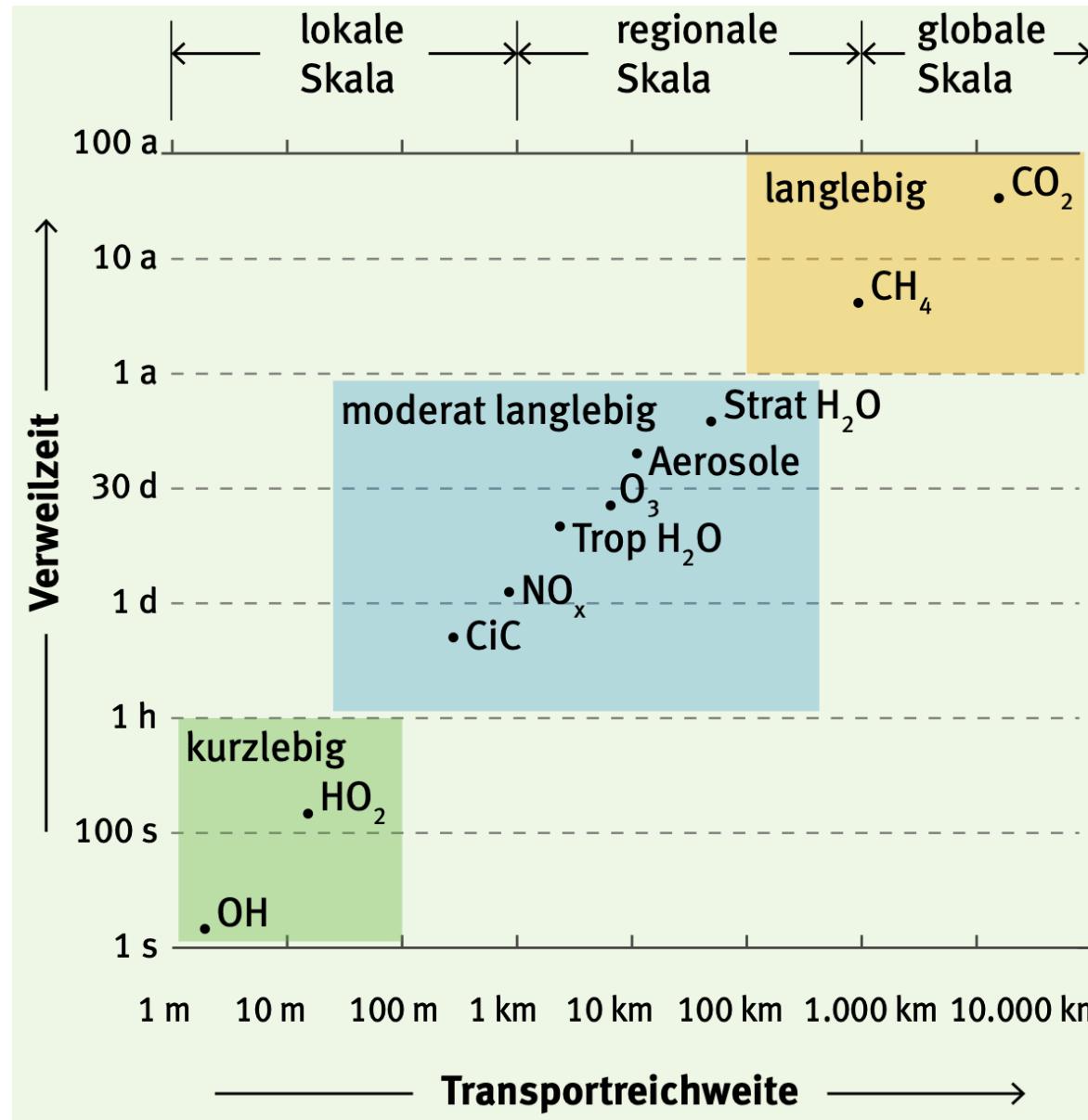


Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Wirkung der Luftverkehrsemissionen auf das Klima

Das Zusammenspiel aller Wirkungsmechanismen ist ein komplizierter Prozess und muss noch weiter erforscht werden.

Nicht-CO₂-Effekte spielen im Luftverkehr aufgrund der Höhe eine größere Rolle als am Boden.

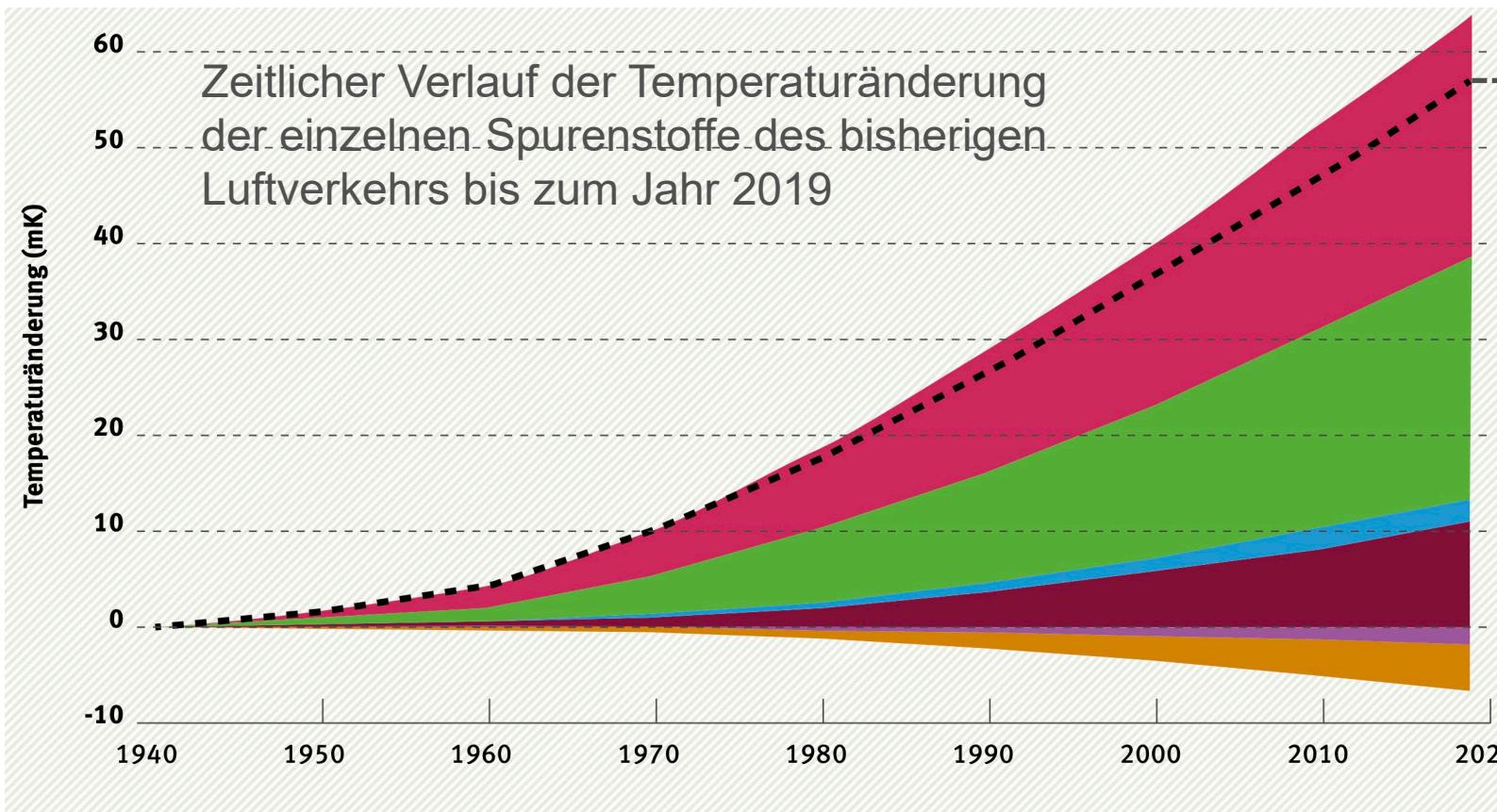


Atmosphärische Verweilzeit
und Transportreichweite von
Spurenstoffen

Es dauert ca. 80 Jahre, bis **die Hälfte** des
ausgestoßenen CO₂ wieder abgebaut ist.

Entsprechend sind die Langzeitwirkungen,
was bei Vorhersagen berücksichtigt werden
muss.

Bis sich das in der Höhe ausgestoßene CO₂ bis
zum Boden verteilt hat und z.B. über CCS
entnommen werden kann, ist es klimawirksam.



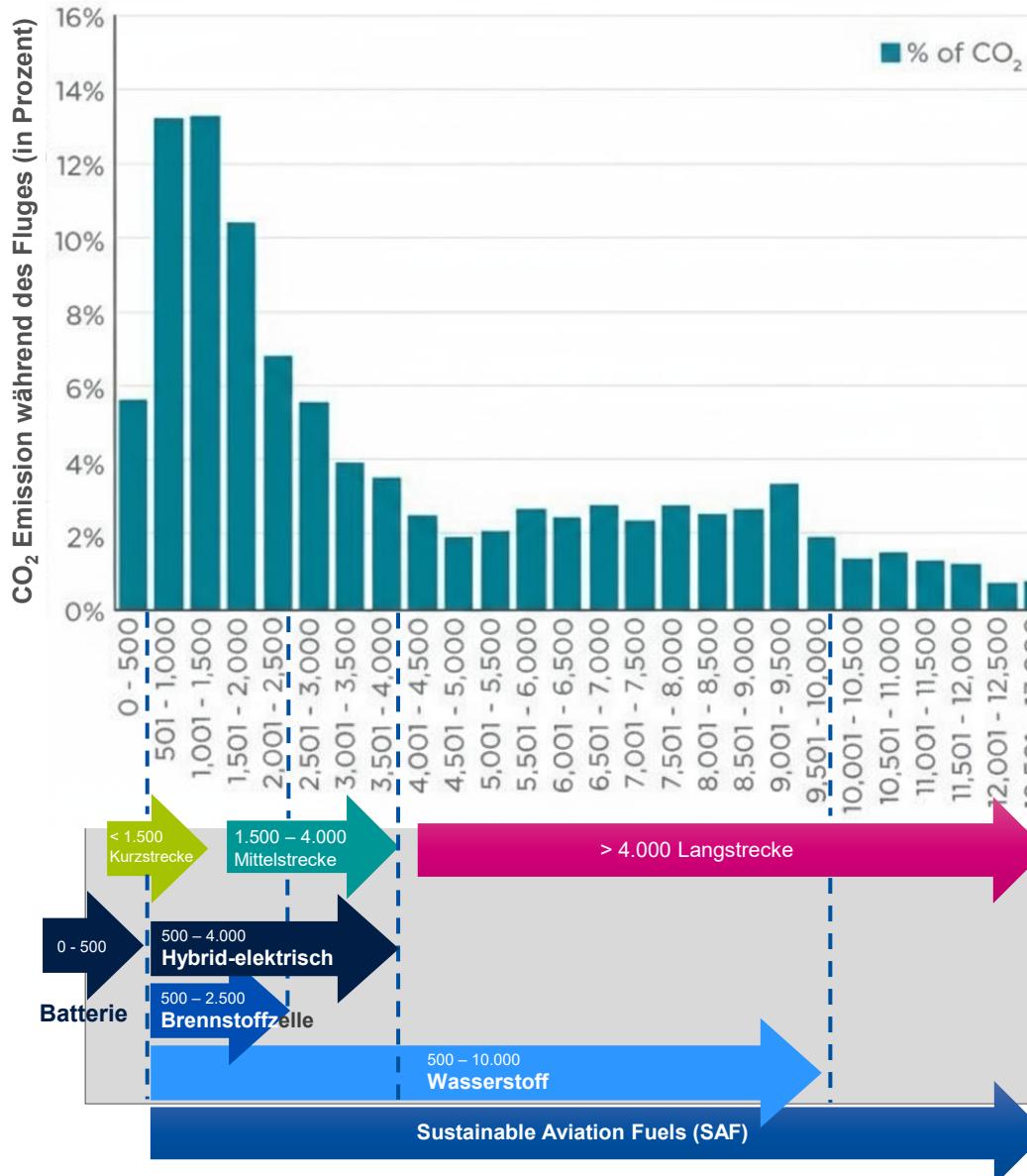
0,057 K vom Luftverkehr,
1,1 K vom Menschen verursacht
5 % der 2019 vom Menschen
verursachten Erwärmung in Bodennähe durch den
Luftverkehr verursacht

■ CiC Zirren, Kondensstreifen
■ O₃ Ozon
■ H₂O Wasserdampf
■ CO₂ Kohlen-dioxid
■ PMO Langzeit-Ozon
■ CH₄ Methan

- - - - - Summe aller Effekte

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

FLUGZEUGE UND ANTRIEBE - MISSIONEN



CO₂ Emissionen bei Passagierflügen nach Flugdistanz im Jahr 2018

Bei der Verbrennung von 1 kg Kerosin entstehen rund 3 kg CO₂.

Kurz- und Mittelstreckenflüge bis 4.000 km machen ca. $\frac{2}{3}$ des Treibstoffverbrauchs und der damit verbundenen CO₂ Emissionen aus.

Dieser Bereich könnte langfristig mit hybrid-elektrischen Antriebstechnologien abgedeckt werden, die die CO₂ Emissionen insgesamt signifikant senken. Darüber hinaus könnte Wasserstoff auch direkt verbrannt werden.

Bio-Fuel

Aus verfügbaren Pflanzen, Fetten, Abfällen
Weitere Herstellung in Konkurrenz
zu Lebensmittelproduktion und Landnutzung

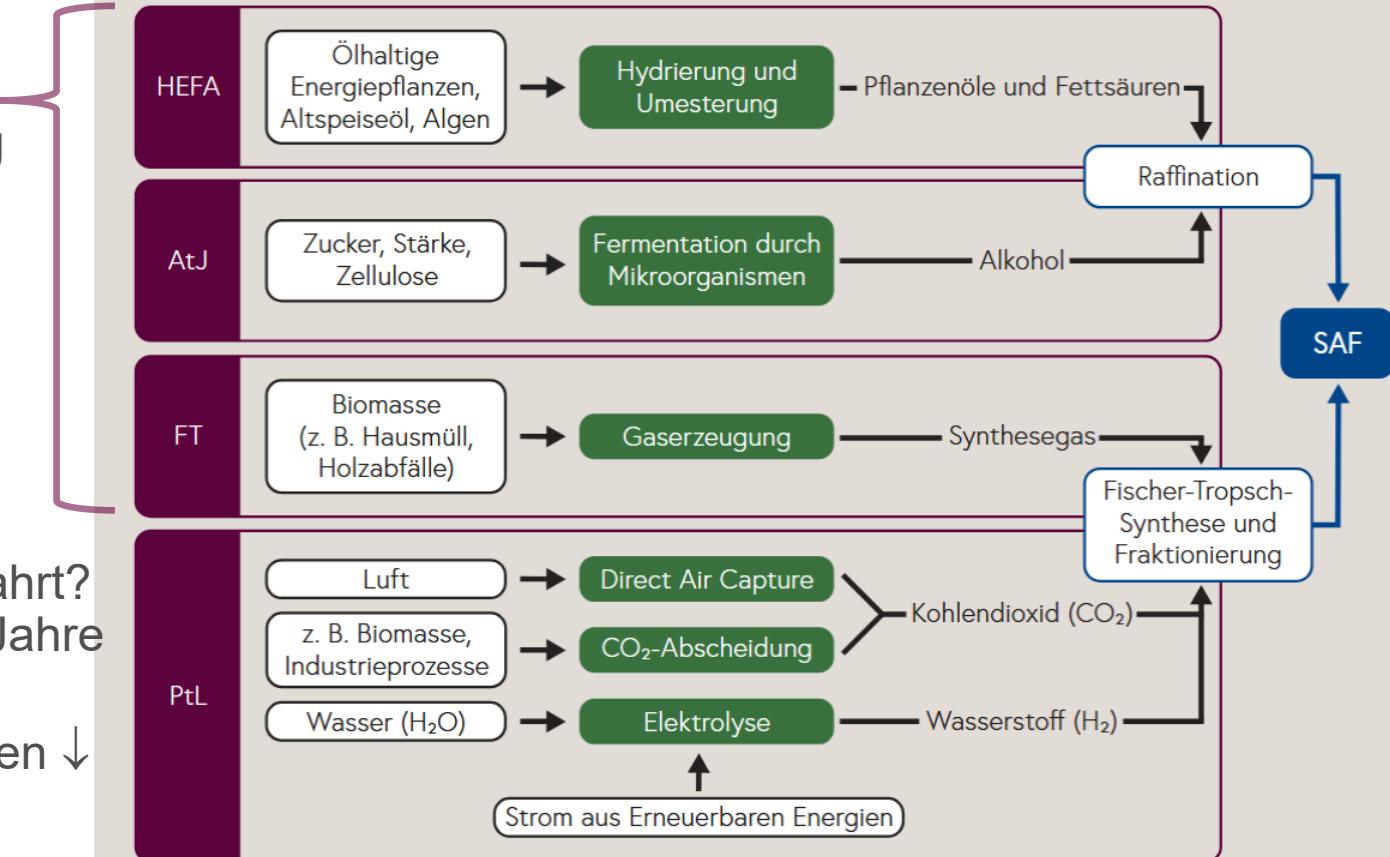
Power to Liquid (PtL) / eFuel

CO_2 'recycling' / CCS → klimaneutrale Luftfahrt?
ABER Höhe → Boden, Verweildauer > 100 Jahre
Spez. Chem. Zusammensetzung →
Ruß ↓, Kondensstreifen ↓

Optimierte Verbrennung → NO_x ↓

Kosten ~ 3-4 x fossiles Kerosin, 2 x Tickets heute
 H_2 ist Zwischenprodukt

Übersicht der bedeutendsten Herstellungspfade für SAF



**Verringerung des
Treibstoffverbrauchs nötig!**

SAF als Brückentechnologie

WASSERSTOFF H₂ – DIREKTE ANWENDUNGEN

und technische Herausforderungen / Chancen – kein CO₂

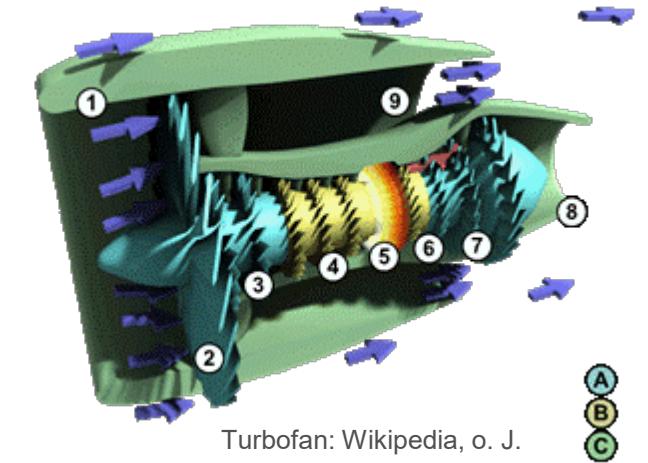
Direkte Verbrennung in modifizierten Verbrennungskraftmaschinen

Höhere Verbrennungstemperatur → NO_x ↑ → angepasste Verbrennung

Reduktion auf 50-80%

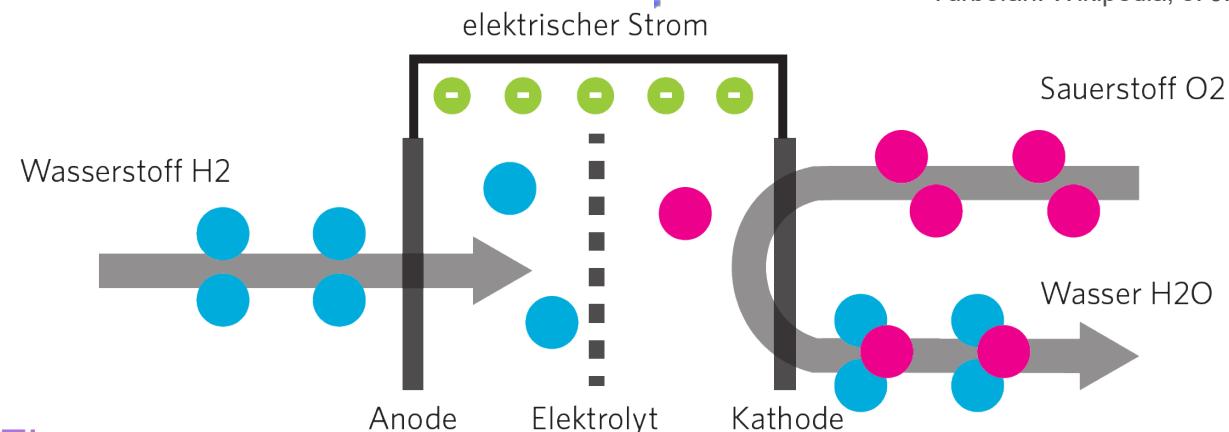
Mehr Wasserdampf im Abgasstrahl → ggf. angepasste Flugrouten

Weniger Aerosole, keine Rußbildung, 30-50% weniger Kondensstreifen



Brennstoffzellen

Frühere Entwicklungsphase in der Luftfahrt



Generelle Aspekte

Integration des Treibstoff- und Tanksystems ins Flugzeug

Wasserstoffversprödung, Oxidation, Auswirkungen auf Beschichtungen

Datenlage für Sicherheit und Zertifizierung

Das kleinste chemische Element

Speicherung

Gasförmig (Druckbehälter), 42 kg/m³ at 700 bar

Kryogen (-253°C), 70.8 kg/m³

Gebunden, z.B. in Metallhydriden

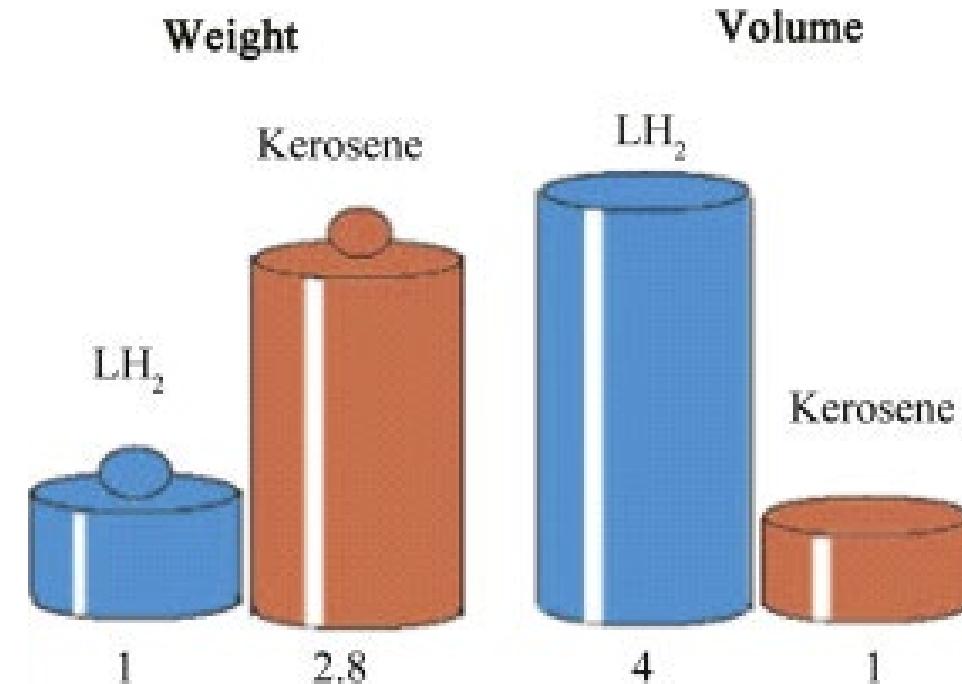
z.B. Lithiumhydrid, Lithiumaluminiumhydrid,
Natriumborhydrid

Höhere Energiedichte pro kg als Kerosin (gravimetrisch)

Kerosin ist bei gleichem Energiegehalt 2,8 mal schwerer als flüssiger Wasserstoff LH₂

Deutlich höheres Volumen als Kerosin (volumetrisch)

Flüssiger Wasserstoff braucht 4 mal mehr Volumen als Kerosin bei gleichem Energiegehalt



Khandelwal et al. (2013), S. 48.

V.a.

Großflugzeuge /
Commuter

Nutzen / Anwendbarkeit:

Hoch

Moderat

Derzeit noch ungenügend

EASA	CO ₂ emissions	NOx emissions	Contrails	Fuel Volume	Fuel + Propulsion System Mass	Supply chain / infrastructure
Liquid H₂ fuel cell <i>H₂ generates electricity via an electrochemical reaction between hydrogen and oxygen, used for thrust.</i>						
Liquid H₂ combustion <i>H₂ is burned in a modified gas-turbine engine to generate thrust.</i>						
Gaseous H₂ fuel cell <i>H₂ generates electricity via an electrochemical reaction between hydrogen and oxygen, used for thrust.</i>						
Gaseous H₂ combustion <i>H₂ is burned in a modified gas-turbine engine to generate thrust.</i>						

EASA, o. J.

Anmerkung zu **Commuter / Leichte Motorflugzeuge**: auch gasförmiger H₂ ist derzeit eine Option

Industriestrategien (Bsp. Airbus ZEROe)

AIRBUS

Press Release

Airbus showcases hydrogen aircraft technologies during its 2025 Airbus Summit

Toulouse, 25 March 2025 – During the 2025 Airbus Summit, Airbus provided an update on its roadmap to pioneer the future of commercial aviation in the decades to come, outlining plans to prepare a next-generation single-aisle aircraft that could enter service in the second half of the 2030s, as well as its revised **ZEROe** project roadmap to mature the technologies associated with hydrogen-powered flight.

At the Summit, **Airbus reconfirmed its commitment to bring to market a commercially viable hydrogen aircraft** and presented some of the key technology building blocks that will enable the advent of a fully electric, fuel-cell powered commercial aircraft – a pathway which stands out as the most promising, following years of research into hydrogen aviation.

Airbus Head of Future Programmes Bruno Fichefeux says, **"Hydrogen is at the heart of our commitment to decarbonise aviation. While we've adjusted our roadmap, our dedication to hydrogen-powered flight is unwavering. Just as we saw in the automotive sector, fully electric aircraft powered by hydrogen fuel cells have the potential in the longer term to revolutionise air transport for the better, complementing the sustainable aviation fuel pathway."**

These technologies were notably showcased as part of a new, notional concept of a hydrogen aircraft powered by four, 2-megawatt electric propulsion engines, each driven by a fuel cell system that converts hydrogen and oxygen into electrical energy. The four fuel cell systems would be supplied via two liquid hydrogen tanks. This concept will continue to be refined over the coming years as additional tests will help mature the technologies associated with hydrogen storage and distribution, as well as with the propulsion systems.

Airbus Head of the **ZEROe** Project, Glenn Llewellyn adds, **"Over the last five years, we have explored multiple hydrogen-propulsion concepts, before down-selecting this fully electric concept. We are confident it could provide the necessary power density for a hydrogen-powered commercial aircraft and could evolve as we mature the technology. In the coming years, we will concentrate on advancing the storage, distribution and propulsion systems, while also advocating for the regulatory framework needed to ensure these aircraft can take flight."**



Center for Hybrid
Electric Systems
Cottbus



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg



ZEROe fully electric hydrogen-powered four pod aircraft

Foto: © Airbus SAS 2025

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-03-airbus-showcases-hydrogen-aircraft-technologies-during-its-2025>

DEMONSTRATORPROJEKTE – Bsp. in D



Hamburg Aviation | Foto: © Hamburg Airport

Betankung und Befüllung mit flüssigem Wasserstoff
Kühlung, Isolation und Arbeitsschutz
Entweichung von Wasserstoffgas („Boil-Off“)
Inertisierung des gespeicherten Wasserstoffs
Digitaler Zwilling

Gefördert durch die Freie und Hansestadt Hamburg



Center for Hybrid
Electric Systems
Cottbus



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

UpLift Dornier 328-100: D-CUPL



Foto: © DLR (CC BY-NC-ND 3.0)

fliegender Prüfstand
für klimaverträgliche Luftfahrttechnologien,
z.B. vollsynthetische Kraftstoffe oder Wasserstoff
voraussichtliche Inbetriebnahme Sommer 2026

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

mit H2-Brennstoffzellenantrieb

APUS
jetzt Clean Aviation Technologies GmbH (CAT)

- APUS i-2 (4 Passagiere)
- Roll-out September 2024



Fotos: © Apus



NEX Aero

- Schwerlastdrohnen
- weltweit erster Hover-Flug eines H₂-angetriebenen VTOLs mit 4m Spannweite (50%-skalierter Prototyp), Sep 2023



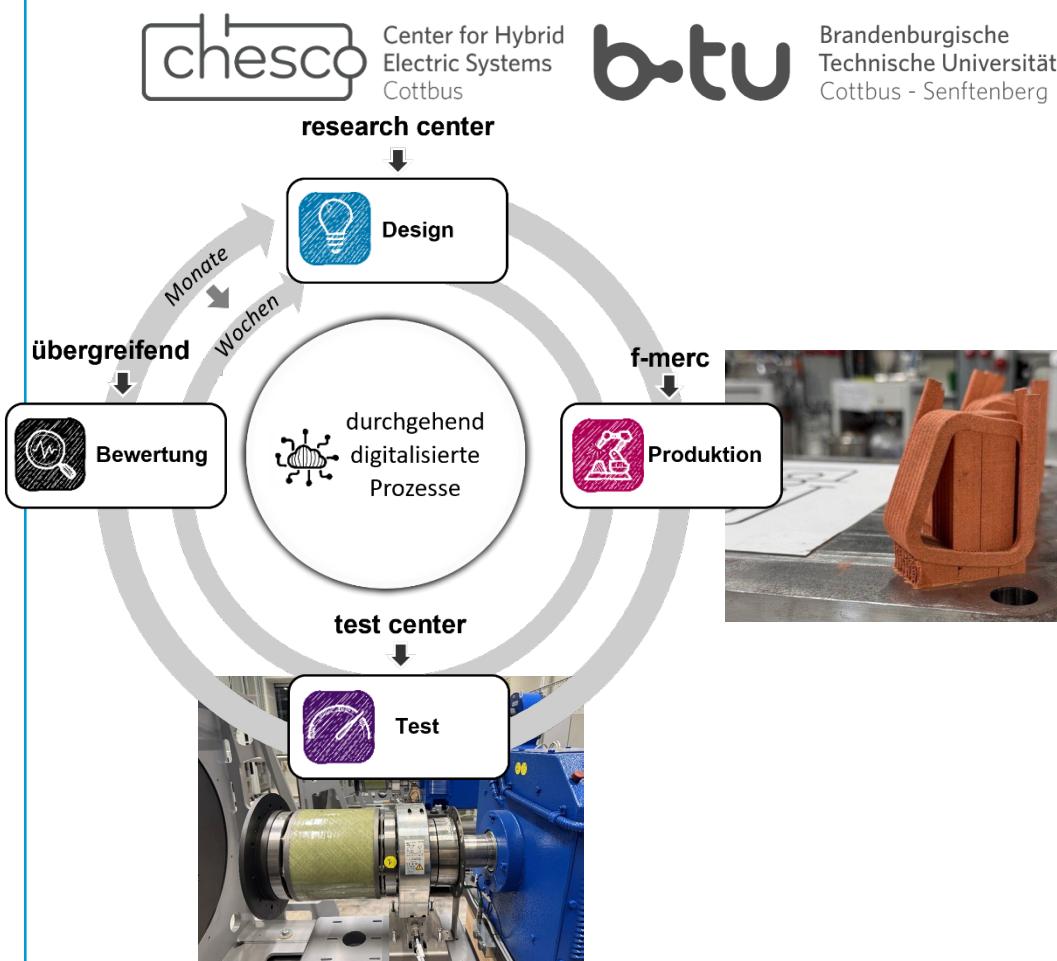
LUFTFAHRTFORSCHUNG IN COTTBUS



Center for Hybrid
Electric Systems
Cottbus



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg



Institut
für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe

System- und Komponentenauslegung
Test
Methodenentwicklung

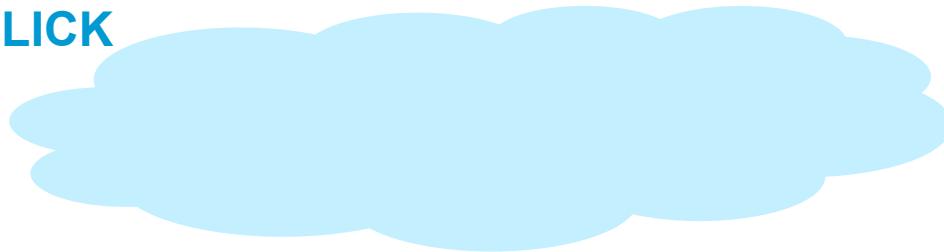
IN REGIONALEM NETZWERK

Wissenschafts- und
Wirtschaftsplattform

Opportunities through Science and Technology

<https://ost4aviation.de/>

Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg



unsere Region als Treiber der wasserstoffbetriebenen bzw. elektrifizierten Luftfahrt?

Luftfahrtkompetenzen und -infrastruktur

kleine, flexible Flugversuchsträger zum schnellen Erfahrungsaufbau

Energieregion und –kompetenz

regenerative Energien

ZUSAMMENFASSUNG

Klimawandel erfordert alternative Treibstoffe

Sustainable Aviation Fuels SAF (Brückentechnologie)

Verfügbarkeit von Ökostrom, Anlagenkapazität, Preis

Wasserstoff

Verfügbarkeit (Ökostrom), Betankung, Sicherheit, Preis usw.

Leichte, hochisolierte Wasserstofftanks für flüssigen Wasserstoff / leichte Drucktanks

Bodeninfrastruktur zur Verflüssigung oder H₂-Speicherung

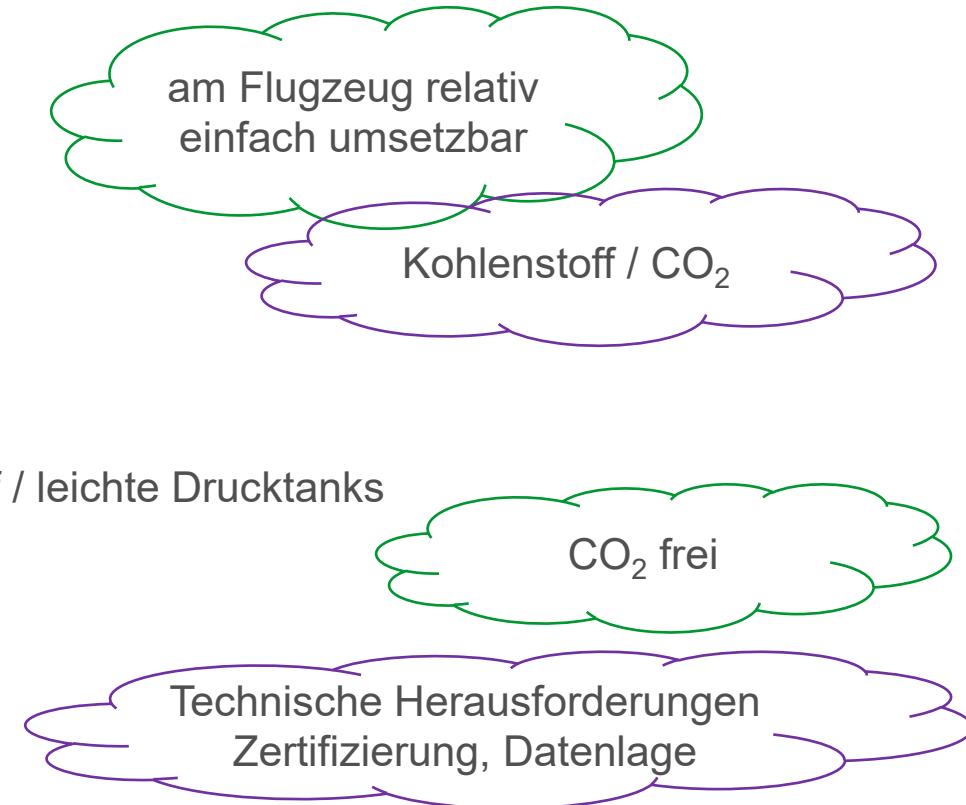
Materialien, Beschichtungen für H₂-Anwendungen

Direktverbrennung oder

Brennstoffzellen mit elektrischen Antrieben

Elektromotoren mit sehr hoher Leistungsdichte, maximalem Wirkungsgrad, minimalem Gewicht

Hochleistungs-Brennstoffzellen (MW-Bereich)



VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABBILDUNGEN



Center for Hybrid
Electric Systems
Cottbus



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Folie 2: Umweltbundesamt (UBA) Deutschland, in: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Klimawirkung des Luftverkehrs. Wissenschaftlicher Kenntnisstand, Entwicklungen und Maßnahmen*. Dessau-Roßlau, 2023, S. 13, eigene Darstellung DLR.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_klimawirkung_des_luftverkehrs_0.pdf (22.10.2025).

Folie 3: Umweltbundesamt (UBA) Deutschland, in: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Klimawirkung des Luftverkehrs. Wissenschaftlicher Kenntnisstand, Entwicklungen und Maßnahmen*. Dessau-Roßlau, 2023, S. 20.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_klimawirkung_des_luftverkehrs_0.pdf (22.10.2025).

Folie 4: Umweltbundesamt (UBA) Deutschland, in: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Klimawirkung des Luftverkehrs. Wissenschaftlicher Kenntnisstand, Entwicklungen und Maßnahmen*. Dessau-Roßlau, 2023, S. 23, eigene Darstellung DLR.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_klimawirkung_des_luftverkehrs_0.pdf (22.10.2025).

Folie 5: Vgl. Brandon Graver, Kevin Zhang, Dan Rutherford, 2019. *CO₂ emissions from commercial aviation, 2018*, S. 8. Working Paper, in: International Council on Clean Transportation (Hrsg.), <https://theicct.org/publication/co2-emissions-from-commercial-aviation-2018/> (22.10.2025).

https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf (22.10.2025).

Folie 6: Umweltbundesamt (UBA) Österreich, in: BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hrsg.): *SAF-Roadmap. Strategie zur Einführung nachhaltiger Kraftstoffe im Flugverkehr in und aus Österreich*. Wien, 2024, S. 23, auf Basis von Klimaschutz-Portal.aero, o. J.

<https://open4aviation.at/resources/pdf/publikationen/bmk-saf-roadmap-ua.pdf> (22.10.2025).

Folie 8: Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle, Center for Hybrid Electric Systems Cottbus (chesco), 2024, angelehnt an [sigens.de](https://sigens.de/was-ist-eine-brennstoffzelle/), o. J.

<https://sigens.de/was-ist-eine-brennstoffzelle/> (22.10.2025).

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABBILDUNGEN



Center for Hybrid
Electric Systems
Cottbus



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Folie 8: Schematische Darstellung einer Flugzeugturbine, Zephyris at English Wikipedia. CC BY-SA 3.0.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbofan3_Labelled.gif (22.10.2025).

Folie 9: Bhupendra Khandelwal, Adam Karakurt, Paulas R. Sekaran, Vishal Sethi, Riti Singh, 2013. *Hydrogen powered aircraft: The future of air transport*, Progress in Aerospace Sciences, Volume 60, S. 48.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042112000887> (22.10.2025).

Folie 10: European Union Aviation Safety Agency (EASA), o. J. *Hydrogen and its potential in aviation*.

<https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/hydrogen-and-its-potential-aviation> (22.10.2025).

Folie 11: Pressemitteilung Airbus, 2025: Airbus showcases hydrogen aircraft technologies during its 2025 Airbus Summit. Airbus SAS 2025, *ZEROe fully electric hydrogen-powered four pod aircraft*. <https://mediagallery.airbus.com/share/bzz8l95yl/element/690336> (22.10.2025).

Folie 12: Pressemitteilung Hamburg Airport, 2022: Ein zweites Flugzeugleben im Dienst der Wissenschaft – ein Airbus A320 wird Reallabor für Wasserstofftechnologie in Hamburg. *Das Hydrogen Aviation Lab von Lufthansa Technik, DLR, ZAL und Hamburg Airport nimmt Form an*.

<https://www.hamburg-airport.de/de/unternehmen/presse/hydrogen-aviation-lab-61610> (22.10.2025).

Folie 12: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), o. J. *Fliegender Prüfstand für Wasserstoff-Technologien: UpLift Dornier 328-100: D-CUPL*. DLR (CC BY-NC-ND 3.0). <https://www.dlr.de/de/forschung-und-transfer/forschungsinfrastruktur/dlr-forschungsflotte/uplift-dornier-328-100> (22.10.2025).

Folie 13: Apus Group, 2024. Official Roll-out of the Apus i-2. <https://group.apus-aero.com/2024/09/06/official-roll-out-of-the-apus-i-2/> (22.10.2025).

Folie 13: NEX Aero, 2023. <https://www.nex.aero/> (22.10.2025).

Interessiert?



Center for Hybrid
Electric Systems
Cottbus



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg



Kontakt

chesco@b-tu.de
www.btu.de/chesco

Supported by:



The
Federal Government



on the basis of a decision
by the German Bundestag

This project is promoted by the German government with funds from the Coal Regions Investment Act and co-financed with funds from the state of Brandenburg