

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

AH2AS

Austrian Hydrogen Aviation Study

Finanziert im Rahmen des Programms
TAKE OFF durch das BMK

Version 14.10.2022



Dieses Dokument gibt die Ergebnisse einer faktenbasierten Studie wieder, die von A3PS – Austrian Association for Advanced Propulsion Systems koordiniert und gemeinsam mit den Partnern Diamond Aircraft und FH Joanneum – Studiengang für Flugzeugtechnik im Auftrag des Bundesministeriums für Klima, Energie, Umwelt, Mobilität, Technologie und Innovation (BMK) erstellt wurde.

Diese Studie wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im gegenständlichen Take-off-Programm gefördert.

Die Erstellung der Austrian Hydrogen Aviation Study (AH2AS) erfolgte in Kollaboration mit den wesentlichen Akteuren aus Forschung und Industrie sowie im Abgleich mit dem BMK und der FFG.

Die folgenden Unternehmen und Organisationen haben im Rahmen von Befragungen und Experteninterviews Inputs geliefert und zu dieser Studie beigetragen: AAI Austrian Aeronautics, Air Liquide, AC Styria, AIT -AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Austrian Airlines, Austro Control, Austro Engine, Automobil Cluster OÖ, AVL, BDI, BEST, BMK, Combustion Bay One, Diamond Aircraft, Easyjet Europa, FACC, FH Joanneum, Flughafen Graz, Flughafen Klagenfurt, Flughafen Linz, Flughafen Salzburg, Flughafen Wien Schwechat, Flugschule Watschinger (Flughafen Wien), HIWItronics, HyCentA – Hydrogen Center Austria, ICT Impact GmbH, IESTA, Joanneum Research, LCM – Linz Center of Mechatronics, Linde, Magna Aerospace, MIBA, MU Leoben – Lehrstuhl für Physikalische Chemie, Neuböck Innovative Engineering, OMV, Österr. Luftfahrtverband, Pankl Aerospace Systems Europe GmbH, PBX GmbH, RIC (Regionales Innovations Centrum), Robert Bosch AG, Rosenbauer, ROTAX BRP, Schiebel Elektronische Geraete GmbH, Shell, Test Fuchs Aerospace, TU Graz, TU Wien, Virtual Vehicle Research Center

Bei der Erstellung der Studie wurde auf eine Ausgewogenheit der eingebundenen Unternehmen und Institutionen aus Produzenten, Betreibern, Infrastrukturanbietern, Technologie & Wissenschaft, Verwaltung und NPOs geachtet.

Die in diesem Dokument enthaltenen Informationen und Schlussfolgerungen spiegeln die kollektive Sichtweise der Beteiligten im Hinblick auf die im Rahmen der Studie durchgeführten Analyse und nicht die der einzelnen Unternehmen oder Organisationen. Alle Informationen und Schlussfolgerungen in diesem Dokument dienen nur zu Referenzzwecken und sind nicht Ersatz für professionelle Beratung oder Beurteilung in bestimmten Fällen.

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
A-1030 Wien, Radetzkystraße 2

Programverantwortung
TAKE OFF Abteilung III/14 Mobilitäts-
und Verkehrstechnologien
DI (FH) Ingrid Kernstock, MA
Tel.: +43 (0)1 71162- 652119
E-Mail: ingrid.kernstock@bmk.gv.at
DI Theresa Bauer, BSc
Tel.: +43 (0)1 71162- 653210
E-Mail: theresa.bauer@bmk.gv.at
Website: www.bmk.gv.at; www.open4aviation.at;
www.aeronautics.at

Programmmanagement TAKE OFF
Österreichische Forschungsförderungs-
gesellschaft mbh
A-1090 Wien, Sensengasse 1
DI Vera Eichberger Tel: +43 (0)5 7755- 5062
vera.eichberger@ffg.at
Website: ffg.att/takeoff

Für den Inhalt verantwortliche Autorinnen
und Autoren:

Autoren

DI Dr. Michael Nöst, MBA
A3PS, CEO, Member of the Executive Board

Dr. Holger Friehmelt
FH Joanneum

Alexander Hauthaler, Raphael Kölbl
Diamond Aircraft

DI Michael Friedmann
ICT Impact GmbH

Dr. Andreas Ottitsch, Dr. Gerhard Burian
A3PS Consultants

Dr. Astrid Wolfbeisser, Anja Rautnig, MMSc.
A3PS

Copyright und Haftung

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundes oder der Autorinnen und Autoren ausgeschlossen ist. Rechtsausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorinnen und Autoren dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen Ihrer Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an i4@bmk.gv.at.

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

AH2AS

Austrian Hydrogen Aviation Study

Österreichische Wasserstoff Flugstudie
finanziert im Rahmen des
Programms TAKE OFF durch das BMK

Wien, Juli 2022



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	9
1.1	Aufgabenstellung der Studie für Österreich	9
1.2	Struktur des Dokumentes	10
1.3	Methodik.....	10
1.3.1	Interviewstruktur	11
	Abbildungs- und Quellenverzeichnis	11
2	State of the Art.....	13
2.1	Einleitung.....	13
2.1.1	Wissenschaftliche Problemstellungen.....	13
2.2	Kraftstoffverbrauch der Luftfahrt.....	14
2.2.1	Kerosinverbrauch	14
2.3	Demonstratoren im internationalen Umfeld	15
2.3.1	Historische Anfänge.....	15
2.3.2	Jüngere Entwicklungen.....	16
2.4	Technische Optionen für Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt.....	18
2.4.1	Brennstoffzelle.....	18
2.4.1.1	Brennstoffzellentechnologie	18
2.4.1.2	Flugsysteme	19
2.4.1.3	Einsatz in Hilfsaggregaten	21
2.4.2	Wasserstoffturbinen.....	21
2.4.2.1	Turbinentechnologie	21
2.4.3	Synfuels.....	21
2.4.4	Infrastruktur und Bodensysteme	21
2.4.4.1	Wasserstoffinfrastruktur	21
2.4.5	Wasserstoffproduktion	22
2.4.6	Wasserstoffspeicherung.....	25
2.4.6.1	Speicherungsoptionen.....	25
2.4.6.2	Komprimierung für Speicherung im gasförmigen Zustand	27
2.4.6.3	Verflüssigung von Wasserstoff	28
2.4.6.4	Vergleich des Energieaufwands und finalen Energiegehalts bei Komprimierung oder Verflüssigung	28
2.5	Gesetzliche Themen und Normen.....	28
2.5.1	Entwicklungen auf EU-Ebene – Novelle RED II	28
2.5.2	Situation in Österreich.....	29

2.5.3	Normen, Zertifizierungen.....	29
	Abbildungs- und Quellenverzeichnis	30
3	Identifikation von technologischen Herausforderungen und technologischen Potenzialen	35
3.1	Technologische Herausforderungen und Rahmenbedingungen	35
3.1.1	Versorgung von Flughäfen und bodenseitige Speicherung von Wasserstoff	35
3.1.2	Betankung der Luftfahrzeuge	36
3.1.3	Speicherung im Luftfahrzeug.....	36
3.1.3.1	Isolation	36
3.1.3.2	Tankanordnung und Geometrie	37
3.1.3.3	Masse des Tanksystems	37
3.1.4	Wasserstoffantrieb von Luftfahrzeugen.....	38
3.1.4.1	Herausforderungen von H ₂ -Strahltriebwerken	38
3.1.4.2	Herausforderungen von Brennstoffzellen	38
3.2	Identifikation, Qualifizierung und Quantifizierung zukünftiger technologischer Potenziale.....	39
3.2.1	Potenziale in der Versorgung, Betankung und Infrastruktur	39
3.2.2	Potenziale in der Speicherung im Luftfahrzeug.....	40
3.2.3	Potenziale im Antrieb	40
3.2.3.1	Potenzial von H ₂ -Turbinen.....	41
3.2.3.2	Potenziale von Brennstoffzellen	42
3.2.4	Potenziale zukünftiger Gesamtsysteme.....	42
3.2.4.1	Flächenflugzeuge	42
3.2.4.2	UAS, VTOL, Helikopter	45
3.3	Zukünftiges Forschungs- und Entwicklungspotenzial.....	46
3.3.1	Technologiereifegrad von Schlüssel-Systemen (TRL)	46
3.3.1.1	Reifegrad der Technik für Versorgung von Flughäfen und Speicherung	47
3.3.1.2	Reifegrad Speicherung im Luftfahrzeug.....	47
3.3.1.3	Reifegrad der Wasserstoffantriebe	47
	Abbildungs- und Quellenverzeichnis	49

4	Wirtschaftliche Herausforderungen und Rahmenbedingungen	53
4.1	Wertschöpfungskette von Wasserstoff in der Luftfahrt in Österreich	53
4.1.1	Wasserstoffproduktion	53
4.1.2	Wasserstoffspeicherung & Transport.....	53
4.1.3	Herausforderungen bzgl. Luftfahrzeuge mit H ₂ - Antrieb	54
4.1.4	Herausforderungen bzgl. H ₂ -Flughafeninfrastruktur.....	54
4.2	Marktpotenziale unterschiedlicher Technologien	54
4.2.1	H ₂ als klimaneutraler Energieträger	54
4.2.2	Wirtschaftliches Potenzial H ₂ basierender Flugzeuge, Komponenten und Infrastruktur, den Energieträgern gegenübergestellt	58
4.2.3	Preisentwicklung und -bewertung von Wasserstoff hinsichtlich des Einsatzes im Flugbereich	60
4.2.4	Aktuelle Projektlandschaft in Österreich	60
4.2.5	Zusammenfassende PESTEL-Analyse	61
4.2.6	Anliegen der österreichischen Unternehmen	63
	Abbildungs- und Quellenverzeichnis	64
5	Evaluierung und Empfehlungen	67
5.1	Empfehlungen: Weiterentwicklung der H₂-betriebenen Luftfahrt.....	67
5.1.1	Dringender Handlungsbedarf	67
5.1.2	Forschungs- und Innovations-Roadmap	68
5.2	Schlussbetrachtung und Ausblick	75
	Abbildungs- und Quellenverzeichnis	76
	Abkürzungsverzeichnis	77

1 Einführung



1 Einführung

Im Programm Flight Path 2050 der Europäischen Union (EU) hat sich die europäische Luftfahrtindustrie das Ziel gesetzt, bis Mitte des 21. Jahrhunderts CO₂-Emissionen um 50 % und NO_x-Emissionen um 90 % zu reduzieren [1.1]. Um das Ziel der Reduktion des CO₂-Fußabdrucks zu erreichen, müssen alternative Antriebstechnologie und nachhaltige Treibstoffe entwickelt werden [1.2].

Während Bio- und synthetische Treibstoffe gewisse Potenziale bieten, unter Weiterentwicklung aktueller Antriebstechnologie klimaschädliche Emissionen zumindest zu reduzieren und für kleinere Luftfahrzeuge oder auch auf Kurzstrecken realistische Anwendungsbereiche bestehen, bietet die Wasserstofftechnologie demgegenüber die folgenden Vorteile [1.3]:

- Einzige Technologie mit realistischer Chance für eine Zero-CO₂-Emission-Aviation
- Skalierbarkeit für Luftfahrzeuge aller Dimensionen (UAV – Wide Body- Passagier-/Transportmaschinen)
- Skalierbarkeit für alle Streckenkategorien (Commuter-Long Range)

Die weltweiten Maßnahmen im Zusammenhang mit COVID-19 haben zu einer Reduktion des Luftverkehrsaufkommens und damit auch zu einer Reduktion der damit verbundenen Emissionen geführt. Vereinzelt hat dies auch zu Forderungen zukünftiger Beschränkungen der Luftfahrt geführt. Im EU Green Deal wurden für 2050 noch ehrgeizigere Ziele für die Treibhausgasreduktion gesetzt., um bis 2050 klimaneutral zu werden [1.4].

Demgegenüber bedeutet die aktuelle Krise jedoch auch eine Chance, und bietet neue Möglichkeiten. Im europäischen Aufbauplan wurden im mehrjährigen Finanzrahmen 2021-2027 rund 374 Milliarden EUR dem Ziel Natürliche Ressourcen und Umwelt und rund 1439 Milliarden EUR den Zielen Binnenmarkt, Innovation und Digitales gewidmet [1.5]. Dadurch bietet sich für die Luftfahrtindustrie eine einzigartige Chance, durch innovative Forschung und Investition in grüne Technologie die Implementierung des Green Deal voranzutreiben [1.4]. Unabhängig von der aktuellen Krise stellt die Entkoppelung des Verkehrsaufkommens von Verbrauch und Schadstoffemissionen eine der zentralen Herausforderungen für den Luftfahrtsektor dar [1.6].

Für die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt bestehen die nachfolgend angeführten Möglichkeiten [1.3, 1.7].

- Brennstoffzellen (neben rein batterieelektrischen Antrieben) für UAVs, Kleinflugzeuge und kommerzielle Mittelstreckenflugzeuge
- Hocheffiziente Wasserstoff-Verbrennungs-Turbinen für Mittel- und Langstreckenflugzeuge

Als intermediär umsetzbare Systeme bieten sich zudem die folgenden Möglichkeiten [1.3, 1.7]:

- Brennstoffzellentechnologie als Hilfsaggregate (z.B. Emissionsreduktion im Bodenbetrieb)
- Wasserstoff für die Erzeugung synthetischer Treibstoffe

Der Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff in der nachhaltigen Luftfahrt der Zukunft bedeutet auch umfassende Herausforderungen für die Flughafeninfrastruktur. Die Treibstofflogistik umfasst dabei den Anschluss von Flughäfen an die im Rahmen von Hydrogen Europe und der österreichischen nationalen Wasserstoffstrategie geplanten Wasserstoffpipelines [1.8] ebenso wie die sichere und wirtschaftliche Lagerung und Distribution auf den Flughäfen.

1.1 Aufgabenstellung der Studie für Österreich

Wasserstofftechnologie ist die Schlüsseltechnologie für die nachhaltige Luftfahrt der Zukunft, die die Erreichung der in nationalen und internationalen Klimaschutzplänen gesetzten Emissionsziele und eine Entkoppelung der Emissionen vom Verkehrsaufkommen ermöglicht.

Die österreichische Luftfahrtindustrie ist international in einigen Spezialbereichen (z.B. auf Komponentenebene, Bau von Kleinflugzeugen, Simulation und Messtechnik) sehr gut positioniert, wobei die Produktion überwiegend auf europäische und globale Exportmärkte orientiert ist.

Mit dem Green Deal der Europäischen Union sollen bis zum Jahr 2027 bedeutende Finanzmittel für den Wiederaufbau der europäischen Wirtschaft nach der Corona-Krise zur Verfügung gestellt werden. Die Forschung und Entwicklung zu nachhaltigen Technologien ist dabei von besonderer Bedeutung.

In dieser historisch einmaligen Situation werden in der AH2AS die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für die österreichische Luftfahrtforschung und -industrie analysiert und gebündelt dargestellt.

Die wichtigsten Ziele dieser Studie sind

- die Analyse zukünftiger Anwendungsmöglichkeiten für Wasserstoff in der Luftfahrt,
- die Erfassung der sich daraus ergebenden Forschungs- und Marktpotenziale,
- die Identifizierung notwendiger Adaptionen der technischen, rechtlichen und institutionellen Rahmenbedingungen,
- die Darstellung der sich daraus für Österreich im Rahmen europäischer Kollaboration ergebenden Möglichkeiten.

Als Resultat der AH2AS werden basierend auf Recherchen und als Ergebnis von Befragungen und Experteninterviews eine Wasserstoff-Roadmap skizziert und Maßnahmen und Prioritäten für die österreichische Luftfahrtforschung- und -Industrie diskutiert.

Die Erstellung der Austrian Hydrogen Aviation Study (AH2AS) erfolgte in Kollaboration mit den wesentlichen Akteuren aus Forschung und Industrie sowie im Abgleich mit dem österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).

1.2 Struktur des Dokumentes

Nach einer ausführlichen Darstellung des Standes der Technik im Bereich Wasserstoff und Luftfahrt wird in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 einerseits auf die technologischen Herausforderungen und komplementär dazu in Kapitel 4 auf die wirtschaftlichen Herausforderungen eingegangen, um in Kapitel 5 die wesentlichsten Ergebnisse der Evaluierung und abgeleiteten Maßnahmen sowie Forschungsbedarfe der österreichischen Industrie und Wissenschaft zusammenzufassen.

1.3 Methodik

Im Vorhaben wurde eine Forschungs- & Innovations-Roadmap (F&I-RM) entwickelt, die als strategisches Planungswerkzeug auf high-Level Basis Verwendung finden kann. In weiterer Folge wird es wichtig sein, daraus detaillierte Umsetzungspfade unter Einbindung der Industrie, Wissenschaft und Fördergeber zu entwickeln. Diesbezüglich bietet sich ein branchenübergreifendes Arbeiten im Workshopformat in etablierten Plattformen an.

Bei der F&I-RM-Entwicklung wurde auf eine Ausgewogenheit der eingebundenen Befragten aus Produzenten, Betreibern, Infrastrukturanbietern, Technologie und Wissenschaft, Verwaltung und NPOs geachtet.

Der Status quo der österreichischen Technologie- und Forschungslandschaft zum Komplex Wasserstoff in der Luftfahrt wurde eingangs über eine Desktop-Studie (Literatur- und Patentrecherche) erfasst. Die Ergebnisse sind in Form einer PESTEL-Analyse dargestellt. (PESTEL = Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal) [1.9].

Im Vorhaben wurden VertreterInnen aus Wirtschaft, relevanten OEMs sowie Forschung und Entwicklung zu ihrer Beurteilung der Bedeutung unterschiedlicher Wasserstofftechnologien in der österreichischen Luftfahrt befragt. Der dafür entwickelte Fragenkatalog berücksichtigt die verschiedenen Markt-, Produkt- und Technologieebenen.

Als Ergebnis der Cross-Impact Betrachtung, die die Auswirkungen hinsichtlich der relevanten Faktoren auf den österreichischen Luftfahrtsektor bewertet, ist F&I-RM, PESTEL und die detaillierte Auswertung der Interviews zu sehen. Ausschlaggebend sind dabei jene Faktoren mit dem höchsten Impact und der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit, die auf Basis der Experteninterviews gewonnen wurden.

Die dabei identifizierten Lücken zwischen zukünftigen Marktpotenzialen und vorhandenen Forschungs- und Technologiepotenzialen münden ebenfalls in der F&I-RM.

Aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen, Empfehlungen und den identifizierten Stakeholdern in Österreich und Europa sollen relevante Forschungsnetzwerke zukünftig institutionalisiert und in personeller Hinsicht mit Key Actors konkretisiert werden.

1.3.1 Interviewstruktur

Um eine möglichst marktnahe Sicht zu erhalten, wurden strukturierte Experten-Interviews geführt. Dazu wurde ein Online Fragebogen entworfen, der inhaltlich mit BMK und FFG abgestimmt wurde. Über 30 österreichische Unternehmungen wurden kontaktiert und deren Feed-back in Form von strukturierten Interviews auf Basis des Fragebogens, schriftliche Beantwortungen des Fragebogens und ergänzende Experteninterviews eingeholt.

Durch die großteils gleichmäßige Verteilung der Branchen konnte ein sehr ausgewogenes Umfrageergebnis erzielt werden. Als einziges Luftfahrtunternehmen (Betreiber) nahm Austrian Airlines an der Umfrage im Rahmen eines strukturierten Interviews teil und nimmt aufgrund seiner Bedeutung auch eine entsprechende Position im Studienergebnis ein.

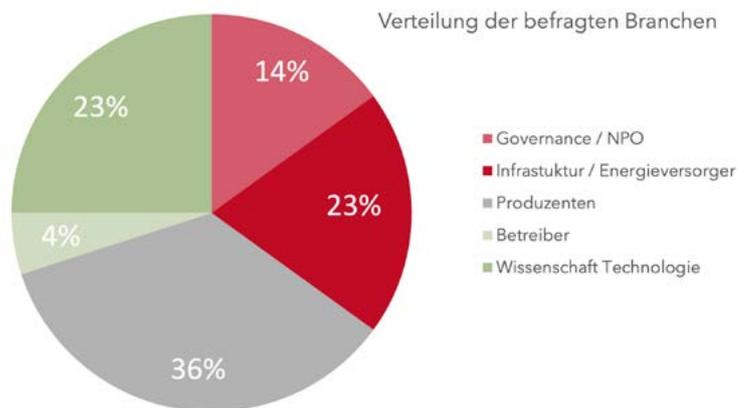


Abbildung 1.1: Verteilung der befragten Branchen

Die auf diesem Weg erhaltenen Informationen wurden anonymisiert und geclustert in das Studienergebnis eingearbeitet.

Quellenverzeichnis

- [1.1] Clean Sky 2 Joint Undertaking. „Roadmap to Climate Neutral Aviation - Infographic.“ Clean Sky. <https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/Clean-Sky-Infographic-2021-v2.pdf> (abgerufen am 10.10.2021).
- [1.2] EU, Flightpath 2050. Brüssel: Europäische Kommission, 2011.
- [1.3] Fuell Cell and Hydrogen 2 Undertaking und Clean Sky 2 Joint Undertaking, Hydrogen-powered aviation - A fact-based study of hydrogen technology, economics and climate impact by 2050. Publications Office of the European Union, 2020.
- [1.4] A. Krein. „A Green Recovery for Aviation.“ Clean Sky. <https://www.cleansky.eu/node/886> (abgerufen am 10.02.2021).
- [1.5] Europäische Kommission. „Europäischer Aufbauplan.“ Europäische Kommission,. https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_de (abgerufen am 20.01.2021).
- [1.6] I. Kernstock, Strategiepräsentation - Eckpunkte der FTI - Luftfahrtstrategie Österreich 2020+. Wien: Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie, , o.D.
- [1.7] S. Bruce, M. Temminghoff, J. Hayward, D. Palfreyman, C. Munnings, N. Burke, und S. Creasey, Opportunities for hydrogen in commercial aviation. CSIRO, 2020.
- [1.8] J. Chatzimarkis, Hydrogen Europe - Presentation for kick-off meeting for the Austrian Hydrogen Strategy. Vienna, 2019.
- [1.9] T. Issa, V. Chang, und T. Issa, „Sustainable business strategies and PESTEL framework,“ GSTF International Journal on Computing, vol. 1, no. 1, S. 73-80, 2010.

2 State of the Art



2 State of the Art

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird auf den „State of the Art“ des Energieträgers Wasserstoff sowie alternative klimaneutrale Energieträger wie Sustainable Aviation Fuels (SAF), auf notwendige Infrastrukturen und Distribution des Energieträgers Wasserstoff sowie auf verschiedene Flugzeugantriebstechnologien (Brennstoffzelle, H₂-Turbine, H₂ VKM) eingegangen.

Im Kapitel sind alle relevanten H₂-F&E Projekte (inkl. Demonstratoren) bzgl. H₂-Antriebe im Flugbereich von historischen Anfängen bis hin zu jüngeren Entwicklungen, die bereits abgeschlossen sind, angeführt. Eine tabellarische Übersicht über derzeit laufende Projekte wird in Kapitel 3 „Identifikation von technologischen Herausforderungen und technologischen Potenzialen“ dargestellt.

Für die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt wurden bereits in der Einleitung die folgenden Anwendungen genannt: i) Brennstoffzellen für UAVs, Kleinflugzeuge und kommerzielle Mittelstreckenflugzeuge und ii) Hocheffiziente Wasserstoff-Verbrennungs-Turbinen für Mittel- und Langstreckenflugzeuge.

Zudem bieten sich die folgenden Möglichkeiten als intermediär umsetzbare Systeme an: iii) Brennstoffzellentechnologie als Hilfsaggregate sowie iv) Wasserstoff für die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe [1.3, 1.7].

Beim Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff darf nicht an die umfassenden Herausforderungen für die Flughafeninfrastruktur vergessen werden. Die Treibstofflogistik umfasst dabei den Anschluss von Flughäfen an geplante Wasserstoffpipelines [1.8]. Weiters liegt eine Herausforderung in der sicheren Lagerung und Verteilung von Wasserstoff auf den Flughäfen.

2.1.1 Wissenschaftliche Problemstellungen

Aus den bisherigen Ausführungen ergeben sich folgende mögliche Forschungsschwerpunkte [2.3, 2.7, 2.9, 2.10]:

- Geometrie, Material, Einbauposition von Wasserstofftanks – die Masse der aktueller Tanktechnologie muss reduziert werden.
- Leitungssysteme – Optimierung des Temperaturmanagements bei Wasserstoffleitungen, Kühlung elektrischer Leitungen (Brennstoffzellensysteme)
- Brennstoffzellentechnologie – aktuelle Technologie basiert auf Protonen-Austausch-Membranen – Kombination mit Speichertechnologie für Lastfolgebetrieb, um Kapazität/Größe der Brennstoffzellen zu optimieren, Optimierung der Kühlsysteme
- Wasserstoffturbinentechnologie, Hybridansätze (Turbinen & Brennstoffzellen), Reduktion der NO_x-Emissionen
- Kostenreduktion, Total Cost of Ownership (TCO)-Reduktion, Reduktion der Herstellungskosten von Wasserstoff, Reduktion der Flugzeugkosten, Optimierung Tank-/Nutzraumvolumina
- Nachhaltige Wasserstoffproduktion
- Entwicklung einer nachhaltigen Wasserstoff-Flughafeninfrastruktur – anfänglich parallel zu bestehender Kerosin-Infrastruktur
- Anpassung / Neugestaltung von Normen und Rechtsvorschriften
- Anpassung / Neugestaltung der Förderungslandschaft
- Notwendige Initiativen in Aus- und Weiterbildung

2.2 Kraftstoffverbrauch der Luftfahrt

Der jährliche Kerosinbedarf entspricht etwa 10 Prozent des Gesamtbedarfs an flüssigen Kraftstoffen in Österreich. Abbildung 2.1 zeigt den österreichischen Diesel-, Benzin- und Kerosinverbrauch des Jahres 2019 in Millionen Tonnen. Bei der Herstellung, Verteilung und Verwendung von Wasserstoff wären diese Mengen an Energie zu berücksichtigen, wenngleich im Straßenverkehr zukünftig eine Reduktion des Bedarfs durch Elektro- oder konkurrierende Wasserstoffantriebe zu erwarten ist. Alternative Antriebe, wie zum Beispiel batterieelektrische Antriebe, werden in der Luftfahrt aus heutiger Sicht nur für sehr kurze Flugdistanzen möglich sein. Für den größten Teil der Luftfahrt ist auf lange Sicht nachhaltiger Kraftstoff bzw. Wasserstoff die einzige Alternative.

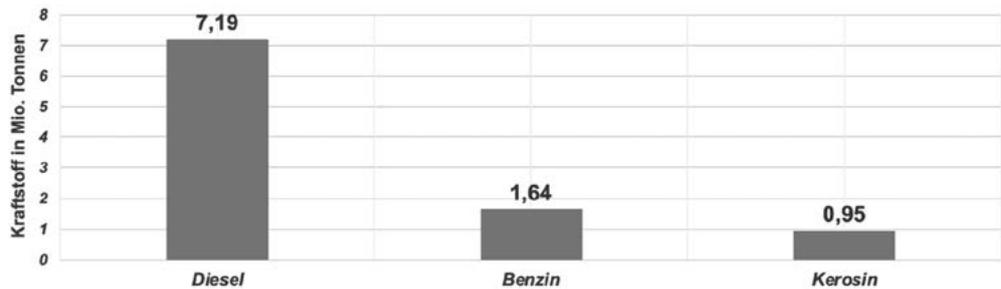


Abbildung 2.1: Österreichischer Verbrauch flüssiger Kraftstoffe 2019, Quelle: UBA, WKO, [2.13]

2.2.1 Kerosinverbrauch

In Österreich wurden im Jahr 2019 mehr als 950.000 Tonnen Kerosin getankt [2.13] und damit 2,99 Mio. Tonnen CO₂ in die Atmosphäre emittiert. Abbildung 2.2 zeigt die Entwicklung seit 2014. Die logistische Versorgung erfolgt durch eine Pipeline direkt von der OMV-Raffinerie in Schwechat zum Flughafen Wien. Die Flughäfen in den Bundesländern werden über Tankwagen versorgt.

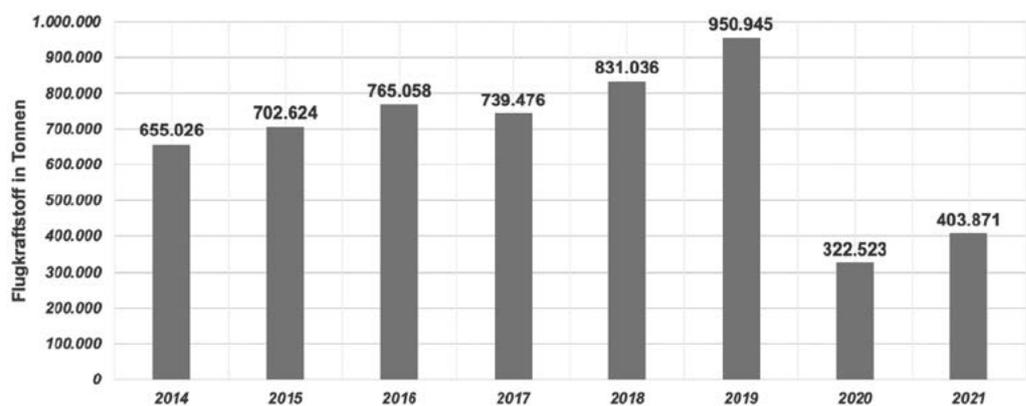


Abbildung 2.2: Österreichischer Kerosinverbrauch, Quelle: UBA, WKO, [2.13]

2.3 Demonstratoren im internationalen Umfeld

2.3.1 Historische Anfänge

Die wissenschaftliche Forschung mit Wasserstoff kann bis in das Jahr 1673 zurückverfolgt werden, wobei bis in das 19. Jahrhundert vorwiegend die chemischen Eigenschaften im Vordergrund standen. Vor dem 2. Weltkrieg sind vorwiegend Anwendungen in Luftschiffen sowie Experimente in militärischer Raketentechnologie belegt, aus welchen sich die heutige Raumfahrt entwickelt hat[2.1].

Eines der ersten bekannten Luftfahrzeugprojekte mit Wasserstoffantrieb ist die Lockheed CL-400 SUNTAN, die zwischen 1956 und 1958 als wasserstoffbetriebenes Nachfolgemodell des U-2 Spionageflugzeuges entwickelt wurde. Finanziert von der U.S. Air Force und entwickelt von Skunk Works, befasste sich das Projekt auch mit der Neuentwicklung des Pratt & Whitney (PW) Wasserstofftriebwerkes Model 304 sowie der für den Betrieb notwendigen Produktion und Transportlogistik von flüssigem Wasserstoff.

T.O.G.W.	69,955 LB.
ZERO F.W.	48,515 LB.
FUEL LOAD,	21,440 LB.
PAYLOAD	1,500 LB.
CREW	2
WING AREA	2,400 SQ. FT.
ASPECT RATIO	2.5
304-2 ENGINES	TWO

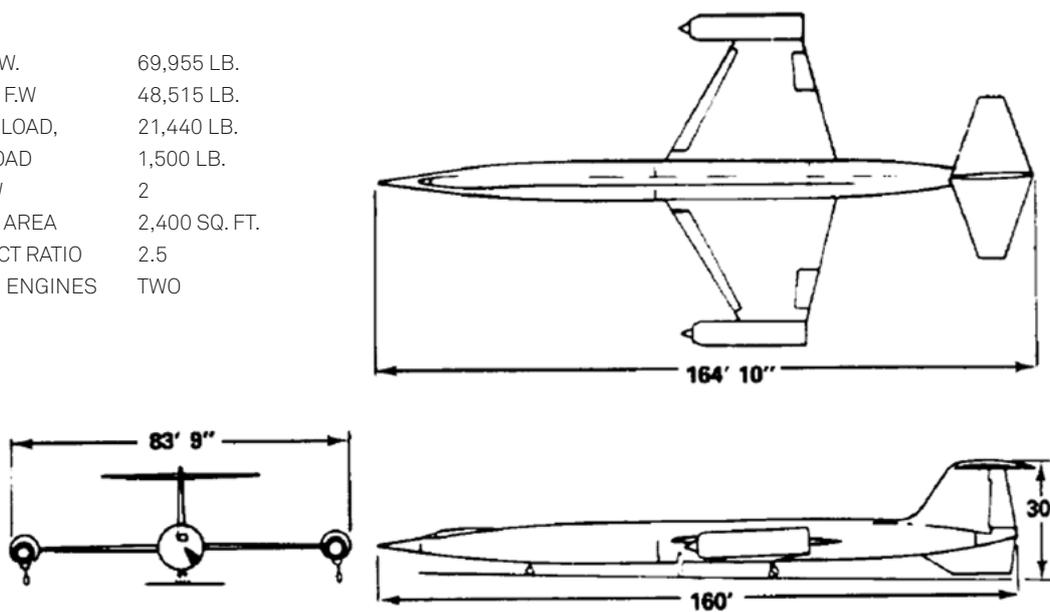


Abbildung 2.3: Lockheed CL-400 SUNTAN reconnaissance aircraft using liquid hydrogen as fuel. ca. 1955 Ben R Rich, „Lockheed CL-400 Liquid Hydrogen-Fueled Mach 2.5 Reconnaissance Vehicle.“ read at a symposium on hydrogen-fueled aircraft, NASA Langley Research Center, 15-16 May 1973[2.1]

Während die technischen Versuche am neuartigen PW 304 Triebwerk und der Aufbau der notwendigen Infrastruktur an der Ostküste im Jahr 1957 zügig voranschritten, wurde den Entscheidungsträgern klar, dass die gewünschte Reichweite aufgrund des beschränkten Volumens für die Wasserstofftanks (obwohl im Rumpf des Flugzeugs untergebracht) nicht ausreichend sein wird. Im Zusammenhang mit Budgetumschichtungen innerhalb der U.S. Air Force wurde das Projekt SUNTAN im darauffolgenden Jahr eingestellt und die wasserstoffbezogenen Erkenntnisse für das amerikanische Raumfahrtprogramm weiterverwendet[2.1].

In den 1980er-Jahren gab es einen experimentellen Umbau eines Verkehrsflugzeuges aus der ehemaligen Sowjetunion: die Tupolev Tu-155. Dazu wurde eine Tupolev Tu-154B modifiziert und nur ein Triebwerk ausgetauscht. Genauer gesagt war die Tu-155 deshalb ein technologisches Hybridflugzeug, da nur das rechte der drei Triebwerke mit Wasserstoff betrieben wurde. Dennoch erregte dieses Vorhaben deutliche Aufmerksamkeit im Westen, da davon ausgegangen wurde, dass die Sowjetunion in diesem Gebiet einen technologischen Vorsprung von etwa fünf Jahren gehabt hätte.



Abbildung 2.4: Tupolev Tu-155 [2.12]

Am 15. April 1988 hob dieses Testflugzeug mit dem Kennzeichen СССР-85035 schließlich vom Flughafen Moskau-Zhukovsky zu seinem Erstflug ab. Ein weiteres besonderes Merkmal war, dass es nicht nur mit Wasserstoff sondern auch mit Erdgas betrieben werden konnte. Insgesamt wurden 100 Testflüge absolviert, wovon fünf mit Wasserstoff als Treibstoff stattfanden.

Auch damals erkannten die Ingenieure von Tupolev ein großes Problem: die Lagerung und Kühlung des Wasserstoffes an Bord, der in zylindrischen bzw. kugelförmigen Tanks untergebracht werden muss und daher nicht mehr wie gewohnt in den Tragflächen mitgeführt werden kann. Tupolev hat dieses Problem damals so gelöst, dass die Tu-155 keine Passagiersitze beinhaltete und stattdessen im gesamtem Rumpf Tanks bzw. Testgeräte untergebracht waren. Jedoch ist dies keine Lösung für den Einsatz in Passagierflugzeugen.[2.12]

2.3.2 Jüngere Entwicklungen

Unter der Führung der Airbus Deutschland GmbH haben sich von 2000 bis 2002 im Projekt CRYOPLANE [2.13] 36 Organisationen im Rahmen des europäischen FP5-GROWTH Programmes zusammengeschlossen, um verschiedenste Konfigurationsmöglichkeiten von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen zu erforschen.

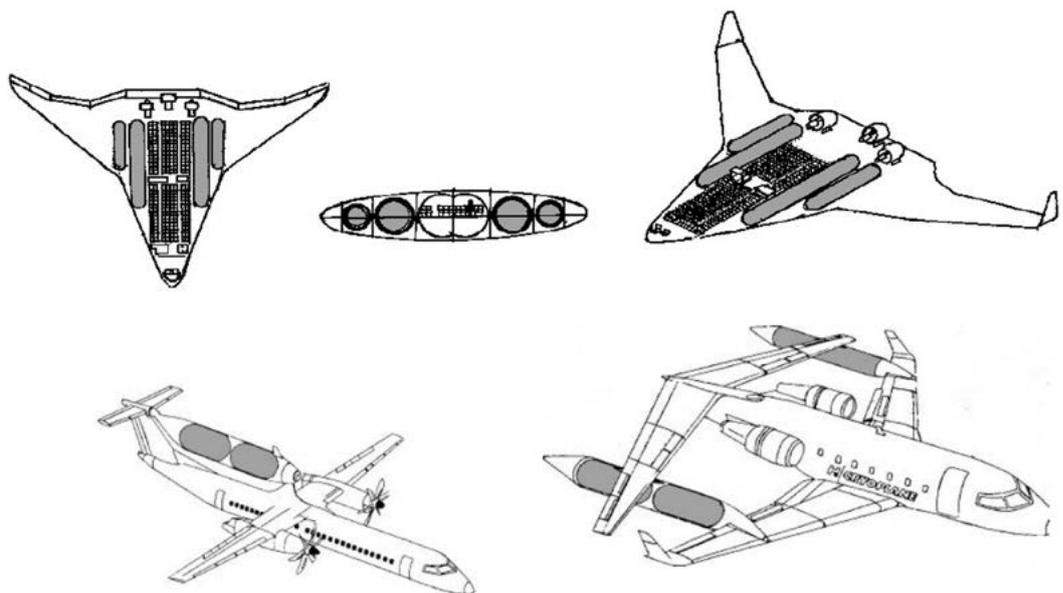


Abbildung 2.5: Regionalflugzeugkonzept mit Wasserstofftanks im Rumpf [2.14]

Die betrachtete Palette der Anwendungsmöglichkeiten reichte dabei vom 12-sitzigen Geschäftsreiseflugzeug bis hin zum Großraumflugzeug mit knapp 400 Passagieren und enthielt auch neuartige Flugzeugauslegungskonzepte (Abbildung 2.5), die sich heute noch nicht im kommerziellen Einsatz befinden. Die von Airbus vorgestellten ZeroE Flugzeugmodelle [2.15] legen durch die wahrscheinliche Anordnung der Wasserstofftanks im Heck der Flugzeuge eine Fortsetzung der aus CRYOPLANE gewonnenen Erkenntnisse und Konzepte nahe.

Im Jahr 2008 testete Boeing Phantom Works ein Diamond Aircraft HK-36 Flächenflugzeug mit moderner Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Brennstoffzellentechnologie als hybrides Demonstrationsprojekt. Dabei war die verwendete Brennstoffzelle speziell für den Horizontalflug ausgelegt und im Steigflug zusätzlich eine Lithium-Ionen-Batterie hinzugeschaltet. Im Zuge des Erstfluges erreichte das Demonstrationsflugzeug eine brennstoffzellenbetriebene Reisegeschwindigkeit von 100 km/h und konnte diese über 20 Minuten lang halten.



Abbildung 2.6: HK-36 von Boeing Phantom Works während des Demonstrationsfluges (Quelle Diamond Aircraft)

Im Jahr 2009 fand der Erstflug der Antares DLR-H2 in Hamburg statt, welche das DLR-Institut für Technische Thermodynamik zusammen mit der Lange Aviation basierend auf deren Motorsegler Antares 20E entwickelt hat. Sowohl die Wasserstofftanks als auch das Brennstoffzellensystem wurden in zwei zusätzliche Außenlastbehälter eingebaut.

Ab 2012 wurde in Zusammenarbeit mit Hydrogenics ein verbesserter Brennstoffzellenantrieb eingebaut und ebenso der rechte Außenlastbehälter mit einem neuen Drucktank für Wasserstoff versehen. Eine Hybridisierung des Flugzeuges mit einer Li-Ion-Batterie wurde seitens DLR als weitere, leistungssteigernde Maßnahme angeführt [2.16] wobei die Antares DLR-H2 heute nicht mehr in Betrieb ist.



Abbildung 2.7: Antares DLR-H2 [2.16]

2.4 Technische Optionen für Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt

2.4.1 Brennstoffzelle

2.4.1.1 Brennstoffzellentechnologie

In einer Brennstoffzelle wird die gespeicherte chemische Energie eines Brennstoffes (beispielsweise Wasserstoff) in elektrische Energie umgewandelt. Eine Brennstoffzelle besteht aus einer Anode und einer Kathode, die durch einen Elektrolyten und oft auch eine zusätzliche Membran getrennt sind. Der Elektrolyt ist für Ionen durchlässig, blockiert jedoch Elektronen. Nach Zufuhr eines Oxidans (beispielsweise Sauerstoff) an die Kathode strömen Wasserstoffionen durch den Elektrolyten von der Anode durch den Elektrolyten zur Kathode und oxidieren dort zu Wasser. Für den Ladungsausgleich zwischen Anode und Kathode kommt es zu einem Elektronenfluss von Anode zu Kathode und somit zur Erzeugung elektrischen Stroms. Aufbau und Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle sind in der Literatur hinlänglich beschrieben. Es existieren verschiedene Arten von Brennstoffzellen, die sich hinsichtlich des verwendeten Brennstoffes und des Oxidans unterscheiden [2.17]:

PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle), auch Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Protonenaustausch-Membran-Brennstoffzelle)

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsäure-Brennstoffzelle)

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle)

AFC: Alkaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)

SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid-Brennstoffzelle)

In Abbildung 2.8 sind die Brennstoffe, Oxidantien und Betriebstemperaturen dieser Brennstoffzellentypen schematisch dargestellt.

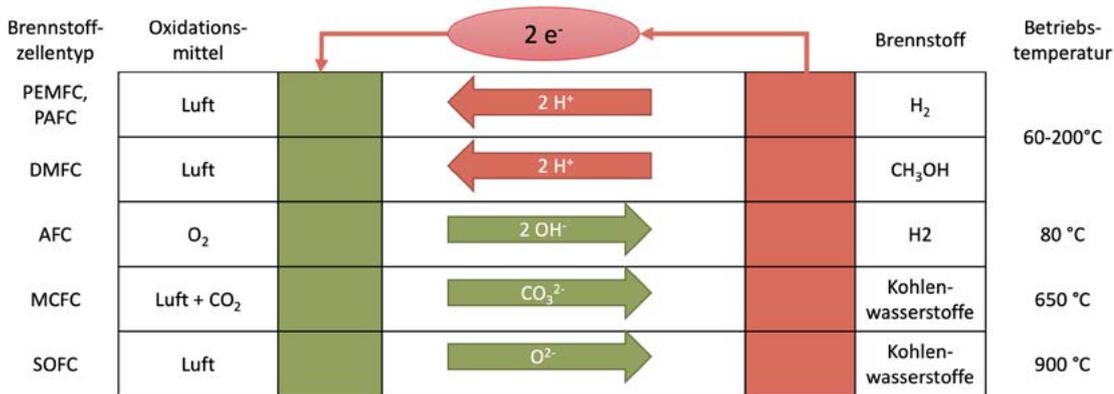


Abbildung 2.8: Elektrochemie der wichtigsten Brennstoffzellentypen nach Scherer [2.17]

Wie aus Abbildung 2.8 ersichtlich ist, sind PEMFC, PAFC und AFC jene Technologien, die in einigermaßen praktikablen Temperaturbereichen arbeiten. PEMFC ist jene Technologie, die vor allem im Automobilsektor bzw. eben auch in der Luftfahrt Anwendung findet und weiterentwickelt wird. Die Entwicklung von MCFC und SOFC hat durch die Abkehr bedeutender Unternehmen von dieser Technologie (Siemens bei SOFC und Tognum bei MCFC) einen Rückschlag erfahren [2.17]. Details zu den Funktionsweisen der einzelnen Technologien sind in einschlägigen Lehr- und Fachbüchern, unter anderem bei Scherer [2.17] nachzulesen.

2.4.1.2 Flugsysteme

2.4.1.2.1 Flächenflugzeuge

Gegenwärtig absolvierten schon einige wasserstoffbetriebene Luftfahrzeuge erfolgreiche Testflüge und viele weitere Prototypen sind in Folge von weiteren Umrüstungen zu zugelassenen Flugzeugen geplant. Einige der bedeutendsten werden im nachfolgenden näher beschrieben und in Kapitel 3.2.4 weiter ergänzt und detailliert betrachtet.



Abbildung 2.9: Prototyp HY4 [2.18]

Das Projekt **HY4** ist das erste Wasserstoff-Passagierflugzeug mit dem aktuellen Stand. Der Prototyp entstand aus einer Zusammenarbeit des DLR und dem slowenischen Flugzeughersteller Pipistrel. Zudem ist das Unternehmen H2FLY integriert und für die Wasserstofftechnologie zuständig. Die HY4 hat vier Sitze und einen Doppelrumpf, wie in Abbildung 2.9 erkannt werden kann. Außerdem besitzt sie ein innovatives Hybridsystem, das Batterie- mit Brennstoffzellentechnologien verbindet. Dabei dient die Lithium-Ionen-Batterie als Backup, sollte etwa die benötigte Energie beispielsweise im Steigflug nicht ausreichen. Der Motor erreicht eine Leistung von 120 Kilowatt womit eine Geschwindigkeit von 200 Kilometern pro Stunde möglich ist. Der erste Demonstrationsflug fand 2016 statt und die HY4 absolvierte seitdem mehrere erfolgreiche Testflüge. Damit stellte dieser Prototyp einen Meilenstein im emissionsfreien und lautlosen Fliegen dar. Zudem kann eine Reichweite von bis zu 1500 km erreicht werden. Laut Joseph Kallo vom DLR legt die Antriebstechnologie den Grundstein für die Zukunft und gibt einen Ausblick auf Wasserstoffflugzeuge mit bis zu 40 Sitzen, wie eine Dornier 328. Des Weiteren sollen mit gesteigerter Effizienz dieser Technologie Reichweiten von über 2000 km in den nächsten zehn Jahren erreicht werden können [2.18].

Das amerikanische Unternehmen **ZeroAvia** hat im Rahmen ihres HyFlyer I Projektes mit einer umgerüsteten Piper Malibu einen weiteren Antrieb für ein wasserstoffbetriebenes Flugzeug entwickelt, welches im Jahr 2020 erfolgreich seinen Erstflug absolviert hat. Anfang 2021 ereignete sich ein Unfall des

Testflugzeuges, was somit der erste bekannte Flugunfall eines wasserstoffbetriebenen Flugzeuges ist. Laut Zero Avia gab es keinen Brand und kein Problem mit der Freisetzung von Wasserstoff. Weitere Daten liegen nicht vor. Man analysierte die Daten und wollte herausfinden, was das Problem war, hieß es von Seiten des Unternehmens [2.19].

Als weiteres, UK-finanziertes Projekt in Bezug auf wasserstoffbetriebene Luftfahrzeuge ist das **FRES-SON** Projekt [2.20] mit einem Konsortium rund um Cranfield Aerospace Ltd. zu nennen. Dabei wird ein bestehendes Britten-Norman Islander Verkehrsflugzeug mit moderner Brennstoffzellentechnologie ausgestattet und eine individuelle Supply Chain für nachfolgende Serienproduktionen untersucht, welches sich nahtlos in den luftfahrtseitigen Teil der englischen Wasserstoffstrategie [2.21] einfügt.



Abbildung 2.10: Britten-Norman Islander von Cranfield Aerospace Ltd.

2.4.1.2.2 Helikopter

Im Hubschrauberbereich hat sich die Wasserstofftechnologie bislang noch sehr wenig niedergeschlagen. Eine der prominentesten Ausnahmen dabei ist der Demonstrator von United Technologies Corporation.



Abbildung 2.11: RC-Helikopter von UTC mit Brennstoffzellenantrieb

United Technologies Corp. (UTC) hat im Jahr 2009 den ersten Prototypen eines Hubschraubers mit Brennstoffzellenantrieb vorgestellt. Der Demonstrator war ferngesteuert und hatte einen Rotordurchmesser von 2 Metern. Für den Antrieb wurde eine Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) verwendet, die eine Leistung von 1.75 Kilowatt lieferte. Der Erstflug dauerte rund 20 Minuten und wurde erfolgreich durchgeführt. Auch wenn dies nur ein ferngesteuerter Helikopter war, war es dennoch ein großer Schritt in der Forschung. Laut Dr. David Parekh von UTC war das Erreichen des Vertikalflugs ein wichtiger Meilenstein für das Fliegen mit Brennstoffzellen, da die Anforderungen an die Leistungsdichte viel höher sind als bei Flächenflugzeugen.

2.4.1.3 Einsatz in Hilfsaggregaten

Möglichkeiten, bislang durch Dieselkraftstoff betriebene Hilfsaggregate mit Energie aus Brennstoffzellen zu versorgen, werden bei Boeing und Airbus untersucht. Zudem sollen Brennstoffzellen anstelle von elektrochemischen Stromspeichern (Batterien) eingesetzt werden, um Systeme wie Kabinendruckregelung, Klimatisierung, Beleuchtung, Cockpitinstrumente, Tragflächenenteisung, Steuerflächen oder Fahrwerke mit Energie zu versorgen [2.22].

General Motors entwickelt gemeinsam mit Liebherr Aerospace Brennstoffzellentechnologie für die Energieversorgung von Flugzeug-Hilfsaggregaten. Diese Brennstoffzellen stellen geräuscharm und effizient Energie im Flug oder auf dem Boden zur Verfügung. Leistung, Betriebszeiten und Betankung ist dabei mit Systemen, die mit fossilen Kraftstoffen verwendet werden, vergleichbar. Zusätzlich kann das dabei emittierte Wasser für die Wasserversorgung des Flugzeugs genutzt werden [2.23].

Auch der europäische Hersteller Airbus arbeitet an der Entwicklung von Brennstoffzellentechnologie für die Energieversorgung von Hilfsaggregaten [2.24].

2.4.2 Wasserstoffturbinen

2.4.2.1 Turbinentechnologie

Wasserstoffturbinen unterscheiden sich im Vergleich mit konventionellen Turbofantriebwerken nur hinsichtlich des verwendeten Kraftstoffes. Der generelle Aufbau und die generelle Funktion sind äquivalent. Die einzigen Komponenten, die zusätzlich hinzukommen, sind spezielle Leitungen und Einspritzsysteme für den Wasserstoff. Somit kann ein konventionelles Triebwerk relativ einfach mit ein paar Anpassungen und Konfigurationsänderungen mit Wasserstoff betrieben werden. Nicht zu vernachlässigen sind dabei aber die Aufwände zur Zulassung gemäß den EASA Regulatorien.

Ein Triebwerk, das jedoch speziell auf Wasserstoff ausgelegt ist und nur für diesen Zweck entwickelt wurde, funktioniert um Einiges effizienter. Der Aufbau hierbei ist trotzdem gleich wie der eines konventionellen Triebwerks.

Im Gegensatz zur „kalten“ Verbrennung in einer Brennstoffzelle, entstehen durch die hohen Temperaturen bei der Verbrennung von Wasserstoff Stickoxide (NO_x). Um diese auf ein geringeres - beziehungsweise vergleichbares Level - als im Kerosinbetrieb zu halten, muss die Brennkammer unter anderem so modifiziert werden, dass es zu einer intensiveren Vermischung zwischen Luft und Wasserstoff kommt [2.25].

2.4.3 Synfuels

Synfuels werden aus Wasserstoff und CO_2 hergestellt. Das dafür benötigte CO_2 kann entweder direkt aus der Luft oder aus CO_2 -Abscheidung und -Speicherung aus industriellen Prozessen (z.B. Zementproduktion) bezogen werden. Vorteil von Synfuels ist, dass sie als sogenannte Drop-In-Fuels mit bestehende Antriebsstrangtechnologien (z.B. Turboprop, Strahltriebwerke) verwendet werden können. Als Nachteil gilt der für deren Herstellung notwendige Energieaufwand [2.3], bei dem außerdem sichergestellt werden muss, dass kein zusätzliches CO_2 entsteht.

2.4.4 Infrastruktur und Bodensysteme

2.4.4.1 Wasserstoffinfrastruktur

In Abbildung 2.12 sind mögliche Versorgungsketten für Wasserstoff bzw. Synfuels in der Luftfahrt dargestellt.

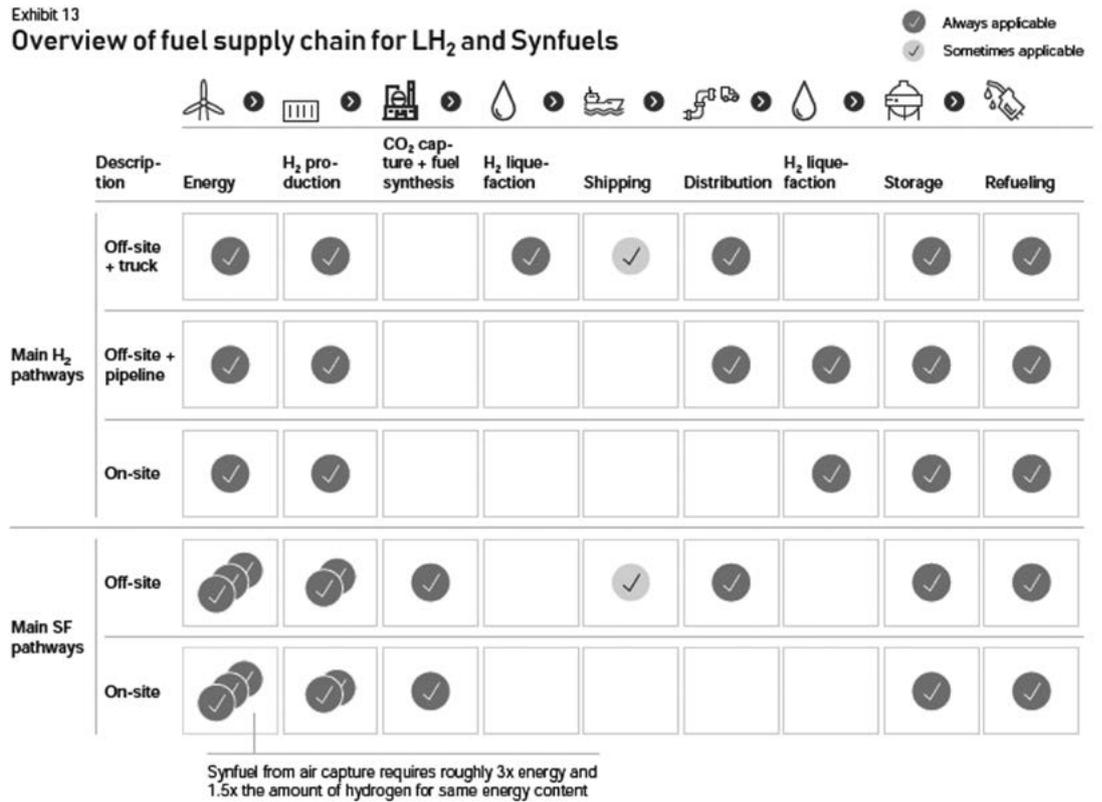


Abbildung 2.12: Versorgungsketten für flüssigen Wasserstoff und Synfuels [2.3]

2.4.5 Wasserstoffproduktion

Bei der direkten Nutzung von Wasserstoff sind Energiequelle, Herstellungsmethode, Speicherung, Transport und die endgültige Nutzung Faktoren, die die Kosten sowie ökologische und ökonomische Effizienz des Prozesses beeinflussen. Die verschiedenen Optionen auf den Stufen dieser Wertschöpfungskette sind in Abbildung 2.13 dargestellt.

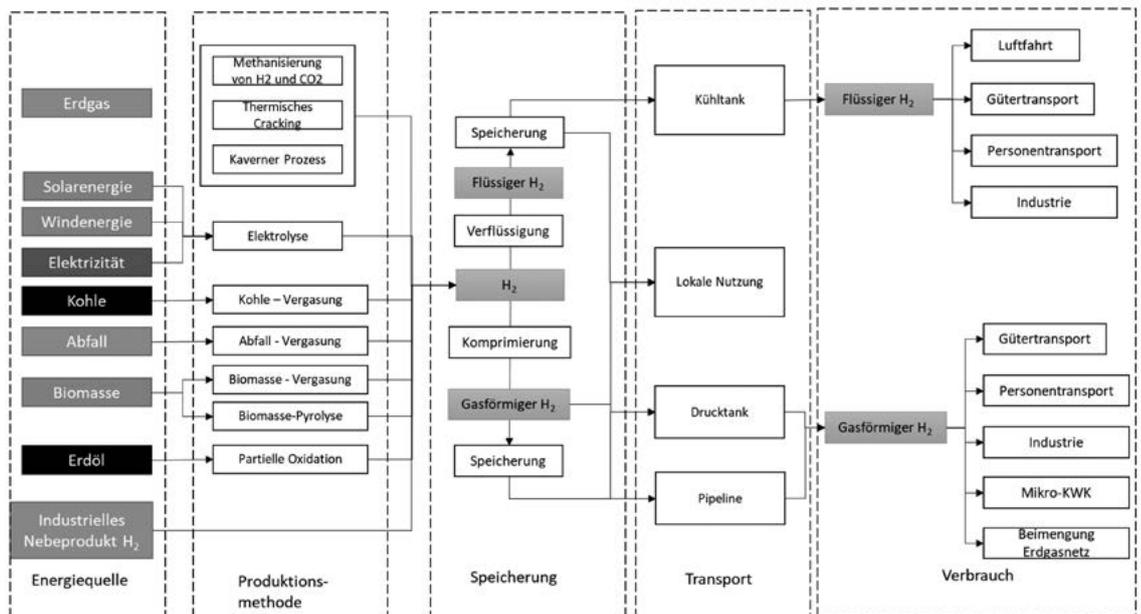


Abbildung 2.13: Potenzielle Wasserstoff-Wertschöpfungsketten [2.26]

Im Zusammenhang mit der Wasserstoffproduktion wird von grünem, blauen, grauen sowie gelbem, weißem bzw. rotem Wasserstoff gesprochen, dieses Farbschema wird nachstehend kurz erläutert [2.27, 2.28]:

Grüner Wasserstoff entsteht durch die Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von Ökostrom. Die elektrische Spannung spaltet Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff auf. Damit wird der eingesetzte Strom in chemische Energie umgewandelt und im Wasserstoff gespeichert. Dabei entstehen keine Treibhausgase. Das Verfahren zählt zu den Power-to-X-Technologien – zu den nachhaltigen Speicherkonzepten im Rahmen der Energiewende.

Roter Wasserstoff ist mit Atomstrom erzeugter Wasserstoff. Damit ist das Verfahren weitgehend CO₂-neutral, aber aus bekannten Gründen umstritten.

Grauer Wasserstoff wird durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen, das wiederum hauptsächlich aus Methan besteht (CH₄). Dabei wird das Gas unter Wasserzugabe bei hohen Temperaturen und Drücken in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid aufgespalten. Pro Tonne Wasserstoff entstehen circa zehn Tonnen CO₂.

Blauer Wasserstoff: Wird das CO₂ aus der Produktion von grauem Wasserstoff aufgefangen und weiterverwendet beziehungsweise final in geologischen Lagerstätten gespeichert (Carbon Capture and Storage), wird aus grauem Wasserstoff per Definition blauer Wasserstoff.

Türkiser Wasserstoff wird in Hochtemperaturreaktoren durch die thermische Spaltung von Methan hergestellt. Dabei entsteht fester Kohlenstoff – und kein CO₂. Voraussetzungen für die Umweltfreundlichkeit des Verfahrens sind die Art der Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors und die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs, zum Beispiel durch seine Verwendung als Asphalt im Straßenbau.

Brauner Wasserstoff entsteht durch Vergasung aus Kohle. Dieses Verfahren wird allerdings allein durch ein japanisches Konsortium in Australien angewandt.

Weißer Wasserstoff bezeichnet natürliche Vorkommen in der Erdkruste und kann an wenigen Stellen durch Fracking gewonnen werden. Andere Autoren [2.27] bezeichnen auch Wasserstoff, der in Chemieanlagen als Nebenprodukt anfällt, als weiß.

Hellgrüner Wasserstoff stammt aus der Hydrogenase, bei der Bakterien mithilfe von Sonnenenergie Biomasse in Methan und Wasserstoff umwandeln. Dazu existieren aber erst Pilotprojekte.

Entsprechend der obigen Auflistung können **grüner, hellgrüner, türkiser und blauer** sowie mit Einschränkungen **weißer Wasserstoff, vor allem wenn er aus Nebenprodukt anfällt** als klimaneutral betrachtet werden [2.27].

In Entwicklung sind auch Verfahren, Wasserstoff durch Photokatalyse herzustellen. Mittels Photolyse wird dabei aus Licht und Wasser Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt.

In Abbildung 2.13 ist ersichtlich, dass Wasserstoff-Wertschöpfungsketten geographisch unterschiedlichen Ebenen zuordenbar sind. Fracht-Transport, Industrie, Mikro-Generierung und Personentransport sind dabei allen Ebenen (global, multi-regional, national) zuordenbar. Die Einspeisung von Wasserstoff in Erdgaspipelines für die Beimengung zur bestehenden Gasversorgung ist multi-regionalen und nationalen Wertschöpfungsketten zuzuordnen. Die Gewinnung von Wasserstoff aus Abfällen ist der nationalen Ebene zuzuordnen. Auf multi-regionaler Ebene erfolgt die auch heute bereits übliche Gewinnung von Wasserstoff aus fossilen Ressourcen oder industriellen Nebenprodukten.

Die Anteile unterschiedlicher Wasserstoffquellen in der globalen Produktion ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

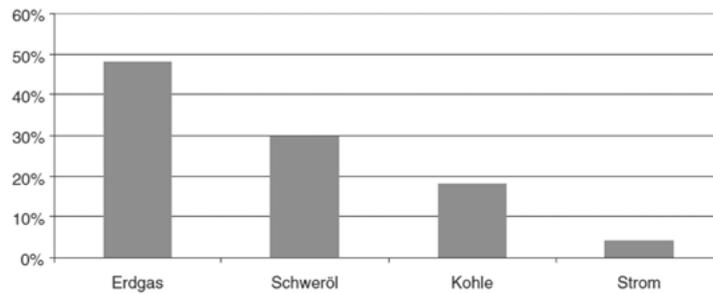


Abbildung 2.14: Anteile unterschiedlicher Wasserstoffquellen [2.29]

Wasserstoff wird heute primär aus Kohlenwasserstoffen oder durch Elektrolyse aus Wasser erzeugt. Kohlenwasserstoffe können als fossile Energieträger, Kunststoffabfällen oder als Biomasse vorliegen. Dabei erfolgt die Ablösung aus den Kohlenwasserstoffen hauptsächlich über Dampfreformierung. Darüber hinaus existieren auch andere Verfahren, so zum Beispiel die partielle Oxidation. Auch Energie wird, neben dem Kohlenwasserstoff oder Wasser, benötigt. Diese muss in Form von Strom, Wärme oder Licht bereitgestellt werden. Sowohl Strom als auch die Wärme können sehr unterschiedlich zur Verfügung gestellt werden. Das jeweilige Herstellungsverfahren bestimmt den Preis des Wasserstoffs [2.29].

Die Herstellung aus fossilen Energieträgern ist heutzutage die dominierende Erzeugungstechnologie. Dagegen sind thermochemische Wasserspaltung, photokatalytische oder photobiologische Verfahren noch in den Anfängen der Entwicklungsphase. Aufgrund des dabei anfallenden CO₂ wird Wasserstoff aus fossilen Energiequellen jedoch nicht als zielführender Weg zur Erreichung der Klimaziele betrachtet [2.30].

Die ökonomische Effizienz der direkten Wasserstoffnutzung wird neben den Herstellungskosten auch von den realistisch erzielbaren Verkaufspreisen bestimmt. Diese bemessen sich an den Kosten für jene Energieträger, die durch Wasserstoff substituiert werden sollen. Bürger et al. [2.31] stellen die spezifischen Herstellungskosten von Wasserstoff für unterschiedliche Anwendungszwecke den in den jeweiligen Sektoren realistisch erzielbaren Verkaufspreisen gegenüber. In den Berechnungen sind auch Kosten für Errichtung und Betrieb eines unterirdischen Wasserstoffspeichers berücksichtigt. Die elektrische Energie wird dabei zu Spotmarket-Preisen von einer Windkraftanlage, mit intermittierender Verfügbarkeit von Strom bezogen. Dabei werden zu erwartenden Entwicklungen für Kosten und erzielbaren Preisen für Wasserstoff gegenübergestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

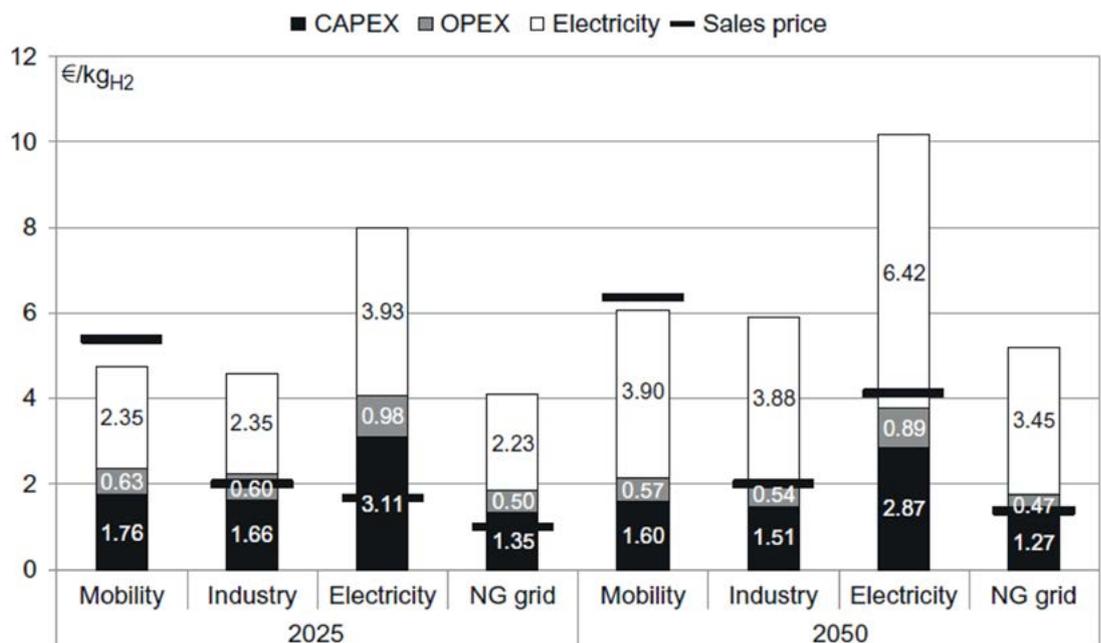


Abbildung 2.15: Vergleich von Wasserstoffherstellungs- und Bereitstellungskosten mit realistisch erzielbaren Verkaufspreisen [2.31]

In Abbildung 2.15 sind jeweils Kapitalkosten (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) sowie gesondert Elektrizitätskosten dargestellt. Für die Anwendungsbereiche Mobilität und Industrie sind die Kosten annähernd auf gleichem Niveau. Die Kosten für die Re-Elektrifizierung von Wasserstoff sind aufgrund der höheren Investitionskosten sowie der – bedingt durch die geringere Gesamteffizienz des Prozesses – höheren Energiekosten deutlich höher als die der anderen Anwendungen. Die Gesamtkosten für die Einspeisung von Wasserstoff in ein bestehendes Erdgasnetz (NG-grid) sind aufgrund der geringeren Bereitstellungskosten geringer. Im Szenario für das Jahr 2050 wird mit geringeren Investitions- und Betriebskosten jedoch höheren Energiekosten gerechnet. Der auf ein Kilogramm Wasserstoff bezogene Vergleich zeigt, dass lediglich für die Nutzung von Wasserstoff in der Mobilität Produktionskosten unterhalb des zu erwartenden realisierbaren Verkaufspreises liegen würden.

Ein weiterer Faktor, der die Effizienz des Betriebs einer kombinierten Elektrolyse- und Wasserstoffspeichungsanlage beeinflusst, ist die jährliche Betriebsdauer des Elektrolyseurs. Bei höherer Betriebsdauer steigt die produzierte Wasserstoffmenge und der Anteil der Investitionskosten pro produzierter Einheit Wasserstoff sinkt [2.32]. Der Zusammenhang zwischen Betriebsdauer, realisierbaren Preisen und möglichen Produktionskosten ist aus Abbildung 2.16 ersichtlich. Bei einer Anlage, die primär für den Bezug aus einer intermittierenden Stromquelle ausgelegt ist, müsste dazu Strom kostengünstig aus dem Netz zugekauft werden.

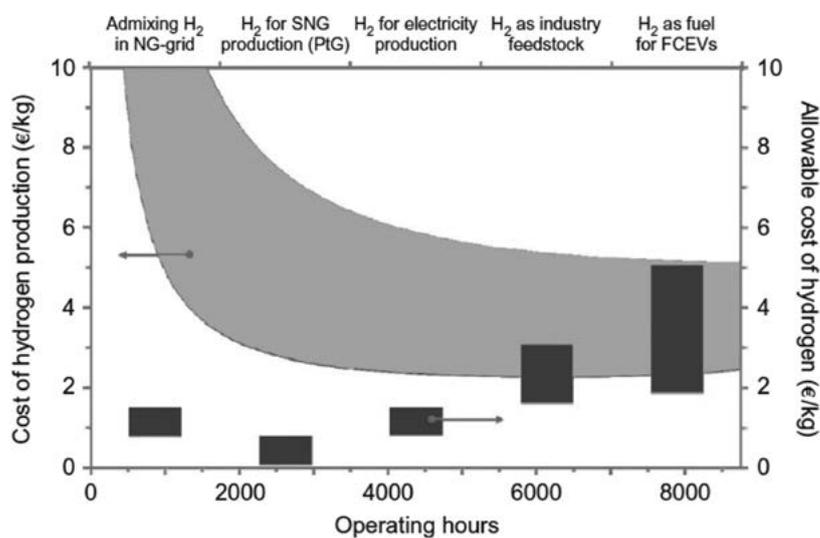


Abbildung 2.16: Veranschaulichung des Potenzials der Kostenreduktion bei längerer Betriebsdauer des Elektrolyseurs [2.32]

In Abbildung 2.16 sind die realisierbaren Preisbereiche als dunkelgraue Balken und die Produktionskostenbereiche bei unterschiedlichen Betriebsdauern als hellgraue Fläche dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei längerer Betriebsdauer auch die Abgabe von Wasserstoff an die Industrie ökonomisch profitabel realisierbar wäre.

2.4.6 Wasserstoffspeicherung

2.4.6.1 Speicherungsoptionen

Wasserstoff kann als komprimiertes Gas in Tanks, in flüssiger Form oder in Metallhydriden erfolgen. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff benötigt auch die Speicherung unter Druck hohe Volumina und ist daher für die Speicherung größerer Mengen, beispielsweise an Bord eines Flugzeuges, nicht praktikabel. Die Speicherung in flüssiger Form ermöglicht, Wasserstoff unter geringeren Volumina zu speichern, doch ist die für die Verflüssigung benötigte hohe Energiemenge ein die Effizienz dieses Verfahrens reduzierender Faktor [2.33].

In Metallhydriden wird Wasserstoff an der Oberfläche des Metalls oder einer Legierung adsorbiert und anschließend in das Metallgitter diffundiert [2.33].

Der Vorteil der Speicherung in Metallhydriden liegt darin, dass kein hoher Druck benötigt wird. Der Nachteil liegt im hohen Gewicht dieser Speicher. Je nach verwendetem Metallhydrid liegt der Anteil des gespeicherten Wasserstoffs im Bereich von 1,5 % – 7,6 %. Das Befüllen unter Druck von ca. 20 – 30 bar löst eine exotherme Reaktion aus, bei der der gespeicherte Wasserstoff aus dem Hydrid gelöst werden

würde. Daher ist beim Befüllen ein Temperaturmanagement notwendig [2.33].

In der nachfolgenden Abbildung sind Volumens- und Gewichtsbedarfe für jeweils 3 kg Wasserstoff bei Verwendung unterschiedlicher Speichersysteme dargestellt.

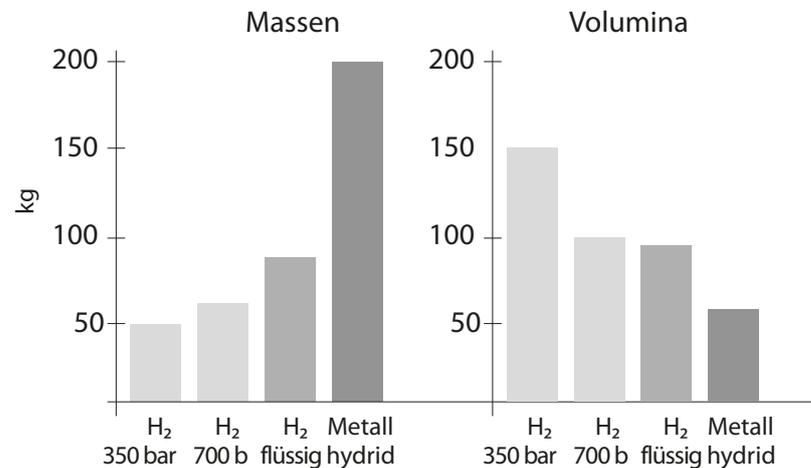


Abbildung 2.17: Vergleich von Masse und Voluminbedarf für Speicherung von 3kg Wasserstoff [2.33]

Eine weitere Möglichkeit, Wasserstoff in großen Mengen zu speichern ist die Speicherung in unterirdischen Kavernen bei Druck von bis zu 200 bar. Am geeignetsten sind hier (ehemalige) Salzlagerstätten. Dieses Verfahren benötigt jedoch umfangreiche geologische Prospektion und auch hohe Investitionskosten. In Europa existieren größere Versuchsanlagen in England und Österreich sowie kleinere in Deutschland, Russland und Tschechien [2.33]. Auch in nicht mehr genutzten Lagerstätten fossiler Energieträgern sowie im Bereich unterirdischer Wasservorkommen kann Wasserstoff unterirdisch gelagert werden [2.34].

Wasserstoff kann auch in vorhandenen Erdgasspeichersystemen, die in den meisten Ländern bereits vorhanden sind, gespeichert und anschließend in bestehenden Erdgasnetzen als Beimengung direkt energetisch genutzt werden. Dieses Verfahren benötigt keine zusätzlichen Investitionen in Speichertechnologie [2.33].

Weitere vor allem für mobile Anwendungen entwickelte Technologien sind die Speicherung in flüssigem organischen Wasserstoffträgern wie Dibenzyltoluen. Mit dieser Technologie können 3 kg Wasserstoff in einer Flasche mit einem Volumen von 50 L und 50 kg gespeichert werden [2.33]. Speziell für die Speicherung an Flughäfen und dem Transport von Wasserstoff, bieten flüssige Materialien, die Wasserstoff in sich speichern und wieder freigeben können (LOHC-Liquid Organic Hydrogen Carriers) große Vorteile. Der Trägerstoff (z.B. Dibenzyltoluol oder Ethylcarbazole) wird unter Energieaufwand mit Wasserstoff beladen. Bevor der Wasserstoff in reiner Form in weiter genutzt werden kann, wird dieser wieder von der Trägerflüssigkeit getrennt, welche wiederum für eine neue Beladung mit Wasserstoff zur Verfügung steht [2.35].

Den größten Vorteil zeigt LOHC in der Handhabung. Dieser kann wie andere flüssige Kraftstoffe in Pipelines oder Tanks transportiert und gelagert werden. Außerdem ist LOHC im Gegensatz zu fossilen Kraftstoffen nicht explosiv [2.36]. In Abbildung 2.18 wird das Versorgungskonzept für LOHC schematisch gezeigt.

Bis dato hat sich die LOHC-Technologie jedoch noch nicht durchgesetzt, da sowohl bei der Beladung als auch bei der entladung von Wasserstoff Energie benötigt wird, wodurch die Gesamtenergieeffizienz stark reduziert wird.

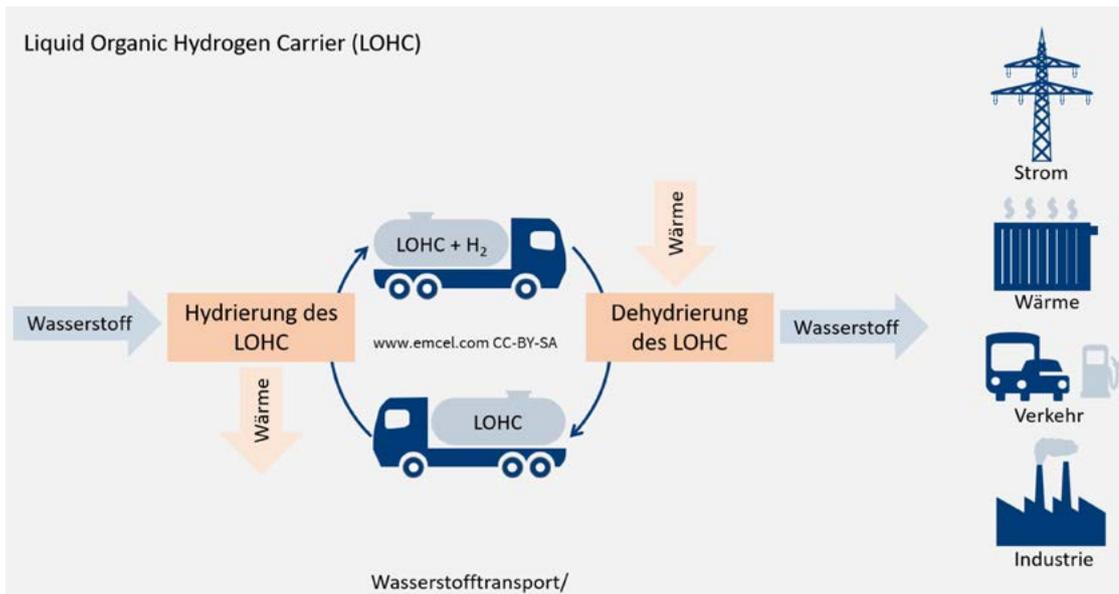


Abbildung 2.18: Prinzip der Versorgung mit LOHC [2.37]

2.4.6.2 Komprimierung für Speicherung im gasförmigen Zustand

Für die Speicherung im gasförmigen Zustand muss Wasserstoff komprimiert werden. Dafür stehen verschiedenen Kompressortechnologien zur Verfügung, die nachstehend kurz erläutert werden.

Kolbenkompressor

In Kolbenkompressoren wird das Gas durch einen oder mehrere Kolben komprimiert. Durch das Verbinden mehrerer Stufen können hohe Drücke im Bereich von 1.000 bis zu 4.500 bar erreicht werden [2.33].

Membrankompressor

In Membrankompressoren bewegt ein Kolben eine Membran, die das Gas komprimiert. Mit dieser Technologie kann Gas auf einen Druck von bis zu 1.000 bar komprimiert werden. Auch Membrankompressoren werden in mehreren Stufen hintereinandergeschaltet, um hohen Druck zu erreichen [2.33].

Ionischer Kompressor

In einem ionischen Kompressor wird Gas durch eine nicht komprimierbare ionische Flüssigkeit in mehreren Zylindern komprimiert. Ionische Flüssigkeiten sind organische Salze mit einem Schmelzpunkt von unter 10 °C. Sie bestehen aus Partikeln mit entweder positiver oder negativer Ladung und vermischen sich nicht mit Wasserstoff. Die ionische Flüssigkeit wird durch eine hydraulische Pumpe zwischen den Zylindern bewegt, wobei der Druck von einem Zylinder zum nächsten erhöht wird. Mit diesem Kompressortyp kann Gas auf einen Druck von 900 bar komprimiert werden. Ein wesentlicher Vorteil ionischer Kompressoren ist, dass sie im Vergleich zu Kolben- oder Membrankompressoren deutlich geringere Dimensionen aufweisen [2.33].

Thermische Kompressoren

In thermischen Kompressoren wird Wasserstoff in Hydriden gespeichert. Zunächst wird dabei Wasserstoff bei geringem Druck und bei Umgebungstemperatur in den Hydridtank gepumpt, wo Wasserstoff im Hydrid adsorbiert wird. Durch Erwärmung auf ca. 140 °C kommt es zu Desorption und der Wasserstoffdruck am Auslass des Systems steigt an. Durch alternierende Erwärmungs- und Abkühlungszyklen kann kontinuierliche Komprimierung erzielt werden. Durch Kombination mehrerer Hydridtanks kann Wasserstoff auf einen Druck von rund 200 bar komprimiert werden. Der Vorteil dieser Technologie ist, dass sie abgesehen von den Ein- und Auslassventilen mit deutlich weniger beweglichen Teilen auskommt und nahezu geräuschlos arbeitet [2.33].

Die für die Komprimierung notwendige Energie ist abhängig von der Kompressortechnologie und dem finalen Druck. Für adiabatische Komprimierung, bei der kein Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt, wird für das Erreichen von Komprimierungsdrücken von 200 – 700 bar Energie im Bereich von 10 – 16 MJ/kg Wasserstoff benötigt, was 8 % bis 12 % des Energiegehalts des Wasserstoffs entspricht. Berücksichtigt man zusätzlich Verluste und den Verbrauch von unterstützenden Anlagen, so ist mit einer

Komprimierungsenergie von 15 – 20 MJ/kg Wasserstoff zu kalkulieren, was 10 % – 15 % des Energiegehalts des komprimierten Wasserstoffs entspricht.

2.4.6.3 Verflüssigung von Wasserstoff

Für die industrielle Verflüssigung von Wasserstoff werden verschiedenen Prozesse angewandt, bei denen Helium, Wasserstoff oder Gasmischungen als Kühlmittel dienen. Wasserstoff wird dabei zunächst komprimiert und anschließend in mehreren Stufen auf -253 °C gekühlt. Flüssiger Wasserstoff wird für die weitere Nutzung oder den Transport in isolierten Tanks gelagert. Ein Problem bei der Lagerung flüssigen Wasserstoffs ist die Verdampfung, insbesondere in kleinen Tanks mit großem Oberflächen-/Volumen-Verhältnis, wodurch sich z.B. bei mobilen Anwendungen die Effizienz sehr verringert [2.34].

Für die Verflüssigung von Wasserstoff wird mehr Energie benötigt. Bei Annahme eines idealen Verflüssigungsprozesses reichen 11,8 MJ/kg für die Verflüssigung. In der Realität liegt der Verbrauch jedoch in Abhängigkeit von der Größe der Verflüssigungsanlage im Bereich von 40 MJ/kg und damit etwa 30 % des flüssigen Wasserstoffs für Anlagen mit einer Kapazität von 1000 kg/h.

2.4.6.4 Vergleich des Energieaufwands und finalen Energiegehalts bei Komprimierung oder Verflüssigung

In Tabelle 2.1 ist der Energiebedarf für Komprimierung oder Verflüssigung von Wasserstoff unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen und die daraus resultierende Energiebilanz ersichtlich.

Tabelle 2.1: Energiebilanz (oberer Heizwert) für Komprimierung oder Verflüssigung von Wasserstoff nach [2.33]

Initialer Energiegehalt von Wasserstoff	Energie für Komprimierung	Energie für Verflüssigung	Finaler Energiegehalt nach Verflüssigung bzw. Komprimierung
100 % 142 MJ/kg		80 MJ/kg bei 100 kg/Tag	62 MJ/kg
		50 MJ/kg bei 10.000 kg/Tag	92 MJ/kg
	14 MJ/kg bei 200 bar		128 MJ/kg
	22 MJ/kg bei 700 bar		120 MJ/kg

2.5 Gesetzliche Themen und Normen

2.5.1 Entwicklungen auf EU-Ebene – Novelle RED II

Als Teil des Pakets Fit for 55 wird aktuell (Juli 2022) eine Ergänzung der EU Richtlinie RED II (Renewable Energy Directive) diskutiert. Diese enthält fünf wesentliche Elemente [2.38]:

1. Ehrgeizigere Ziele für erneuerbare Energien: Steigerung des Anteils erneuerbarer Energie im Gesamtenergiemix der EU von 40 % (aktuell 32 %) bis 2030. Ein Unterziel davon betrifft einen Anteil von 2,2 % an „Advanced Biofuels“ und 2,6 % Renewable fuels from non-biological origins (RFNBO), wozu auch Wasserstoff gezählt wird.
2. Erweiterungen im Bereich Kraftstoffzertifizierung und Rückverfolgbarkeit: Grüner Wasserstoff und damit produzierte Produkte (Synfuels) gelten als ein wesentlicher Bestandteil der EU Net Zero Strategie. Um das Marktwachstum in diesem Bereich zu fördern, sollen neue Regeln zu Zertifizierung und Nachverfolgbarkeit eingeführt werden. Dies soll entweder über eine neu aufzusetzende Union Database oder Zertifizierungsschemata wie Certifihy [2.39] erfolgen.
3. Abschaffung bestehender Regeln zu Herkunftsgarantien (Guarantee of Origin [GO]): Im bestehenden System verweigern manche Mitgliedsstaaten Erzeugern, die Empfänger staatlicher Subventionen

sind, die Ausstellung von GOs. Dies wird als Barriere für Stromkaufverträge gesehen, da Unternehmen, die von diesen Herstellern Strom zukaufen, keine Erneuerbare-Energie-Zertifikate erhalten. Nach der Revision von RED II sollen Mitgliedsstaaten verpflichtet werden, GOs an alle Erzeuger von Strom aus erneuerbaren Energien auszustellen, unabhängig davon, ob sie Subventionsempfänger sind oder nicht.

4. Neue Kennzeichnungsmethoden für Produkte, die unter Nutzung erneuerbarer Energie hergestellt wurden: Auf Produkten soll der Anteil der Verwendung erneuerbarer Energie von Rohmaterialgewinnung bis zur Endfertigung angegeben werden. – Inwieweit dies auch für Dienstleistungen (z.B. Flugreisen) umgesetzt werden soll, ist noch unklar.
5. Änderungen im Bereich Biomasse und Biodiversität: Als Reaktion auf Kritik von Naturschutzseite soll künftig die Verwendung von Biomasse aus Urwäldern oder Wäldern mit hoher Biodiversität nicht mehr als erneuerbare Energiequelle anerkannt werden, wobei hier noch Diskussionen in Bezug auf die Definitionen zu erwarten sind.

Eine wesentliche Erleichterung für das Wachstum im Bereich Grüner Wasserstoff ist durch die in der RED II–Novelle ergänzte Lockerung der Additionalitäts-Regeln, wonach bislang Grüner Wasserstoff, bzw. damit produzierte weitere RFNBOs nur dann anerkannt wurde, wenn der für die Produktion notwendige Strom aus neu errichteten Generatoren stammte. In der neuen Fassung der RED II sollen diese Ansprüche reduziert werden [2.40]. Dazu soll Artikel 1(16) der neuen RED II den bestehenden Artikel 27 (3) dahingehend ergänzen, dass das bestehende Rahmenwerk für Additionalität durch ein neues Regelwerk ersetzt wird, und die Zurechnung von RFNBOs, die mit Strom erzeugt wurden, unabhängig davon erfolgt, in welchem Sektor sie verbraucht werden [2.40].

Das „Fit for 55“-Paket enthält auch einen Vorschlag zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr, die „ReFuelEU Aviation-Initiative“ [2.41]. Bis 2025 soll der Anteil der von den Flughäfen zu Verfügung gestellten Sustainable Aviation Fuels inklusive Wasserstoff bei 2 % (davon mindestens 0,04 % synthetische Kraftstoffe) liegen. Bis 2040 wird eine Steigerung auf 37 % und ab 2050 85 % gefordert, weiters soll ein Fonds für einen nachhaltigen Flugverkehr 2023 bis 2050 eingerichtet werden [2.42].

2.5.2 Situation in Österreich

In einer Studie von Frontier Economics [2.43] wurde im Frühjahr 2021 auf die aus der aktuellen RED II und deren nationaler Umsetzung bestehenden Einschränkungen für den weiteren Ausbau grünen Wasserstoffs hingewiesen. Aufgrund des bestehenden und auch geplanten Anstiegs des Anteils der Erneuerbaren hätte Österreich allerdings auch eine günstige Position bei Bezug von Börsenstrom aus dem öffentlichen Netz, denn dieser könnte zumindest größtenteils als „grüner“ Wasserstoff klassifiziert werden. Bei Erreichung des Zieles von 100 % (bilanziell) erneuerbarem Strom bis 2030 und einer Beibehaltung dieses Zieles auch über 2030 hinaus, würde die für den gesamten erzeugten Wasserstoff gelten [2.43].

2.5.3 Normen, Zertifizierungen

Das Zertifizierungssystem CertifyHy ist aktuell das umfangreichste System für die Zertifizierung von Grünem Wasserstoff. Das System wurde durch ein Konsortium unter der Führung von Hincio gemeinsam mit Bölkow Systemtechnik, Grexel, TNO und TÜV SÜD, finanziert durch Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking entwickelt. CertifyHy basiert auf umfangreichen Konsultationen mit über 900 Mitgliedern der CertifyHy-Plattform und der in diesem Rahmen erstellten Arbeitsgruppen. Zwischen 2014 und 2019 wurden die Grundpfeiler für die Entwicklung eines EU-weiten Herkunftsgarantiesystem (GO) entwickelt [2.39].

Aktuell läuft eine Pilotphase, an der die Unternehmen Air Liquide (Industriegaserzeuger), Nouryon (Spezialchemikalien), Air Products, Colruyt Group sowie der Energieversorger Uniper teilnehmen und GOs ausstellen. Die ersten GOs wurden im Dezember 2018 ausgestellt. Im März 2019 hatten 10 Organisationen Konten im Registrierungsdienst eröffnet und 76.000 Zertifikate waren ausgestellt worden. Die ersten kommerziellen Transaktionen wurden mit Kunden wie z.B. H₂Mobility Deutschland getätigt.

In der nächsten Entwicklungsstufe soll ein EU-weites Zertifizierungssystem geschaffen werden, das sowohl GOs umfasst, die den Ursprung von Grünem und Low-Carbon-Wasserstoff an End-Nutzer ausweisen sowie Lieferanten-Zertifikate, die den Compliance-Bedarf und Politikziele abdecken. CertifyHy wird eine europäische Ausstell- und Registrier-Organisation aufstellen, die Schnittstellen sowohl zu

nationalen Registrier-Systemen als auch anderen Energieträgern beinhaltet. Das Pilotprojekt wird dabei fortgesetzt und ausgeweitet, bis das System formal implementiert ist. Für die erfolgreiche Implementierung ist dabei permanenter Abgleich mit dem Umfeld zu Regulativen und Standards notwendig. Durch Informationskampagnen zu Wasserstoffzertifikaten und GOs soll zudem die Akzeptanz des Zertifizierungsschemas erhöht werden. Durch den weiteren Ausbau des CertifyHy-Systems soll grüner und Low-Carbon-Wasserstoff zu einem wichtigen Bestandteil des EU-Energieystems werden [2.39].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Österreichischer Verbrauch flüssiger Kraftstoffe 2019, Quelle: UBA, WKO, [2.13]

Abbildung 2.2: Österreichischer Kerosinverbrauch, Quelle: UBA, WKO, [2.13]

Abbildung 2.3: Lockheed CL-400 SUNTAN[2.11].

Abbildung 2.4: Tupolev Tu-155 [2.12]

Abbildung 2.5: Regionalflugzeugkonzept mit Wasserstofftanks im Rumpf [2.14]

Abbildung 2.6: HK-36 von Boeing Phantom Works während des Demonstrationsfluges (Quelle Diamond Aircraft)

Abbildung 2.7: Antares DLR-H2 [2.16]

Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle [2.17]

Abbildung 2.9: Elektrochemie der wichtigsten Brennstoffzellentypen nach Scherer [2.17]

Abbildung 2.10: Prototyp HY4 [2.19]

Abbildung 2.11: Britten-Norman Islander von Cranfield Aerospace Ltd.

Abbildung 2.12: RC-Helikopter von UTC mit Brennstoffzellenantrieb

Abbildung 2.13: Versorgungsketten für flüssigen Wasserstoff und Synfuels [2.3]

Abbildung 2.14: Potenzielle Wasserstoff-Wertschöpfungsketten [2.31]

Abbildung 2.15: Anteile unterschiedlicher Wasserstoffquellen [2.34]

Abbildung 2.16: Vergleich von Wasserstoffherstellungs- und Bereitstellungskosten mit realistisch erzielbaren Verkaufspreisen [2.36]

Abbildung 2.17: Veranschaulichung des Potenzials der Kostenreduktion bei längerer Betriebsdauer des Elektrolyseurs [2.37]

Abbildung 2.18: Vergleich von Masse und Voluminbedarf für Speicherung von 3kg Wasserstoff [2.38]

Abbildung 2.19: Prinzip der Versorgung mit LOHC [2.42]

Quellenverzeichnis

- [2.1] Clean Sky 2 Joint Undertaking. „Roadmap to Climate Neutral Aviation - Infographic.“ Clean Sky. <https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/Clean-Sky-Infographic-2021-v2.pdf> (abgerufen am 10.10.2021).
- [2.2] EU, Flightpath 2050. Brüssel: Europäische Kommission, 2011.
- [2.3] Fuel Cell and Hydrogen 2 Undertaking and Clean Sky 2 Joint Undertaking. „Hydrogen-powered aviation - A fact-based study of hydrogen technology, economics and climate impact by 2050.“ Publications Office of the European Union, 2020.
- [2.4] A. Krein. „A Green Recovery for Aviation.“ Clean Sky. <https://www.cleansky.eu/node/886> (abgerufen am 10.02.2021).
- [2.5] Europäische Kommission. „Europäischer Aufbauplan.“ Europäische Kommission,. https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_de (abgerufen am 20.01.2021).
- [2.6] I. Kernstock, Strategiepräsentation - Eckpunkte der FTI - Luftfahrtstrategie Österreich 2020+. Wien: Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie, , o.D.
- [2.7] S. Bruce et al., „Opportunities for hydrogen in aviation,“ CSIRO, 2020. Accessed: 21.01.2021.
- [2.8] J. Chatzimarkis, Hydrogen Europe - Presentation for kick-off meeting for the Austrian Hydrogen Strategy. Vienna, 2019.
- [2.9] I. Kernstock, „Forschung und Innovation im Luftfahrtsektor: Chancen nützen auf internationalen Märkten,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Wien, 2015.
- [2.10] Pentalaterales Energieforum, „Joint Political Declaration of the Pentalateral Energy Forum on the Role of Hydrogen to Decarbonise the Energy System in Europe,“ Pentalaterales Energieforum, Den Haag, 2020.
- [2.11] J. L. Sloop, Liquid Hydrogen as Propulsion Fuel, 1945-1959. Washington D.C.: NASA, 1978.
- [2.12] AeroTelegraph. „Die Tupolev, die bereits vor 32 Jahren mit Wasserstoff flog.“ <https://www.aerotelegraph.com/tu-155-sowjetunion-die-wasserstoff-tupolev-die-bereits-in-1980er-jahren-flog> (abgerufen am 20.08.2021).
- [2.13] Cordis. „G4RD-CT.“ <https://cordis.europa.eu/project/id/G4RD-CT-2000-00192/de> (abgerufen am 23.10.2021).
- [2.14] A. Westenberg, „Cryoplane – Hydrogen Aircraft,“ in H2 Expo, Hamburg, 2003, S. 32.
- [2.15] P. Wiesmayer. „„ZEROe“: Airbus stellt neue Null-Emissions Flugzeug-Konzepte vor.“ Innovation Origins. <https://innovationorigins.com/de/zeroe-airbus-stellt-neue-null-emissions-flugzeug-konzepte-vor/> (abgerufen am 23.10.2021).
- [2.16] DLR. „Antares DLH-H2 außer Betrieb.“ DLR. <https://www.dlr.de/content/de/artikel/luftfahrt/forschungsflotte-infrastruktur/dlr-flugzeugflotte/antares-dlr-h2-ausser-betrieb.html> (abgerufen am 21.08.2021).
- [2.17] G. G. Scherer, „Fuel Cell Types and Their Electrochemistry,“ in Fuel Cells and Hydrogen Production, A. Weber and T. Lipman Eds. New York: Springer, 2019, S. 83-98.
- [2.18] AeroTelegraph. „Taugt Wasserstoff als Revolutionär der Luftfahrt?“ <https://www.aerotelegraph.com/wasserstoff-flugzeug-luftfahrt-einfaches-molekuel-kniffliger-umgang> (abgerufen am 22.08.2021).
- [2.19] AeroTelegraph. „Wasserstoff-Testflugzeug legt Bruchlandung hin.“ <https://www.aerotelegraph.com/wasserstoff-testflugzeug-legt-bruchlandung-hin#:~:text=Bei%20einem%20Testflug%20gab%20es,von%20Zero%20Avia%20zu%20Bruch.&text=Das%20britische%20Unternehmen%20hat%20sich,ohne%20jegliche%20Emissionen%20fliegen%20lassen.> (abgerufen am 25.08.2021).

- [2.20] Cranfield Aerospace Ltd., „Cranfield Aerospace Solutions obtains a B-N Islander aircraft.“ [2.Online]. Available: <https://projectfresson.uk/cranfield-aerospace-solutions-obtains-a-b-n-islander-aircraft>
- [2.21] E. I. S. Secretary of State for Business, UK Hydrogen Strategy. London: Secretary of State for Business, Energy & Industrial Strategy, 2021.
- [2.22] A. Baroutaji, T. Wilberforce, M. Ramadan, and A. G. Olabi, „Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 106, S. 31-40, 2019.
- [2.23] FCHEA. „Fuel Cell Auxilliary Power Units.“ Fuel Cell and Hydrogen Energy Association. <https://www.fchea.org/in-transition/2018/11/5/fuel-cell-auxiliary-power-units> (abgerufen am 25.08.2021).
- [2.24] Airbus. „Hydrogen fuel cells, explained - Cross-industry collaboration is set to unlock the technology's potential for aviation.“ <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2020/10/hydrogen-fuel-cell-cross-industry-collaboration-potential-for-aviation.html> (abgerufen am 10.09.2021).
- [2.25] S. Rondinelli, A. Gardi, R. Kapoor, and R. Sabatini, „Benefits and challenges of liquid hydrogen fuels in commercial aviation,“ *International Journal of Sustainable Aviation*, vol. 3, no. 3, S. 200-211, 2017.
- [2.26] E. S. Hanley, J. Deane, and B. Ó. Gallachóir, „The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, S. 3027-3045, 2018.
- [2.27] EWE. „Die Farben des Wasserstoffs.“ EWE. <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/die-farben-des-wasserstoffs> (abgerufen am 10.09.2021).
- [2.28] M. Grupp, „Zukunft Wasserstoff,“ *DIN-Magazin*, vol. 21, no. 1, 2021.
- [2.29] T. Hamacher, „Wasserstoff als strategischer Sekundärenergieträger,“ in *Wasserstoff und Brennstoffzelle - 2. aktualisierte und erweiterte Auflage*, J. Töpler and J. Lehmann Eds. Wiesbaden: Springer, 2017, S. 1-23.
- [2.30] J. Töpler and J. Lehmann, *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*. 2. Auflage. Berlin: Springer, 2017.
- [2.31] U. Bünger, J. Michalski, F. Crostogina, and O. Kruck, „Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications,“ in *Compendium of hydrogen energy*, M. Ball, A. Basile, and T. N. Vziroglu Eds. Amsterdam: Woodhead Publishin - Elsevier, 2016, S. 133-163.
- [2.32] M. Ball and M. Weeda, „The hydrogen economy - Vision or reality?,“ in *Compendium of hydrogen energy*, M. Ball, A. Basile, and T. N. Vziroglu Eds. Amsterdam: Woodhead Publishin - Elsevier, 2016, S. 238-266.
- [2.33] M. Boudellal, *Power-to-Gas Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition* Berlin: de Gruyter, 2018.
- [2.34] M. Ball, A. Basile, and T. N. e. Vziroglu, *Compendium of hydrogen energy*. Amsterdam: Woodhead Publishin - Elsevier, 2016.
- [2.35] I. Makaryan, I. Sedov, and A. Maksimov, „Hydrogen storage using liquid organic carriers,“ *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 93, no. 12, S. 1815-1830, 2020.
- [2.36] S. Gleitmann and E. Augusten, *Wasserstoff und Brennstoffzellen*. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag, 2021.
- [2.37] EMCEL. „Wie funktionieren LOHC-Wasserstoffspeicher?“ <https://emcel.com/de/lohc-wasserstoffspeicher/> (abgerufen am 25.10.2021).
- [2.38] J. Collel. „5 Key Updates to the Renewable Energy Directive II (REDII).“ FlexiDAO. <https://www.flexidao.com/post/5-key-updates-to-the-renewable-energy-directive-2> (abgerufen am 12.09.2021).
- [2.39] CertifyHy. „CertifyHy.“ CertifyHy. <https://www.certifyhy.eu/> (abgerufen am 10.09.2021).

- [2.40] EU, „Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL COM(2021) 557 final 2021/0218 (COD),“ European Commission, Brussels, 2021.
- [2.41] European Parliament, „ReFuelEU Aviation initiative: Sustainable aviation fuels and the fit for 55 package.“ https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2022-0199_DE.pdf (abgerufen am 04.08.2022)
- [2.42] European Parliament, „Bericht über den Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen für einen nachhaltigen Luftverkehr.“ [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/de/document/EPRS_BRI\(2022\)698900](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/de/document/EPRS_BRI(2022)698900) (abgerufen am 04.08.2022)
- [2.43] FrontierEconomics, „Grundlage für die Positionierung zu Wasserstoff,“ Frontier Economics, Wien, 2021.

3 Identifikation von technologischen Herausforderungen und technologischen Potenzialen



3 Identifikation von technologischen Herausforderungen und technologischen Potenzialen

3.1 Technologische Herausforderungen und Rahmenbedingungen

Bei der energetischen Betrachtung im Vergleich zu Kerosin, scheint der Einsatz von Wasserstoff, mit der dreifachen Energiemenge pro Masseneinheit (gravimetrische Energiedichte), vorteilhaft zu sein. Die Nachteile und damit auch eine der Hauptursachen für die technischen Herausforderungen werden mit der Betrachtung der volumetrischen Energiedichte deutlich. Diese besagt wieviel Menge an Energie ein bestimmtes Volumen beinhaltet.

Wasserstoff hat bei Raumtemperatur und Normaldruck eine sehr geringe Dichte ($\sim 0,09 \text{ kg/m}^3$). Um für die Luftfahrt attraktive Mengen an Wasserstoff bereitzustellen zu können, muss dieser mit den bereits erläuterten Methoden, komprimiert oder verflüssigt werden. Im Falle von flüssigem Wasserstoff (LH_2) – welcher die größte Dichte verspricht – benötigt dieser noch um das Vierfache mehr an Volumen um die gleiche Energiemenge von Kerosin zu speichern. Unter 700 bar komprimierter gasförmiger Wasserstoff (GH_2) sogar um das 8,5-Fache.

Kurz zusammengefasst ergibt sich durch die Speicherung von Wasserstoff ein höherer Raumbedarf als bei Kerosin, was unter anderem bei der Thematik von Speichertanks an Flughäfen und vor allem bei der Speicherung in Luftfahrzeugen erhebliche Herausforderungen mit sich bringt.

In diesem Kapitel werden diese und weitere Hürden entlang der Wertschöpfungskette aufgezeigt, wodurch zukünftige Forschungs- und Entwicklungsbereiche identifiziert werden können.

Für eine strukturierte Analyse der Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Potenziale ist die Identifizierung der für die Luftfahrt wichtigsten Glieder aus der Zulieferkette hilfreich.



Abbildung 3.1: Explizit wichtige Glieder der Wasserstoff-Versorgungskette für die Luftfahrt

3.1.1 Versorgung von Flughäfen und bodenseitige Speicherung von Wasserstoff

Der Versorgung von Flughäfen mit grünem Wasserstoff geht ein CO_2 -freier Herstellungsprozess als Voraussetzung voraus. Dafür eignet sich, wie bereits erläutert, das Verfahren der Elektrolyse durch nachhaltige Energiequellen. Der produzierte Wasserstoff wird im nächsten Schritt für den Transport komprimiert oder verflüssigt. Kleinere Flughäfen und Flugplätze könnten durch Tankcluster versorgt werden. Für größere Flughäfen eignet sich zudem die Versorgung durch Wasserstoff-Pipelines mit Sustainable Aviation Fuels (SAF). Eine weitere Möglichkeit wäre der Transport von gebundenem Wasserstoff an einer Trägerflüssigkeit (LOHC).

Pipelines für flüssigen Wasserstoff gelten derzeit als unwirtschaftlich, denn diese würden das Fünffache der konventionellen Pipelines kosten.

In der Clean-Sky-Studie „Hydrogen-powered aviation; A fact-based study of hydrogen technology“ [3.8] werden zudem verschiedene Szenarien für die Etablierung der notwendigen Wasserstoff-Infrastruktur und dem Aufkommen von den ersten mittels Wasserstoff betriebenen Regionalflügen skizziert. Dabei könnten kleinere Flughäfen den Beginn einleiten, die einen Zugang zu großen Mengen an erneuerbarer Energie (Windkraft, Solar, Wasserkraft) haben. Hier werden beispielsweise Standorte an Küstenregionen, sowie Regionen im Süden von Europa genannt.

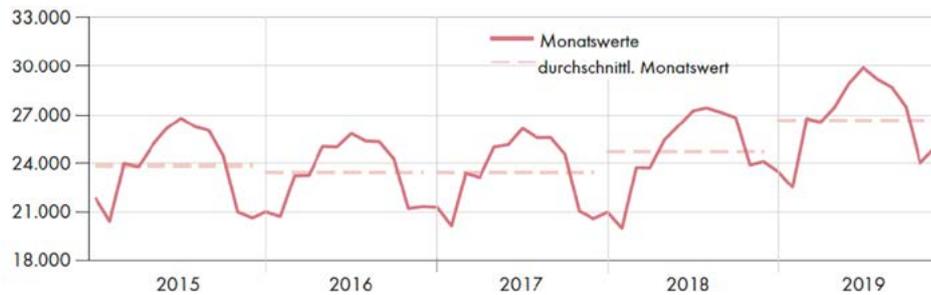


Abbildung 3.2: Schwankungen der Starts und Landungen in Österreich[3.1].

Auf ein Jahr betrachtet, ist der Flugverkehr in Österreich nicht konstant (Abbildung 3.2). Die Anzahl der Starts und Landungen nimmt in den Sommermonaten auf ein Maximum zu. Dementsprechend ist auch der Wasserstoffbedarf nicht konstant. Die Schlussfolgerung daraus wäre, dass in den Sommermonaten mehr Wasserstoff hergestellt und verteilt werden muss. Tatsächlich kann davon ausgegangen werden, dass im Sommer regenerative Energiequellen wie Photovoltaik ihre Jahreshöchstleistung erreichen, was zu einer Synergie zwischen den beiden Effekten führen könnte. Dennoch ist es wichtig auf die Schwankungen im Wasserstoffbedarf für die Luftfahrt, mit längerfristige Speicheranlagen zu reagieren, um möglichen Engpässen in der Versorgung entgegenzuwirken.

3.1.2 Betankung der Luftfahrzeuge

Wenn Wasserstoff noch nicht vor dem Transport verflüssigt wurde, muss die Verflüssigung am Flughafen erfolgen. Anschließend gelangt LH_2 durch Betankungsanlagen oder durch Tankcluster in das Luftfahrzeug. Der Betankungsvorgang selbst könnte sich bei Regional- und Zubringerflügen zeitlich um das Doppelte verlängern. Bei Mittel- und Langstreckenflügen sogar um das Dreifache. Daraus würde eine längere Standzeit bis zum nächsten Abheben des Flugzeuges resultieren (Turnaround Time). Der Verlängerung des Betankungsvorgangs könnten jedoch neue Technologien entgegenwirken. Vorteilhaft wäre die Erhöhung der Durchflussrate an Wasserstoff, oder mehrere Betankungspunkte am Flugzeug, was parallele Betankung von mehreren Betankungswägen ermöglichen könnte. Dem entgegen steht wiederum der eingeschränkte Platz an hoch frequentierten Flughäfen, was das gleichzeitige Manövrieren mehrerer Betankungsfahrzeuge erschwert. Bei der Handhabung von Wasserstoff braucht es zudem die Etablierung von neuen Sicherheitsmaßnahmen und dementsprechend Unterweisungen für das Personal, um das Risiko auf ein geringes Level vergleichbar wie jenes im Umgang mit fossilen Kraftstoffen zu bringen. Durchaus vorteilhafter gestaltet sich das Betanken von synthetischem Kraftstoff (z.B. SAF). Hierfür kann, nach der Zertifizierung und Zulassung, die bestehende Infrastruktur für Kerosin genutzt werden. Die Betankungszeiten und die Handhabung von SAF gleichen jenen von Kerosin [3.9].

3.1.3 Speicherung im Luftfahrzeug

Für Luftfahrtanwendungen ist flüssiger Wasserstoff aufgrund der relativ hohen Energiedichte am geeignetsten. Der Übergang von gasförmiger- zur flüssigen Phase findet erst bei sehr tiefen Temperaturen von -253 °C ($\sim 20\text{ Kelvin}$) statt. Dadurch ergeben sich hohe technische Anforderungen an den LH_2 -Tank. Die notwendigen -253 °C über längeren Zeitraum zu halten und somit ein durch die Erwärmung herbeigeführtes Verdampfen des Wasserstoffs (engl. Boil-off loss) zu verhindern, stellt - neben der Aufbewahrung selbst - die zentrale Aufgabe eines Kryogenbehälters dar. Die vorherrschenden Umgebungsbedingungen, der Isolationsgrad des Tanks, die Aufbewahrungszeiten, die Geometrie und die Menge an gespeicherten Wasserstoff sind somit entscheidende Parameter für die Mengen an „verlorenem“ LH_2 . Der durch die Wärmeeinleitung hervorgerufene Verdampfungseffekt (Boil-off) führt in weiterer Folge weiters zu einem Druckanstieg im Tank. Um dem Überschreiten des zulässigen Betriebsdruckes entgegenzuwirken, muss durch die Öffnung eines Sicherheitsventils der verdampfte Wasserstoff abgelassen werden, denn ansonsten könnten am Tank Schäden entstehen [3.10].

3.1.3.1 Isolation

Um den Wärmetransport in den LH_2 -Tank zu minimieren, sollte dieser isoliert werden. Dadurch kann die Menge an Wasserstoff minimiert werden, die durch das Verdampfen des Wasserstoffes aus dem Tank entlassen wird. Grundsätzlich stehen dafür drei unterschiedliche Isolationstypen zur Auswahl, deren

Vor- und Nachteile je nach Anwendung gesondert evaluiert werden müssen.

- Mehrschichtige Isolation (MLI): Diese Isolierung besteht aus dünnen, sich abwechselnden Schichten aus Metallfolie und einem Isolationsmaterial wie beispielsweise Glasfaser oder Polyester. Diese Isolierung führt zu einem schweren Tankgewicht und ist anfällig für Produktionsfehler [3.11].
- Vakuum-Isolation: Zwischen Innen- und Außenwand des Tanks wird ein Vakuum erzeugt. Das Eindringen von Luft muss daher durch Dichtungen verhindert werden, denn bei den tiefen Temperaturen von flüssigem Wasserstoff, würde die Luft bei Kontakt sofort gefrieren und im schlimmsten Fall den Treibstofffluss unterbrechen. In der Raumfahrt kommt dieser Isolationstyp bereits zum Einsatz und zeigt auch für die Luftfahrt großes Potenzial. Die Isolierung führt dennoch zu einem hohen Systemgewicht und das Aufrechterhalten des Vakuums stellt eine zusätzliche Herausforderung dar [3.11].
- Isolierung mit Schaumstoff: Schaumstoff mit geringer thermischer Leitfähigkeit und einer geringen Dichte wird zwischen der dünnen metallischen Innen- und Außenwand des Tanks eingebettet, wodurch das Isolationsmaterial geschützt wird. Isolierungen mit Schaumstoffen sind generell weniger anfällig für ein Versagen als es bei der Vakuumisolierung der Fall ist [3.11]. Dennoch eröffnet sich in diesem Feld weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

3.1.3.2 Tankanordnung und Geometrie

Konventionelle Kerosintanks sind meist in den Flügel des Flugzeuges integriert (Integraltank), dabei dient der Raum im Rumpf primär für die Unterbringung der Nutzlast. Da der Raumbedarf für Wasserstoff größer ist, scheint diese Konfiguration für Flüssigwasserstofftanks nicht realisierbar zu sein. Zusätzlich gibt es auch geometrische Einschränkungen für den Tank. Die optimale Form für einen Wasserstofftank ist zylinderförmig mit halb-kugel-förmigen Endkappen. Bei dem konventionellen Rumpfdesign heutiger Verkehrsflugzeuge (Tube and Wing) bietet die Unterbringung des Tanks im Rumpf einen möglichen Lösungsansatz. Dadurch schwindet jedoch Platz für die Unterbringung von Passagieren und Fracht. Die Verlängerung des Flugzeugrumpfs könnte dieser Problematik entgegenwirken, oder alternativ könnten auch bei neuen Konzepten von Flugzeugen die Tanks extern angebracht werden. Diese Konfigurationen haben jedoch den Nachteil, dass sich der aerodynamische Widerstand vergrößert und das Gesamtgewicht des Flugzeugs sich erhöht. Bei der exponierten Anbringung außerhalb des Rumpfs, müssen die Tanks zusätzlich gegen äußere Gewalteinwirkung geschützt werden [3.10].

Die Unterbringung der sperrigen Wasserstofftanks führt zur Idee eines grundlegend neuen Flugzeugdesigns. Der Nurflügler (eng. Blended Wing Body - BWB) könnte das konventionelle Tube and Wing Design ersetzen. Dabei ist der gesamte Rumpf ein Teil der Tragfläche und trägt so wesentlich zur Generierung von Auftrieb bei. Abbildung 3.15, zeigt solch ein Design von Airbus. Der gestreckte Rumpf bietet zudem eine verbesserte Option für Unterbringung der Wasserstofftanks. Ein Nurflügler fliegt zusätzlich effizienter. Die Herausforderungen liegen unter anderem in der geringen Erfahrung in der Herstellung solcher Flugzeuge und dessen Struktur. In weitere Folge muss mit einem langen Entwicklungs- und Zulassungsprozess gerechnet werden, was eine Marktreife in naher Zukunft unwahrscheinlich erscheinen lässt.

3.1.3.3 Masse des Tanksystems

Die Speichereffizienz ist ein entscheidender Parameter, um Tanksysteme bewerten zu können. Dabei wird die Masse des speicherbaren Kraftstoffs in Relation zum Tankgewicht inklusive Kraftstoff gesetzt. Bei einem Tank mit einer Speichereffizienz von 50 wt% (Gewichtsprozent) ist die Hälfte des Gesamtgewichts auf den Kraftstoff selbst zurückzuführen. Erreicht ein Wasserstofftank eine Effizienz von 33 wt%, dann ist dieser genauso schwer wie ein Kerosintank, der mit dem gleichen Energieinhalt beladen ist. Das liegt daran, dass flüssiger Wasserstoff (bei gleicher Energiemenge) ungefähr dreimal leichter als Kerosin ist. Bei Erreichung von 66 wt% wiegt der beladene Wasserstofftank nur die Hälfte des Kerosintanks. Über die technisch erreichbare Speichereffizienz gibt es in der Fachliteratur unterschiedliche Ergebnisse. Die Werte variieren zwischen 20 wt% bis zu über 70 wt% [3.12]. Heutige Prototypen erreichen derzeit Effizienzen im unteren Bereich bei maximalen 20 wt% [3.8]. Laut der Clean-Sky Studie „Hydrogen-powered aviation; A fact-based study of hydrogen technology“ [3.8] ist es erforderlich, dass Speichersysteme von wasserstoffbetriebenen Kurzstreckenflugzeugen die Marke von 35 wt% und Langstreckenflugzeuge sogar 38 wt% erreichen, um einen ökonomischen und effizienten Betrieb zu ermöglichen.

Tabelle 3.1: Zielwerte für die Speichereffizienz von Wasserstofftanks

Prototyp im Zubringer Segment	20 wt%
Zielwert für Kurzstreckenflugzeuge	35 wt%
Zielwert für Langstreckenflugzeuge	38 wt%

3.1.4 Wasserstoffantrieb von Luftfahrzeugen

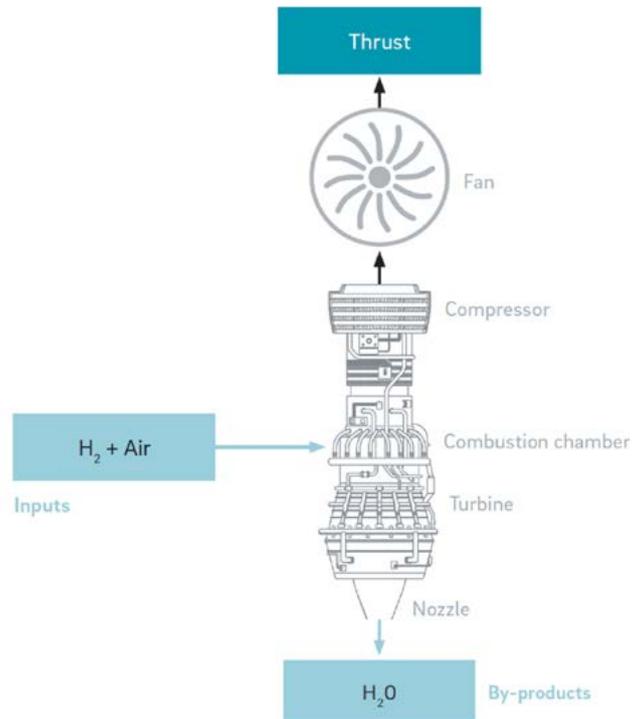


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau der Wasserstoffverbrennung in einem Strahltriebwerk.

Die gespeicherte Energie in Wasserstoff kann konventionell durch Verbrennung in Strahltriebwerken, Turboprop-Triebwerken oder Kolbenmotoren zu Schubkraft für das Flugzeug umgewandelt werden. Alternativ bietet sich die Nutzung von Brennstoffzellen an. Dabei wird durch die Energie in Wasserstoff elektrischer Strom erzeugt, der wiederum für den Antrieb von Elektromotoren genutzt werden kann. Dabei ist auch der Einsatz von hybriden Systemen denkbar, bei denen die Vorteile der beiden Ansätze genutzt werden können.

3.1.4.1 Herausforderungen von H₂-Strahltriebwerken

Heutige Strahltriebwerke sind sehr zuverlässig und sind bereits hochgradig optimiert. Jedoch muss diese – auf Kerosinbetrieb ausgelegte Technologie – auf die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff modifiziert werden. Die hohe Flammgeschwindigkeit, hohe Diffusion und der breite Bereich der Entflammbarkeit, erfordern besondere technische Änderungen der Brennkammer. Bei der Verbrennung von Wasserstoff unter hohen Temperaturen entstehen zudem Stickoxide (NO_x).

Dieser Effekt kann jedoch auf ein Minimum reduziert werden, wenn es beispielsweise zu einer intensiveren Vermischung des Luft-Wasserstoff-Gemischs in der Brennkammer kommt [3.13]. Nicht nur an der Brennkammer müssen Veränderungen vorgenommen werden. Auch die Treibstoffzuleitungen müssen für den Transport von Wasserstoff geeignet sein. Wie bei allen grundlegenden Veränderungen in der Luftfahrt, kann aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen von einem verlängerten Zulassungsprozess ausgegangen werden [3.10]. Die Modifikationen halten sich im direkten Vergleich zur Implementierung von elektrischen Systemen im Rahmen und bringen die geringsten technischen Änderungen mit sich [3.14].

3.1.4.2 Herausforderungen von Brennstoffzellen

Durch die Automobilbranche wurden in den letzten Jahren große Fortschritte in der Erforschung und Entwicklung von PEMFCs erreicht. Hier wurde besonders die Lebenserwartung erhöht und die Kosten reduziert. Marktreife Brennstoffzellen haben eine noch weitaus geringere spezifische Leistung (~1,6 kW/kg) als Strahltriebwerke. Zusätzlich reagieren Brennstoffzellen langsamer auf Lastwechsel [3.15]. Für den optimalen Betrieb ist zudem auch ein Kühlsystem notwendig. Zusätzliche Komponenten des Powertrains wie der Elektromotor, die Verkabelung und die Software müssen die hohen Sicherheitsanforderungen ebenso erfüllen.

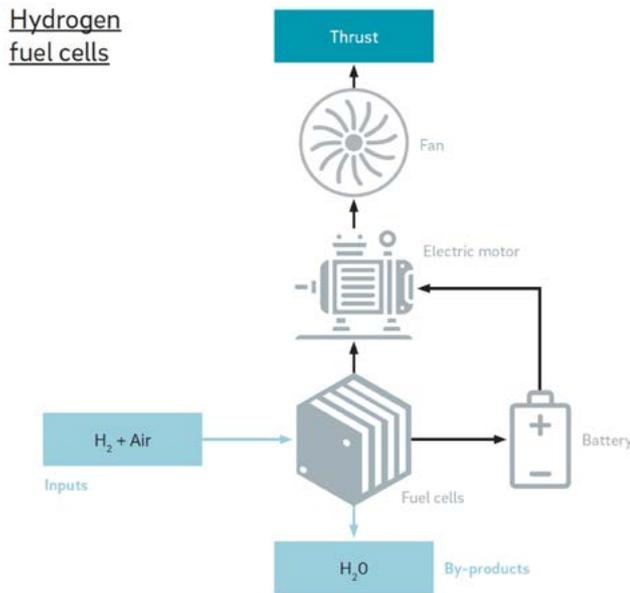


Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellenantriebs für Luftfahrzeuge.

3.2 Identifikation, Qualifizierung und Quantifizierung zukünftiger technologischer Potenziale

3.2.1 Potenziale in der Versorgung, Betankung und Infrastruktur

Die Einschätzung der befragten ExpertInnen liefert folgende potenzielle Versorgung und Transportmöglichkeiten.

Die Verfügbarkeit von reinem Wasserstoff im Gasnetz sowie die Unterflurbetankung wird von den befragten ExpertInnen ab 2040 als möglich erachtet. Reiner flüssiger Wasserstoff (kryogen) könnte ab 2025, spätestens jedoch 2030 eingesetzt werden. Der Einsatz gebunden als Alkohol oder als Ammoniak wird ab dem Jahr 2025 erwartet. Die LOHC Technologie, also die chemische Bindung in aromatischen Kohlenwasserstoffen, könnte nach den Einschätzungen ab 2030 bzw. 2040 zum Einsatz kommen.

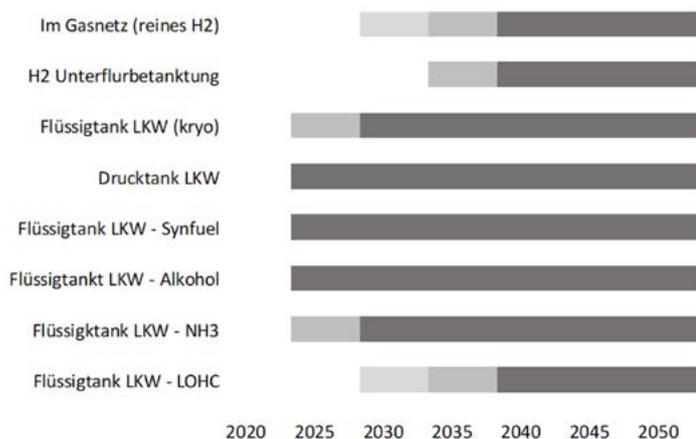


Abbildung 3.5: Wasserstoff Transportmöglichkeiten; (Frage: Wie wird Wasserstoff im Rahmen der Luftfahrtindustrie künftig transportiert und betankt und ab wann ist die jeweilige Technologie verfügbar?) Legende: von hell nach dunkel: zunehmende Relevanz

Der größte Anteil des Passagier- und Flugverkehrs in Österreich findet auf dem Flughafen Wien-Schwechat statt. Diesen Standort mit grünem Wasserstoff zu versorgen und zu betreiben hätte somit die größte Wirkung auf die Öko-Bilanz der österreichischen Luftfahrt. Dennoch eignen sich kleinere Flughäfen und Flugplätze besser für die Erprobung der neuen Infrastruktur. Den notwendigen Platz für die Speicher-

und Verflüssigungsanlagen zu finden, gestaltet sich auf kleineren Standorten wesentlich leichter. Zudem könnte sich die neue Infrastruktur einfacher in den laufenden Betrieb einbinden lassen.

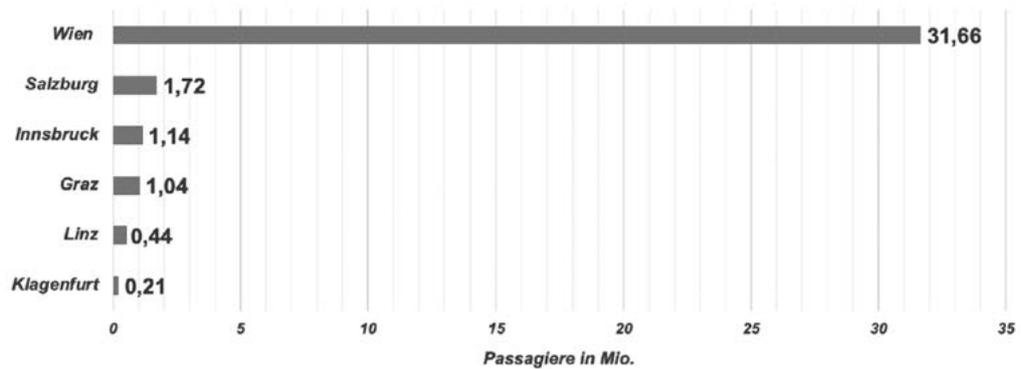


Abbildung 3.6: Passagierzahlen auf österreichischen Flughäfen im Jahr 2019[3.1].

3.2.2 Potenziale in der Speicherung im Luftfahrzeug

Aus der Befragung der ExpertInnen geht hervor, dass abgesehen von der Nutzung von SAF, der mit herkömmlichen Antriebs- und Speichertechnologien kompatibel ist, der Einsatz und die Speicherung von flüssigem Wasserstoff als am geeignetsten für die Luftfahrt gesehen wird. Aber auch von der Druckspeicherung wird erwartet, dass diese in Zukunft an Bord Einsatz findet.

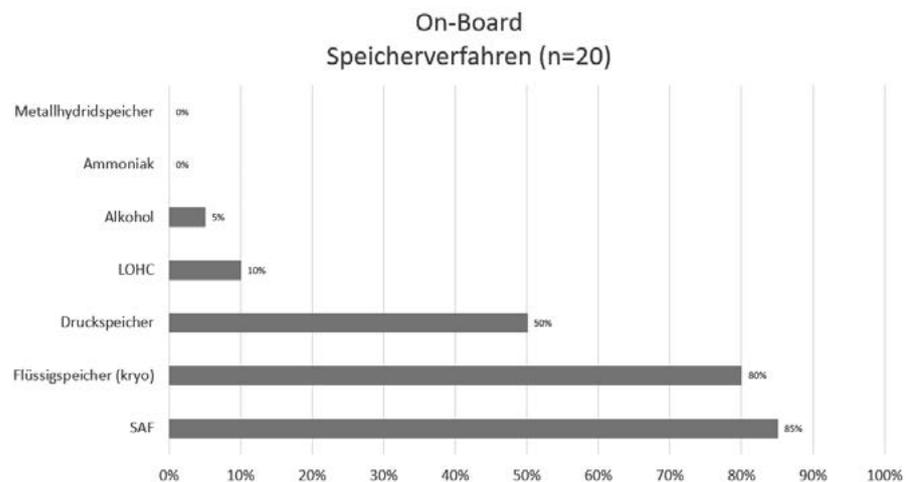


Abbildung 3.7: On-Board Speicherverfahren
(Frage: Welche On-Board H₂-Speicherverfahren werden sich künftig für die Luftfahrt am stärksten durchsetzen?)

3.2.3 Potenziale im Antrieb

Hinsichtlich der künftigen Energieträger geht klar hervor, dass in allen wesentlichen Luftfahrzeugklassen mit hoher Wahrscheinlichkeit Wasserstoff in Zukunft eine Rolle spielen wird. Für kleinere Luftfahrzeuge wie UAVs, Propellerflugzeuge und Helikopter wird auch der rein elektrische Betrieb in Erwägung gezogen. Synfuels werden als Energieträger für alle Klassen gesehen, wobei auch dort reiner Wasserstoff z.B. für die Hilfsturbine oder in Brennstoffzellen zur Versorgung der elektrischen Verbraucher an Bord eingesetzt werden wird.

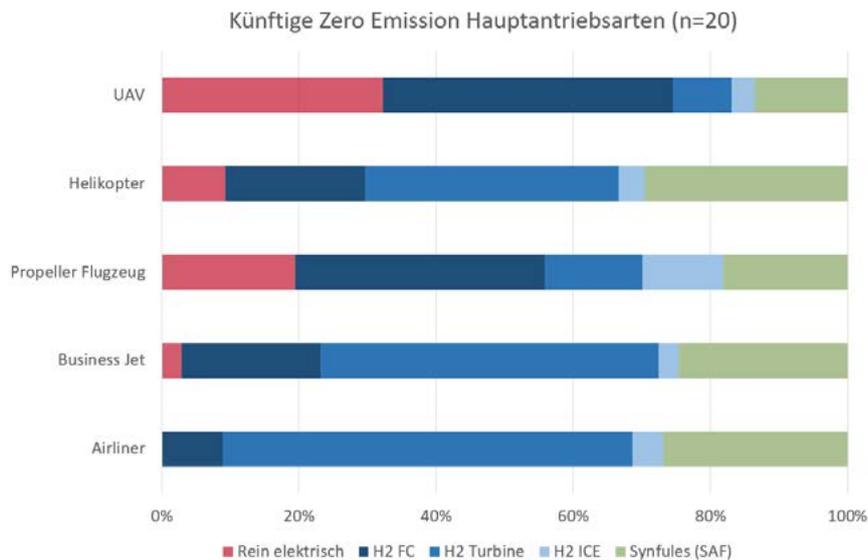


Abbildung 3.8: Wahrscheinlichkeit des künftigen Einsatzes von Energieträgern
 (Frage: Welche zero Emission Antriebsarten wird es künftig in der Luftfahrt geben?)

3.2.3.1 Potenzial von H₂-Turbinen

H₂ Turbinen sollen künftig herkömmliche Turbinenanwendungen ersetzen. Kleine Turbinen, die als Hilfsturbine (APU) fungieren, werden schon ab 2030 im Serieneinsatz gesehen. Mittlere Turbinenklassen für Business Jets aber auch für Helikopter werden ab 2030, spätestens jedoch ab 2040 im Einsatz gesehen. Große H₂ Turbinen für Narrowbody Jets können ab 2040 und sehr große Turbinen für Widebody Jets nach 2040 Verwendung finden.

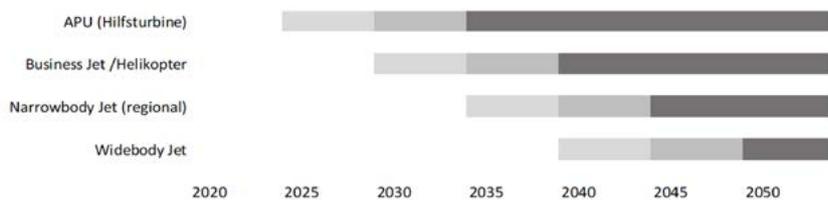


Abbildung 3.9: Entwicklung künftiger H₂ Turbinen nach Leistungskategorien
 (Frage: In welchen Leistungskategorien könnten künftig H₂ Turbinen verwendet werden?)
 Legende: von hell nach dunkel: zunehmende Relevanz

Wasserstoffantriebe – unabhängig ob Verbrennung in Turbinen oder Brennstoffzellen – haben großes Potenzial, die Klimabilanz der Luftfahrt zu verbessern, bis hin emissionsfreies Fliegen zu ermöglichen. Durch die Verbrennung von Wasserstoff in Strahltriebwerken entsteht kein CO₂, CO SO_x sowie Ruß. Dennoch ist dieser Prozess nicht komplett emissionsfrei. Wasserdampf sowie Stickoxide bleiben als Beiprodukt. Wasserdampf führt in hohen Flughöhen zur Bildung von Kondenswolken. Diese entwickeln sich zu langlebigen Eiswolken, die ebenso zum Treibhauseffekt beitragen. Es wird noch daran geforscht, ob die Verbrennung von reinem Wasserstoff gleichermaßen die Bildung von Kondensstreifen begünstigt wie die Verbrennung von Kerosin, da wie bereits erwähnt die Emission von Ruß ausbleibt und dieser als Keim für Eiskristalle dient [3.14].

Obwohl heutige Strahltriebwerke weitestgehend ihr Entwicklungspotenzial erreicht haben, gelingt es Ingenieure und Wissenschaftler weitere Methoden zu finden, um die Effizienz zu steigern. Exemplarisch sollte die revolutionäre Technik hinter einem Water-Enhanced Turbofan genannt werden:

→ Water-Enhanced Turbofan

In einem Water-Enhanced Turbofan ist ein Dampfkraftprozess im Gasturbinenprozess integriert. Daraus entsteht eine nasse Verbrennung, wodurch die Emissionen deutlich reduziert werden. Das Unternehmen MTU Aero Engines forscht derzeit unter anderem am Potenzial dieser Technologie.

Der durch die Abgaswärme erzeugte Dampf wird in die Brennkammer eingespritzt. Der befeuchtete Massenstrom enthält deutlich mehr entziehbare Energie als Luft. Das Hochpumpen des genutzten flüssigen Wassers auf den erforderlichen Druck erfordert nur die halbe Leistung gegenüber der Kompression von Luft, was den internen Leistungsbedarf des Motors reduziert. Beides führt zu einer deutlichen Steigerung der spezifischen Leistung im Vergleich zu einer herkömmlichen Gasturbine. Die Rückgewinnung der in der Regel ungenutzten Abgaswärme in das System führt zu einer erheblichen Steigerung des

thermodynamischen Wirkungsgrads. Durch einen dem Dampferzeuger nachgeschalteten Kondensator wird das Wasser in seine flüssige Phase zurückgeführt und dann aus dem Abgas-Dampf-Gemisch zurückgewonnen. Der Kondensator wird mit Luft gekühlt (z. B. über den Bypass des Antriebssystems oder über ein separates Gebläse). Vorläufigen Potenzialstudien zufolge dürfte dieses Turbofan-Konzept den spezifischen Treibstoffverbrauch im Reiseflug im Vergleich zu einem konventionellen Flugzeugtriebwerk desselben Technologieniveaus um etwa 15 bis 20 % senken. Berücksichtigt man die Zunahme der Systemmasse und des Luftwiderstands aufgrund der erforderlichen Komponenten wie z. B. der Wärmetauscher, so beträgt die Treibstoffeinsparung und damit das CO₂-Reduktionspotenzial etwa 10 bis 15 % im Vergleich zu einem evolutionären Gasturbinentriebwerk [3.16].

3.2.3.2 Potenziale von Brennstoffzellen

Bei den Brennstoffzellen sehen die ExpertInnen einen eindeutigen Trend hin zum künftigen Einsatz der Polymer-Elektrolyt-Membran Technologie (PEMFC) für Kurz- und Mittelstreckeneinsätze. Damit würde sich bis auf den anfallenden Wasserdampf die Emissionsfreiheit von CO₂, NO_x, SO_x, CO, HC und Ruß realisieren lassen. Die Wasserdampfemissionen würden bei einer Reduzierung der Flughöhe zu einem schwächeren Einfluss auf die Umweltbelastung führen. Zusätzlich arbeiten Brennstoffzellen effizienter als Strahltriebwerke. Letztere erreichen eine Effizienz von rund 40 %. Bei einem Wirkungsgrad der Brennstoffzelle von 55 % und einem Wirkungsgrad des Powertrains von 90 % erreicht man Gesamteffizienz von 45-50 %.

Brennstoffzellenantriebe beinhalten außerdem Komponenten wie Elektromotoren, Hochspannungsleitungen oder Software. Diese Systeme sind auch für rein elektrische Antriebe notwendig, die in vielen anderen Bereichen der Industrie und Mobilität künftig eingesetzt werden. So kann von der sich rapide entwickelnden Zulieferkette und wachsendem Wissen über elektrische Systeme profitiert werden. Weiters arbeiten Elektromotoren und Brennstoffzellen wesentlich leiser als Strahltriebwerke. Dadurch entsteht ein großes Potenzial, die Luftfahrt geräuschärmer zu gestalten und die Lebensqualität für Mensch und Tier gerade in der Nähe von hochfrequentierten Flughäfen wesentlich zu verbessern [3.14].

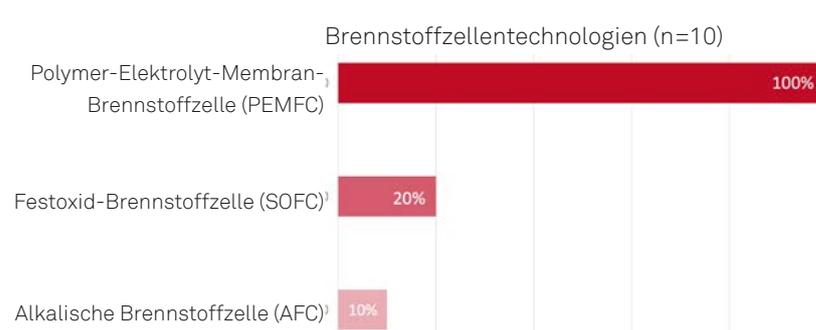


Abbildung 3.10: Brennstoffzellentechnologien in der Luftfahrt

3.2.4 Potenziale zukünftiger Gesamtsysteme

Die Richtung, in die etablierter Luftfahrzeug-Hersteller und neu gegründete Unternehmen forschen, lässt das Potenzial ganzheitlicher Flugsysteme erahnen. Bereits heute wird an unterschiedlichen Fluggeräten gearbeitet. Einen Auszug und Überblick soll die folgende Auflistung bieten:

3.2.4.1 Flächenflugzeuge

→ Zero Avia



Abbildung 3.11: Brennstoffzellentechnologien in der Luftfahrt

Dem britischen Unternehmen Zero Avia gelang es bereits ein Wasserstoffflugzeug zu entwickeln. Die umgebaute Piper M absolvierte im Jahr 2020 erfolgreich ihren Erstflug. Damit ist die Piper das erste kommerziell nutzbare Flugzeug, das eine Kombination aus Batterie- und Brennstoffzellentechnologie einsetzt. Zero Avia will sich mit diesem Schritt auf einen Markt für Flüge mit 10 bis 20 Passagieren konzentrieren, die über eine Distanz von 500 nautischen Meilen (ca. 926 km) geflogen werden können. Der Prototyp, der in bestehende Flugzeuge eingebaut werden kann, soll bis 2023 einsatzbereit sein. Eine leistungsfähigere Version ist für 2026 geplant. Es wird erwartet, dass dadurch die Treibstoff- und Wartungskosten um 75 Prozent und die Kosten pro Flug um 50 Prozent gesenkt werden können [3.4].

Anfang 2021 ereignete sich jedoch ein Unfall mit dem Testflugzeug. Das war bisher der erste Flugunfall eines kommerziellen wasserstoffbetriebenen Flugzeugs. Daher wurden weitere Testflüge ausgesetzt, jedoch sollten keine Verzögerungen bei der Markteinführung der Technologie daraus resultieren. Nach Angaben von Zero Avia gab es weder ein Feuer noch ein Problem mit der Freisetzung von Wasserstoff. Das Unternehmen arbeitet an der Flugunfallermittlung [3.17].

→ Deutsche Aircraft in Zusammenarbeit mit H2FLY

Deutsche Aircraft hat mit ihrer Dornier 328 das Ziel klimaneutraler Regionalflüge durchzuführen. Dazu arbeiten sie mit dem Unternehmen H2FLY zusammen, die sich auf Wasserstoff-Brennstoffzellensysteme für Flugzeuge spezialisieren und schon mehrere erfolgreiche Testflüge mit ihrem Prototypen HY4 hinter sich haben. Im Jahr 2025 ist der erste Demonstrationsflug geplant, wobei das Flugzeug eine Leistung von 1,5 Mega-Watt erreichen soll und somit das leistungsstärkste wasserstoffelektrische Luftfahrzeug bis dahin sein soll. Dadurch können Regionalflüge mit bis zu 40 Passagieren über eine Entfernung von 250 – 500 km (später auch 700- 800 km) durchgeführt werden [3.18].

→ DLR in Kooperation mit MTU Aero Engines

Auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrtforschung (DLR) und der Triebwerkshersteller MTU Aero Engines arbeiten an einem neuen Wasserstoffantrieb. Für den Demonstrationsflug, der für 2026 geplant ist, soll eine Dornier 228 mit ihrem Brennstoffzellensystem ausgestattet werden [3.2, 18].



Abbildung 3.12: Dornier 228 mit Brennstoffzellen-Antrieb[3.2].

→ Airbus

Airbus, als einer der größten Flugzeughersteller der Welt, will auch in Zukunft Wasserstofftechnologien für den Antrieb nutzen. Bereits im Jahr 2025 will der Hersteller erstmals mit einem Flugzeug abheben, das mit einem Wasserstofftank und -antrieb ausgestattet ist. Für das Projekt soll ein Airbus A380 umgerüstet werden. Ähnlich wie bei der Tupolev Tu-155, wird eines der vier Triebwerke ersetzt und ein leichter und robuster Wasserstofftank an Bord installiert. Die Forschung hierfür wird in den neuen Forschungszentren in Bremen und Nantes durchgeführt [3.19].



Abb.3.13: Konzept des Airbus Zero E Turbofan-Flugzeugs[3.5]. Abb.3.14: Konzept des Airbus Zero E Turboprop-Flugzeugs[3.5].

Ab 2035 soll Airbus schließlich in der Lage sein, ein kommerzielles wasserstoffbetriebenes Flugzeug auf den Markt zu bringen. Damit will der Flugzeughersteller das erste emissionsfreie Verkehrsflugzeug der Welt entwickeln. Deshalb hat er das Projekt Zero E ins Leben gerufen, um ein solches Wasserstoffflugzeug zu entwerfen und zu entwickeln. Zu diesem Zweck hat Airbus vier verschiedene Konzepte veröffentlicht, wie ein solches Flugzeug aussehen könnte [3.5].

Das erste Konzept zeigt ein Modell, das von zwei modifizierten Mantelstromtriebwerken angetrieben wird und aktuellen Verkehrsflugzeugen sehr ähnelt. Es soll 120 bis 200 Passagiere befördern und diese über eine Entfernung von 3700 Kilometern transportieren können. Die Wasserstofftanks befinden sich im hinteren Teil des Rumpfes, was in Abbildung 3.13 gut zu erkennen ist [3.5].

Das zweite Konzept, welches in Abbildung 3.14 dargestellt ist, zeigt eine Turboprop-Konstruktion. Es ist für die Beförderung von 100 Passagieren und eine Reichweite von 1850 Kilometern ausgelegt. Airbus arbeitet bei diesem Konzept eng mit seiner Tochtergesellschaft Avions de Transport Régional (ATR) zusammen, da es den aktuellen Flugzeugen von ATR sehr ähnlich ist und sich nur in der Antriebstechnik unterscheidet [3.5, 3.20]

Das dritte Konzept, welches in Abbildung 3.15 gezeigt wird, ist ein Blended-Wing-Body-Modell. Es besteht aus einem konventionellen Flugzeug und einem Nurflügel, wobei die Flügel nahtlos in den Rumpf übergehen. Ähnlich wie das erste Konzept mit dem Turbofan-Triebwerk wird es 200 Passagiere befördern und über 3700 Kilometer weit fliegen können [3.5].



Abbildung 3.15: Konzept des Airbus Zero E Blended Wing[3.5].

Das vierte und letzte Konzept sieht ein Turboprop-Flugzeug (Abbildung 3.16) mit sechs separat betriebenen Propellern vor. Dabei werden sechs sogenannte Pods an der Unterseite des Flügels befestigt, die jeweils ein komplettes und unabhängiges Antriebssystem darstellen. Ein Pod besteht aus einem Wasserstofftank, Brennstoffzellen, einem Elektromotor, einem Propeller, der notwendigen Elektronik, einem Kühlsystem und verschiedenen Hilfsgeräten. Der Vorteil liegt in der Wartung, da die jeweiligen Pods schnell demontiert beziehungsweise wieder eingesetzt werden können [3.3]. Die Entscheidung, welches Konzept sich für künftige Flugzeuge durchsetzt und weiterverfolgt wird, soll im Jahr 2025 getroffen werden [3.5].



Abbildung 3.16: Konzept des Airbus Zero E-Pod[3.3]

→ United Airlines Backs ZeroAvia's Hydrogen-Powered CRJ

Die US-amerikanische Fluggesellschaft United Airlines investiert in den Wasserstoffantriebshersteller ZeroAvia. Das gemeinsame Vorhaben beinhaltet die Umrüstung der CRJ-550 Flotte auf Wasserstoff-

betrieb, ein auf Wasserstoffbetrieb modifizierter CRJ-Jet ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Dabei wird im hinteren Bereich Platz für den Flüssigwasserstofftank geschaffen und die konventionellen Strahltriebwerke durch einen elektrischen Propellerantrieb ersetzt [3.7].



Abbildung 3.17: Konzept des auf Wasserstoffbetrieb modifizierten CRJ-Jet[3.7].

3.2.4.2 UAS, VTOL, Helikopter

→ Alaka'i

Der US-amerikanische Hersteller Alaka'i spezialisiert sich auf die Entwicklung von Flugtaxis. Im Unterschied zu anderen Unternehmen setzen sie jedoch auf Brennstoffzellen als Antrieb anstatt Lithium-Ionen-Batterien für ihr Flugtaxi „Skai“. Dieser Brennstoffzellenantrieb soll deutlich ausdauernder sein als vergleichbare Akkumulatoren. Somit soll eine Flugzeit von mehr als vier Stunden möglich sein, die mit Zusatztanks sogar auf zehn Stunden gesteigert werden kann, falls dies erforderlich ist. Auch die lange Ladezeit entfällt durch den Wasserstoffantrieb. In nur zehn Minuten kann der Tank wieder komplett aufgefüllt werden. Eine Reichweite von 640 Kilometern und Geschwindigkeiten von 160 Kilometern pro Stunde sollen zudem erreichbar sein. Auch auf die Sicherheit legt der Hersteller viel Wert. Das Flugtaxi verkraftet einen Ausfall von zwei der sechs Rotoren und enthält zusätzlich noch einen Fallschirm als letzte Rettung. Des Weiteren sind bis auf die Rotoren alle Geräte, die zur Flugfähigkeit benötigt werden, mindestens dreifach ausgelegt [3.6].



Abbildung 3.18: Alaka'i Flugtaxi[3.6].

→ Zepher Z1 VTOL sUAS

Das amerikanische Unternehmen Zepher hat mit ihrem Z1 VTOL sUAS einen Meilenstein für wasserstoffbetriebene Drohnen erreicht, nachdem der Erstflug im August 2021 mit Wasserstoff als Antrieb erfolgreich absolviert wurde. Zudem wurden schon Schwebetests durchgeführt. Das Ziel dieser Technologie ist es, die Ausdauer und die akustische Signatur von UAS in rauen Umgebungen zu verbessern. Durch fortschrittliche „Hardware-in-the-Loop-Simulationen“, Flugtests von Systemkomponenten kann eine optimale Leistung und Haltbarkeit gewährleistet werden und somit ist das Endprodukt ein nach militärischem Standard gebautes UAV. Durch den Einbau der wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle, die einen verstellbaren Propeller antreibt, konnte die Ausdauer und die akustische Signatur, sowie die Flugsteuerung und Haltbarkeit im Vergleich zu herkömmlichen UAVs verbessert werden.

Hervorzuheben sind aber auch die Aktivitäten des österreichischen Unternehmens Bladescape. Dabei setzt das Unternehmen bei Langstrecken-UAV Flügen große Hoffnung auf Wasserstoffantriebe aufgrund ihrer Vorteile in Bezug auf die potenzielle Reichweitensteigerung [3.21].

→ Piasecki Aircraft Corporation

Das Unternehmen Piasecki Aircraft Corporation arbeitet an der Umsetzung eines Helikopters mit Wasserstoffantrieb. Die Brennstoffzelle wird hierfür von der Firma HyPoint entwickelt. Der erste Testflug ist für das Jahr 2023 geplant und die Zulassung soll ein Jahr später erfolgen. Bis dahin sind Bodentests der Systeme vorgesehen, um die Kühlung, wechselnde Belastungen und Lebensdauer zu evaluieren [3.22].

Tabelle 3.2: Aktuelle Projekte

Projekt	Start	Antriebsart	Kurzbeschreibung	Speichermedium	Reichweite (km)	Status	Projekthomepage
HY4	2015	Wasserstoffbrennstoffzelle und elektrische Batterien	Flächenflugzeug (Viersitzer), Doppelrumpf	gasförmig	000	geflogen	www.h2fly.de
HES Element One	2018	Wasserstoffbrennstoffzelle	Flächenflugzeug (Viersitzer), Propeller	Gasförmig/flüssig	500 - 5000	in Entwicklung	www.h3dynamics.com
Alaka'i Skai	2019	Wasserstoffbrennstoffzelle	Fünfsitzer, Flugtaxi, sechs Rotoren	Flüssig	640	in Entwicklung	www.alakai.com
Apus i-2	2019	Wasserstoffbrennstoffzelle	Flächenflugzeug (Viersitzer), zwei Propeller	gasförmig	1000	in Entwicklung	www.apus-zero.de
NASA CHEETA	2019	Wasserstoffbrennstoffzelle	Nurflügler, großes Verkehrsflugzeug	flüssig	unbekannt	in Entwicklung	www.uli.arc.nasa.gov/projects/8/
Pipistrel ESTOL	2019	Wasserstoffbrennstoffzelle	Flächenflugzeug (19-Sitzer)	unbekannt	unbekannt	in Entwicklung	www.pipistres-aircraft.com/unifer19-2-archiv
ZeroAvia	2019	Wasserstoffbrennstoffzelle	Flächenflugzeug (10 bis 20-Sitzer), zwei Propeller	gasförmig	800	in Entwicklung	www.zeroavia.com
Airbus Cyroplane	2003	Wasserstoffverbrennung	Große Verkehrsflugzeuge	flüssig	unbekannt	Machbarkeitsstudie	www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe
NASA Concept B	2004	Wasserstoffbrennstoffzelle	Nurflügler, großes Verkehrsflugzeug	flüssig	6500	Machbarkeitsstudie	www1.grc.nasa.gov/aeronautics/hep/airplane-concepts/

3.3 Zukünftiges Forschungs- und Entwicklungspotenzial

3.3.1 Technologiereifegrad von Schlüssel-Systemen (TRL)

Es gibt heute schon bestehende Wasserstofftechnologien, davon befinden sich einige noch in der Entwicklung oder in einer frühen Konzeptphase. Um zukünftige Forschungs- und Entwicklungspotenziale aufzuzeigen, können Systeme ein definiertes Reifelevel zugeschrieben werden (TRL-Technology Readiness Level, siehe Abbildung 3.19).

Die TRL-Analyse ist in neun Stufen unterteilt, die wiederum in drei verschiedene Phasen unterteilt sind: Grundlagenforschung, Entwicklung und Betrieb/Produktion.



Abbildung 3.19: Übersicht zu den einzelnen Stufen des Technologiereifegrads[3.23].

Wie in Abbildung 3.20 ersichtlich ist, befinden sich Wasserstofftechnologien abhängig vom Einsatzgebiet auf unterschiedliche Reifestufen. Anwendungen in der Luftfahrt hinken in der Systemreife anderen Bereichen hinterher. Das kann durch die vergleichsweise sehr hohen Sicherheitsstandards und den damit verbundenen Zulassungsprozess begründet werden. In der Raumfahrt kommt flüssiger Wasserstoff als Treibstoff seit geraumer Zeit zum Einsatz. Auch Brennstoffzellen wurden schon an Bord der Raumkapsel des Apollo-Projekts genutzt.

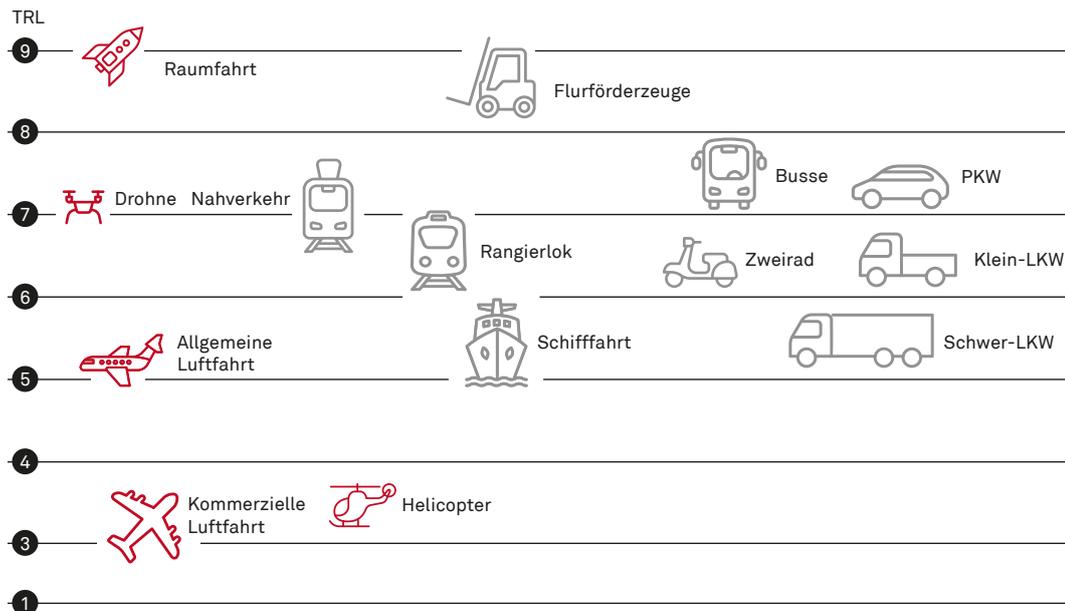


Abbildung 3.20: Technology Readiness Levels für verschiedene wasserstoffbetriebene Mobilitätsanwendungen
(Darstellung basierend auf Daten von Shell)

3.3.1.1 Reifegrad der Technik für Versorgung von Flughäfen und Speicherung

Produktionsverfahren von synthetischen Kraftstoffen (z.B. Fischer-Tropsch), die Komprimierung von Wasserstoff auf 350 bzw. 700 bar, die Verflüssigung von Wasserstoff sowie die Speicherung in flüssigen Trägerstoffen sind bereits erprobt und im Einsatz (TLR 9) [3.24].

3.3.1.2 Reifegrad Speicherung im Luftfahrzeug

Tanksysteme für die Speicherung von flüssigem Wasserstoff als klar bevorzugter Variante für Fluganwendungen sind bereits in Entwicklung und in Erprobung und weisen einen TRL von 4-6 auf. In Kapitel 3.1.3.3 wird auf das Masse-zu-Speicher-Verhältnis, das noch nicht ganz den Voraussetzungen für einen effizienten Betrieb genügt, diskutiert.

3.3.1.3 Reifegrad der Wasserstoffantriebe

→ Brennstoffzellensysteme für die Luftfahrt

Wasserstoff-Brennstoffzellensysteme sind eine der am weitesten erforschten Wasserstofftechnologien, die derzeit verfügbar sind. Daher ist die Anwendung als Hauptantriebssystem in kleinen Kurzstreckenflugzeugen realisierbar. Das maximale Abfluggewicht (MTOW), wird sich erhöhen, aber die benötigte Energie sich hingegen reduzieren. Bei Wasserstoff-Brennstoffzelle entfallen die CO₂-Emissionen vollständig, und da der Wasserstoff nicht konventionell verbrannt wird, entstehen auch keine Emissionsgase wie Stickoxide (NO_x), sodass sich die Umweltbelastung drastisch reduziert. Im Allgemeinen sind Wasserstoff-Brennstoffzellensysteme vollständig entwickelt und werden bereits in verschiedenen Sektoren eingesetzt, aber in der Luftfahrt gibt es noch kein zertifiziertes Brennstoffzellensystem in Betrieb. In Bezug auf die TRL befinden sich Wasserstoff-Brennstoffzellensysteme in der Luftfahrt auf Stufe 7, was bedeutet, dass sie sich bereits in der Einführungsphase befinden. Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, handelt es sich bei dem Projekt HY4 um ein Prototyp-Flugzeug, das mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellensystem angetrieben wird und bereits erfolgreich Testflüge absolviert hat. Da es sich um eine gut erforschte Technologie handelt, ist die Kommerzialisierung eines kleinen Passagierflugzeugs, das mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellensystem angetrieben wird, vor dem Ende des Jahres 2030 denkbar.

→ Wasserstoffturbine

Wasserstoffturbinen entsprechen in etwa den herkömmlichen Turbinen, die mit Kerosin betrieben werden und sind aus heutiger Sicht am besten für den Langstreckeneinsatz geeignet. Wie bereits beschrieben, war der erste Prototyp einer Anwendung in der Luftfahrt die Einführung der Tupolev Tu-155. Aber schon zuvor wurde der erste Prototyp eines Verbrennungsmotors (ICE) nur mit Wasserstoff betrieben. Die Forschung an dieser Technologie geriet jedoch nach einigen erfolgreichen Testflügen mit der Tu-155 ins Stocken, da zu diesem Zeitpunkt niemand die Notwendigkeit sah, solche Turbinen für die Kommerzia-

lisierung zu entwickeln. Nachdem die Klimaneutralität in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat, wurde die Erforschung und Entwicklung von Wasserstoffturbinen ein wichtiger Schwerpunkt für die klimaneutrale Luftfahrt. Der TRL-Wert ist nicht eindeutig, da Prototypen wie die in der Tu-155 installierte Wasserstoffturbine der Stufe 6 zuzuordnen sind, modernisierte Wasserstoffturbinen, die eine vergleichbare Leistung wie derzeitige konventionelle Strahltriebwerke haben sollen, jedoch der Stufe 3.

Das Vorhaben von Airbus, eine Wasserstoffturbine in den Airbus A380 einzubauen würde den TRL wieder auf Stufe 6 anheben.

Der beschriebene Water-Enhanced Turbofan (WET) ist eine neuere Technologie, die in den letzten Jahren von der Firma MTU Aero Engines auf den Weg gebracht wurde. Das System hat nicht ausschließlich mit Wasserstoff zu tun, aber es hat ein enormes Potenzial und könnte die Abgasemissionen heutiger Triebwerke drastisch reduzieren, ohne der Notwendigkeit der Entwicklung eines neuen Antriebssystems. In Bezug auf TRL befindet es sich auf Stufe 2 und damit in einer relativ frühen Konzeptphase.

Wann welche alternativen Antriebstechnologien großtechnisch zum Einsatz kommen, wird von den befragten ExpertInnen zumeist sehr homogen beurteilt. Der rein elektrische Betrieb bzw. der flächendeckende Einsatz von Synfuels (SAF) wird bereits zwischen 2025 und 2030 angesetzt.

Wasserstoff für den Betrieb von Brennstoffzellen entweder als Hilfsaggregat oder als Range Extender wird sehr übereinstimmend mit 2030 angegeben. Der Betrieb von Flugzeugen mittels Brennstoffzellen ist zwischen 2030 und 2040 angedacht.

Die Nutzung von Wasserstoff in H₂ Turbinen wird von der österreichischen Industrie und Wissenschaft ab 2040 angegeben.

Einzig der Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Verbrennungskraftmaschinen kann zeitlich nicht so klar eingeordnet werden. Dies begründet sich an am derzeit noch niedrigen TRL, woraus sich ein entsprechender kurzfristiger hoher F&E Bedarf ergibt.

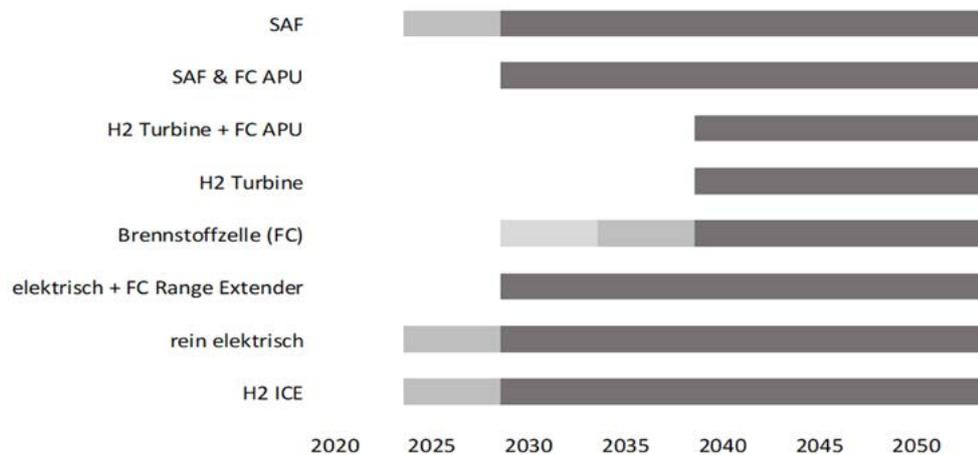


Abbildung 3.21: Zeithorizonte für Antriebstechnologien (Legende: von hell nach dunkel: zunehmende Relevanz)

Als wichtigste Meilensteine für die Entwicklung von Zero-Emission Antriebstechnologien wurde allgemein die Verfügbarkeit von entsprechenden Komponenten und Systemtechnologien gesehen. Weiters spielen die Wasserstoffinfrastruktur, eine ermöglichende Regulatorik und die rasche Entwicklung und Verfügbarkeit von SAF eine wichtige Rolle. Nicht zuletzt sieht man auch die Unterstützung durch Förderungen als Wesentlich an.

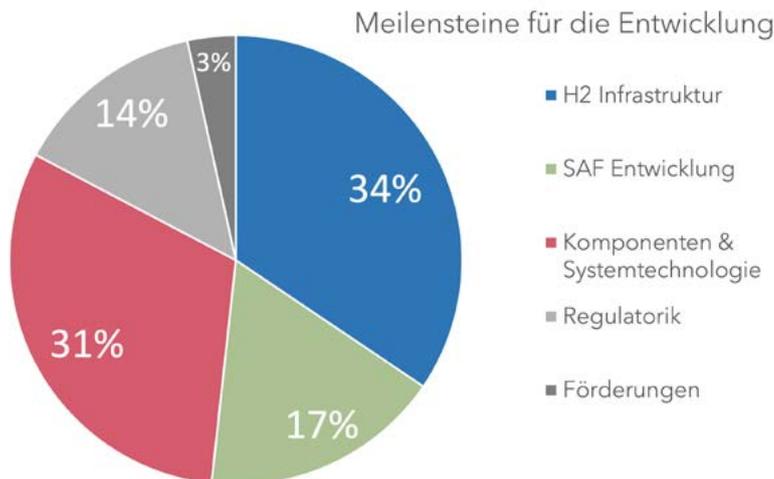


Abbildung 3.22: Meileinsteine für die Entwicklung von Zero-Emission Atriebstechnologien

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Wasserstoff-Lieferkette

Abbildung 3.2: Schwankungen der Starts und Landungen in Österreich[3.1].

Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau der Wasserstoffverbrennung in einem Strahltriebwerk.

Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellenantriebs für Luftfahrzeuge.

Abbildung 3.5: Wasserstoff Transportmöglichkeiten

Abbildung 3.6: Passagierzahlen auf österreichischen Flughäfen im Jahr 2019[3.1].

Abbildung 3.7: On-Board Speicherverfahren

Abbildung 3.8: Wahrscheinlichkeit des künftigen Einsatzes von Energieträgern

Abbildung 3.9: Entwicklung künftiger H₂ Turbinen nach Leistungskategorien

Abbildung 3.10: Brennstoffzellentechnologien in der Luftfahrt

Abbildung 3.11: Modifizierte Piper M vom Zero Avia[3.4].

Abbildung 3.12: Dornier 228 mit Brennstoffzellen-Antrieb[3.2].

Abbildung 3.13: Konzept des Airbus Zero E Turbofan-Flugzeugs[3.5].

Abbildung 3.14: Konzept des Airbus Zero E Turboprop-Flugzeugs[3.5].

Abbildung 3.15: Konzept des Airbus Zero E Blended Wing[3.5].

Abbildung 3.16: Konzept des Airbus Zero E-Pod[3.3].

Abbildung 3.17: Konzept des auf Wasserstoffbetrieb modifizierten CRJ-Jet[3.7].

Abbildung 3.18: Alaka'i Flugtaxi[3.6].

Abbildung 3.19: Übersicht zu den einzelnen Stufen des Technologiereifegrads[3.23].

Abbildung 3.20: Technology Readiness Levels für verschiedene Mobilitätsanwendungen

Abbildung 3.21: Zeithorizonte für Antriebstechnologien

Abbildung 3.22: Meileinsteine für die Entwicklung von Zero-Emission Atriebstechnologien

Quellenverzeichnis

- [3.1] I. G. Florl, „Masterarbeit: SUSTAINABLE AVIATION FUEL als Teil der Österreichischen Energiewende,“ FH JOANNEUM University of Applied Sciences, Graz, Austria, 2022.
- [3.2] T. Nowack. „Airbus zeigt Wasserstoffflieger mit sechs Propellern.“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/airbus-zeigt-wasserstoffflieger-mit-sechs-propellern> (abgerufen am 15.05.2022).
- [3.3] S. Eiselin. „Dornier 228 soll mit Wasserstoff fliegen.“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/dornier-228-soll-mit-wasserstoff-fliegen> (abgerufen am 15.05.2022).
- [3.4] aero Telegraph. „Piper absolviert Jungfernflug mit Wasserstoff.“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/zero-avia-piper-absolviert-jungfernflug-mit-wasserstoff> (abgerufen am 16.06.2022).
- [3.5] T. Nowack. „Airbus stellt drei Wasserstoff-Flugzeuge vor.“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/zero-e-konzepte-2035-airbus-stellt-drei-wasserstoff-flugzeuge-vor> (abgerufen am 16.05.2022).
- [3.6] F. Stoffels. „Dieses Elektro-Flugtaxi setzt auf Brennstoffzellen „ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/alakai-skai-evtol-dieses-elektro-flugtaxi-setzt-auf-brennstoffzellen> (abgerufen am 10.06.2022).
- [3.7] G. Warwick. „United Airlines Backs ZeroAvia's Hydrogen-Powered CRJ.“ AVIATION WEEK Network. <https://aviationweek.com/special-topics/sustainability/united-airlines-backs-zeroavias-hydrogen-powered-crj> (abgerufen am 13.12.2021).
- [3.8] C. S. JU, „Hydrogen-powered aviation; A fact-based study of hydrogen technology,“ Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
- [3.9] „Hydrogen-powered aviation; A fact-based study of hydrogen technology,“ Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
- [3.10] R. Kölbl, „Bachelorarbeit 1: Wasserstoffanwendungen im Luftverkehr,“ FH Joanneum University of Applied Sciences, Graz, Austria, 2021.
- [3.11] B. Khandelwal, A. Karakurt, P. R. Sekaran, V. Sethi, und R. Singh, „Hydrogen powered aircraft: The future of air transport,“ Progress in Aerospace Sciences 60, S. 45-59, 2013.
- [3.12] J. Huete und P. Pilidis. (2021) Parametric study on tank integration for hydrogen civil aviation propulsion. International Journal of Hydrogen Energy 46. 37049-37062.
- [3.13] D. Cecere, E. Giacomazzi, und A. Ingenito. (2014) A review on hydrogen industrial aerospace. International Journal of Hydrogen Energy 39. 10731-10747.
- [3.14] R. Berger, „Hydrogen: A future fuel for aviation?,“ Roland Berger GmbH, München, 2020.

- [3.15] A. Sürer. (2018) State of the art of hydrogen usage as fuel on aviation. European Mechanical Science, Vol. 2(1). 20-30.
- [3.16] L. Tamburelli. „Ecological jet engines: German top manufacturer MTU's way.“ <http://blog.privatejetfinder.com/ecological-jet-engines/> (abgerufen am 20.06.2022).
- [3.17] L. Wunderlich. „Wasserstoff-Testflugzeug legt Bruchlandung hin.“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/wasserstoff-testflugzeug-legt-bruchlandung-hin> (abgerufen am 20.06.2022).
- [3.18] T. Nowack. „Neue Dornier 328 soll zum Wasserstoffflieger werden.“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/neue-dornier-328-soll-zum-wasserstoffflieger-werden> (abgerufen am 15.06.2022).
- [3.19] S. Eiselin. „Airbus testet Wasserstoff mit A380.“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/airbus-testet-wasserstoff-mit-a380> (abgerufen am 28.06.2022).
- [3.20] F. Stoffels. „Kommt Airbus' Wasserstoffflieger von ATR?“ aero TELEGRAPH. <https://www.aerotelegraph.com/kommt-airbus-wasserstoffflieger-von-atr> (abgerufen am 11.06.2022).
- [3.21] UAS weekly. „Zepher Meets Milestone Targets in Development of Z1 VTOL sUAS for United States Army Special Operations Command (USASOC).“ UAS weekly. <https://uasweekly.com/2021/08/15/zepher-meets-milestone-targets-in-development-of-z1-vtol-suas-for-united-states-army-special-operations-command-usasoc/> (abgerufen am 17.06.2022).
- [3.22] N. Klenske und G. Polek. „Piasecki Prepares To Step Up Testing Regime for Hydrogen-Powered Helicopter.“ Future Flight. <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-04-05/piasecki-prepares-step-testing-regime-hydrogen-powered-helicopter> (abgerufen am 20.06.2022).
- [3.23] EurA. „EIC Accelerator: Das neue SME Instrument von Horizon Europe.“ EurA. <https://www.sme-instrument.de/> (abgerufen am 15.06.2022).
- [3.24] S. Bruce, M. Temminghoff, J. Hayward, D. Palfreyman, C. Munnings, N. Burke, und S. Creasey, Opportunities for hydrogen in commercial aviation. CSIRO, 2020.

4 Wirtschaftliche Herausforderungen u. Rahmenbedingungen



4 Wirtschaftliche Herausforderungen und Rahmenbedingungen

In den Kapiteln 2 und 3 ist bereits auf die Vorteile durch die Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff in der Flugzeugbranche eingegangen worden, wodurch Emissionen von CO₂, Ruß und Aerosolvorläufern auf null reduziert werden können.

Neben diesen Vorteilen, mit Blick auf die Emissionen, wird Wasserstoff wegen seiner möglichen Kostenvorteile im Vergleich zu synthetischen Kraftstoffen (eine Umwandlungsstufe weniger) neben SAF (Sustainable Aviation Fuels) eine wichtige Rolle spielen. Die spezifischen Herausforderungen für den Wasserstoffeinsatz im Flugverkehr u.a. durch die geringere Energiedichte werden aber dazu führen, dass insbesondere auf der längeren Mittelstrecke und der Langstrecke SAF verstärkt zum Einsatz kommen werden. Kurzfristig kann auch in diesem Streckenbereich sowie auf der Mittelstrecke bis 1.500 km mit SAF eine deutliche Reduktion der Emissionsbelastung erreicht werden, mittel- und lang- fristig müssen die Klima- und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile von Wasserstoff und SAFs sorgfältig abgewogen werden [4.1].

Langfristig darf abgesehen von der Reduktion der CO₂-Emissionen auch das THG-Potenzial der Kondensstreifen nicht unterschätzt werden.

4.1 Wertschöpfungskette von Wasserstoff in der Luftfahrt in Österreich

Im Folgenden wird auf die Potenziale, durch Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff, entlang der entsprechenden Wertschöpfungskette eingegangen.

4.1.1 Wasserstoffproduktion

Die Bedarfsabschätzung der österreichischen Wasserstoffstrategie [4.2] stellt einen künftigen Gesamtbedarf von rund 2.2 Mio. Tonnen Wasserstoff dar. Darin ist jedoch der Bedarf der Luftfahrt noch nicht berücksichtigt. Die im Rahmen dieser Studie getroffene Abschätzung gibt für die österreichische Luftfahrt 0,96 Mio. Tonnen an (siehe 4.2.1.1).

Bis 2030 soll in Österreich eine Elektrolysekapazität von 1 GW installiert werden, woraus rund 150.000 Tonnen Wasserstoff gewonnen werden können. Ein weiterer Ausbau der Elektrolysekapazität auf 2 GW würde die in Österreich über den Elektrolyseweg produzierte Menge bis 2040 zwar verdoppeln, reicht aber bei weitem noch nicht aus, um den Gesamtbedarf zu decken.

Zusätzlich können durch thermische Verfahren entweder über die Herstellung von blauem Wasserstoff aus der Methandampfreformation mit Kohlendioxidabscheidung oder von türkischem Wasserstoff über den Weg der Methanpyrolyse bzw. durch andere thermische Verfahren aus Vergasungsprozessen von biogenen Einsatzstoffen oder Abfällen zusätzliche Mengen generiert werden. Doch auch diese Mengen können den Gesamtbedarf bei weitem nicht decken, womit der größte Teil des Wasserstoffs künftig importiert werden muss. Es ist davon auszugehen, dass diese Verfahren ab 2035 großtechnisch einsetzbar sind [4.3].

Nichtsdestotrotz wird alleine durch den Aufbau der Produktionskapazitäten in Österreich Wertschöpfung in hohem Ausmaß generiert. Als Anhaltspunkt dafür kann das Projekt für den Bau einer 300 GW Elektrolyseanlage in Nickelsdorf, Burgenland, genannt werden, welche künftig 40.000 Tonnen grünen Wasserstoff jährlich produzieren soll. Der Investitionsbedarf wird mit 400 Mio. EUR angegeben [4.4]. Daraus lässt sich der Investitionsbedarf für 2 GW Elektrolysekapazität mit 2.7 Mrd. EUR abschätzen.

4.1.2 Wasserstoffspeicherung & Transport

Im großen Maßstab erfolgt die Speicherung von Wasserstoff künftig in unterirdischen Großspeichern, aber auch Druckspeicher werden in einem großen Ausmaß Verwendung finden. Da in der Luftfahrt neben SAF vor allem flüssiger Wasserstoff zum Einsatz kommen wird, ist es erforderlich energie- und damit kostenoptimale Speicher- und Transportstrategien zu entwickeln.

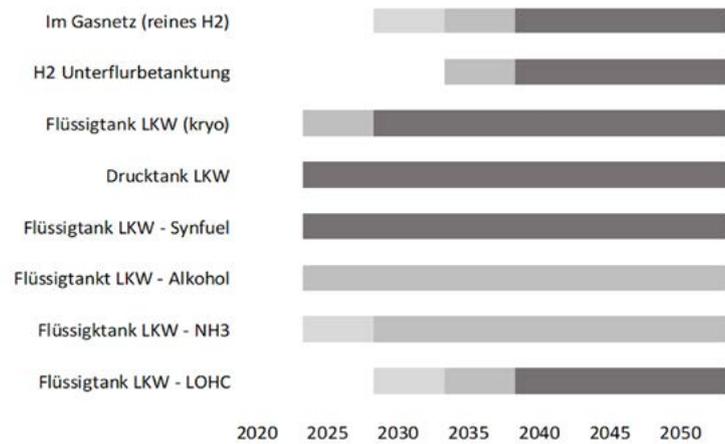


Abbildung 4.1: Zeithorizonten von Wasserstoff-Transporttechnologien
(Legende: von hell nach dunkel: zunehmende Relevanz)

Eine naheliegende Option bietet der Antransport von gasförmigem Wasserstoff über das Gasnetz und die Verflüssigung und Zwischenspeicherung direkt am Flughafen. Damit kann in weiterer Folge auch eine Unterflurbetankung mit flüssigem Wasserstoff realisiert werden.

Für kleinere Flughäfen bietet sich der Antransport von flüssigem Wasserstoff über Lkw an.

4.1.3 Herausforderungen bzgl. Luftfahrzeuge mit H₂-Antrieb

In Kapitel 3 wurden bereits die technischen Herausforderungen bzgl. der Speicherung von flüssigem Wasserstoff und die Integration solcher Tanksysteme in Flugzeuge erläutert. Die „wirtschaftliche“ Herausforderung besteht für die Integration von H₂-Tanks im bestehenden konventionellen Flugzeug Konzeptdesign, da die Tragflächen zur Integration von Tanks nicht in der Art geeignet sind. Zukünftig besteht die Herausforderung darin, den Tankraum im Rumpf zu verbauen, was wiederum das Ladevolumen reduziert. Folge dessen reicht es daher nicht aus, bestehende Modelle z.B. 737 oder A320-Serie mit H₂-Turbinen umzurüsten, sondern das ganze Flugzeugkonzept muss neu gedacht werden. Dies wird neben der technischen Herausforderung vor allem als ökonomische Herausforderung gesehen.

Je nach Größe des Flugzeugs dauert die Einführung größerer neuer Flugzeuge typischerweise etwa 15 bis 20 Jahre und der breite Einsatz in der Flotte weitere 10 Jahre. Da die letzte Generation von Kurzstreckenflugzeugen 2015 eingeführt wurde (z. B. die Flugzeugfamilie A320neo), eröffnet sich zwischen 2030 und 2035 ein Zeitfenster für ein neues, dekarbonisiertes Flugzeug in diesem Segment. Dieses Zeitfenster muss unbedingt genutzt werden, da die nächste Generation in diesem Segment dann erst zwischen 2045 und 2050 zu erwarten wäre, was zu spät wäre.

4.1.4 Herausforderungen bzgl. H₂-Flughafeninfrastruktur

Die ökonomische Herausforderung besteht hier ähnlich wie bei der Etablierung von E-Ladestationen bzw. von H₂-Infrastruktur für LKW darin, dass es Aussicht auf eine hinreichende Anzahl von Kunden braucht, damit sich der Businesscase lohnt, umgekehrt kann mangelnde Infrastruktur ein Hemmnis für diesbezügliche Investitionen in der Flugzeugindustrie darstellen.

4.2 Marktpotenziale unterschiedlicher Technologien

4.2.1 H₂ als klimaneutraler Energieträger

4.2.1.1 Österreich

Im Jahr 2019 wurden in Österreich über 950.000 Tonnen Kerosin getankt [4.5]. Diese Menge entspricht einem Äquivalent von 0,34 Megatonnen an Wasserstoff. Bei einem angenommenen jährlichen Wachstum der Luftfahrt von 4 % und einer jährlichen Effizienzsteigerung von 2 % [4.6], ergibt sich rein für den österreichischen Luftverkehr ein prognostizierter Wasserstoffbedarf im Jahr 2050 von 0,63 Megatonnen. Daraus erfolgt ein Netto-Energiebedarf von rund 76 Petajoule.

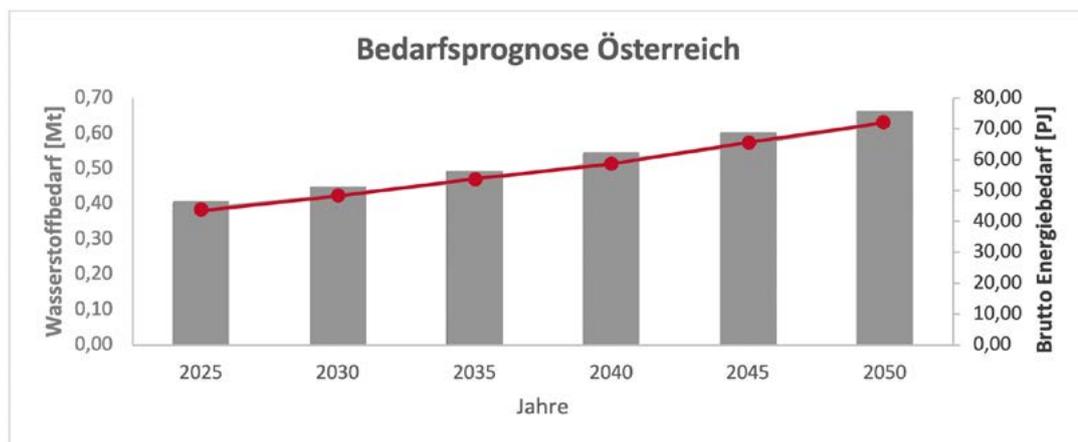


Abbildung 4.2: Prognostizierter Wasserstoff- und Energiebedarf für den operationellen Luftverkehr in Österreich.

Dabei wurde vorerst nur die für den operationellen Flugverkehr benötigte Menge und der daraus abgeleitete Energieinhalt abgeschätzt. Diese Entwicklung ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Betrachtet man zusätzlich den Energieaufwand für die Herstellung des Wasserstoffs und der anschließenden Distribution, wird ein Zuwachs des Energiebedarfs deutlich. In der Clean-Sky Studie „Hydrogen-powered aviation; A fact-based study of hydrogen technology“ [4.6] werden die in Tabelle 4.1 dargestellten Annahmen für den Wirkungsgrad entlang des Herstellungs- und Verteilungsprozesses für synthetischen Kraftstoff sowie LH₂ angenommen:

Tabelle 4.1: Annahmen für den Wirkungsgrad entlang der Herstellungs- und Verteilungsprozesse für synthetischen Kraftstoff und LH₂

Speicherform				Gesamteffizienz %
LH ₂ durch Elektrolyse und Verflüssigung	100 % erneuerbare Energie	70 % Elektrolyse	83 % Verteilung und Verflüssigung	58 %
Synthetischer Kraftstoff aus „direct air carbon capture“	100 % erneuerbare Energie	70 % Elektrolyse	32 % Fischer-Tropsch / 99 % Verteilung	22 %
Synthetischer Kraftstoff aus „industry carbon capture“	100 % erneuerbare Energie	70 % Elektrolyse	51 % Fischer-Tropsch / 99 % Verteilung	35 %

In Abbildung 4.3 ist der Energiebedarf dargestellt, der von der Form der Speicherung abhängig ist. Als Referenz beinhaltet die Grafik zusätzlich den Netto-Energiebedarf für die operationelle Luftfahrt und den Bedarf mit Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Herstellung durch Elektrolyse. Dabei zeigt sich, dass die Produktion von synthetischem Kraftstoff, der aus grünem Wasserstoff und Kohlenstoff aus der Atmosphäre besteht, am meisten Energie benötigt. Die Nutzung von gespeichertem Kohlenstoff aus Industrieanlagen führt zu einer Verbesserung hinsichtlich der Effizienz. Wesentlich weniger Energie wird für die Verflüssigung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff benötigt.

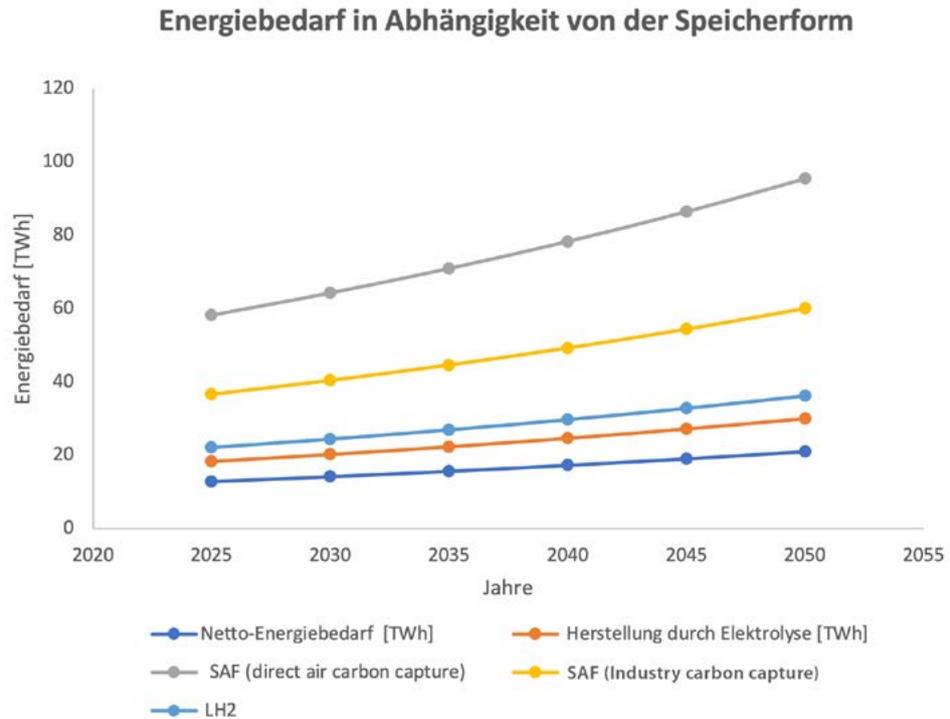


Abbildung 4.3: Vergleich des Energiebedarfs abhängig von der Speicherform.

Für die Versorgung der Luftfahrt skizziert die Clean-Sky Studie „Hydrogen-powered aviation; A fact-based study of hydrogen technology“ [4.6] zwei Szenarien für das Jahr 2050, in denen ein Teil der Luftfahrzeuge mit synthetischem Kraftstoff und der restliche Teil mit flüssigem Wasserstoff betankt wird. Maximal 60 % der Luftfahrzeuge werden im optimistischeren der beiden Szenarien mit LH₂ versorgt. Aus diesem Szenario geht ein Energiebedarf von rund 46 TWh für das Jahr 2050 hervor.

Als realistischer wird jedoch der umgekehrte Fall gesehen, dass im Jahr 2050 die Mehrheit der Flotte (60 %) auf Synfuels angewiesen ist, was zu einem Bedarf von etwa 51 TWh führen würde (Abbildung 4.4).

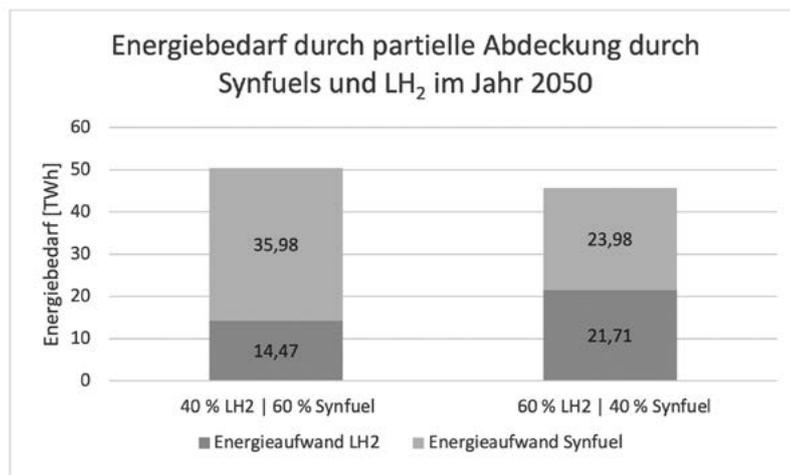


Abbildung 4.4: Prognose des Energiebedarfs für das Jahr 2050 mit Berücksichtigung der partiellen Abdeckung von Synfuels und LH₂.

Der für die österreichische Luftfahrt erforderliche Bedarf an Wasserstoff, sei es für die direkte Verwendung in Form von LH₂ als auch für die Erzeugung von SAF ist in der österreichischen Wasserstoffstrategie [4.2] mengenmäßig noch nicht abgebildet.

4.2.1.2 Europa

In [4.7] (siehe Abbildung 4.5) werden Szenarien für den voraussichtlichen Verbrauch von erneuerbaren Kraftstoffen aus nicht biologischen Quellen (RFNBO), wozu auch Wasserstoff zählt, im europäischen

Transportwesen präsentiert. Das Szenario MIX-H₂ geht dabei davon aus, dass durch entsprechende Fördermaßnahmen bis zum Jahr 2030 bereits europaweit 40 GW Kapazität an Elektrolyseuren installiert und in Betrieb ist und RFNBOs 2,6 % der im gesamten Transportsektor verbrauchten Treibstoffe entsprechen.

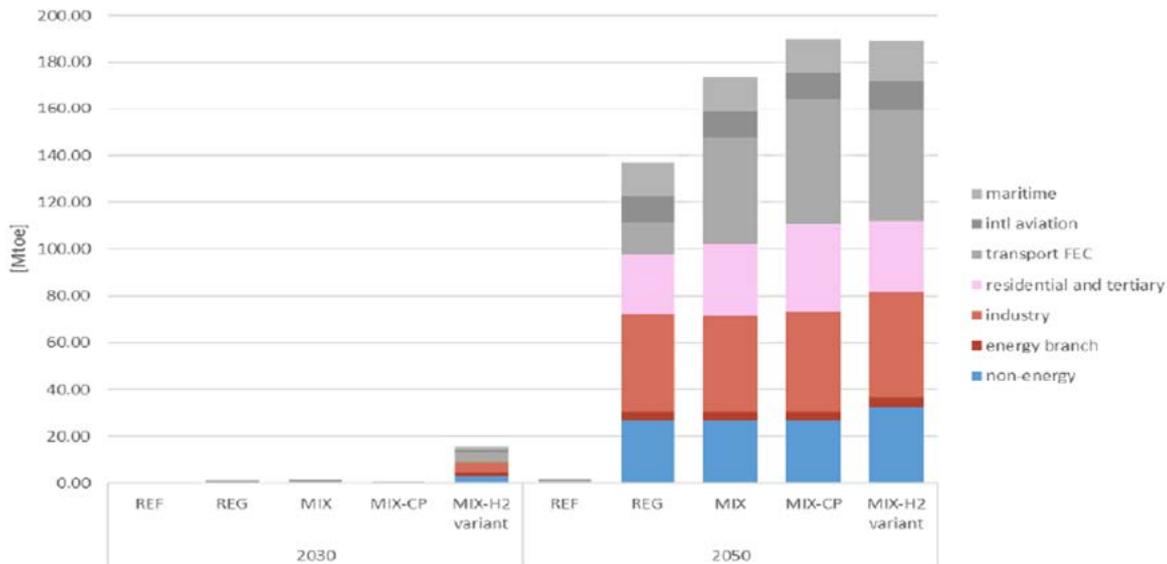


Abbildung 4.5: Zukünftiger Verbrauch von RFNBOs im europäischen Verkehrssektor, gegliedert nach Transportmitteln [4.7]

Aus Abbildung 4.5 ist ersichtlich, dass unter Annahme des MIX-H₂-Szenarios der jährliche Verbrauch an RFNBOs im Jahre 2030 in der Luftfahrt noch im einstelligen Mt-Bereich liegen wird. Über die nächsten Jahrzehnte wird dann ein deutlicher Anstieg vorhergesagt, bis im Jahr 2050 der Verbrauch in der Luftfahrt alleine im Bereich von rund 15 Mt sein wird.

4.2.1.3 Global

Global wird der erneuerbare H₂-Bedarf für Fluganwendungen bis 2050 etwa 50 Mio. Tonnen betragen. In untenstehender Abbildung ist dieser Bedarf anderen Branchen gegenübergestellt. Beispielsweise ist der erneuerbare H₂-Bedarf für die weltweite Stahlerzeugung in einer gleichen Größenordnung abgeschätzt.

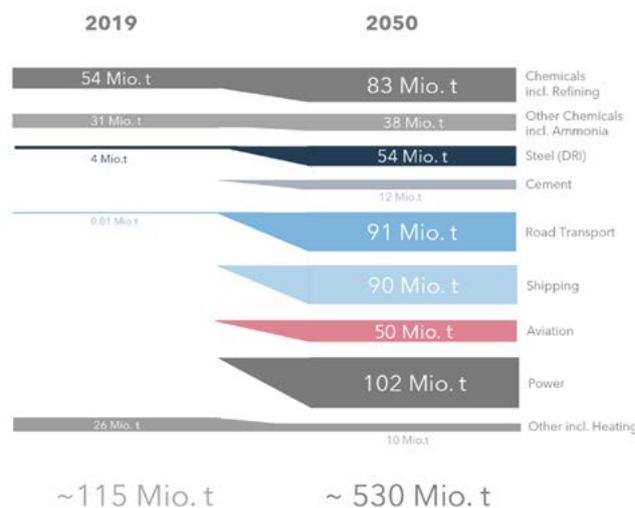


Abbildung 4.6: Globaler H₂ Bedarf verschiedener Branchen 2019 und 2050 gegenübergestellt, Grafik: ICT Impact GnbH, basierend auf [4.8]

4.2.2 Wirtschaftliches Potenzial H₂ basierender Flugzeuge, Komponenten und Infrastruktur, den Energieträgern gegenübergestellt

Ergänzend zu den Einschätzungen aus Kapitel 2.1.1. wird laut der durchgeführten Tiefeninterviews Wasserstoff für die Zukunft der Luftfahrt zumeist als außerordentlich wichtig bzw. sehr wichtig eingestuft, wobei die Bedeutung für Europa am größten eingeschätzt wurde. Für Österreich selbst und die jeweiligen Branchen und die eigene Unternehmung schätzt man die Bedeutung von H₂ für die Luftfahrt etwas geringer ein, was vermutlich an der im Vergleich zu anderen europäischen Ländern eher untergeordnete Luftfahrtindustrie liegt (siehe dazu Abb. 4.7).

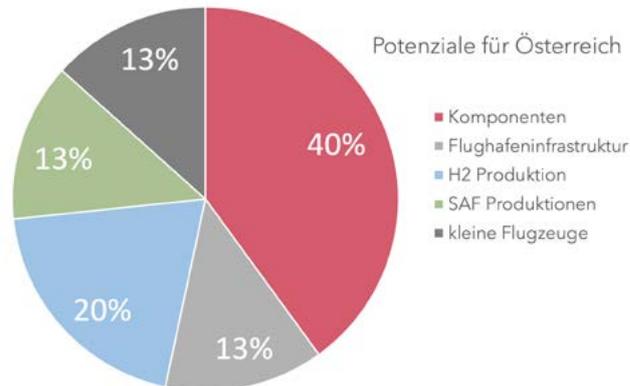


Abbildung 4.7: Auswertung der Wichtigkeit von Wasserstoff für die Luftfahrt (Frage: Wie wichtig ist Wasserstoff für die Zukunft der Luftfahrt?)

4.2.2.1 Österreich

Bezogen auf Österreich sehen die wirtschaftlichen Potenziale ähnlich aus, wie bereits in Kapitel 3 bezüglich der technischen Potenziale erläutert wurde, wobei neben Komponenten vor allem die H₂- und SAF-Produktion als wichtig eingestuft werden. Auch der Bau von kleinen Flugzeugen durch Diamond Aircraft kann hier stellvertretend genannt werden.

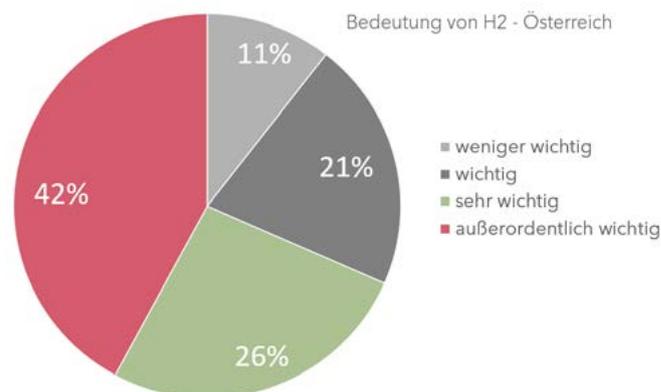


Abbildung 4.8: Potenziale für Österreich (Frage: Welche Potenziale für Wasserstoffanwendungen in der Luftfahrt sehen Sie generell aus österreichischer Sicht?)

Einem Press Release v. 21.7. zufolge arbeitet Diamond Aircraft an der Zulassung eines vollelektrischen Flugzeuges. „Mit der eDA40 will der Flugzeughersteller Diamond Aircraft heuer noch ein vollelektrisches Flugzeug auf den Markt bringen. Die Auftragsbücher der in Wiener Neustadt ansässigen und global agierenden Flugzeugfirma sind für die kommenden zwei Jahre für die Privat-, Schulungs- und Spezialflugzeuge voll. Aus diesem Grund sucht der Betrieb aktuell mehr als 60 Fachkräfte“, gab das Unternehmen bekannt. „Wir werden unsere Produktion an all unseren Standorten in den nächsten drei Jahren deutlich steigern“, sagt Liqun Zhang, CEO von Diamond Aircraft.

4.2.2.2 Europa

Laut der durchgeführten Tiefeninterviews mit österreichischen Unternehmen wird Wasserstoff für die Zukunft der Luftfahrt in Europa mit etwa 80% als außerordentlich wichtig bis sehr wichtig eingestuft.

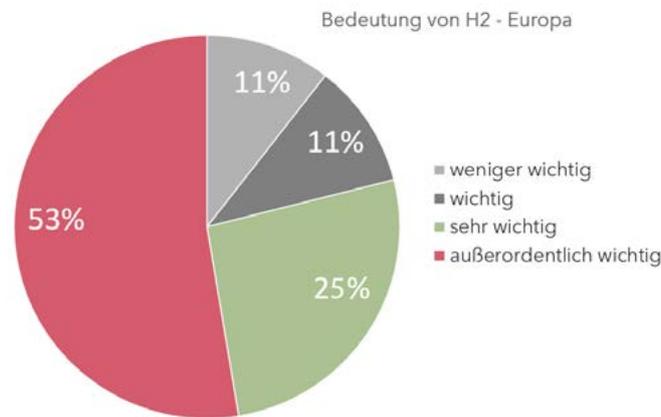


Abbildung 4.9: Auswertung der Wichtigkeit von Wasserstoff für die Luftfahrt
(Frage: Wie wichtig ist Wasserstoff für die Zukunft der Luftfahrt in Europa?)

4.2.2.3 Global

Der globale Wasserstoffbedarf wird von der Internationalen Energieagentur mit 530 Mio. Tonnen jährlich abgeschätzt [4.8]. Auf der Bedarfsseite wird die Menge an Wasserstoff, die jährlich in der Luftfahrt eingesetzt wird mit rund 50 Mio. Tonnen angegeben und liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie der Wasserstoffbedarf für die Stahlproduktion.

Der Markt für wasserstoffbetriebene Luftfahrzeuge wird bis zum Jahr 2025 ein Volumen von 1,4 Mrd. USD erreicht haben und bis zum Jahr 2030 auf rund 7,4 Mrd. USD ansteigen. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate wird für 2025 auf 2030 mit 28,9 % angenommen. Politische Bestrebungen, wie der Green Deal der EU sowie nationale Programme zielen auf eine Dekarbonisierung der Wirtschaftssysteme ab. Die Industrie betreibt daher konzertierte Programme für die Reduktion von CO₂-Emissionen.

Für die nähere bis mittelfristige Zukunft wird vor allem die Brennstoffzellentechnologie als führende Technologie in der Luftfahrt gesehen. Mit ein Grund hierfür ist, dass Brennstoffzellentechnologie bereits marktreif ist und daher auch leicht verfügbar ist. Was die Größe der Luftfahrzeuge angeht, so wird hier zunächst eine Fokussierung auf kleinere Luftfahrzeuge mit bis zu vier Insassen sowie vor allem unbemannte Flugzeuge erwartet. Reichweiten werden in den nächsten Jahren bei 20 km liegen, woraus ersichtlich ist, dass der Freizeitbereich, sowie kommerzielle Shuttle-Dienste oder auch der Einsatz als Basis für Fernerkundungssensoren im Mittelpunkt stehen werden. Weitere Einsatzgebiete elektrischer Antriebstechnologie werden in hybrid-elektrischen Konzepten gesehen. Die wichtigsten Herstellerfirmen in diesem Bereich sind Airbus SE (Niederlande), GKN Aerospace (UK), Urban Aeronautics Ltd. (Israel), HES Energy Systems (Singapur) and, ZeroAvia Inc. (US) [4.9].

Laut der durchgeführten Tiefeninterviews mit österreichischen Unternehmen wird Wasserstoff für die Zukunft der Luftfahrt weltweit mit etwa 72% als außerordentlich wichtig bis sehr wichtig eingestuft. [4.9]

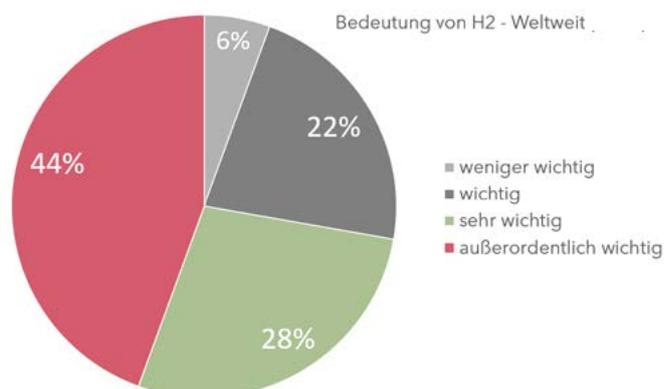


Abbildung 4.10: Auswertung der Wichtigkeit von Wasserstoff für die Luftfahrt weltweit
(Frage: Wie wichtig ist Wasserstoff für die Zukunft der Luftfahrt weltweit?)

4.2.3 Preisentwicklung und -bewertung von Wasserstoff hinsichtlich des Einsatzes im Flugbereich

Treibstoffkosten stellen ca. ein Drittel der Kosten von Airlines dar. Hinsichtlich der künftig realistisch möglichen Preistränge von Wasserstoff gibt es die größte Zustimmung für einen Preisbereich zwischen 2 und 6 EUR/kg (6 bis 18 Cent/kWh). Zum Vergleich die derzeitigen Kosten für Kerosin liegen bei ca. 1,1 EUR/Liter Nettopreis (ca. 8 Cent/kWh) laut Jet Fuel Station VIE [4.10].

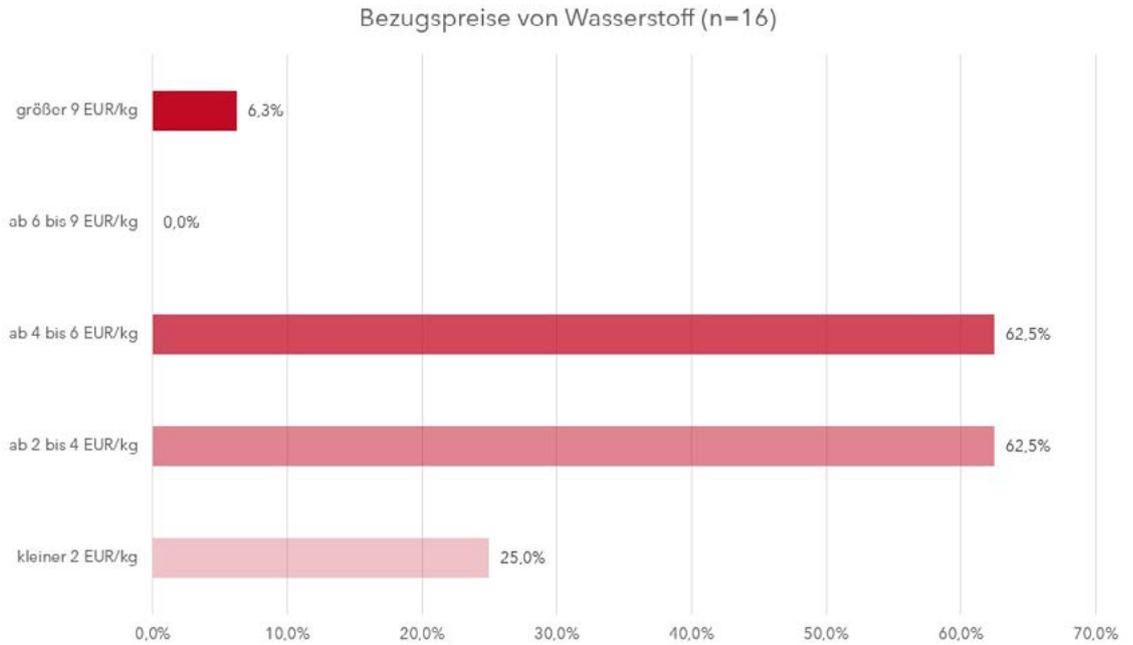


Abbildung 4.11: Erwarteter künftiger Preis von Wasserstoff (Frage: Bei welchen Bezugspreisen macht die Herstellung bzw. der Einsatz von Wasserstoff für Ihre Anwendung Sinn?)

4.2.4 Aktuelle Projektlandschaft in Österreich

Die befragten Unternehmungen beschäftigen sich derzeit mit 25 Projekten/Themen für Zero-Emission Antriebsarten, wobei die Entwicklung von Komponenten und Systemen den größten Anteil ausmacht (Abbildung 4.12).

Projekt-/Themeninhalte	Projekt-/Themeninhalte						Projekte/Themen
	Komponenten	Systeme	H2 Infrastruktur	SAF	Studien	Rahmenbedingungen	
Summe	8	7	5	2	2	1	25

Abbildung 4.12: Aktuelle Wasserstoffprojektlandschaft (Frage: An welchen Wasserstoffprojekten arbeiten Sie derzeit?)

Die TRLs der Produkte, die in den angegebenen Projekten entwickelt werden befinden sich zumeist zwischen 2 und 6, wobei TRL 2 bis 4 dominieren.

TRL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Summe	0	0	6	5	5	4	4	1	1	1	27

Abbildung 4.13: TRL der aktuellen Wasserstoffprojekte (Frage: Auf welcher Entwicklungsstufe (z.B. TRL 0-9) befinden sich Ihre Projekte bzw. Anwendungen?)

Als dominante Player im Bereich Wasserstoff für die Luftfahrt wurden im Rahmen der Befragung dieser Studie folgende Unternehmen aus Industrie, Wissenschaft und dem Verwaltungsbereich, gereiht nach der Häufigkeit der Rückmeldungen, genannt: OMV, Diamond Aircraft, die beiden technischen Universitäten TU Wien und TU Graz, AVL, Test Fuchs, AIT - Austrian Institute of Technology GmbH, Austrian Airlines, Austro Engine, FH JOANNEUM, Magna, Air BP, BMK, FFG, HyCentA, Peak Technology.

4.2.5 Zusammenfassende PESTEL-Analyse

Zur Analyse des Makro-Umfeldes eines Wasserstoffeinsatzes im Flugbereich für Österreich wurde eine sogenannte PESTEL-Analyse erstellt. Dabei handelt es sich um ein strategisches Tool, mit dem das externe Umfeld eines Anwendungsbereiches in einer spezifischen Branche anhand von 6 verschiedenen Faktoren analysiert wird. P steht dabei für political (politisch), E für economic (ökonomisch), S für social (sozio-kulturell), T für technological (technologisch), E für ecological (ökologisch) und L für legal (rechtlich).

4.2.5.1 Politisches Umfeld (P)

Der Ausbau von Kompetenzen in Forschung, Technologie und Innovation, die Bildung strategischer Allianzen, die Sicherung bestehender und Erschließung neuer Märkte sowie die Ausbildung qualifizierter Fachkräfte und die Nachwuchsförderung sind die vier Maßnahmenbündel des Aktionsplans der FTI Luftfahrtstrategie 2020+ [4.12].

Auf europäischer Ebene sieht die Strategie Hydrogen Europe die Nutzung von Wasserstoff als einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der europäischen Klimaschutzziele, wobei der sektorübergreifenden Integration besondere Bedeutung zukommt [4.11].

Die für Energiepolitik ressortzuständigen Minister der Staaten Belgien, Deutschland, Frankreich, Luxemburg, den Niederlanden, Österreich und Schweiz veröffentlichten als pentalaterales Energie-Forum die Gemeinsame Politische Erklärung zur Rolle von Wasserstoff für die Dekarbonisierung des Energiesystems in Europa in der sie europäische Kooperation in Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Politik für den Einsatz von Wasserstoff in Europa für ihre eigenen Staaten betonten und die Europäische Union sowie die Mitgliedsstaaten ermutigten, sich diesen Zielen anzuschließen [4.13].

Die Österreichische Wasserstoffstrategie wird seit Ende 2018 unter der Leitung einer aus BMNT, BMK und BMBWF bestehenden Steuerungsgruppe in Kooperation mit in vier Arbeitsgruppen (AG1: Erzeugung, Infrastruktur und Speicher; AG2: Greening the Gas“ H₂ und Biomethan; AG3: Wasserstoff in industriellen Prozessen; AG4: Brennstoffzellen und Wasserstoffnutzung (4a: Mobilität, 4b: Gebäude) organisierten Unternehmen entwickelt. Aus der Wasserstoffstrategie sind die folgenden Eckpunkte zu zukünftigen Anwendungsbereichen von Wasserstoff in Österreich bekannt [4.14]:

- Integration in die erneuerbare Stromproduktion als saisonaler Speicher
- Feedstock für die Industrie – Ersatz der derzeitigen Verwendung von Wasserstoff aus Erdgas
- Nutzung für Hochtemperaturprozesse in der Industrie
- Nutzung im Schwerverkehr
- Andere Mobilitätsanwendungen

Weitere Ziele der Strategie sind Versorgungssicherheit und eine durch zwei Netze gewährleistete Resilienz. Es wird jedoch auch darauf verwiesen, dass die Umsetzung der Strategie auch Wasserstoffimporte benötigen wird. In jedem Fall wird angestrebt, dass österreichische Unternehmen und Forschungseinrichtungen in ausgewählten Bereichen Technologieführerschaft erlangen und dadurch Arbeitsplätze geschaffen werden sollen [4.14].

4.2.5.2 Wirtschaftliches Umfeld (E)

Bedingt durch die wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen im Frühjahr 2022 sind Prognosen zur wirtschaftlichen Entwicklung mit hohen Unsicherheiten behaftet. Allerdings haben gerade diese Entwicklungen auch die Notwendigkeit eines Umstiegs auf andere als fossile Energieträger gezeigt. Wenn jedoch vermehrt Wasserstoff in Anwendungen zum Einsatz kommen soll, in denen aktuell fossile Energieträger und insbesondere Erdgas verwendet werden, so ist bereits mittelfristig mit einem Wasserstoffbedarf der

Gesamtwirtschaft zu rechnen, der die weiter oben präsentierten Zahlen noch deutlich übersteigen wird. Die zu erwartenden erheblich höheren Kosten des Betriebs mit grünem Wasserstoff wird voraussichtlich Auswirkungen auf die Marktstruktur des Luftverkehrs haben (z.B. Thema: Wirtschaftlichkeit von Billigfluglinien).

4.2.5.3 Soziales Umfeld (S)

Im Zusammenhang mit der gesellschaftlichen Diskussion zum Klimawandel bzw. Maßnahmen, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren, steht die Luftfahrt unter starker Kritik. In manchen europäischen Staaten werden Maßnahmen diskutiert, die z.B. Kurz- und Mittelstreckenflüge reduzieren sollen. Auch Unterstützungszahlungen für COVID-19 bedingte Ausfälle wurden durch NGOs zum Teil heftig kritisiert [4.15]. Die Nutzung von grünem Wasserstoff als klimaneutralem Treibstoff kann dazu beitragen, die soziale Akzeptanz der Luftfahrt zu erhöhen, was mit ein Grund für die auf europäischer und globaler Ebene gesetzten Initiativen der Luftfahrtindustrie zur Erforschung dieser und anderer Technologien zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes der Luftfahrt ist.

4.2.5.4 Technologisches Umfeld (T)

Während in Österreich keine der großen Flugzeughersteller Produktionsstandorte betreiben, gibt es mit der Unternehmen Diamond Aircraft einen Hersteller, der im Segment von Flugzeugen mit bis zu acht Sitzen einige auch international beachtete Modelle auf den Markt gebracht hat. Dieses Segment wird für den Einsatz von Brennstoffzellentechnologie als besonders interessant erachtet. Von Bedeutung für die österreichische Industrie ist vor allem die Herstellung von Flugzeugkomponenten. Dies umfasst die Herstellung von Spezialwerkstoffen (z.B. AMAG) ebenso wie die Herstellung von Tanksystemen (z.B. Magna) oder Flügel- und Leitwerkkomponenten (z.B. FACC). Die Einführung von Wasserstoff als neuem Treibstoff in der Luftfahrtindustrie stellt diese Unternehmen vor die Herausforderung, auch für diese Technologie angepasste neue Komponenten zu entwickeln.

4.2.5.5 Umweltaspekte (E)

Um die mit der Nutzung von Wasserstoff angestrebten CO₂-Emissionsziele zu erreichen (bei H₂-Verbrennung auch NO_x-Emissionsziele), ist es notwendig, ausschließlich grünen Wasserstoff in der Luftfahrt einzusetzen. Insbesondere ist evident, dass auch die Auswirkungen von Wasserdampf (als Produkt bei einer Verbrennung oder Brennstoffzellenumsetzung) in Höhen des Flugbetriebs zu berücksichtigen ist. Wie Abbildung 4.3 zeigt, werden dafür ab 2025 jährlich 16 TWh Strom aus erneuerbaren Energien benötigt. Aktuelle Planungen sehen bis 2025 einen Gesamtausbau an erneuerbarer Stromerzeugung in Österreich vor, der eine Produktion von jährlich 55,8 TWh ermöglicht und bis 2030 auf 82,8 TWh ansteigen soll [4.16]. Dies bedeutet, dass bereits 2025 rund ein Drittel der gesamten erneuerbaren Stromerzeugung für die Luftfahrt zur Verfügung stehen müsste (was ohne zusätzlichem Import von grünem Strom bzw. grünem Wasserstoff aus heutiger Sicht unrealistisch erscheint). Die dazu in Kapitel 4.1 angestellten Berechnungen gehen zwar von der nicht realistischen Annahme aus, dass bereits bis 2025 der gesamte Kerosinbedarf der österreichischen Luftfahrt durch Wasserstoff ersetzt wird, doch zeigt der Vergleich die Ambitionen, die mit der Einführung von Wasserstoff als nicht-fossilem Energieträger in der Luftfahrt verbunden sind und weist auf die Notwendigkeit der Erweiterung der Ausbaupläne für Stromgewinnung aus erneuerbaren Energieträgern hin.

4.2.5.6 Rechtliches Umfeld (L)

Aktuell existieren keine gesonderten gesetzlichen Regelungen zu Wasserstoff. Für die Errichtung und den Betrieb von Wasserstoffproduktionsanlagen sind Bestimmungen zur Betriebsanlagengenehmigung sowie die Gewerbeordnung relevant. Größere Anlagen werden vermutlich als IPPC-Anlagen betrachtet und erfordern nach § 353 Abs. 1 GewO 1994 eine integrierte Anlagengenehmigung, die sich über alle Umweltmedien (Luft, Wasser, Abfall, Boden, Energie) erstreckt. Zusätzlich ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem UVP-G notwendig [4.17].

Für den Transport auf der Straße ist relevant, dass Wasserstoff entsprechend dem internationalem Abkommen zum Transport gefährlicher Güter (Agreement on International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) als Gefahrgut der Klasse 2 nach ADR gilt. Dies erfordert besondere Qualifikationen für Fahrer und Fahrerinnen. In Österreich ist das ADR durch das Gefahrgutbeförderungsgesetz umgesetzt. Im Weiteren gelten Bestimmungen für Druckbehälter nach dem Druckgerätegesetz sowie die Bestimmungen der Explosionsschutzverordnung für Design, Herstellung und Transport der notwendigen Tanks [4.18].

Im öffentlichen Gasnetz darf ein Gemenge von Wasserstoff und Erdgas einen Maximalanteil von entsprechend der neuen Gasqualitätsrichtlinie G B210 von bis zu 10 % Wasserstoff beinhalten. Vor Gültigkeit der neuen Richtlinie betrug der Maximalanteil 4 %. Die Festlegung dieser Werte obliegt dem BMK gemeinsam mit dem BMDW. Der Handel ist durch die E-Control geregelt und dieser anzuzeigen.

4.2.6 Anliegen der österreichischen Unternehmen

Im Rahmen der Befragung und der Experteninterviews wurden die Unternehmungen auch zu ihren Anliegen befragt (siehe dazu Abb. 4.14). Hier ist der Wunsch nach mehr finanzieller Unterstützung am größten, gefolgt von Forschung und Kooperationen und unterstützenden regulatorischen Rahmenbedingungen.

Zusätzlich wurden eine realistische Einschätzung der technologischen und wirtschaftlichen Entwicklung sowie das Bereitstellen von H₂ Infrastruktur und das Hochfahren der SAF Produktion genannt.

Nicht zuletzt sollte schnell und zielstrebig gehandelt werden, um den Anschluss nicht zu verpassen!

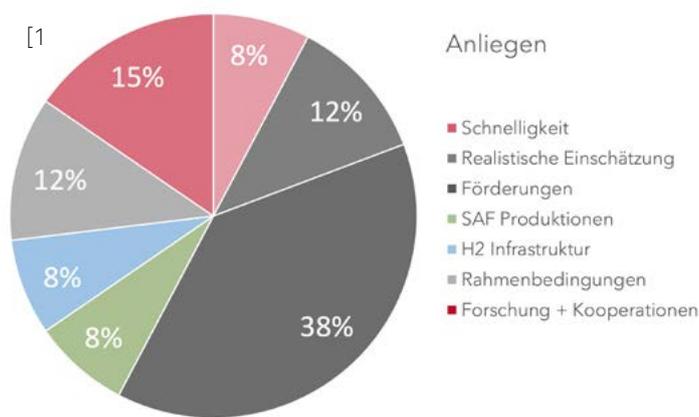


Abbildung 4.14: Anliegen der befragten Unternehmungen (Frage: Was wünschen Sie sich für die Entwicklung von Wasserstoff in der Luftfahrt in Österreich?)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Zeithorizonten von Wasserstoff-Transporttechnologien

Abbildung 4.2: Prognostizierter Wasserstoff- und Energiebedarf für den operationellen Luftverkehr in Österreich.

Abbildung 4.3: Vergleich des Energiebedarfs abhängig von der Speicherform.

Abbildung 4.4: Prognose des Energiebedarfs für das Jahr 2050 mit Berücksichtigung der partiellen Abdeckung von Synfuels und LH₂.

Abbildung 4.5: Zukünftiger Verbrauch von RFNBOs im europäischen Verkehrssektor, gegliedert nach Transportmitteln [4.7]

Abbildung 4.6: Globaler H₂ Bedarf verschiedener Branchen 2019 und 2050 gegenübergestellt, Grafik: ICT Impact GnbH, basierend auf [4.8]

Abbildung 4.7: Auswertung der Wichtigkeit von Wasserstoff für die Luftfahrt

Abbildung 4.8: Potenziale für Österreich

Abbildung 4.9: Auswertung der Wichtigkeit von Wasserstoff für die Luftfahrt

Abbildung 4.10: Auswertung der Wichtigkeit von Wasserstoff für die Luftfahrt weltweit

Abbildung 4.11: Erwarteter künftiger Preis von Wasserstoff

Abbildung 4.12: Aktuelle Wasserstoffprojektlandschaft

Abbildung 4.13: TRL der aktuellen Wasserstoffprojekte

Abbildung 14.4: Anliegen der befragten Unternehmungen

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Annahmen für den Wirkungsgrad entlang der Herstellungs- und Verteilungsprozesse für synthetischen Kraftstoff und LH₂

Quellenverzeichnis

- [4.1] Nationaler Wasserstoffrat. „Wasserstoff für die Luftfahrt in Deutschland - Stellungnahme Luftverkehr.“ Nationaler Wasserstoffrat. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-04-16_NWR-Stellungnahme_Luftverkehr.pdf (abgerufen am 16.05.2022).
- [4.2] BMK. „Österreichische Wasserstoffstrategie.“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/energieversorgung/wasserstoff/strategie.html> (abgerufen am 21.07.2022).
- [4.3] M. Friedmann, Wasserstoffstudie Österreich. Wien: ICT Impact GmbH, 2022.
- [4.4] BMK. „Wasserstoff aus Wind- und Sonnenstrom für Österreich.“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/20220720_gruener-wasserstoff-burgenland.html (abgerufen am 21.07.2022).
- [4.5] BMK. „Verbrauchsstatistik für Dezember 2019 (Auswertung gemäß § 6 Abs. 1 Z 1 Erdölstatistik-Verordnung 2011.“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/verbrauchsstatistik-erdoelprodukte-2019.pdf> (abgerufen am 10.05.2022).

- [4.6] Fuel Cell and Hydrogen 2 Undertaking und Clean Sky 2 Joint Undertaking, Hydrogen-powered aviation - A fact-based study of hydrogen technology, economics and climate impact by 2050. Publications Office of the European Union, 2020.
- [4.7] EU, „Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL COM(2021) 557 final 2021/0218 (COD),“ European Commission, Brussels, 2021.
- [4.8] IEA, Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector (no. 20.06.2022). Paris: International Energy Agency, 2021.
- [4.9] Research and Markets. „Hydrogen Aircraft Market by Power Source (Hydrogen Combustion, Hydrogen Fuel Cell), Platform (Unmanned Aerial Vehicles, Air Taxis, and Business Jets), Range, Passenger Capacity, Technology, and Region - Global Forecast to 2030.“ Research and Markets,. [https://www.researchandmarkets.com/reports/5315059/hydrogen-aircraft-market-by-power-source?utm_source=GNOM&utm_medium=PressRelease&utm_code=m5759r&utm_campaign=1530903+-+Global+Hydrogen+Aircraft+Market+\(2020+to+2030\)+-+Development+of+Fuel+Cell+Technologies+in+the+Aviation+Industry+Presents+Opportunities&utm_exec=jamu273prd](https://www.researchandmarkets.com/reports/5315059/hydrogen-aircraft-market-by-power-source?utm_source=GNOM&utm_medium=PressRelease&utm_code=m5759r&utm_campaign=1530903+-+Global+Hydrogen+Aircraft+Market+(2020+to+2030)+-+Development+of+Fuel+Cell+Technologies+in+the+Aviation+Industry+Presents+Opportunities&utm_exec=jamu273prd) (abgerufen am 10.09.2021).
- [4.10] Jet-A1-Fuel.com. „Jet a1 price Austria.“ JET-A1-FUEL.COM. (abgerufen am 20.07.2022).
- [4.11] J. Chatzimarkis, Hydrogen Europe - Presentation for kick-off meeting for the Austrian Hydrogen Strategy. Vienna, 2019.
- [4.12] I. Kernstock, „Forschung und Innovation im Luftfahrtsektor: Chancen nützen auf internationalen Märkten,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Wien, 2015.
- [4.13] Pentalaterales Energieforum, „Joint Political Declaration of the Pentalateral Energy Forum on the Role of Hydrogen to Decarbonise the Energy System in Europe,“ Pentalaterales Energieforum, Den Haag, 2020.
- [4.14] J. Streitner, „Wasserstoffstrategie - Mit Sektorkopplung zur Zielerreichung,“ 2019.
- [4.15] Green Peace Netherlands. „POLLUTING EUROPEAN AIRLINES SEEK €12.8 BN AND COUNTING, GREEN-PEACE DEMANDS TOTAL BAN ON SHORT-HAUL FLIGHTS.“ Green Peace Netherlands,. <https://www.greenpeace.org/nl/klimaatverandering/33060/polluting-european-airlines-seek-e12-8-bn-and-counting-greenpeace-demands-total-ban-on-short-haul-flights/> (abgerufen am 12.10.2021).
- [4.16] Österreich.Energie. „Ausbau bei erneuerbare Energie in Österreich.“ Österreichs Energie. <https://oesterreichsenergie.at/downloads/grafiken/detailseite/erneuerbaren-ausbau-strom-bis-2030> (abgerufen am 10.01.2022).
- [4.17] C. Cudlik, „Ist das österreichische Anlagenrecht reif für Power-to-X-Anlagen?,“ RdU-UT, vol. 2020, no. 14, S. 63, 2020.
- [4.18] M. Selenics. „Hydrogen Law and Regulation in Austria.“ CMS Law-Tax-Future. <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/austria> (abgerufen am 10.11.2021).

5 Evaluierung und Empfehlungen



5 Evaluierung und Empfehlungen

Folgend werden die aus der Recherche und der Auswertung, bereits in Kapitel 3 und Kapitel 4 diskutierten Ergebnisse aus der Befragung und den Experteninterviews, in Form von Empfehlungen und gesammelt in einer strukturierten Forschungs- und Innovations-Roadmap (F&I-RM) dargestellt und diskutiert.

5.1 Empfehlungen: Weiterentwicklung der H₂-betriebenen Luftfahrt

Wie diese Studie zeigt, hat der Wasserstoffantrieb das Potenzial, bis 2050 ein wesentlicher Bestandteil des Antriebsmixes zu sein und eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der Luftfahrt einzunehmen. Dazu ist eine Intensivierung der Forschungs-, Innovations- und Entwicklungsaktivitäten erforderlich, um die zugrundeliegenden Technologien zu entwickeln, sie in Flugzeuge zu integrieren und die erforderliche Infrastruktur zu implementieren. Diese Forschungsaktivitäten werden auch bessere Einblicke in die Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Klimawirksamkeit von Zukunftstechnologien liefern. Sie werden viele der in dieser Studie getroffenen Annahmen validieren und widerlegen und dazu beitragen, diesen Fahrplan für eine dekarbonisierte Luftfahrt aus österreichischer Sicht zu verfeinern.

5.1.1 Dringender Handlungsbedarf

Je nach Größe des Flugzeugs dauert die Einführung größerer neuer Flugzeuge typischerweise etwa 15 bis 20 Jahre und der breite Einsatz in der Flotte weitere 10 Jahre. Die letzte Generation von Kurzstreckenflugzeugen, die für etwa ein Viertel der gesamten Klimaauswirkungen des Sektors verantwortlich sind, wurde um 2015 eingeführt (z. B. die Flugzeugfamilie A320neo). Dies eröffnet zwischen 2030 und 2035 ein Zeitfenster für ein neues, dekarbonisiertes Flugzeug in diesem Segment. Die nächste Generation in diesem Segment wäre dann erst zwischen 2045 und 2050 zu erwarten, was zu spät wäre, um die von der EU und der ATAG gesetzten Dekarbonisierungsziele zu erreichen. Regional- und/oder Pendlerpiloten könnten vorher eingeführt werden, und Kurzstreckenflugzeuge könnten ein Sprungbrett für die Einführung in Mittelstreckenflugzeugen werden. Österreichische Flugzeugprogramme konzentrieren sich auf Kleinflugzeuge. Bei der Entwicklung von Zubringer- Mittelstrecken- und Langstrecken-Flugzeugen dienen österreichische Projekte dazu, die Beteiligung österreichischer Stakeholder an internationalen/europäischen Projekten vorzubereiten.

Vier Aspekte sind erforderlich, um diesen Übergang für den Sektor zu steuern:

1. Eine detaillierte Sektor F&I-Roadmap zur Steuerung des Übergangs
2. Intensivierung der Aktivität und Finanzierung von Forschung und Innovation (F&I).
3. Ein Pilotprojekt, welches die komplette Wertschöpfungskette in Österreich umfasst
4. Langfristiger politischer Rahmen

Die Sektor-Roadmap als follow-up zur vorliegenden Studie muss klare Ambitionen setzen, Standards angleichen, den Aufbau der Infrastruktur koordinieren, Marktversagen überwinden und Vorreiter ermutigen. Fokus soll dabei auf folgende für Österreich relevanten Bereiche gelegt werden:

- Flugzeug Engineering
- Komponenten und Systeme (z.B. Ventile, Sensoren,...)
- Bau von Kleinflugzeugen (General Aviation)
- Wasserstoffinfrastruktur und Verteilung

Kurzfristig stellt die Entwicklung eines wasserstoffbetriebenen Kleinflugzeugs (Demonstrator) einen

äußerst wichtigen ersten Schritt bis 2030 dar. Ein wichtiges mittelfristiges Ziel könnte beispielsweise die Einführung eines H₂-betriebenen Kurzstreckenflugzeugs vor 2035 sein. Der langfristige politische Rahmen muss die Leitlinien, einschließlich der Auswirkungen auf das Klima, für den Sektor festlegen. Die Europäische Union soll zunächst auf Pendler-, Regional- und Kurzstreckenflüge abzielen, und dies dann zusammen mit internationalen Partnern auch bei Mittel- und Langstreckenflugzeuge umsetzen. An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass die für die Dekarbonisierung der Luftfahrt erforderliche Wasserstoffmenge sowohl in den österreichischen Strategieüberlegungen als auch in den Infrastrukturplanungen berücksichtigt werden muss, da der Mengenbedarf in ähnlicher Größenordnung wie jener der Stahlindustrie einzuordnen ist.

Die F&I-Aktivitäten bilden sowohl die Grundlage für die F&I-RM und den langfristigen politischen Rahmen als auch die Technologieentwicklung, die erforderlich ist, um Wasserstoffflugzeuge in Betrieb zu nehmen.

Die Studienautoren schlagen die Ausschreibung eines Pilotprojekts, welches die komplette Wertschöpfungskette in Österreich von Wasserstoffherstellung, -transport, tanksystem bis hin zu einem Kleinflugzeugdemonstrators umfasst, vor.

5.1.2 Forschungs- und Innovations-Roadmap

Basierend auf der Machbarkeitsanalyse der Technologie, den kritischen Kostentreibern, Unsicherheiten und Einführungsbarrieren wurde die folgende F&I-Roadmap abgeleitet (siehe Abbildung 5.1). Es ist in vier Bereiche gegliedert: die Entwicklung relevanter H₂-Struktur, die Entwicklung von H₂-Flugzeugkomponenten und -systemen (einschließlich neuer Flugzeugdesigns) und die Schaffung gesetzlicher Rahmenbedingungen. Alle diese Bereiche umfassen Zertifizierungs- und Standardisierungsaspekte als wichtige Voraussetzungen für eine klare Anleitung in F&I und erfordern die Beteiligung der Zulassungsbehörden der Zivilluftfahrt. Schlüsselaktivitäten finden in drei Phasen statt:

- Das kurzfristige Ziel bis 2025 besteht darin, die technologischen Grundlagen zu entwickeln, und die Roadmap und eine Empfehlung für Verordnungen zu erstellen, von der Sicherheit bis zur Marktaktivierung Mechanismen.
- Das Ziel in den Jahren bis 2030 besteht darin, Zubringerflugzeuge zur Zertifizierung zu bringen, Wasserstoffflugzeuge in Regional- und Kurzstreckensegmenten zu pilotieren
- In der Phase von 2030 bis 2035 sollen sich die F&I-Aktivitäten darauf konzentrieren, diese Komponenten zu skalieren, auf Mittelstreckenflugzeuge anzuwenden und für den Einsatz vorzubereiten sowie die zweite Welle der Wasserstoffluftfahrt vorzubereiten, dazu gehört eine sichere und effiziente Betankungseinrichtung am Flughafen.
- Langfristig von 2035 bis 2050 müssen Konzepte und erste Prototypen für Mittel- und möglicherweise Langstreckensegmente entwickelt werden, einschließlich neuer revolutionärer Flugzeugdesigns und neuer Technologien für die großflächige Kraftstoffversorgung und schnelle Betankung.

In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Forschungsbereiche detailliert beschrieben.

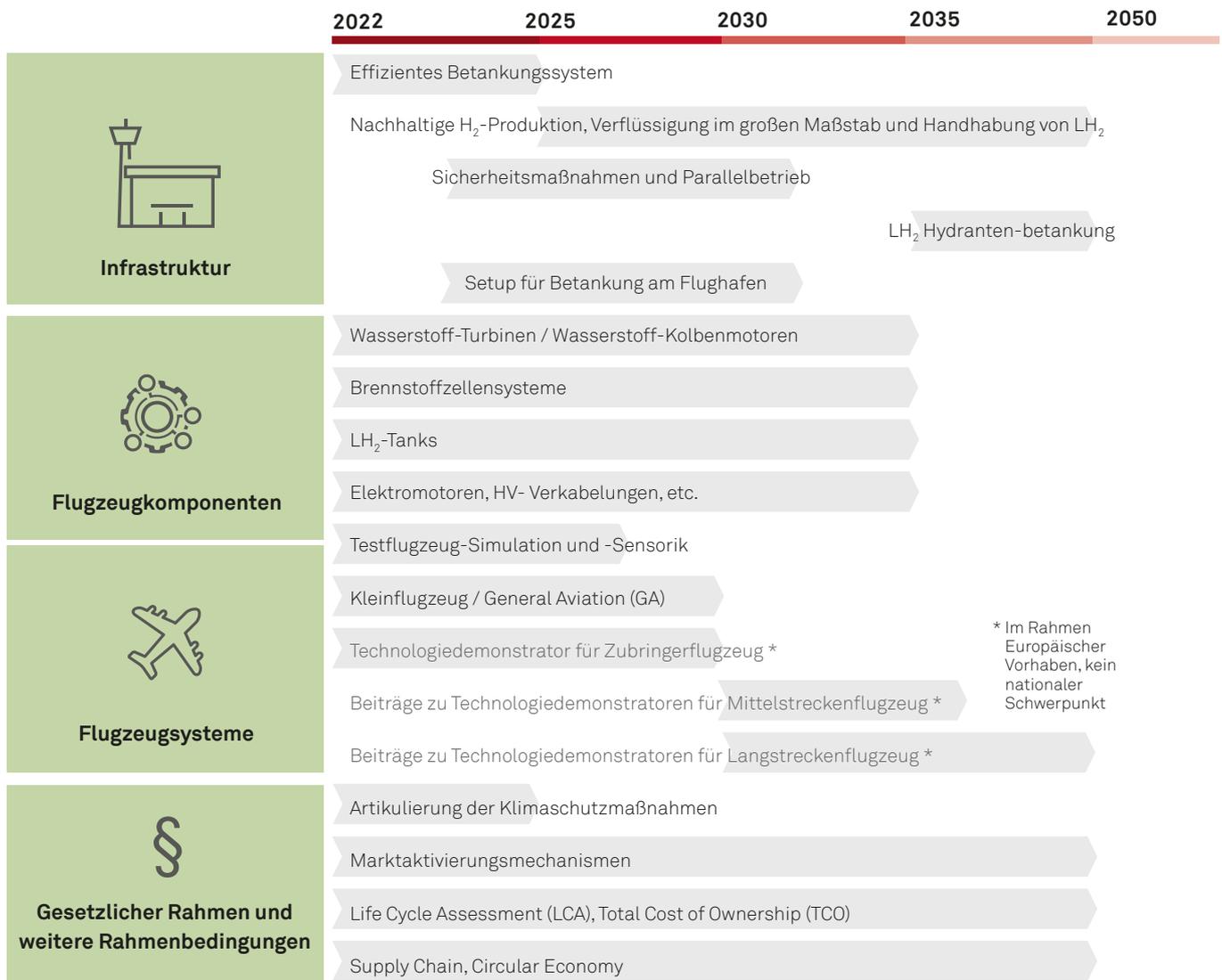


Abbildung 5.1 Forschungs- und Innovations-Roadmap – 4 Hauptforschungsbereiche

5.1.2.1 Betankungsinfrastruktur: Betankungssysteme, Sicherheit und Verflüssigung

Ein wichtiger Schlüssel zur Erschließung des Potenzials der LH₂-Luftfahrt ist die Entwicklung der erforderlichen Betankungsinfrastruktur. Die meisten notwendigen Technologien sind heute kommerziell verfügbar, sodass die Herausforderung hauptsächlich in der Skalierung und dem Aufbau paralleler Infrastrukturen während des Übergangs zu neuen Flugzeugsystemen liegt. Dennoch müssen einige kritische F&I-Herausforderungen gelöst werden. Das Ergebnis der Bewältigung dieser Herausforderungen könnte über die Wettbewerbsfähigkeit des LH₂-Flugs entscheiden.

Kurzfristig müssen neue Betankungsstrategien und -technologien den Betankungsprozess beschleunigen, um mit konventionellen Betankungstarifen konkurrieren zu können. Gleichzeitig muss die Industrie maßgeschneiderte Sicherheitsmaßnahmen für LH₂ festlegen und ihre potenziellen Auswirkungen auf den Parallelbetrieb prüfen. Die Betankungseinrichtung des Flughafens muss möglicherweise auch im Hinblick auf parallele Infrastrukturanforderungen überprüft werden.

Mittel- und langfristig wird die Installation einer großmaßstäblichen LH₂-Versorgung und -Verflüssigung an Flughäfen eine zentrale Herausforderung für Forschung und Entwicklung sein. Längerfristig muss untersucht werden, ob und wie LH₂-Hydranten-Betankungssysteme eine Rolle bei der LH₂-Betankung im großen Maßstab spielen können.

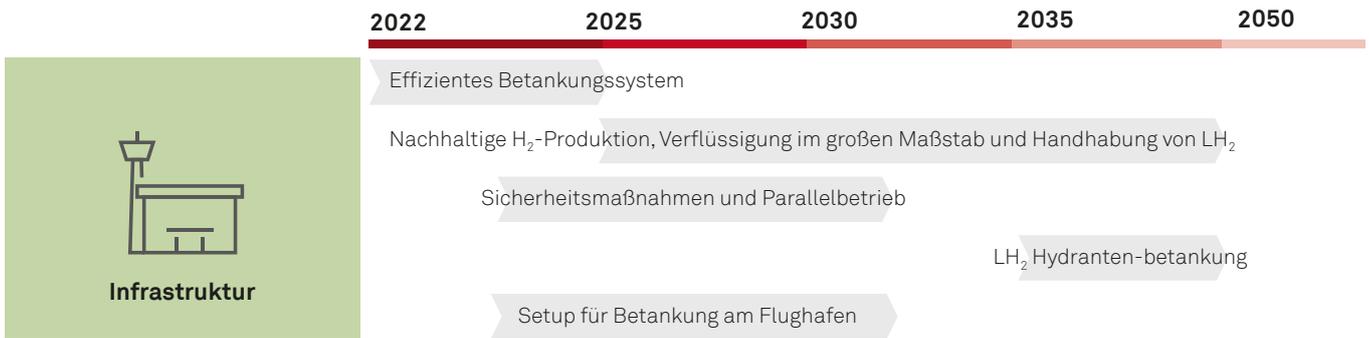


Abbildung 5.2 Forschungs- und Innovations-Roadmap – Infrastruktur

Effiziente Betankungssysteme

Da längere Durchlaufzeiten die Kosten stark erhöhen, ist die Entwicklung effizienterer Betankungssysteme von entscheidender Bedeutung. Allein die Verlängerung der Turnaround-Zeit um 10 Minuten könnte die Kosten eines Kurzstreckenflugs um 2 Prozent erhöhen. Die Forschung und Entwicklung soll sich darauf konzentrieren, die Durchflussraten durch LH₂-Schläuche zu optimieren und sicherzustellen, dass beim Auftanken Anfangs-Durchflussraten wie mit Kerosin (900 Liter/Minute) oder höher erreichbar sind.

Sicherheitsmaßnahmen und Parallelbetrieb

Da die Durchlaufzeit entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit ist, müssen die potenziellen Auswirkungen eines Worst-Case-Betankungsereignisses um das Flugzeug herum sowie die erforderliche Sicherheitszone (d. h. zündungsfreie Zone) um den Betankungsvorgang herum besser verstanden werden. Dieses Wissen hilft bei der Bestimmung, welche Operationen während des Flugzeugwechsels parallel stattfinden können.

Versorgung von Flughäfen und Betankung Flugzeugen

Kurzfristig sollen LH₂-Tankwagen Flugzeuge auf kleineren Regionalflughäfen direkt bedienen können. Mit einigen möglichen Anpassungen an Schlauch-(Verbindungs-)Systemen sind aktuelle Systeme angemessen eingerichtet, um eine frühe Innovation zu ermöglichen. Längerfristig sind jedoch möglicherweise Alternativen erforderlich, um Störungen des Bodenbetriebs und der bestehenden Flughafen-Betankungsinfrastruktur einzudämmen.

Aus der Literatur [5.1-5.4], Recherche und Befragungsauswertung der AH2AS ergeben sich insbesondere folgende wissenschaftliche Problemstellungen und Themenfelder:

- Entwicklung nachhaltige Wasserstoff-Flughafeninfrastruktur – anfänglich parallel zu bestehender Kerosin-Infrastruktur
- Betankungssysteme im großen Maßstab

Die Kosten von LH₂-Hydrantenbetankungssystemen würden mindestens das Fünffache der derzeitigen Kosten von Hydrantenbetankungssystemen betragen, was sie zumindest bis 2040 kostentechnisch eine große Herausforderung darstellt. Die zu untersuchende Frage ist daher, welche Systeme in der Lage sind den LH₂-Betankungsbedarf größerer Flughäfen in großem Umfang zu decken. Automatisierte Betankungswagen mit mechanisch betriebenen Betankungsschläuchen, mobile Betankungsplattformen und Betankungsparkplätze außerhalb des Flugplatzes sind Optionen.

H₂-Herstellung, Verflüssigung im großen Maßstab und Handhabung von LH₂

Die Treibstoffkosten werden bei der Bestimmung der Wettbewerbsfähigkeit der LH₂-Luftfahrt eine grundlegende Rolle spielen. Während die Wasserstoffnachfrage der Luftfahrt in unseren Szenarien die Wasserstoffnachfrage insgesamt nur um etwa 10 bis 25 Prozent erhöhen wird, könnte die Nachfrage nach flüssigem Wasserstoff um ein Vielfaches wachsen, was ein beispielloses Up-Scaling der Verflüssigungskapazität erfordert. Dieses Up-Scaling wird eine entscheidende Sensibilität für die Wettbewerbsfähigkeit von Kraftstoffen darstellen; Wenn die Verflüssigungskosten bis 2040 um weitere 10 Prozent gesenkt werden könnten, könnten die Treibstoffkosten um weitere 1,50 US-Dollar pro Megawattstunde gegenüber den prognostizierten 77,20 US-Dollar pro Megawattstunde gesenkt werden. Damit würde ein durchschnittlicher Kurzstreckenflug wiederum um 1 Prozent günstiger. F&E könnte der Branche helfen, die Effizienz erheblich zu verbessern und die Investitionskosten zu senken. Aus der Literatur [5.1-4], Recherche und Befragungsauswertung der AH2AS ergeben sich insbesondere wissenschaftliche Problemstellungen im Bereich der nachhaltigen Wasserstoffproduktion.

Betankungsinfrastruktur für LH₂-Hydranten

Viele große Flughäfen setzen heute auf Hydrantenbetankungsanlagen, um Flugzeuge mit Kerosin zu versorgen. Obwohl dies kurzfristig nicht machbar ist, könnten kryogenisierte Hydranten-Betankungssysteme für LH₂ die Kosten für die Flüssigkeitshandhabung an Flughäfen senken und Staus verringern. Obwohl dieses Thema keine oberste Priorität für die Forschung zur LH₂-Luftfahrt hat, könnte die Lösung dieser Frage dazu beitragen, einige grundlegende Skalierungsherausforderungen langfristig zu bewältigen.

5.1.2.2 Komponententechnik: Sichere und zuverlässige Speicherung und Verteilung von LH₂



Abbildung 5.3 Forschungs- und Innovations-Roadmap – Flugzeugkomponenten

Die unmittelbare Priorität für Komponenten liegt in der Entwicklung und Konstruktion von leichten Tanksystemen, zuverlässigen Kraftstoffverteilungskomponenten, H₂-Antriebsturbinen mit niedrigen NO_x-Emissionen und langer Lebensdauer sowie leistungsstarken Brennstoffzellensystemen. Zur Lenkung von Forschung und Entwicklung müssen Zertifizierungsanforderungen für jede Komponente festgelegt werden.

Hocheffiziente H₂-Verbrennungsturbinen und Wasserstoffkolbenmotoren mit geringem NO_x-Ausstoß

H₂-Turbinen mit hoher Verbrennungseffizienz, niedrigeren NO_x-Emissionen und einer zuverlässigen, langlebigen Turbine sind erforderlich, um Wasserstoffflugzeuge für Kurzstrecken-, Mittelstrecken- und Langstreckenflugzeuge realisieren zu können. Höhere Wirkungsgrade und Zuverlässigkeit ermöglichen wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, während niedrigere NO_x-Emissionen die Klimabilanz verbessern.

Aus der Literatur [5.1-5.4], Recherche und Befragungsauswertung der AH2AS ergeben sich insbesondere folgende wissenschaftliche Problemstellungen und Themenfelder:

- Wasserstoffturbinentechnologie
- Hybridansätze (Turbinen & Brennstoffzellen)
- Reduktion der NO_x-Emissionen

Leistungsstarkes, lebensdaueroptimiertes Brennstoffzellensystem inklusive Kühlkonzepten

Die Forschung daran, wie die Leistungsdichte von Brennstoffzellen um das Dreifache erhöht werden kann, ist für größere Brennstoffzellen-Flugzeugkonstruktionen von entscheidender Bedeutung. Wenn die Leistungsdichte von Brennstoffzellen nicht erhöht werden kann, lassen sich die Energieeinsparpotenziale der Konzeptstudien für Pendler-, Regional- und Kurzstreckenflugzeuge nicht realisieren.

Ein wesentlicher limitierender Faktor von Brennstoffzellensystemen mit höherer installierter Leistung – mehr als 10 bis 20 Megawatt – ist der daraus resultierende Wärmeanstieg, der große und schwere Wärmetauscher zur Kühlung des Systems erfordert.

Aus der Literaturrecherche [5.1-4] und Befragungsauswertung der AH2AS ergeben sich insbesondere folgende wissenschaftliche Problemstellungen und Themenfelder:

- Leitungssysteme – Optimierung des Temperaturmanagements bei Wasserstoffleitungen, Kühlung elektrischer Leitungen (Brennstoffzellensysteme)
- Brennstoffzellentechnologie – aktuelle Technologie basiert auf Protonen-Austausch-Membranen in Kombination mit Speichertechnologie für Lastfolgebetrieb, um Kapazität/Größe der Brennstoffzellen zu optimieren, Optimierung der Kühlsysteme

Leichte und sichere LH₂-Tanks

Der LH₂-Tank mit optimalem Volumen und Gewicht ist ein Schlüsselfaktor für die technologisch machbare und wirtschaftliche H₂-betriebene Luftfahrt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, wie die Wirtschaftlichkeit vom gravimetrischen Tankindex abhängt. Dies ist besonders wichtig für das Langstreckensegment: Eine Erhöhung des Index von 38 Prozent auf 55 Prozent würde Flugzeuge mit LH₂-Antrieb gegenüber Flugzeugen mit Synfuel-Antrieb konkurrenzfähig machen, da die CO₂-Äquivalent-Vermeidungskosten um 44 Prozent sinken.

Um einen gravimetrischen Index von 35 Prozent für ein Kurzstreckenflugzeug und 38 Prozent oder mehr für ein Langstreckenflugzeug zu erreichen, muss die F&I von LH₂-Tanks eng mit der von Flugzeugherstellern und Zertifizierungsbehörden verknüpft werden.

Aus der Literatur [5.1-4], Recherche und Befragungsauswertung der AH2AS ergeben sich insbesondere folgende wissenschaftliche Problemstellungen und Themenfelder:

- Geometrie & Material
- Einbauposition von Wasserstofftanks
- Reduktion der Masse aktueller Tanksysteme

On-Board LH₂-Verteilungskomponenten und -system

Eine sichere, zuverlässige und redundante LH₂-Treibstoffverteilung ist der Schlüssel zur Gewährleistung der Machbarkeit und Zertifizierung von LH₂-angetriebenen Flugzeugen. Kryogene Treibstoffe wurden bisher noch nie in der kommerziellen Luftfahrt eingesetzt – in einem Umfeld, in dem Sicherheit, geringes Gewicht und eine lange Lebensdauer sehr wichtig sind. Da Wasserstoff in flüssiger Form gespeichert wird, aber in gasförmiger Hochdruckform in die Brennstoffkammer eingespritzt werden muss, muss die Architektur so ausgelegt sein, dass sie die Verdampfung des Wasserstoffs handhaben kann.

Testflugzeug-Simulation und -Sensorik

Modellierungsmethoden und Simulationswerkzeuge erlauben es, Rückschlüsse von der Brennstoffzellebene auf die Systemebene zu ziehen und somit erheblich Zeit im Entwicklungsprozess zu sparen. Hier besteht eine große Chance für die österreichische Industrie und F&E-Institutionen, vorhandene Expertise aus dem Automotive-Bereich in den Flugzeug-Sektor zu transformieren. Simulation und Sensorik im Fahrzeug-Sektor sind u.a. Teil der Austrian Roadmap for Sustainable Mobility [5.5].

Spezielle Steuerungsmethoden für Flugzeugantriebsstränge (z. B. Brennstoffzellen-Hybride), die sowohl die Komponentendegradation minimieren als auch die Effizienz maximieren, sind von entscheidender Bedeutung. Es werden Zustandsüberwachungssysteme (virtuelle Sensoren) sowie adäquate neue Sensoren benötigt, um die Betriebsbedingungen (z. B. in Turbinen oder Brennstoffzellen) zu messen, ohne deren Betrieb negativ zu beeinflussen. Die kontinuierliche Überwachung von Betriebsparameter eröffnet neue Möglichkeiten, die Leistung der Flugzeuge in Echtzeit zu bewerten, wodurch die Lebensdauer der Komponenten, die Emissionen und die Effizienz unterwegs optimiert werden, ohne dass Wartungsausfallzeiten erforderlich sind.

Die zunehmende Anzahl von Sensoren in Flugzeugen zur Bewältigung neuer Herausforderungen wie Umgebungswahrnehmung, Messung von Komponenten und Systemzuständen für Steuerungsfunktionen und die Nutzung digitaler Zwillinge erfordern den effizienten Einsatz von Sensorik an Bord.

5.1.2.3 H₂-Flugzeugsystem: Effiziente, zuverlässige Systemarchitektur und Prototypenentwicklung



Abbildung 5.4 Forschungs- und Innovations-Roadmap – Flugzeugsysteme

Nach erfolgreicher Entwicklung müssen die Komponenten in ein H₂-Flugzeugsystem integriert werden. Die Priorität liegt bei der Entwicklung einer sicheren und zuverlässigen Kraftstoffverteilung sowohl für Routine- als auch für kritische Bedingungen. Das Kraftstoffverteilungssystem soll in einen Flugzeugrahmen mit LH₂-Tanks so integriert werden, um maximale Effizienz zu erreichen. Nur so können H₂-Flugzeuge wettbewerbsfähige Betriebskosten erzielen.

Gegen Ende der Anfangsphase soll die Luftfahrtindustrie einen Technologiedemonstrator für kleinere Flugzeuge (General Aviation, GA) herstellen und während der Entwicklung eng mit verschiedenen Behörden zusammenarbeiten, um die Zertifizierung des Prototyps sicherzustellen. Für alle Segmente wird entscheidend sein, zertifizierungsreife Prototypen zu entwickeln, wobei der Schwerpunkt auf Flugzeugzellendesigns mit hocheffizienter Aerodynamik und Leichtbaustrukturen liegt, die eine modulare Integration sicherer, zuverlässiger Wasserstoffkomponenten ermöglichen und gleichzeitig die Wartungsvorlaufzeiten minimieren. Österreichische Stakeholder werden sich im Rahmen europäischer Vorhaben an Projekten für Technologiedemonstratoren beteiligen, nationale Schwerpunkte sind abgesehen von der Entwicklung von Kleinflugzeugen nicht geplant.

Testflugzeug-Simulation und -Sensorik

Durch Simulationen kann der Bau von Prototypen und umfangreiche Testflüge teilweise ersetzt werden. Die Flugzeugentwicklung könnte dadurch schneller, günstiger und grüner werden. Nach erfolgreicher Simulation kann ein Technologiedemonstrator gebaut werden.

Entwicklung eines Wasserstoff-Kleinflugzeugs

Mit einem Prototyp im General-Aviation-Segment werden H₂-Antriebskomponenten und eine sichere, zuverlässige Integration des H₂-Systems entwickelt und unter realen Flugbedingungen getestet. Für eine schnellere Entwicklung und frühzeitige Erprobung könnte auch gasförmiger Wasserstoff zum Antrieb solcher kleineren Flugzeuge verwendet werden. Parallel dazu sollte sich die Flugzeugzellen- und Systementwicklung auf radikalere Konstruktionen wie verteilten Antrieb konzentrieren, die Aerodynamik testen und Effizienzvorteile bewerten.

5.1.2.4 Regulatorischer Rahmen: Klimafolgenforschung und Marktaktivierungsmechanismen



Abbildung 5.5 Forschungs- und Innovations-Roadmap – Gesetzlicher Rahmen und weitere Rahmenbedingungen

Zur Bewältigung des Übergangs ist ein langfristiger Regulierungsrahmen erforderlich. F&I wird benötigt, um die Grundlage zu schaffen, auf der diese Übergangspolitik gestaltet werden kann. Dies erfordert ein besseres Verständnis der Klimaauswirkungen des Luftverkehrs, der Hebel zur Reduzierung dieser Klimaauswirkungen, eine Sektor-Roadmap, die die verschiedenen Übergangspfade und ihre Wirtschaftlichkeit darlegt, sowie die Erforschung von Marktaktivierungsmechanismen.

Klimawirkungsmessung

Die Klimaauswirkungen des Luftverkehrs sind immer noch nicht vollständig verstanden, was die Festlegung von Zielen, die Messung der Bemühungen und den Vergleich von Technologiepfaden zu einer Herausforderung macht. Zukünftige Technologieentscheidungen werden stark von einem besseren Verständnis darüber abhängen, wie Nicht-CO₂-Emissionen und ihre damit verbundenen Auswirkungen die globale Erwärmung beeinflussen. Dazu gehören die Lebensdauerwirkungen von CO₂, Nicht-CO₂-Emissionen und emissionsbezogenen Effekten. Die Unterschiede zwischen den Klimaauswirkungen neuer Antriebe und Kraftstoffe und der konventionellen Luftfahrt müssen klar sein, wenn Industrie und Hersteller fundierte Entscheidungen treffen sollen.

Neue Modelle, Simulationen und Flugtests werden auch benötigt, um die Auswirkungen neuer Kraftstoffe wie Synfuels oder Wasserstoffverbrennung auf das Klima zu bewerten. Die anfänglichen Studien zu Änderungen der NO_x-Emission von Synfuels und H₂-Turbinenverbrennung müssen validiert und mit den Auswirkungen konventioneller Turbinen verglichen werden. Darüber hinaus muss die Industrie un-

tersuchen, wie diese Technologien Wasserdampf, Ruß und damit verbundene Kondensstreifen erzeugen. Derzeit gibt es keine Brennstoffzellen-Verbrennungsmodelle oder -simulationen, um die Auswirkungen auf Kondensstreifen und Zirrusbildung zu bewerten. Mögliche Methoden zur Wiederverwendung oder Konditionierung von Wasserdampf zur Vermeidung von Kondensstreifenbildung müssen ebenfalls entwickelt und getestet werden. Abschließend sollten alle diese Effekte für unterschiedliche Flugzeuggrößen in unterschiedlichen Flughöhen evaluiert werden.

Weitere klimarelevante Themen sollten ebenfalls untersucht werden, darunter eine detaillierte Lebenszyklusanalyse der vorgelagerten Emissionen der verschiedenen Kraftstoffe und Technologien sowie eine Untersuchung möglicher Minderungshebel, wie z. B. die Änderung von Flugrouten und Flughöhen, um die Bildung von Kondensstreifen zu reduzieren.

Umsetzungs-Roadmap und Marktaktivierungsmechanismen

Der Luftfahrtsektor braucht einen Fahrplan mit klaren lang-, mittel- und kurzfristigen Zielen für die Dekarbonisierung, um Unsicherheiten zu verringern und die Bemühungen der einzelnen Akteure aufeinander abzustimmen. Eine langfristige Perspektive stärkt die Fähigkeit, Zukunftstechnologien zu planen, zu investieren und zu entwickeln. Diese Gewissheit zieht Investitionen in Innovation und deren Skalierung an und ermöglicht die Entwicklung der Infrastruktur.

Eine Roadmap ist kein monolithisches, einzelnes Forschungsstück: Sie enthält Technologiebewertungen und -vergleiche, einschließlich Sicherheits- und Zertifizierungsanforderungen, Szenarioplanung für Infrastruktur- und Einsatzszenarien sowie Recherchen zu geeigneten Unterstützungsmechanismen und Marktaktivierungsrichtlinien. Es muss entwickelt und regelmäßig aktualisiert und angepasst werden, um den Einsatz zu gewährleisten. Wenn die Technologie ausgereift ist, müssen die Bemühungen von der Ausarbeitung des langfristigen Plans auf eher mittelfristige Strategien verlagert werden. Es bildet die Grundlage für die Ausarbeitung von Richtlinien zur Umsetzung der Roadmap. Dies können die Finanzierung von F&I-Aktivitäten, gezielte Subventionen für klimafreundlichere Flugzeuge, die Unterstützung der Entwicklung und Bereitstellung von Infrastruktur durch öffentliche Finanzierungsmechanismen und vieles mehr sein. Letztendlich braucht die Branche einen fairen und langfristigen Regulierungsrahmen, ähnlich wie andere Branchen mit dem ETS und dem Verkehr mit Flottenzielen, in denen die Sekundärkosten des Klimawandels in den Kosten für den Einsatz eines Flugzeugs zum Befördern von Gütern oder Personen internalisiert werden. Eine solche Politik erfordert sorgfältige Analysen und Überlegungen, um mit einem effektiven und effizienten Übergang voranzukommen.

Aus der Literatur [5.1-5.4], Recherche und Befragungsauswertung der AH2AS ergeben sich insbesondere folgende wissenschaftliche Problemstellungen und Themenfelder:

- Anpassung / Neugestaltung von Normen und Rechtsvorschriften
- Anpassung / Neugestaltung der Förderungslandschaft
- Notwendige Initiativen in Aus- und Weiterbildung

Life Cycle Assessment und Total Cost of Ownership

Life Cycle Assessment (LCA) ist die Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen (z. B. CO₂-Fußabdruck, Wasser-, Materialressourcen- und Energieverbrauch, Schadstoffemissionen usw.) während des gesamten Lebenszyklus eines Verkehrssystems. Die Phasen des Lebenszyklus umfassen die Gewinnung und Veredelung von (kritischen) Rohstoffen, die Flugzeugherstellung, den Vertrieb, die Flugzeugnutzung, das Recycling und die endgültige Entsorgung (von der Wiege bis zur Bahre). Dazu gehört auch die Beschaffung der Energie des Verkehrssystems. LCA unterscheidet sich von sogenannten Well-to-Wheel (WtW)-Analysen, die die Fahrzeugherstellung sowie die Entsorgung am Lebensende ausschließen. LCA ermöglicht den Vergleich verschiedener Systeme, die im gleichen Zeitraum die gleiche Transportleistung anbieten.

Insbesondere im Falle des wasserstoffbasierten Flugverkehrs hängt die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstofftechnologien von Forschungs- und Innovationsdurchbrüchen, von Produktionsmengen von Fahrzeugen und Komponenten sowie vom Preis und der Verfügbarkeit von Wasserstoff als Kraftstoff ab. Daher sind Maßnahmen zur Stimulierung einer breiten Einführung von Wasserstoffbrennstoffzellenflugzeugen in ganz Europa genauso wichtig wie Forschungs- und Innovationsmaßnahmen für schwer zu elektrifizierende Sektoren, um die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) der Wasserstoffbrennstoffzellenflugzeuge zu senken. Österreichische Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Universitäten beschäftigen sich seit Jahrzehnten mit Brennstoffzellentechnologien und den dazugehörigen Test- und Validierungssystemen. Aufgrund der beginnenden Hochlaufphase der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologien erwarten die AH2AS-Studienautoren einen noch härteren internationalen Wettbewerb in Forschung und Industrie und daher werden weitere Instrumente zur Stärkung

der österreichischen Gemeinschaft benötigt

Aus der Literatur [5.1-5.4], Recherche und Befragungsauswertung der AH2AS ergeben sich insbesondere folgende wissenschaftliche Problemstellungen und Themenfelder:

- Kostenreduktion, Total Cost of Ownership (TCO)-Reduktion, Reduktion der Herstellungskosten bei Wasserstoff, Reduktion der Flugzeugkosten
- Optimierung Tank-/Nutzraumvolumina

Supply Chain und Circular Economy

Eine Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) ist „ein Produktions- und Konsummodell, bei dem vorhandene Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, wiederaufbereitet und recycelt werden.“ [5.6]. Die Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, globale Herausforderungen wie den Klimawandel zu bewältigen, Biodiversitätsverlust, Verschwendung und Umweltverschmutzung zu vermeiden. Die drei Prinzipien, die für die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft erforderlich sind, sind: Abfall und Umweltverschmutzung beseitigen, Produkte und Materialien zirkulieren und die Natur regenerieren. Kreislaufwirtschaft wird im Gegensatz zur traditionellen Linearwirtschaft definiert [5.7].

Aus diesem Grund ist weitere Forschung erforderlich, um zuverlässige Methoden zur Bewertung der ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen von wasserstoffbasierten Technologien und der damit verbundenen Wertschöpfungsketten zu entwickeln. Dabei müssen die gesamten Lebenszyklus-Umweltauswirkungen (einschließlich der Auswirkungen auf den „Wasserhaushalt“), Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Darüber hinaus muss die Versorgungssicherheit mit kritischen Rohstoffen parallel zu Materialreduktion, Substitution, Wiederverwendung und Recycling zu einem Kernstück der Wertschöpfungskette werden, um eine stärkere Kreislaufwirtschaft zu fördern.

5.2 Schlussbetrachtung und Ausblick

Da die größten Kompetenzbereiche der österreichischen Luftfahrtindustrie in der Komponentenentwicklung und dem Bau von Kleinflugzeugen zu finden sind, ist darauf in der künftigen Förderstrategie besonderes Augenmerk zu legen.

Gesamtheitlich ist jedoch die Umstellung des Flugbetriebes auf eine Wasserstoffwirtschaft eine noch größere Herausforderung. Österreichische Unternehmen liefern hier einen wertvollen Beitrag für die Technologieentwicklung bei.

Darüber hinaus ist aber die Bereitstellung von Wasserstoff in sehr großen Mengen über eine neu zu entwickelnde und zu implementierende Infrastruktur die größte Herausforderung auf der Gesamtsystemebene.

Aus diesen Überlegungen und unter Berücksichtigung der langwierigen Zeitspannen für Zertifizierungen, ist ein Zeithorizont zur vollständigen Dekarbonisierung der Luftfahrt bis 2050 als höchst zeitkritisch einzustufen und erfordert unmittelbaren Handlungsbedarf auf allen Ebenen, damit rasch die zur Umsetzung erforderlichen Rahmenbedingungen sowohl auf rechtlicher aber auch finanzieller und personeller Ebene bereitgestellt werden können.

In halbjährlichen Intervallen soll die vorgeschlagenen Entwicklungen in Form von Positionspapieren detailliert und deren Umsetzung darin evaluiert werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.1: Forschungs- und Innovations-Roadmap – 4 Hauptforschungsbereiche

Abbildung 5.2: Forschungs- und Innovations-Roadmap – Infrastruktur

Abbildung 5.3: Forschungs- und Innovations-Roadmap – Flugzeugkomponenten

Abbildung 5.4: Forschungs- und Innovations-Roadmap – Flugzeugsysteme

Abbildung 5.5: Forschungs- und Innovations-Roadmap – Gesetzlicher Rahmen und weitere Rahmenbedingungen

Quellenverzeichnis

- [5.1] Fuel Cell and Hydrogen 2 Undertaking und Clean Sky 2 Joint Undertaking, Hydrogen-powered aviation – sA fact-based study of hydrogen technology, economics and climate impact by 2050. Publications Office of the European Union, 2020.
- [5.2] I. Kernstock, „Forschung und Innovation im Luftfahrtsektor: Chancen nützen auf internationalen Märkten,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Wien, 2015.
- [5.3] Pentalaterales Energieforum, „Joint Political Declaration of the Pentalateral Energy Forum on the Role of Hydrogen to Decarbonise the Energy System in Europe,“ Pentalaterales Energieforum, Den Haag, 2020.
- [5.4] S. Bruce, M. Temminghoff, J. Hayward, D. Palfreyman, C. Munnings, N. Burke, und S. Creasey, Opportunities for hydrogen in commercial aviation. CSIRO, 2020.
- [5.5] M. Nöst, A. Wolbeisser, P. Prenninger, R. Ratz, T. A. B. Brandstätter, und et al, Austrian Roadmap for Sustainable Mobility – A long-term perspective. Wien: A3PS, 2022.
- [5.6] European Parliament. „Circular economy: definition, importance and benefits.“ European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201ST005603/circular-economy-definition-importance-and-benefits> (abgerufen am 14.06.2022).
- [5.7] Ellen Macarthur Foundation. „Circular economy introduction.“ Ellen Macarthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (abgerufen am 22.06.2022).

Abkürzungsverzeichnis

ADR	Agreement on International Carriage of Dangerous Goods by Road
AFC	Alkaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)
AG	Arbeitsgruppe
AH2AS	Austrian Hydrogen Aviation Study
APU	Auxiliary Power Unit
ATR	Avions de Transport Régional
BMDW	Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BWB	Blended Wing Body
CAPEX	Kapitalkosten
CCS	Carbon Capture and Storage
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle)
EASA	European Aviation Safety Agency
ETS	Europäischer Emissionshandel
EU	Europäische Union
F&I-RM	Forschungs- und Innovations-Roadmap
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
F&E	Forschung und Entwicklung
GA	General Aviation
GH2	Gaseous Hydrogen
GO	Guarantee of Origin
HC	Hydro Carbons (Kohlenwasserstoffe)
ICE	Internal Combustion Engine
LCA	Life Cycle Assessment
LH ₂	Liquidified H ₂
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)
MLI	Mehrschichtige Isolation
MTOW	maximum take off weight
NG	Natural Gas (Erdgas)
NPO	Non-Profit Organization
OPEX	Betriebskosten
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsäure Brennstoffzelle)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle); auch Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle)
PESTEL	Political, Economic, Social, Technological Environmental, Legal
PW	Pratt & Whitney
RED II	Renewable Energy Directive II
RFNBO	Renewable fuels from non-biological origins
SAF	Sustainable Aviation Fuels
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Festoxid-Brennstoffzelle)
TCO	Total Cost of Ownership
TFRM	Technologie- und Forschungs-Roadmap
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UBA	Umweltbundesamt
UTC	United Technologies Corp
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WET	Water-Enhanced Turbofan
WKO	Wirtschaftskammer Österreich
WtW	Well-to-Wheel
wt%	Gewichtsprozent

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
Tel.: +43 (0)1 71162- 65-0
email@bmk.gv.at
bmk.gv.at

A3PS ●●●▶

 **Diamond**
AIRCRAFT

FH | JOANNEUM
University of Applied Sciences

