

**POTENZIALANALYSE ZUR WASSER-
STOFFINFRASTRUKTUR AN DEUT-
SCHEN FLUGHÄFEN**

STUDIE



IMPRESSUM

Im Auftrag des

Bundesministeriums für Verkehr

Herausgeberin

NOW GmbH

Autorin

Fraunhofer IML

Nadine Richter-Mücklich, Karsten Uhing

Stand

22. April 2026

Copyright

Die Nutzungsrechte liegen, soweit nicht explizit genannt, beim Bundesministerium für Verkehr, der NOW GmbH und dem Fraunhofer IML.

INHALT

TABELLENVERZEICHNIS	IV
---------------------------	----

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
-----------------------------	---

1. Einleitung	1
1.1. Ausgangssituation & Motivation	1
1.2. Hintergrund und Relevanz der Forschungsfrage	1
1.3. Wasserstoff als Energieträger	2
1.4. Flughäfen und Energie	2
1.5. Wasserstoff im Übergang zu klimaneutralen Flughäfen/klimaneutraler Luftfahrt....	3
1.6. Zielsetzung und Forschungsfragen der Studie	5
2. Methodik und Datenbasis	6
2.1. Methodisches Vorgehen	6
2.2. Quellenlage: Literatur, Studien, Normen, Rechtsakte, Praxisbeispiele.....	6
2.3. Datenerhebung M3: Stichprobe, Leitfaden-Cluster, Auswertung	7
2.4. Auswahl und Segmentierung der betrachteten Flughäfen	7
2.5. Ökosystem-Linse.....	8
2.6. Qualitäts-, Validität- und Limitationen-Management	9
2.7. Beitrag der Studie zur operativen und infrastrukturellen Betrachtung	9
3. Technologie- & Infrastrukturrahmen	11
3.1. Systemübersicht H ₂ am Flughafen.....	11
3.2. GH ₂ vs. LH ₂ : Eigenschaften, Betrieb, Sicherheit	13
3.3. Tank-, Speicher- & Betankungstechnologien inkl. Boil-off-Management	15
3.4. GSE-Einsatzprofile, Leistungsanforderungen, operative Integration.....	17
3.5. Schnittstellen & Synergien im Ökosystem	20
3.6. Sicherheitsmanagement & Genehmigungslogik	22
3.7. Verzahnung von Masterplanung und H ₂ -Infrastruktur	24
3.8. Technologischer Reifegrad & Roadmap.....	25
4. Ökonomische Perspektiven.....	27
4.1. Akteursrollen.....	27
4.2. Nachfrage-Szenarien & Lastprofile	29
4.3. Kosten- und Wirtschaftlichkeitstreiber	34

4.4.	Regionale H ₂ -Hubs & Sharing-Modelle (Hub-&-Spoke, Multi-Use-Stationen).....	36
4.5.	Betreiber- und Businessmodelle für H ₂ -Infrastruktur an Flughäfen.....	38
4.6.	Förder-, Finanzierungs- und Vertragsmodelle.....	41
4.7.	Räumliche und planerische Restriktionen als Wirtschaftlichkeitsfaktor	43
5.	Regulatorik & Strategiebezug.....	45
5.1.	Relevante Rahmenwerke.....	48
5.2.	Ableitung pragmatischer Anforderungen für Flughäfen & Betreiber.....	60
5.3.	Einordnung der Erkenntnisse in die (NWS 2023) & „Klimaneutrale Luftfahrt“	61
5.4.	Wasserstoff im Kontext der systemischen Resilienz.....	66
6.	Anbindung an das H ₂ -Kernnetz	68
6.1.	Planungsstand deutsches H ₂ -Kernnetz (bis 2032) – Relevanz für Flughäfen	68
6.2.	Regionale Priorisierungskriterien (Trassennähe, Bündelpotenziale, Reifegrad)	70
6.3.	Anschluss- und Speicheroptionen (Skizzen; keine Standortplanung)	71
6.4.	Alternativen und Übergangslösungen (On-Site-Erzeugung, regionale Produktionsinseln)	79
6.5.	Anwendungsfälle	79
6.6.	Potenzielle Nachfrage nach Wasserstoff für Bodendienste	86
6.7.	Wissenschaftliche Zusammenfassung	89
6.8.	Zwei Rollen von Flughäfen im Wasserstoffhochlauf	90
7.	Stakeholder-Einbindung	92
7.1.	Stichprobe und Rollen	92
7.2.	Leitfaden-Cluster & Auswertungsmethodik.....	92
7.3.	Ergebnisse nach Themenclustern.....	94
7.4.	Typologie von Flughäfen und standortspezifische Implikationen	96
7.5.	Konsens, Dissens, offene Fragen.....	99
8.	Konsolidierung und Bewertung	102
8.1.	Triangulation M2 × M3: bestätigt, widerlegt, neu	102
8.2.	Widerlegt bzw. relativiert (M3 vs. M2)	102
8.3.	Umsetzungs-Matrix: Technik × Wirtschaft × Regulierung × Ökosystem-Reife.....	103
8.4.	Risiken, Abhängigkeiten und prioritäre Entwicklungspfade.....	104
9.	Handlungsoptionen	106
9.1.	Leitprinzipien & Designkriterien.....	106
9.2.	Optionen je Akteursgruppe	106
9.3.	Regionale Pilotpfade & Reallabore	109

9.4. KPI-Set & Monitoring.....	110
9.5. Roadmap: vom GSE-Einstieg zur regionalen H ₂ -Drehscheibe und Flugbetriebsintegration.....	111
10. Schlussfolgerungen & Ausblick	112
10.1. Was ist gesichert, was bleibt zu klären?	112
10.2. Empfehlungen für nachgelagerte Vertiefungen (Business-Cases, Machbarkeit, Standardisierung)	113
10.3. Hinweise zur Umsetzung & nächsten Schritten	114
Literaturverzeichnis.....	115
Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis.....	124
Anhänge	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Reduktion von THG im Luftverkehr durch H ₂ kurz-mittel und langfristig	50
Tabelle 2 Anzahl von Flughäfen im TEN-V Netzwerk Deutschland und Europa (Stand 2025)	56
Tabelle 3 Lokale Regularien des Flughafenbetriebs (Vorfeld)	59
Tabelle 4 Pragmatische Anforderungen für Flughäfen & Betreiber	60
Tabelle 5 Bekannte Produktionsvorhaben für grünen Wasserstoff in Deutschland bis 2030	69
Tabelle 6 Potenzielle Wasserstoffverbraucher im Flughafen Bodendienst.	86
Tabelle 7 Ausgewählte Flughäfen Analyse potenzielle Wasserstoffbedarfe für Bodendienste.	87
Tabelle 8 Potenzieller Wasserstoffbedarf für Bodendienste HAM	88
Tabelle 9 Potenzieller Wasserstoffbedarf für Bodendienste FRA	88
Tabelle 10 Potenzieller Wasserstoffbedarf für Bodendienste MUC	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Selektion relevanter Flughäfen	8
Abbildung 2 Kernbausteine der H ₂ -Systemarchitektur am Flughafen	12
Abbildung 3 Relevante Speicher und Betankungssysteme	16
Abbildung 4 Übersicht zentraler Akteursrollen	27
Abbildung 5 Nutzung von Wasserstoff bei Bodendiensten und Flugbetrieb	31
Abbildung 6 Regulatorische Einflussfaktoren für die Implementierung von H ₂ im Flughafenbetrieb (ohne wirtschaftliche Dimension).....	45
Abbildung 7 Dekarbonisierungsstrategien von Ten-V Flughäfen auf in Europa und Deutschland (Onlineveröffentlichungen).....	46
Abbildung 8 Kernpunkte für die Luftfahrt in der Fortschreibung NWS	61
Abbildung 9 Wasserstoff Kernnetz bis 2032 und deutsche TEN-V Verkehrsflughäfen (Kernnetz) - (<i>gem. Genehmigung vom 22.10.2024</i>)	68
Abbildung 10 Geographischer Abgleich TEN-V Verkehrsflughäfen und Produktionsstätten für Grünen Wasserstoff	69
Abbildung 11 Anbindung von TEN-V Flughäfen an das WKN	72
Abbildung 12 Schematische Darstellung der LKW-Anbindung von Flughäfen an das Wasserstoff Kernnetz.....	73
Abbildung 13 Geographische Zuordnung der Anwendungsfälle	80
Abbildung 14 Beschaffenheit Absperrpunkt Gräbendorf.....	81
Abbildung 15 Anbindung BER – Absperrpunkt Gräbendorf.....	81
Abbildung 16 Straßenanbindung LEJ – Absperrpunkt Göhren	82
Abbildung 17 Örtliche Beschaffenheit Absperrpunkt Göhren	82
Abbildung 18 Straßenanbindung LEJ – Absperrpunkt Reidburg.....	83
Abbildung 19 Örtliche Beschaffenheit Absperrpunkt Reidburg	83
Abbildung 20 Örtliche Beschaffenheit Absperrpunkt Jügesheim	84
Abbildung 21 Straßenanbindung FRA – Absperrpunkt Jügesheim	84
Abbildung 22 Örtliche Beschaffenheit Dezentrale Produktionsinsel Pfeffenhausen	85
Abbildung 23 Straßenanbindung MUC – dezentrale Produktionsinsel.....	85
Abbildung 24 Drop & Swap Lösung H ₂ Busbetrieb Südbayern	86
Abbildung 25 AZEA-Vision (2024) Entwicklung von Flugzeugen mit Nichtfossilem Vortrieb bis 2040	91
Abbildung 26 Hauptthemencluster Interviews (induktiv/deduktiv)	94
Abbildung 27 Zeitlich gestaffelte Entwicklungspfade des Wasserstoffhochlaufs an Flughäfen	105

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation & Motivation

Mit dem Hochlauf der Wasserstofftechnologie in Deutschland und Europa und den steigenden Anforderungen an eine klimaneutrale Luftfahrt bis 2045, gewinnt der Aufbau entsprechender Infrastrukturen an deutschen Verkehrsflughäfen zunehmend an Bedeutung. Während wasserstoffbetriebene Flugzeuge noch nicht kommerziell im Einsatz stehen, sind ihr Markteintritt bereits durch europäische und nationale Vorgaben (u. a. AFIR, RED III, Nationale Wasserstoffstrategie) vorgezeichnet und ihre technologische Vorbereitung bereits Teil der strategischen Planung namhafter Hersteller. Insbesondere Flughäfen des TEN-V-Netzwerks, stehen vor der Aufgabe, sich frühzeitig mit der Einführung von Wasserstofftechnologien auseinanderzusetzen und vorzubereiten, da diese als Hauptbezugspunkt für geltende und kommende EU-Verordnungen und deren nationalen Umsetzungen gelten. In Deutschland befinden sich zum Zeitpunkt der Studie 11 Flughäfen im TEN-V Kernnetz und 13 im erweiterten TEN-V Netz. In dieser Studie soll untersucht werden, in welchem Rahmen und ab welchem Zeitpunkt alternative Kraftstoffe an Flughäfen zum Einsatz kommen sollen und welche Maßnahmen zur Vorbereitung auf den Einsatz erforderlich sind. Dazu gehört z. B. die Fragestellung, ob zunächst eher kleinere regionale Flughäfen für die Erprobung und den Aufbau besser geeignet sind. Ziel der Studie ist es, den infrastrukturellen Bedarf, technologische Optionen sowie regulatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen für den Aufbau von Wasserstoffinfrastrukturen an deutschen Verkehrsflughäfen systematisch zu analysieren und konkrete Handlungsoptionen abzuleiten. Dabei sollen sowohl kurzfristige Potenziale (z. B. GSE-Einsatz (Ground Support Equipment) oder doppelte Nutzung, z. B. land-/luftseitig) als auch langfristige Perspektiven (Integration von Wasserstoff in den Flugbetrieb und Anschluss an das H₂-Kernnetz) berücksichtigt werden. Die Ergebnisse werden in einem konsolidierten Bericht mit Management Summary, Handlungsoptionen und Publikationsformat zusammengeführt und dienen als Entscheidungsgrundlage für NOW GmbH sowie für Flughafenbetreiber, Dienstleister, Industrie und Politik.

1.2. Hintergrund und Relevanz der Forschungsfrage

Welches Potenzial hätten deutsche Verkehrsflughäfen, Wasserstoff in ihren Energiemix zu integrieren, um die Emissionen im Flughafenbetrieb zu vermeiden und welche Anforderungen an eine infrastrukturelle Anpassung im Flughafenbetrieb entstehen hierdurch?

Funktionell betrachtet sind Verkehrsflughäfen Knotenpunkte eines größeren Transportnetzwerks, an denen der Übergang zwischen verschiedenen Transportmitteln organisiert wird, von denen typischerweise mindestens eines dem Luftverkehr zuzuordnen ist. Obwohl Flughäfen hochgradig komplexe Ökosysteme sein können, ist ihre Kernfunktion auf diese Aufgabe beschränkt.

Bei der tatsächlichen Umsetzung dieser Aufgabe unter Berücksichtigung aller geltenden Regularien und Sicherheitsvorschriften wird jedoch eine große Menge an Energie benötigt ([siehe Abschnitt 1.4](#)), die mit hohen Emissionswerten verbunden ist, da sie auch heute noch fast ausschließlich aus fossilen Brennstoffen generiert wird. Im Zuge des gesellschaftlichen Wandels, der den menschengemachten Einfluss auf den Klimawandel und die damit verbundenen Wohlstandseinbußen vermeiden soll, gilt es deshalb, Strategien zu entwickeln und umzusetzen, um die Funktionalität der

deutschen Verkehrsflughäfen zu erhalten und die Emissionen, die durch ihren Betrieb anfallen, auf ein absolutes Minimum zu reduzieren. Hierfür müssen vor allem fossile Kraftstoffe durch emissionsarme Energieträger ersetzt werden. Die naheliegendste Alternative ist die Elektrifizierung unter Nutzung regenerativer Energie, da der Ausbau regenerativer Energien in Deutschland stetig voranschreitet und sich batterieelektrische Alternativen bereits in anderen Bereichen des Verkehrssektors entwickeln konnten. Gleichzeitig sind nicht alle Privilegien der Nutzung fossiler Brennstoffe auf die Nutzung batterieelektrischer Alternativen übertragbar, was im Flughafenbetrieb zu Herausforderungen führen kann. Dies betrifft insbesondere Anwendungen mit hohen Leistungsanforderungen und langen Einsatzzeiten sowie begrenzten Ladefenstern, beispielsweise bei schweren Vorfeldfahrzeugen, Winterdienstfahrzeugen oder kontinuierlich betriebenen Spezialanwendungen. Hinzu kommen andere Hürden wie die Netzkapazität oder Sicherheitsregularien, die eine nahtlose Anpassung einschränken können. Die dadurch entstehenden Lücken müssten durch emissionsarme oder emissionsfreie Kraftstoffe abgedeckt werden. Neben HVO100 besteht die technische Option, gasförmigen oder flüssigen Wasserstoff als Energieträger im Flughafenbetrieb einzusetzen. Der Einsatz von Wasserstoff würde wesentliche Anforderungen für den Einsatz an Flughäfen erfüllen, ist jedoch aufgrund fehlender Infrastruktur, begrenzter Verfügbarkeit sowie unzureichender technologischer Reife im Verkehrssektor einschließlich der Luftfahrtbranche noch nicht etabliert und bedarf einer infrastrukturellen Anpassung, die mit verbundenen Kosten einhergeht. Seine Nutzung befindet sich in einer Entwicklungsphase, die erst ab einem bestimmten Reifegrad anwendbar wird. Dieser Reifegrad hängt im Wesentlichen von den Investitionskosten, etablierten Regularien und Standards sowie nicht zuletzt dem Marktpreis und der verfügbaren Menge ab. Erst dann ist es einem Flughafen möglich, Wasserstoff unter Berücksichtigung der Profitabilität und operativen Zuverlässigkeit einzusetzen. Die folgende Studie zielt darauf ab das Potenzial von Wasserstoff im Flughafenbetrieb vor allem aber die nötige Wasserstoff-Infrastruktur zu betrachten und Handlungsoptionen für Flughafenbetreiber deutscher Verkehrsflughäfen zu ermitteln.

1.3. Wasserstoff als Energieträger

Die vorliegende Studie basiert auf dem grundlegenden Verständnis von Wasserstoff als Energieträger. Bei Verwendung als Kraftstoff wird dieser Energieträger als klimaneutral bzw. immissionsfrei betrachtet, da neben elektrischer oder mechanischer Energie und Wärme lediglich Wasserdampf bzw. Wasser als Nebenprodukt entsteht. Eine Umweltbilanz müsste demnach nur noch für die Produktion des Wasserstoffs erstellt werden. Dabei sind folgende Fragen zu klären: Wie viel Energie wird für die Herstellung verwendet und aus welchen Quellen stammt sie? In dieser Studie wird von der Nutzung von grünem oder blauem Wasserstoff ausgegangen. Die lokalen und globalen Klimaeffekte durch das zusätzliche Einbringen von Wasserdampf in die Atmosphäre werden in der Studie erwähnt, bei der Erstellung von Handlungsoptionen jedoch nicht berücksichtigt.

1.4. Flughäfen und Energie

Die Entwicklung der deutschen Verkehrsflughäfen seit dem Aufbau der zivilen Luftfahrtinfrastruktur zu Beginn des 20. Jahrhunderts ist von einem kontinuierlichen Wachstum geprägt. Dabei sind sowohl die Anzahl der Flughäfen als auch deren Größe und internationale Bedeutung stetig gewachsen. Parallel zu diesem Wachstum stieg auch der Energiebedarf, um die Flughäfen zu betreiben. So

erreicht beispielsweise der größte deutsche Verkehrsflughafen, der Frankfurt Airport (FRA), einen jährlichen Stromverbrauch von 539 GWh, dem durchschnittlichen Jahresbedarf einer Stadt mit 150.000 Einwohnern. Ein Flughafen mittlerer Größe wie Düsseldorf Airport (DUS) kommt immer noch auf einen jährlichen Energieverbrauch von ca. 88 GWh was einer Stadt mit 22.000 Einwohnern entspricht. Hinzu kommt der Verbrauch fossiler Kraftstoffe wie Erdgas, Diesel oder Kerosin, die vor Ort in Energie umgewandelt werden, um den Flughafen funktionsfähig zu halten. Die Haupteinflussfaktoren des Energieverbrauchs sind die Bewegung von Fahrzeugen und mobilitätsunterstützenden Anlagen, sowie Wärme- und Klimatechnik, Beleuchtung und relevante Sicherheitsaspekte des Flughafenbetriebs. Diese sind notwendig für den sicheren Kernbetrieb des Flughafens unerlässlich, und steigen grundsätzlich mit dem örtlichen Passagieraufkommen und zusätzlichen Sicherheitsanforderungen. Neben dem Kernbetrieb benötigen Flughäfen zudem sekundäre Energiebedarfe, die den Bereichen Kundenbedürfnisse und -erlebnisse wie beispielsweise Shopping Malls und Gastronomie zugeordnet. Flughäfen in Deutschland haben sich zu Mobilitäts- und Business-Hubs weiterentwickelt, wodurch sich der lokale Energiebedarf durch Verkehrsanbindungen und Gewerbeansiedlungen in der unmittelbaren Umgebung der Flughäfen weiter erhöht hat. Festzuhalten bleibt jedoch, dass die Kernfunktion von Flughäfen ohne eine zuverlässige Energieversorgung nicht zu gewährleisten wäre.

Neben dem Bestreben, den Energiebedarf durch fortschrittliche Technologien zu reduzieren, sind Flughäfen im Zuge der nationalen Nachhaltigkeits- und Klimaschutzziele vor allem mit der Aufgabe konfrontiert, den Flughafenbetrieb auf regenerative Energie umzustellen. Zu diesem Zweck haben alle deutschen Verkehrsflughäfen Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt in den unter anderem Maßnahmen artikuliert werden, durch die der gesamte Flughafenbetrieb schnellstmöglich jedoch bis spätestens 2050 CO₂ bzw. klimaneutral werden soll. (Siehe Anhang 1) unten zeigt Beispiele relevanter Energiebedarfe an Flughäfen entlang der oben genannten Betriebsanforderungen.

1.5. Wasserstoff im Übergang zu klimaneutralen Flughäfen/klimaneutraler Luftfahrt

Die Rolle von Wasserstoff (H₂) im Übergang zu klimaneutralen Flughäfen und einer klimaneutralen Luftfahrt wird in der aktuellen Forschung und Politik intensiv diskutiert, ist aber keineswegs abschließend geklärt. Wasserstoff gilt in vielen Szenarien als eine mögliche Option zur Dekarbonisierung insbesondere des Kurz- und Mittelstreckenverkehrs und ausgewählter bodenseitiger Anwendungen, steht jedoch in Konkurrenz zu anderen Pfaden wie der großskaligen Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF), Effizienzsteigerungen und der Elektrifizierung kurzreichweitiger Anwendungen. Aktuelle Analysen betonen, dass der Beitrag von Wasserstoff stark von technologischer Reife, Infrastrukturaufbau, Kostenentwicklung und sektorübergreifender Nachfrage abhängen wird (Oesingmann et al., 2024; Alsulaiman, 2024)

Für Flughäfen wird Wasserstoff vor allem im Kontext hybrider Energiesysteme diskutiert. Als chemischer Energieträger kann H₂ prinzipiell verschiedene Sektoren koppeln, wie Strom, Wärme, Mobilität und Industrie, und damit die Entwicklung hin zu multifunktionalen Energie- und Verkehrsknotenpunkten unterstützen. Studien zu Wasserstoff in der Luftfahrt und im Verkehrssystem weisen darauf hin, dass Flughäfen perspektivisch als Knoten in regionalen H₂-Wertschöpfungsketten fungieren könnten, etwa durch die Nutzung von lokal erzeugtem oder importiertem Wasserstoff für

Bodenflotten, Gebäudewärme oder Notstromversorgung (Kühlen et al., 2025; Eschmann et al., 2024). Gleichzeitig zeigen diese Arbeiten aber auch, dass Wasserstoff aufgrund begrenzter Verfügbarkeit und hoher Kosten zunächst voraussichtlich dort eingesetzt wird, wo Alternativen technisch oder wirtschaftlich besonders schwierig sind.

Im Bereich der Flugzeugantriebe wird Wasserstoff in Form von flüssigem Wasserstoff (LH₂) als langfristige Option betrachtet. Mehrere Studien und Roadmaps sehen H₂-betriebene Luftfahrzeuge als potenziellen Baustein eines tiefgreifenden Dekarbonisierungspfades, insbesondere für Kurz- und Mittelstrecken (IATA, 2025b; Arup, 2023). Gleichzeitig haben sich die Erwartungen an den zeitlichen Horizont deutlich verschoben. Airbus hatte ursprünglich das Ziel formuliert, ein erstes ZEROe-Flugzeug bis 2035 in Dienst zu stellen; inzwischen geht das Unternehmen, auch vor dem Hintergrund langsamer Infrastruktur- und Wasserstoffmarktentwicklung, von einer Verzögerung um fünf bis zehn Jahre aus, mit einem möglichen kommerziellen Einsatz eher in den 2040er-Jahren (Reuters, 2025; Financial Times, 2025). Damit bleibt ungewiss, in welchem Umfang und in welchem Zeitfenster LH₂-Flugzeuge tatsächlich eine signifikante Rolle im Gesamtsystem der Luftfahrt einnehmen werden.

Aus Flughafensicht bedeutet dies, dass Investitionen in wasserstoffbezogene Infrastruktur derzeit primär auf bodenseitige Anwendungen sowie auf eine mögliche, aber unsichere langfristige Luftfahrtperspektive zielen. IATA und andere Akteure betonen in ihren Net-Zero-Roadmaps, dass Wasserstoff Flugzeuge und Flughäfen in Zukunft substanziell beeinflussen *könnte*, durch neue Betankungs-, Speicher- und Sicherheitsinfrastrukturen, zugleich aber darauf, dass kurzfristig SAF und Effizienzmaßnahmen im Vordergrund stehen werden (IATA, 2023; IATA, 2025b). In der Praxis ist daher eher von einem gestuften Übergang auszugehen, bei dem Wasserstoff zunächst punktuell in GSE-Flotten, schweren Einsatzfahrzeugen oder stationären Anwendungen erprobt wird und erst deutlich später, falls entsprechende Flugzeugkonzepte tatsächlich in den Markt kommen, eine luftfahrtspezifische Infrastruktur für LH₂ aufgebaut wird.

Die DLR-Policy-Briefs zu Wasserstoff und SAF weisen zudem darauf hin, dass Wasserstoff bis 2050 nicht nur als direkter Flugkraftstoff, sondern in erheblichem Umfang auch als Ausgangsstoff für die Herstellung synthetischer flüssiger Kraftstoffe benötigt würde. In mehreren Szenarien wird der größte Teil der Wasserstoffnachfrage der Luftfahrt eher in die Produktion von SAF als in den Einsatz reinen LH₂ in Flugzeugen fließen (Oesingmann et al., 2024; Grimme & Oesingmann, 2025). Vor diesem Hintergrund erscheint es plausibel, Wasserstoff im Kontext klimaneutraler Flughäfen nicht als singulären Schlüssel, sondern als einen von mehreren Bausteinen zu betrachten, dessen konkrete Rolle und Bedeutung in den kommenden Jahrzehnten noch deutlich konturiert werden müssen.

Aus systemischer Perspektive lässt sich Wasserstoff derzeit als Option in einem breiteren Portfolio möglicher Dekarbonisierungspfade verstehen. Während bestehende Ansätze wie SAF und Elektrifizierung kurzfristig dominieren, könnte Wasserstoff insbesondere im bodenseitigen Betrieb und in späteren luftfahrtspezifischen Anwendungen zusätzliche Potenziale eröffnen. Der zukünftige Stellenwert hängt dabei weniger von einer Einzeltechnologie ab als von der Fähigkeit der Flughäfen, mehrere Transformationspfade parallel zu berücksichtigen.

1.6. Zielsetzung und Forschungsfragen der Studie

Ziel der Studie ist es, den Beitrag von Wasserstoff zur Dekarbonisierung der Bodenprozesse an Flughäfen zu bewerten und die Voraussetzungen für einen skalierbaren, sicheren und wirtschaftlich tragfähigen Markthochlauf zu identifizieren.

Die Untersuchung soll folgende Leitfragen beantworten:

- Welche Infrastruktur- und Systemanforderungen ergeben sich für den Einsatz von H₂-Technologien an Flughäfen (on- und near-site)?
- Unter welchen technischen, regulatorischen und wirtschaftlichen Bedingungen kann ein Markthochlauf gelingen?
- Wie können Flughäfen, als Teil des TEN-V-Kernnetzes, eine regionale und sektorübergreifende Rolle im entstehenden H₂-Ökosystem einnehmen?

2. Methodik und Datenbasis

2.1. Methodisches Vorgehen

Die Studie folgt einem mehrstufigen Vorgehensmodell, dessen Meilensteine zwar strukturell voneinander abgegrenzt sind, in der praktischen Bearbeitung jedoch teilweise fließend ineinandergreifen:

M2 – Desk Research: systematische Literatur- und Dokumentenanalyse zur Erfassung des aktuellen Wissensstands zu H₂-Infrastrukturen an Flughäfen, regulatorischen Rahmenbedingungen, technologischen Entwicklungen und Geschäftsmodellen. Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes erfolgte außerdem eine umfassende Auswertung der Nachhaltigkeits- und Klimaziele der europäischen Flughäfen im TEN-V-Kernnetz. Diese Analyse wurde anschließend für deutsche Verkehrsflughäfen im Kernnetz sowie im erweiterten TEN-V-Netz differenziert, um nationale Spezifika sichtbar zu machen. Ein besonderer Fokus lag auf der Identifikation von Standorten mit einem ausgeprägten strategischen Interesse an Wasserstoff, sowohl im EU-weiten Vergleich als auch spezifisch für Deutschland.

M3 – Stakeholder-Interviews: qualitative Erhebung von Expertinnen- und Experteneinschätzungen entlang relevanter Wertschöpfungsketten. Die Interviewleitfäden wurden auf Basis der Ergebnisse des Desk Research sowie des bestehenden Fachwissens des Projektteams entwickelt. Gleichzeitig dienten die Interviews der Validierung und Einordnung der zuvor identifizierten strategischen Ziele und H₂-Ambitionen.

M4 – Konsolidierung: Integration und Validierung der Erkenntnisse aus M2 und M3 sowie Ableitung zentraler Handlungsfelder, technischer und institutioneller Voraussetzungen und strategischer Empfehlungen.

Damit wird ein methodischer Dreiklang aus Sekundäranalyse, Primärerhebung und Synthese umgesetzt, der eine triangulierte Sicht auf das Untersuchungsfeld ermöglicht und sowohl strategische Zielsetzungen als auch operative Realitäten berücksichtigt.

2.2. Quellenlage: Literatur, Studien, Normen, Rechtsakte, Praxisbeispiele

Die Analyse stützt sich auf ein breites Spektrum qualitativer und quantitativer Quellen:

- **Literatur und Studien** (z. B. DLR, Hydrogen Europe, ATI UK, IEA, nationale und europäische Strategiepapiere)
- **Normen und Rechtsakte** (u. a. AFIR, RED III, RFNBO-Kriterien, ICAO/EASA-Regularien)
- **Praxisbeispiele** aus laufenden und abgeschlossenen Projekten zu H₂-Infrastruktur, GSE-Integration und Logistikverknüpfungen an europäischen Flughäfen

Diese Quellen bilden den Rahmen für die inhaltliche Strukturierung des Interviewleitfadens und die spätere Einordnung der empirischen Ergebnisse.

2.3. Datenerhebung M3: Stichprobe, Leitfaden-Cluster, Auswertung

Im Meilenstein M3 wurden **qualitative Experteninterviews** mit Akteuren aus unterschiedlichen Bereichen des H₂-Ökosystems geführt (z. B. Flughäfen, Energieversorger, Technologieanbieter, Fahrzeughersteller, Forschungseinrichtungen und öffentliche Stellen).

Die **Interviewleitfäden** wurden aus den Erkenntnissen des Desk Research und dem Vorwissen des Projektteams entwickelt. Sie sind in thematische Cluster gegliedert (z. B. technologische Reife, Infrastrukturintegration, regulatorische Rahmenbedingungen, Wirtschaftlichkeit, Akteursrollen) und ermöglichen eine systematische, aber zugleich offene Gesprächsführung (siehe Anhang 2).

Die **Datenauswertung** erfolgte qualitativ nach dem Verfahren der *Template Analysis*. Dabei wurde ein anfängliches Analyseraster („Template“) auf Basis der Leitfadenthemen definiert (deduktiver Ansatz). Im Verlauf der Auswertung wurden neue, inhaltlich relevante Kategorien (*emerging themes*) ergänzt (induktiver Ansatz). Alle Sub-Themen wurden direkt aus der Interviewanalyse abgeleitet und in einer konsistenten Struktur zusammengeführt.

Die qualitative Auswertung der Experteninterviews verfolgt das Ziel, die in der Desk-Research-Phase (M2) identifizierten Annahmen und Themenfelder zur Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen durch Praxisperspektiven zu validieren, zu erweitern oder zu differenzieren. Dabei wird untersucht, wie Akteure aus verschiedenen Funktionsbereichen (Flughafen, Bodenabfertigung, Energieversorgung, Behörden, Verbände) die technologische, wirtschaftliche und organisatorische Realisierbarkeit einschätzen.

2.4. Auswahl und Segmentierung der betrachteten Flughäfen

Für die Analyse der potenziellen Rolle von Wasserstoff im Flughafenbetrieb konzentriert sich die Studie auf die 36 deutschen Verkehrsflughäfen mit Zulassung nach § 38 LuftVZO i. V. m. § 12 LuftVG. Diese Flughäfen bündeln den überwiegenden Teil der luftverkehrsbedingten Emissionen in Deutschland und verfügen gleichzeitig über die infrastrukturellen Voraussetzungen für die Integration neuer Energieträger.

Flugplätze in Deutschland lassen sich gemäß Art. 6 LuftVG in *Flughäfen*, *Landeplätze* und *Segelflugplätze* unterteilen. Obwohl an jedem der knapp 550 Flugplätze Bemühungen für einen klimakompatiblen Betrieb von Bedeutung sind, fokussiert die Studie, im Sinne des Klimaschutzgesetzes (§ 3 KSG) vor allem die 36 deutschen Flughäfen mit Zulassung nach § 38 LuftVZO i. V. m. § 12 LuftVG, da sich hier die zu vermeidenden Treibhausgase konzentrieren. Diese Flughäfen können je nach Profil entweder Wasserstoff als emissionsarmen Ersatz für fossile Kraftstoffe einsetzen und/oder als Testfeld für zu erprobende Wasserstoffanwendungen fungieren.

Eine weitere Eingrenzung der Flughäfen nach Art. 6 LuftVG hinsichtlich ihrer Beschaffenheit kann über die Klassifizierung der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) vorgenommen werden, durch die „Flughäfen“ in *internationale Verkehrsflughäfen*, *regionale Verkehrsflughäfen* und *Sonderflughäfen* unterteilt werden. Diese Unterteilung ist relevant, da zwischen regionalen und internationalen Verkehrsflughäfen Unterschiede hinsichtlich der Flugrouten und somit auch in der Beschaffenheit der Flotte und der Flughafeninfrastruktur bestehen.

Die deutschen *Verkehrsflughäfen* werden für die Studie außerdem innerhalb der Kategorien des Transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V) eingeordnet. Diese unterteilen sich in:

- Flughäfen, des TEN-V Kernnetzes (11 deutsche Verkehrsflughäfen)
- Flughäfen des TEN-V Gesamtnetzes (13 deutsche Verkehrsflughäfen)
- Flughäfen § 38 nach (LuftVZO) außerhalb des TEN-V (12 deutsche Verkehrsflughäfen)

Die Studie soll sich auf die Verkehrsflughäfen des TEN-V Kernnetzes und des Gesamtnetzes beschränken, da diese aufgrund ihrer Lage und der Anzahl der Flugbewegungen am ausschlaggebendsten für die zu vermeidende Klimawirkung und der hiermit verbundenen Regulatorik sind. Eine Auflistung der entsprechenden Flughäfen findet sich in [siehe Anhang 3](#).

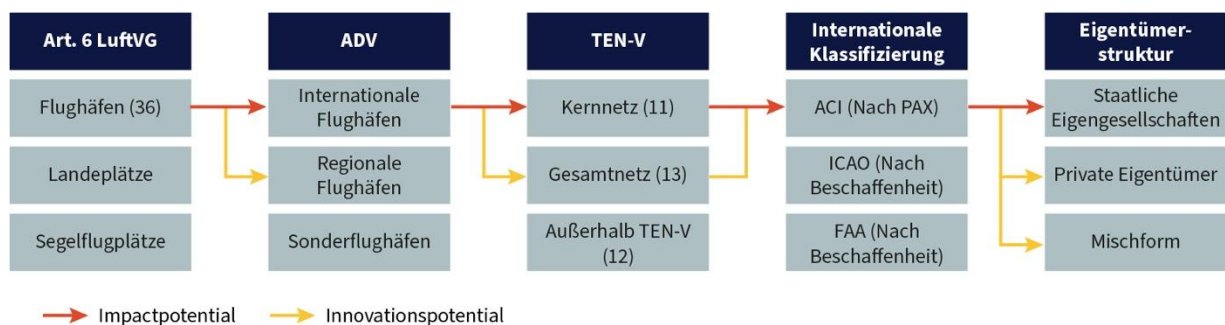


Abbildung 1 Selektion relevanter Flughäfen

2.5. Ökosystem-Linse

Parallel zu den inhaltlichen Arbeitspaketen wurde eine querschnittliche Ökosystem-Perspektive angewendet, um die vielschichtigen Wechselwirkungen zwischen technischen, organisatorischen und institutionellen Subsystemen im Kontext von Wasserstoffinfrastrukturen an Flughäfen abzubilden. Diese Perspektive ermöglicht es, systemische Zusammenhänge zu erfassen, die in isolierten Betrachtungen einzelner Themenfelder oftmals unberücksichtigt bleiben.

Im Zentrum dieser Analyse steht die Betrachtung der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette: von der Erzeugung über Transport und Speicherung bis hin zur Nutzung im Flughafenbetrieb, wodurch strukturelle Abhängigkeiten, potenzielle Engpässe und realistische Skalierungspfade identifiziert werden.

Darüber hinaus rückt die Analyse die Infrastrukturkopplungen in den Blick: Die Schnittstellen zwischen Wasserstoff-, Strom- und Gasinfrastrukturen sowie angrenzenden Logistik- und Mobilitätssystemen, einschließlich des öffentlichen Personennahverkehrs, prägen maßgeblich die technischen und räumlichen Gestaltungsmöglichkeiten an einem Flughafenstandort. Diese Kopplungen eröffnen Synergien, können aber auch neue Abhängigkeiten schaffen, die in der strategischen Planung berücksichtigt werden müssen.

Insgesamt dient die Ökosystem-Linse als analytischer Rahmen, der Abhängigkeiten, Skalierungshemmnisse und systemische Synergien frühzeitig sichtbar macht. Die abschließende Ausformulierung dieser Querschnittsanalyse erfolgt im Rahmen der Konsolidierungsphase (M4), sobald alle empirischen Bausteine vollständig zusammengeführt und bewertet wurden.

2.6. Qualitäts-, Validität- und Limitationen-Management

Zur Sicherstellung der Qualität und Nachvollziehbarkeit wurden mehrere miteinander verzahnte Maßnahmen umgesetzt. Alle Quellen, Interviewleitfäden und Analysekriterien wurden transparent dokumentiert, sodass sowohl der Forschungsprozess als auch die Herleitung der Ergebnisse klar nachvollziehbar bleiben. Die Kombination aus Desk Research und Experteninterviews ermöglichte eine methodische Triangulation, durch die unterschiedliche Perspektiven miteinander abgeglichen und Erkenntnisse validiert werden konnten. Ergänzend fanden interne Konsistenzprüfungen im Projektteam nach dem Vier-Augen-Prinzip statt, um Interpretationen kritisch zu reflektieren und methodische Stringenz sicherzustellen.

Gleichzeitig bestehen bestimmte Limitationen. Besonders hervorzuheben sind die begrenzte Stichprobengröße sowie die dynamische und teils fragmentierte Datenlage im Bereich der Wasserstofftechnologien und regulatorischen Entwicklungen. Die qualitative Methodik ist jedoch bewusst auf ein vertieftes Verständnis komplexer Zusammenhänge und deren Kontextualisierung ausgerichtet. Ziel ist daher nicht statistische Repräsentativität, sondern die systematische Erfassung, Strukturierung und Interpretation von Expertenwissen, das für die Analyse der H₂-Infrastruktur an Verkehrsflughäfen besonders wertvoll ist.

2.7. Beitrag der Studie zur operativen und infrastrukturellen Betrachtung

Die Studie ergänzt das bestehende Spektrum an Forschungsarbeiten und strategischen Veröffentlichungen zur Wasserstoffnutzung im Luftverkehr um eine Perspektive, die bisher weniger ausführlich beleuchtet wurde. Während Whitepaper, nationale Strategien und OEM-Analysen (Original Equipment Manufacturer) vor allem technologische Entwicklungen, langfristige Transformationspfade und regulatorische Rahmenbedingungen fokussieren, richtet diese Untersuchung den Blick gezielt auf die operative und infrastrukturelle Umsetzung im Bereich der Bodenabfertigung. Sie versteht Flughäfen als komplexe sozio-technische Systeme, in denen energieinfrastrukturelle, betriebliche und sicherheitsbezogene Aspekte eng miteinander verbunden sind, und ordnet die Wasserstoffintegration daher in einen stärker prozessualen und anwendungsorientierten Kontext ein.

In vielen bestehenden Veröffentlichungen stehen flugzeugseitige Nutzungsszenarien oder übergeordnete Systemtransformationen im Vordergrund. Die Studie knüpft daran an, erweitert diese Perspektive jedoch durch eine detaillierte Analyse der spezifischen Anforderungen und Einsatzprofile von GSE-Flotten sowie deren potenzieller Rolle im frühen Markthochlauf und zur Vorbereitung auf den möglichen Einsatz im Flugzeug. Dadurch wird ein Bereich vertieft, der im Gesamtfeld der H₂-Forschung zwar berücksichtigt, aber bislang weniger operativ ausdifferenziert dargestellt wurde.

Darüber hinaus trägt die Studie zu einem besseren Verständnis der Einbindung von Flughäfen in regionale Wasserstoffökosysteme bei. Während verschiedene Strategiepapiere und Forschungsvorhaben regionale H₂-Cluster grundsätzlich abbilden, erweitert diese Arbeit den Blick auf Flughäfen als mögliche Knotenpunkte, die über den eigenen Luftverkehrsbetrieb hinaus mit Logistik, ÖPNV, Gewerbe- und Industrieblächen vernetzt sein können. Dieser Ansatz leistet einen Beitrag dazu, die potenzielle Rolle von Flughäfen innerhalb regionaler Wertschöpfungsmodelle differenzierter zu beschreiben.

Schließlich bietet die Studie eine integrierte Betrachtung technischer, wirtschaftlicher, operativer und regulatorischer Dimensionen, die in anderen Arbeiten häufig getrennt voneinander behandelt werden, weil sie unterschiedliche Analyseziele verfolgen. Durch die Zusammenführung dieser Perspektiven zeigt die Untersuchung Wechselwirkungen zwischen Sicherheitsanforderungen, Infrastrukturdesign, Prozessketten, Kostenstrukturen und Genehmigungslogiken auf. Damit liefert sie eine ergänzende, anwendungsorientierte Grundlage, die sowohl den in der Literatur beschriebenen technologischen Entwicklungspfaden als auch praktischen Umsetzungsüberlegungen in deutschen Flughafenbetrieben Rechnung trägt.

3. Technologie- & Infrastrukturrahmen

3.1. Systemübersicht H₂ am Flughafen

Die Integration von Wasserstoff an Flughäfen wird derzeit intensiv diskutiert, ist jedoch mit hoher Unsicherheit hinsichtlich des Zeitpunktes, Umfang und Ausgestaltung verbunden. Für politische Akteure, Fördergeber und Flughafenbetreiber stellt sich dabei weniger die Frage ob, sondern wie, wo und wann Wasserstoff sinnvoll in bestehende Flughafenstrukturen integriert werden kann. Vor diesem Hintergrund ist eine systemische, zugleich aber selektive Betrachtung der H₂-Versorgungskette erforderlich. Internationale Analysen, darunter der ACI-ATI Hydrogen Airport Report (2021), die ACI Europe AZEA Factsheets (ACI, 2025), sowie die IATA Concept of Operations for Battery- and Hydrogen-Powered Aircraft at Aerodromes (IATA, 2025a), heben hervor, dass Flughäfen dabei als komplexe sozio-technische Infrastrukturen verstanden werden müssen, deren Landseite und Luftseite jeweils spezifische technische, operative und sicherheitsrelevante Anforderungen aufweisen.

Die grundlegende Unterscheidung zwischen Landseite und Luftseite ist für die Systemplanung zentral. Die Landseite umfasst typischerweise die Anlieferung von GH₂ und LH₂, zentrale Speichersysteme in einem Wasserstoff-Szenario, Aufbereitungstechnik sowie Schnittstellen zu regionalen Energie- und Logistiksystemen. Die Luftseite hingegen bezieht sich auf den operativen Vorfeldbereich, die Bereitstellung von Wasserstoff für GSE und Spezialfahrzeuge sowie langfristig mögliche Betankungsprozesse für wasserstoffbetriebene Flugzeuge. Studien weisen darauf hin, dass diese Bereiche aufgrund verschiedener Zugangszonen, Sicherheitslogiken, Evakuierungsradien und Betriebsanforderungen nur eingeschränkt homogen geplant werden können (IATA, 2025a; ACI, 2025).

Die Interviews machen deutlich, dass die Systemplanung in der Praxis selten einer flughafenweiten Endausbaulogik folgt. Stattdessen wird Wasserstoff überwiegend als ergänzende Option betrachtet und zunächst dort geprüft, wo batterieelektrische Lösungen an praktische Grenzen stoßen (z. B. belastungsintensives Equipment, Winterdienst Fahrzeuge, ausgewählte Spezialanwendungen). Infrastrukturentscheidungen werden entsprechend meist Anwendungsfall-basiert und schrittweise getroffen. Gleichzeitig wird in den Interviews klar zwischen zwei Entwicklungspfaden unterschieden: GH₂ wird als kurzfristig relevanter Einstiegspfad für bodenseitige Anwendungen bewertet, während LH₂ primär als langfristiges Thema im Kontext zukünftiger wasserstoffbetriebener Flugzeuge gesehen wird. Ein Zusammenhang zwischen den beiden Formen wird durch die steigende Menge von GH₂ bei einer lokalen Anwendung von LH₂ durch entsprechende Boil-off Prozesse gesehen. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass selbst Flughafenbetreiber, die GH₂ derzeit keine eigenständige strategische Bedeutung beimessen, perspektivisch mit entsprechenden Kopplungseffekten rechnen müssen.

Im heutigen und mittelfristigen Betrieb wird die Wasserstoffversorgung an Flughäfen überwiegend über externe Zulieferung erfolgen. Der ACI-ATI-Bericht (2021) zeigt, dass GH₂-Tubetrailer und LH₂-Tankzüge die dominierenden Transportformen bleiben, bis Pipelineanschlüsse wirtschaftlich oder technisch realisiert werden können. Ergänzend kommen in einigen Szenarien dezentrale On-site-Elektrolyseanlagen hinzu ([siehe Kapitel 6.4](#)), insbesondere an Standorten mit geeigneten Energiepartnerschaften oder hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien. Bereits kleinere Anlagen im unteren Leistungsbereich können durch lokale erneuerbare Energiequellen wie Photovoltaik oder

Windenergie versorgt werden, wobei eine Kombination beider Technologien zur Erhöhung der Verfügbarkeit als besonders vorteilhaft gilt.

Die Literatur unterscheidet zwei etablierte Speicherformen, die auch in städtischen oder industriellen Kontexten genutzt werden: GH₂ in Druckspeichern (350/700 bar) mit Kompressionseinheiten sowie LH₂ in kryogenen Tanks mit Vakuumisolierung und Boil-off-Management (BMWK, 2025). Kompressionseinheiten übernehmen dabei die Verdichtung des gasförmigen Wasserstoffs auf das erforderliche Druckniveau für Speicherung und Betankung, und sind ein zentraler Bestandteil der GH₂-Infrastruktur. Beide gelten als kurzfristig realisierbare Bausteine dezentraler Energiespeicherinfrastruktur. (siehe Kapitel 3.2)

Auf der Ebene der Luftseite betont die IATA-ConOps-Systematik (IATA, 2025a) die Notwendigkeit, wasserstoffbezogene Bodenprozesse in bestehende Vorfeldabläufe zu integrieren. Dies betrifft sowohl GH₂-Dispenser für GSE-Flotten, Feuerwehr- oder Winterdienstfahrzeuge als auch perspektivisch mobile LH₂-Betankungsfahrzeuge im Rahmen von Testprogrammen. Hydranten-basierte Lösungen für LH₂ werden aktuell nur auf konzeptioneller Ebene diskutiert und gelten als langfristige Option, deren technische und regulatorische Machbarkeit noch nicht abschließend geklärt ist (ACI-ATI, 2021; IATA, 2025a).

Die daraus abgeleitete funktionale Prozesskette umfasst folgende Kernbausteine, die im weiteren Infrastrukturdesign detaillierter betrachtet werden:

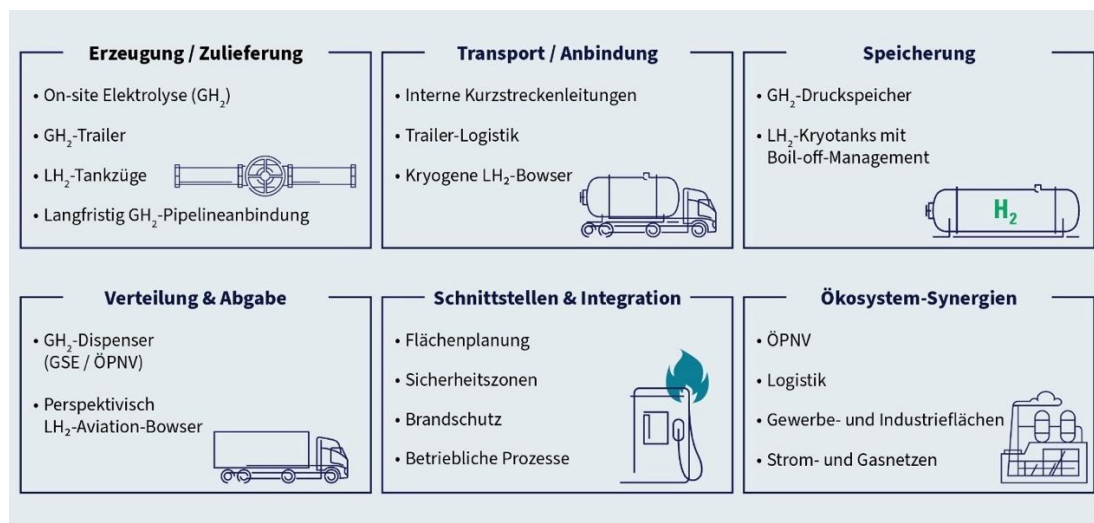


Abbildung 2 Kernbausteine der H₂-Systemarchitektur am Flughafen

Für die meisten Flughäfen stellen diese Bausteine keinen gleichzeitig umzusetzenden Zielzustand dar, sondern einen zeitlich gestuften Entwicklungsbaukasten. Einzelne Elemente, insbesondere mobile GH₂-Lösungen, fungieren dabei als Einstieg, während andere (z. B. großskalige LH₂-Infrastruktur) primär vorbereitenden Charakter haben.

Eine wachsende Zahl wissenschaftlicher Arbeiten hebt hervor, dass Flughäfen nur dann realistische wirtschaftliche Perspektiven für Wasserstoff entwickeln, wenn sie in regionale Multi-Use-Ökosysteme eingebettet sind. Die Untersuchung von Gu et al. (2023) zeigt etwa, dass Wasserstoffinfrastrukturen im Mobilitätssektor nur dann hohe Auslastungsgrade erreichen, wenn sie sektorübergreifend

genutzt werden, ein Befund, der sich auf Flughäfen übertragen lässt, insbesondere in Verbindung mit Logistikunternehmen, ÖPNV-Betreibern und Gewerbetreibenden.

Externe Trigger aus den Interviews zeigen, dass die Umsetzungsdynamik maßgeblich von Faktoren beeinflusst wird, die überwiegend außerhalb der direkten Steuerbarkeit einzelner Flughäfen liegen: (1) OEM-Zeitpläne (Verfügbarkeit von H₂-GSE und perspektivisch Flugzeugen), (2) politische Vorgaben und Förderlogiken sowie (3) die regionale Wasserstoffverfügbarkeit (z. B. Cluster, Backbone-Anbindung). Diese Abhängigkeiten unterstreichen die Notwendigkeit koordinierter und politisch flankierter Entwicklungsansätze.

3.2. GH₂ vs. LH₂: Eigenschaften, Betrieb, Sicherheit

Für die strategische und operative Planung an Flughäfen ist die Unterscheidung zwischen komprimiertem Wasserstoff (GH₂) und flüssigem Wasserstoff (LH₂) zentral, da beide Ansätze mit grundlegend unterschiedlichen Einsatzlogiken, Reifegraden und Umsetzungsrisiken verbunden sind. Die Wahl zwischen GH₂ und LH₂ ist dabei weniger eine rein technische Entscheidung als vielmehr eine Frage von Zeithorizont, Anwendungsfall und institutionellem Rahmen. Der ACI-ATI Hydrogen Airport Report (2021) und die IATA Concept of Operations for Battery- and Hydrogen-Powered Aircraft at Aerodromes (2024) betonen, dass GH₂ mittelfristig vor allem für bodenseitige Anwendungen relevant ist, während LH₂ primär als langfristige Option für flugzeugseitige Konzepte betrachtet wird.

GH₂ wird bei Druckstufen von typischerweise 350–700 bar gespeichert und kann mit standardisierten Komponenten wie Kompressoren, Druckspeichern, Dispensern, in bestehende Logistik- und Prozessketten integriert werden (ACI-ATI, 2021). Demgegenüber weist LH₂ eine deutlich höhere volumetrische Energiedichte auf, erfordert jedoch Temperaturen von rund –253 °C, kryogene Tanks und ein anspruchsvolles Boil-off-Management. Für den Flughafenbetrieb bedeutet dies, dass LH₂-Systeme mit zusätzlichen Kosten und Anforderungen an Temperaturmanagement, Materialauswahl und Betriebsorganisation verbunden sind, die deutlich über jene von GH₂-Anwendungen hinausgehen.

Die Interviews bestätigen diese Unterscheidung und schärfen sie weiter: GH₂ wird überwiegend als kurzfristig realisierbarer Ersatz für dieselbetriebene Fahrzeuge der Bodendienste gesehen, während LH₂ primär als vorbereitungsorientiertes Thema für den zukünftigen Flugzeugbetrieb verstanden wird. Eine parallele Einführung beider Pfade wird von den meisten Akteuren als weder notwendig noch wirtschaftlich sinnvoll eingeschätzt.

Beide Wasserstoffpfade sind mit spezifischen Sicherheitsanforderungen verbunden. Wasserstoff zeichnet sich durch eine niedrige Zündenergie, hohe Diffusität und eine nahezu farblose Flamme aus, was für den Flughafenbetrieb besondere Anforderungen an Detektion, Belüftung, Zündquellenkontrolle, Abblas- und Erdungskonzepte sowie betriebliche Protokolle mit sich bringt (IATA, 2024; ACI Europe, 2023).

Für den Flughafenbetrieb ist insbesondere relevant, dass Sicherheitsanforderungen nicht nur technisch, sondern auch organisatorisch und regulatorisch abgebildet werden müssen (z. B. über definierte Betriebsabläufe, Schulungen, RFFS-Einbindung und Genehmigungsprozesse).

Funktionale Charakteristika und Einsatzlogiken:

GH₂ (komprimiert) – Einstiegspfad für bodenseitige Anwendungen

- Technische Stärken: vergleichsweise hohe Reife, modulare Skalierbarkeit, Nutzung etablierter Komponenten
- Einsatzfokus: GSE, Busse, Feuerwehr- und Winterdienstfahrzeuge, Demonstrations- und Pilotprojekte
- Operative Vorteile: mobile Versorgung möglich, geringere Anforderungen an Kryotechnik, geringerer Energiebedarf
- Grenzen: geringere volumetrische Energiedichte, Flächenbedarf für Speicher, logistische Abhängigkeit von Trailern bei fehlender Netzanbindung

LH₂ (flüssig) – Vorbereitungspfad für den Flugzeugbetrieb

- Technische Stärken: hohe Energiedichte, perspektivisch relevant für wasserstoffbetriebene Luftfahrzeuge
- Erfordernisse: kryogene Tanks, Isolierung, Boil-off-Management, spezielle Materialien
- Komplexität: hohe Anforderungen an Sicherheit, Qualifikation und Genehmigung
- Wirtschaftlichkeit: nach Einschätzung der Interviewpartner erst bei gebündelter, großskaliger Nachfrage realistisch

Die Interviews zeigen übereinstimmend, dass eine lokale Verflüssigung von Wasserstoff am Flughafen derzeit überwiegend als nicht wirtschaftlich darstellbar eingeschätzt wird. Bevorzugt werden zentrale Verflüssigungsstandorte und Zulieferketten oder langfristig regionalen Hubs, was in der aktuellen und mittelfristigen Umsetzung vor allem den Transport von Flüssigwasserstoff über Tanklastzüge (LH₂-Trailer) impliziert.

Sicherheits-Kernelemente (GH₂ und LH₂)

- Gasdetektion und Belüftung
- Zündquellenkontrolle und Erdung
- Not-Shutdown- und Blow-down-Konzepte
- Definierte Sicherheits- und Verkehrsradien
- Klare Betriebs- und Betankungsprotokolle
- Einbindung der Flughafenfeuerwehr (RFFS)
- Regelmäßige Übungen und Qualifizierung

Die sicherheitstechnischen Anforderungen unterscheiden sich im Detail zwischen GH₂ und LH₂, folgen jedoch denselben Grundprinzipien. Für die Umsetzbarkeit an Flughäfen ist weniger die technische Machbarkeit als vielmehr die Standardisierung und Genehmigungsfähigkeit entscheidend.

Zusammenfassend ist die Abgrenzung zwischen GH₂ und LH₂ weniger als binäre Technologieentscheidung zu verstehen, sondern als zeitlich gestufter Entwicklungspfad: GH₂ ermöglicht frühe Lern- und Demonstrationsschritte im Bodenbetrieb, während LH₂ primär eine strategische Vorbereitungsaufgabe im Hinblick auf zukünftige Antriebskonzepte für Flugzeuge darstellt. Diese Pfadlogik bildet eine zentrale Grundlage für die weiteren infrastrukturellen und organisatorischen Überlegungen in den folgenden Kapiteln.

3.3. Tank-, Speicher- & Betankungstechnologien inkl. Boil-off-Management

Die Auswahl von Tank-, Speicher- und Betankungstechnologien stellt für Flughäfen eine der zentralen *Umsetzungsentscheidungen* dar, da sie Investitionsumfang, Genehmigungsaufwand, betriebliche Komplexität und Skalierbarkeit maßgeblich beeinflusst. Für die Praxis ist dabei weniger die technische Vollständigkeit als die Frage entscheidend, *welche Technologien zu welchem Zeitpunkt und für welchen Zweck* eingesetzt werden sollten. Im frühen Markthochlauf betrifft dies primär GH₂-Systeme für GSE und landseitige Anwendungen, während LH₂-Technologien, aufgrund höherer Komplexität und unsicherer Nachfrage, aktuell überwiegend in Forschung und ersten Demonstrationen betrachtet werden. Der technologische Reifegrad unterscheidet sich entsprechend stark zwischen komprimiertem Wasserstoff und kryogenen Systemen, was für Planung, Flächenbedarf, Sicherheitsanforderungen und Betriebsprozesse weitreichende Folgen hat (Dubec & Millinship, 2024; Jaffary and Zhang, 2025; BMWK, 2025).

GH₂-Systeme gelten heute als technisch weiter ausgereift und können modular skaliert werden. Sie basieren auf Kompression, Druckspeichern und Dispensern, wie sie im Mobilitätssektor bereits vielfach eingesetzt werden und für die grundlegende Sicherheitsstandards verfügbar sind (BMWK, 2025). LH₂-Systeme bieten dagegen eine deutlich höhere Energiedichte und gelten langfristig als Voraussetzung für wasserstoffbasierte Luftfahrzeuge, erfordern jedoch Temperaturen von rund -253 °C, vakuumisolierte Tanks, hohe Materialanforderungen sowie ein durchdachtes Umgangs- und Boil-off-Management. Demonstrationsprojekte, wie der 100 m³-LH₂-Tank des ZAL Hamburg, verdeutlichen, dass bereits einzelne kryogene Speicher erhebliche infrastrukturelle und sicherheitstechnische Anforderungen mit sich bringen (ZAL, 2021). Erste technische Studien zeigen zudem, dass selbst bei hochwertigen Tanks unvermeidbare Verdampfungsraten auftreten, die operativ berücksichtigt werden müssen (Blakseth et al., 2024). Für den Flughafenbetrieb bedeutet dies, dass LH₂-Systeme nicht nur technisch anspruchsvoller sind, sondern auch höhere Anforderungen an Betrieb, Sicherheit, Qualifikation und Genehmigung stellen (Dubec & Millinship, 2024).

Die für Flughäfen relevanten Speicher- und Betankungssysteme lassen sich damit wie folgt gruppieren:



Abbildung 3 Relevante Speicher und Betankungssysteme

Die Interviews zeigen, dass diese Optionen in der Praxis nicht als gleichwertige Alternativen betrachtet werden, sondern einer klaren Priorisierung folgen.

Praxisbewertung aus den Interviews: modular vor stationär

Die Interviews zeigen übereinstimmend, dass mobile, modulare und reversible Lösungen im frühen Markthochlauf klar bevorzugt werden. Trailer-basierte Konzepte und mobile Betankungsfahrzeuge (Bowserlösungen) ermöglichen es, Betriebserfahrung aufzubauen, ohne frühzeitig hohe Investitionen zu tätigen oder sich räumlich festzulegen. Sie gelten daher als robuste No-Regret-Optionen für Pilot- und Demonstrationsphasen. Entsprechend dominieren im frühen Markthochlauf mobile GH₂-Versorgungssysteme, die ohne größere bauliche Eingriffe eingesetzt werden können.

Stationäre GH₂-Anlagen werden erst dann als sinnvoll eingeschätzt, wenn eine gesicherte Nachfrage, wiederkehrende Nutzung und eine geklärte Genehmigungslage vorliegen. Für LH₂ gilt diese Einschränkung in noch stärkerem Maße. Studien zu LH₂-Betankungskonzepten zeigen zudem, dass Hydranten-ähnliche Systeme oder Pipelines eine aktive Temperaturhaltung benötigen, um Verdampfung („flashing“) zu vermeiden, was den technischen und betrieblichen Aufwand deutlich erhöht (Krog et al., 2025). Solche Systeme werden daher erst bei hoher und verlässlicher Nachfrage als wirtschaftlich tragfähig bewertet.

Beispiele aus Demonstrationsprojekten zeigen, dass GH₂-Betankungen im Minutenbereich technisch realisierbar sind. ZeroAvia (Pates, 2025) beschreibt hierzu ein 500-bar-Refuelling-System mit einer Kapazität von rund 780 kg, das als Referenz für zukünftige GSE-Betankungskonzepte dienen kann (ZeroAvia, 2025). In der Praxis wird jedoch weniger der Dispenser selbst als vielmehr die Verfügbarkeit und Redundanz der Kompressoren als potenzieller betrieblicher Engpass beschrieben.

LH₂-spezifische Aspekte und Boil-off-Management

Ein zentrales Thema bei LH₂-Systemen ist das Management von Boil-off-Gas (BOG), da flüssiger Wasserstoff zwangsläufig verdampft, sobald Wärme in den Tank gelangt. Unkontrolliertes Abblasen führt zu Energieverlusten und erhöhten Sicherheitsanforderungen (Franke & Kazula, 2025). Zwar existieren technische Konzepte zur Reduktion oder Nutzung von Boil-off-Gas: von gezielten Kühlstrategien bis hin zu Rückverflüssigungssystemen, die Interviews machen jedoch deutlich, dass

deren wirtschaftliche, regulatorische und operative Einsetzbarkeit im Flughafenbetrieb derzeit als offen bewertet wird. Für die meisten Standorte wird Boil-off-Management daher primär als Sicherheits- und Betriebsfrage und weniger als Effizienzhebel betrachtet. Entsprechend wird LH₂ derzeit vor allem als Bestandteil langfristiger Vorbereitungs- und Demonstrationsstrategien gesehen, nicht als kurzfristig zu skalierende Infrastruktur.

Sicherheits- und Betriebsimplikationen

Alle wasserstoffbezogenen Tank- und Betankungssysteme unterliegen strengen Sicherheits- und Betriebsanforderungen. Dazu gehören Zonierung, Explosionsschutz, Gasdetektion, definierte Betankungsabläufe sowie die Integration in Feuerwehr-, Instandhaltungs- und Vorfeldprozesse.

Die Interviews unterstreichen, dass insbesondere bei stationären Anlagen und LH₂-Systemen nicht die Technik, sondern die Genehmigungsfähigkeit, Haftungsfragen und institutionelle Erfahrung die größten Hürden darstellen. Für die Übergangsphase bis mindestens Mitte der 2030er-Jahre ist daher vor allem mit oberirdischen, modularen GH₂- und einzelnen LH₂-Speichern zu rechnen, während großskalige, fest installierte Lösungen erst bei klarer Nachfrage und standardisierten Genehmigungsprozessen realistisch erscheinen.

Für die Praxis bedeutet dies, dass die Auswahl von Tank-, Speicher- und Betankungstechnologien nicht als technische Optimierungsaufgabe, sondern als strategische Stufenentscheidung zu verstehen ist. Mobile GH₂-Systeme bieten einen risikoarmen Einstieg und ermöglichen Lernen und Akzeptanz. Stationäre GH₂-Anlagen und insbesondere LH₂-Infrastrukturen erfordern dagegen eine hohe Planungssicherheit, klare regulatorische Rahmenbedingungen und eine belastbare Nachfragebasis.

3.4. GSE-Einsatzprofile, Leistungsanforderungen, operative Integration

Ground Support Equipment (GSE) gehört zu den Bereichen, in denen Wasserstoffanwendungen am Flughafen vergleichsweise früh erprobt und eingesetzt werden können. Dies liegt vor allem an den klar definierten Einsatzprofilen, den begrenzten Fahrwegen im Vorfeldbereich und an der Möglichkeit, Fahrzeuge in strukturierten Betriebsfenstern zu betanken. Verschiedene Studien (u. a. von ACI/ATI (2021) und IATA (2024)) weisen darauf hin, dass sich GSE-Flotten grundsätzlich gut für einen ersten Markthochlauf eignen, auch wenn viele praktische und datenbezogene Fragen derzeit noch offen sind. Die Interviews relativieren diese grundsätzliche Eignung jedoch deutlich und zeigen, dass nicht GSE als Gesamtkategorie, sondern nur ausgewählte Fahrzeugtypen realistisch für einen frühen Einsatz von Wasserstoff in Betracht kommen. Maßgeblich hierfür sind Energiebedarf, Einsatzdauer, Lade- bzw. Betankungsfenster sowie die Verfügbarkeit geeigneter Fahrzeuge.

Einsatzprofile und Energiebedarf

Der Energiebedarf einzelner GSE-Kategorien ergibt sich aus ihren jeweiligen Aufgaben im Turnaround-Prozess und unterscheidet sich zum Teil erheblich. Pushback-Traktoren, Gepäckschlepper, GPU- oder ASU-Einheiten und weitere Spezialfahrzeuge verfügen über jeweils eigene Lastprofile, Zyklen und Einsatzrhythmen. Die Interviews zeigen, dass für eine belastbare Dimensionierung wasserstoffbasierter GSE-Anwendungen detaillierte betriebliche Nutzungsdaten erforderlich wären (z. B. Einsatzhäufigkeiten, Schichtmodelle, Stand- und Pufferzeiten, reale Fahrwege). Solche Daten liegen derzeit jedoch häufig nicht in der notwendigen Granularität vor, was eine präzise

Bedarfsabschätzung erschwert und den Planungsaufwand erhöht. Dieser Datenmangel stellt einen der zentralen praktischen Hemmfaktoren dar und betrifft sowohl wasserstoff- als auch batterieelektrische Anwendungen. Die Literatur bestätigt diesen Befund auch im weiteren Mobilitätskontext, etwa hinsichtlich der Erfassung realer Verbrauchs- und Bewegungsdaten (Gu et al., 2023).

Fahrzeugverfügbarkeit als zentraler Engpass

Die Interviews zeigen übereinstimmend, dass der derzeit wichtigste limitierende Faktor für den Einsatz von Wasserstoff im GSE-Bereich nicht die Infrastruktur, sondern die Verfügbarkeit serienreifer Fahrzeuge ist. Die meisten heute existierenden H₂-GSE befinden sich im Prototyp- oder Demonstrationsstadium und sind häufig nur im Rahmen geförderter Projekte verfügbar. Diese OEM-Abhängigkeit führt dazu, dass Flughäfen und Bodenabfertiger ihre Planungen nur eingeschränkt selbst steuern können. Entscheidungen über Infrastruktur, Schulung oder Prozesse sind häufig vorgezogen, während geeignete Fahrzeuge noch nicht in ausreichender Zahl verfügbar sind.

Die bislang verfügbaren Prototypen und Demonstrationsfahrzeuge erlauben dennoch eine erste Einschätzung technischer Anforderungen. Die meisten Konzepte basieren auf 350-bar-GH₂-Speichersystemen, mit Tankvolumina im ein- bis niedrigen zweistelligen Kilogramm Bereich. Für schwere Schleppfahrzeuge oder Pushback-Systeme werden in Konzeptpapieren höhere Speichermengen angenommen, während Flughafenbusse teilweise deutlich größere Tanks nutzen. Diese Angaben sind weniger als belastbare Verbrauchswerte zu verstehen, sondern spiegeln vor allem aktuelle Designentscheidungen und Demonstrationsgrenzen wider.

Use-Case-Selektion statt Flottenumstellung

Auch zum Energiebedarf einzelner Einsätze liegen bislang keine veröffentlichten Messdaten vor. Modellbasierte Abschätzungen, die aus Leistungsdaten konventioneller Diesel- und elektrischer GSE abgeleitet werden, deuten jedoch darauf hin, dass Pushback-Fahrzeuge einen relevanten, aber zeitlich klar begrenzten Energiebedarf aufweisen, während Schlepper oder GPU/ASU-Einheiten stark einsatzabhängige Leistungsprofile haben. Solche Ableitungen geben eine erste Orientierung, ersetzen jedoch keine empirischen Verbrauchswerte.

Aus den Interviews ergibt sich klar, dass Wasserstoff im GSE-Bereich nicht für eine flächendeckende Flottenumstellung, sondern für hoch selektive Einsatzfelder betrachtet wird.

Typische Use-Cases die in den Interviews erwähnt wurden:

- Heavy-Duty-Fahrzeuge mit hohem Energiebedarf
- Winterdienstfahrzeuge (fehlende BEV-Alternativen)
- Feuerwehr- und Notfallfahrzeuge
- GPUs oder ASUs an Außenpositionen mit begrenzter Ladeinfrastruktur
- Peak-Demand- oder Backup-Anwendungen

Leichtes GSE mit kurzen Einsatzzyklen und klaren Ladefenstern wird dagegen überwiegend als Domäne batterieelektrischer Lösungen gesehen.

Betankung und operative Integration

Für den Betankungsvorgang existieren Erfahrungswerte aus dem allgemeinen H₂-Mobilitätssektor sowie aus ersten Flughafenanwendungen. Diese zeigen, dass Betankungszeiten im Minutenbereich technisch erreichbar sind und wesentlich durch Kompressorleistung und Druckstufe bestimmt werden. Die verfügbare Literatur weist darauf hin, dass weniger die Dispenser, sondern vor allem die Kompressoren die entscheidende Engpasskomponente darstellen und deshalb redundant ausgelegt werden müssen, um eine kontinuierliche Versorgung sicherzustellen (IATA, 2025a, b; ACI-ATI, 2021).

In der Praxis wird jedoch weniger der Dispenser selbst als vielmehr die Verfügbarkeit, Auslegung und Redundanz der Kompressoren als kritischer Faktor beschrieben. Ausfallzeiten oder Engpässe wirken sich unmittelbar auf den Vorfelddetrieb aus und müssen daher frühzeitig berücksichtigt werden.

Für die Bereitstellung von Wasserstoff für GSE existieren drei prinzipielle Versorgungsansätze: zentral gelegene GH₂-Stationen auf dem Vorfeld, mobile Trailer- oder Bowserlösungen sowie hybride Systeme, bei denen LH₂ außerhalb des Vorfelds gespeichert und über Verdampfer als GH₂ abgegeben wird. Jede dieser Varianten hat spezifische Konsequenzen für Sicherheit, Flächenplanung, Verkehrsführung und die Einbindung in bestehende Abläufe. Mobile Systeme bieten Flexibilität, verursachen aber zusätzlichen Verkehr und erhöhen die betriebliche Komplexität. Stationäre Lösungen erleichtern die Planung und erlauben höhere Durchsätze, verlangen jedoch bauliche Eingriffe und eine sorgfältige Zonierung. LH₂-basierte Systeme ermöglichen potenzielle Synergien mit einer späteren flugzeugseitigen Wasserstoffnutzung, sind aber technisch anspruchsvoller und wirtschaftlich nur dann sinnvoll, wenn ausreichend Nachfrage vorhanden ist (Dubec & Millinship, 2024).

Die Interviews zeigen eine klare Präferenz für mobile oder hybride Lösungen in frühen Phasen, da diese eine höhere Flexibilität bieten und besser in bestehende Verkehrs- und Sicherheitslogiken integrierbar sind.

Organisation, Akzeptanz und Betrieb

Neben der Technik spielt die organisatorische Einbettung eine zentrale Rolle. Die Interviews verdeutlichen, dass Akzeptanz im operativen Betrieb weniger durch strategische Zielbilder als durch praktische Erprobung entsteht. Schulung, klare Zuständigkeiten und realitätsnahe Demonstrationen sind entscheidend für die Integration wasserstoffbetriebener GSE in bestehende Abläufe. Die IATA ConOps (2024) hebt hervor, dass die Einführung neuer Energieträger am Vorfeld immer auch eine organisatorische Lernkurve erfordert, die über die reine Technik hinausgeht.

Schließlich können GSE-Anwendungen dann besonders effizient betrieben werden, wenn sie Teil eines größeren regionalen oder standortbezogenen Wasserstoffsystems sind wie etwa in Verbindung mit Busflotten, Logistikunternehmen oder industriellen Abnehmern. Eine solche Bündelung verbessert die Grundauslastung, verteilt Infrastrukturkosten auf mehrere Nutzer und erhöht die Flexibilität in der Versorgung. Untersuchungen zu sektorübergreifenden H₂-Systemen zeigen, dass gerade diese Kopplungen ein zentraler Faktor für die Wirtschaftlichkeit kleiner und mittlerer Wasserstoffanwendungen sind (Yue et al., 2023; BMWK, 2025).

GSE stellen ein realistisches, jedoch hoch selektives Einstiegfeld für Wasserstoff am Flughafen dar. Die Einführung ist weniger durch technische Machbarkeit als durch OEM-Verfügbarkeit, belastbare

Einsatzdaten und operative Integration begrenzt. Für die Praxis bedeutet dies, dass Wasserstoff im GSE-Bereich primär als Lern- und Demonstrationspfad zu verstehen ist, der gezielt dort eingesetzt wird, wo batterieelektrische Lösungen an ihre Grenzen stoßen und wo eine Einbettung in regionale H₂-Ökosysteme möglich ist.

3.5. Schnittstellen & Synergien im Ökosystem

Die Integration von Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen entfaltet ihr Potenzial möglicherweise erst dann voll, wenn sie nicht als isolierte technische Einrichtung verstanden wird, sondern als Bestandteil eines regionalen Mobilitäts- und Energiesystems. Aktuelle Analysen betonen zunehmend die Rolle von Flughäfen als multimodale Energie- und Verkehrsknotenpunkte, die über die Luftfahrt hinaus als zentrale Standorte sektorenübergreifender Wasserstoffnutzung fungieren können (World Economic Forum, 2024). In dieser Perspektive stehen nicht nur die GSE-Flotten im Fokus, sondern auch Logistik, ÖPNV, Gewerbe- und Industrieareale, die gemeinsam eine belastbare Nachfragebasis schaffen und damit die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffanlagen verbessern. Die Interviews bestätigen diese Perspektive deutlich und schärfen sie zugleich: Wasserstoffinfrastruktur am Flughafen wird von den befragten Akteuren nur dann als wirtschaftlich und betrieblich tragfähig eingeschätzt, wenn sie in ein regionales Multi-Use-Ökosystem eingebettet ist. Der Flughafen allein erzeugt in der Regel keine ausreichende Nachfrage, um Investitionen in H₂-Erzeugung, Speicherung oder Betankung dauerhaft zu rechtfertigen.

Ökosystemlogik statt Insellösung

Die Funktion des Flughafens als Energie- und Mobilitätshub ergibt sich aus seiner ausgeprägten Netzwerkanbindung, den hohen Energieverbräuchen im Grundbetrieb und der Vielzahl beteiligter Akteursgruppen. Studien zeigen, dass eine Bündelung verschiedener wasserstoffbasierter Anwendungen (bspw. vom Vorfeldbetrieb über LKW-Betankung bis hin zu ÖPNV-Flotten) die Auslastung von Speicher-, Kompressor- und Dispenserstrukturen signifikant erhöhen und die Fixkosten auf mehrere Nutzergruppen verteilen kann (World Economic Forum, 2024; HyNEAT, o.J.; HyNEAT, 2025; DGLR, 2025). Die daraus entstehende Grundlast gilt als wesentliche Voraussetzung für wirtschaftlich tragfähige H₂-Infrastrukturen im frühen Markthochlauf. Aus den Interviews wird deutlich, dass diese Bündelung nicht als „Zusatznutzen“, sondern als zentrale Voraussetzung für Wirtschaftlichkeit verstanden wird. Wasserstoffprojekte, die ausschließlich auf den Flughafenbetrieb ausgerichtet sind, werden überwiegend als nicht tragfähig eingeschätzt.

Kopplung mit Logistik, ÖPNV und Industrie

Besonders ausgeprägt sind Synergien im Bereich der Logistik. Flughäfen mit direkten Verbindungen zu Frachtterminals, Paketverteilzentren oder Logistik hubs verfügen über eine Fahrzeugflotte, deren Energiebedarf sowohl zeitlich als auch räumlich mit dem GSE-Betrieb harmoniert. Erste praktische Erfahrungen, etwa aus dem BSR HyAirport-Projekt am Flughafen Riga, zeigen, dass die parallele Nutzung einer Wasserstoffstation durch GSE- und LKW-Betreiber technisch gut kombinierbar ist und die Infrastrukturplanung maßgeblich von den angrenzenden Bedarfsstrukturen beeinflusst wird (Interreg Baltic Sea Region, 2024). Gemeinsame Trailerlogistik, abgestimmte Druckstufen und eine höhere Auslastung in Tagesrandlagen gelten als zentrale Vorteile.

Die Interviews unterstreichen, dass Logistikakteure häufig als Ankerkunden fungieren können, da sie größere Flotten, längere Einsatzzeiten und damit eine stabilere Grundlast einbringen. Für Flughäfen erhöht dies die Planungssicherheit und reduziert das Risiko von Unterauslastung.

Auch ÖPNV- und Flughafenbusse bieten ein relevantes Kopplungsfeld. Wasserstoffbusflotten können dieselben GH_2 -Versorgungseinheiten nutzen wie GSE, was zu Skaleneffekten und einer gleichmäßigeren Auslastung führt. Untersuchungen zur Integration multimodaler Wasserstoffsysteme verdeutlichen, dass insbesondere die Kombination von Flughafenbetrieb, urbanem Verkehr und Logistik erhebliche Effizienzgewinne erzeugen kann. Voraussetzung dafür ist eine harmonisierte Betriebsführung, die Betankungsfenster, Speicheranforderungen und Sicherheitsprozesse mehrerer Akteursgruppen aufeinander abstimmt.

Mehrere Interviewpartner betonen jedoch, dass solche Kopplungen nur dann funktionieren, wenn Betriebslogiken, Betankungsfenster und Sicherheitsanforderungen frühzeitig aufeinander abgestimmt werden. Die organisatorische Koordination wird dabei als ebenso anspruchsvoll eingeschätzt wie die technische Integration.

Industrie- und Energieanbindung

Über die Mobilität hinaus ergeben sich Synergien zu angrenzenden Industrie- und Gewerbeflächen. Viele Flughäfen sind in Industriegebiete eingebettet, in denen Wasserstoff als Prozessenergie, für interne Logistik oder als Backup-Lösung genutzt werden kann. Arbeiten zu LH_2 -Infrastrukturintegration zeigen, dass insbesondere Boil-off-Gas aus flüssigen Speicheranlagen effizient in GH_2 -Abgaben für GSE oder andere Nutzer überführt werden kann, wodurch energetische Verluste reduziert und Betriebskosten gesenkt werden (Van Dijk et al., 2024). Eine gemeinsame Nutzung von Großspeichern und Traileranlieferungslogistik kann dabei helfen, Versorgungskosten zu senken und die Infrastruktur robuster gegen Nachfrageschwankungen zu machen.

Die Interviews zeigen, dass insbesondere Standorte mit bestehender Industrie- oder Energieinfrastruktur (z. B. Chemieparks, Energiecluster) bessere Voraussetzungen für einen frühen Hochlauf aufweisen. Der Flughafen übernimmt hier eher die Rolle eines Mitnutzers oder Integrators, nicht die eines dominierenden Nachfragers.

Eine systemische Kopplung umfasst jedoch nicht nur technische, sondern auch energetische und operative Ebenen. Energetische Kopplungsmodelle zeigen, dass Wasserstoff in integrierten Energieverbänden aus Strom-, Wärme- und H_2 -Systemen als Flexibilisierungsoption dienen kann, wodurch Lastspitzen geglättet und erneuerbare Energien besser eingebunden werden. Auf operativer Ebene erfordert die gemeinsame Nutzung von Wasserstoffanlagen klar abgestimmte Governance-Strukturen, da Flughäfen, ÖPNV-Betreiber, Logistikunternehmen und Industrieakteure unterschiedliche Betriebslogiken verfolgen. Die Risikoanalysen des DLR heben hervor, dass insbesondere Unsicherheiten in Nachfrageprognosen und heterogene Entscheidungsprozesse der beteiligten Akteure zu Fehlplanungen oder Unterauslastung führen können (Braun und Classen 2023).

Governance, Risiken und Koordinationsbedarf

Die Interviews machen deutlich, dass technische Machbarkeit allein nicht ausreicht, um Ökosystemsnergien zu realisieren. Entscheidend sind klare Governance-Strukturen: Wer investiert, wer betreibt, wer trägt Risiken und wie werden Kosten und Nutzen verteilt? Fehlende Abstimmung zwischen Flughafen, Logistik, ÖPNV, Energieversorgern und Behörden wird als wesentliches Risiko für Unterauslastung oder Fehlplanung benannt. Insbesondere divergierende Zeithorizonte und Investitionslogiken erschweren eine koordinierte Entwicklung.

Für die Praxis bedeutet dies, dass Wasserstoffinfrastruktur am Flughafen nicht als standortspezifisches Einzelprojekt, sondern als Bestandteil eines regionalen Transformationspfades verstanden werden sollte. Flughäfen fungieren dabei weniger als Treiber, sondern als Ermöglicher und Plattformen, die unterschiedliche Nachfrager, Infrastrukturen und Governance-Ebenen zusammenführen. Die frühzeitige Identifikation geeigneter Partner und die Entwicklung gemeinsamer Nutzungskonzepte sind entscheidend für die Umsetzbarkeit wasserstoffbasierter Anwendungen.

3.6. Sicherheitsmanagement & Genehmigungslogik

Hinweis: Einige Aspekte dieses Abschnitts, insbesondere zu technischen Anlagenparametern, Boil-off-Management und zonenbezogenen Sicherheitsanforderungen, werden in anderen Kapiteln (z. B. Kapitel 3.2/3.3 sowie Kapitel 5) nochmals vertieft. Die nachfolgende Darstellung versteht sich daher als zusammenfassende, prozessorientierte Einordnung.

Das Sicherheitsmanagement sowie die Genehmigungslogik für Wasserstoffinfrastrukturen an Flughäfen müssen in ihrem Aufbau sowohl technische als auch organisatorische Komponenten systematisch verknüpfen. Die Interviews zeigen jedoch deutlich, dass die praktische Umsetzbarkeit weniger durch technische Machbarkeit als durch Genehmigungsfähigkeit, institutionelle Erfahrung und Standardisierung bestimmt wird. Sicherheitsmanagement ist damit nicht nur eine technische Disziplin, sondern ein zentrales Governance-Thema.

Flächenbedarf und infrastrukturelle Grundanforderungen

Beim Flächenbedarf zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen gasförmiger (GH_2) und flüssiger Wasserstoffanlage (LH_2). Eine GH_2 -Station umfasst typischerweise ein Kompressorgehäuse, Speicherbündel auf Skids, Dispenser sowie eine Trafostation bzw. Transformator. Abhängig von der Puffergröße werden hierfür in der Regel einige hundert Quadratmeter benötigt; eine Erweiterung über zusätzliche Speicher-Racks ist möglich (EHSP, 2023). Im Gegensatz dazu sind LH_2 -Anlagen aufgrund ihres kryogenen Betriebs auf deutlich größeren Flächen angelegt. Zusätzlich zu einem oder mehreren Kryotanks mit Auffangbereich gehören ein Kaltgas-/BOG-System, Pumpen, Verdampfer, Sicherheits- und Abblaseleitungen sowie ein Elektro-/MSR-Container zur Grundausstattung. Inklusive der erforderlichen Sicherheitsradien ergeben sich schnell Flächenbedarfe im vierstelligen Quadratmeterbereich (Schiaroli et al., 2025). Die Interviews bestätigen, dass diese Flächenanforderungen insbesondere auf verdichteten Flughafengeländen eine zentrale planerische Hürde darstellen und frühzeitig in die Masterplanung integriert werden müssen (vgl. Kapitel 3.7).

Sicherheitszonen, Abstände und technische Schutzmaßnahmen

Für die Auslegung von Abständen und sicherheitsrelevanten Zonen gelten bestimmte Richtprinzipien, die jeweils projektspezifisch zu verifizieren und in den Genehmigungsprozess einzubringen sind. Flughafenspezifische Anforderungen beinhalten die räumliche Trennung gegenüber Publikumsbereichen, Gebäuden und Verkehrswegen sowie die Definition von Explosions- bzw. Gefahrenzonen mit regulierter Zutrittskontrolle (Braun und Classen, 2023). Ein adäquates Wind- und Lüftungskonzept ist erforderlich, um freigesetzten Wasserstoff kontrolliert zu verdünnen. Dazu gehört die Installation von Gasdetektoren am Boden und an der Decke, je nach Szenario, sowie optional Kameraüberwachung oder FLIR-Technik (EHSP 2023). In Bezug auf Mindestabstände führt eine Übersicht aus, dass für flüssigen Wasserstoff stationäre Sicherheitsradien von mindestens 8–20 m zwischen Anlage und Öffentlichkeit empfohlen werden (Braun und Classen 2023; HyResponder, 2021).

Aus den Interviews wird deutlich, dass diese technischen Anforderungen grundsätzlich beherrschbar sind, ihre konkrete Auslegung jedoch stark von der Interpretation durch Genehmigungsbehörden abhängt. Fehlende einheitliche Standards führen in der Praxis zu konservativen Sicherheitsansätzen und projektspezifischen Einzelentscheidungen.

Rolle der Feuerwehr und des operativen Betriebs

Das Brand- und Rettungskonzept stellt einen weiteren zentralen Baustein dar: Sicher gestellte Zufahrten für die Flughafenfeuerwehr (RFFS), ausreichende Löschmittel wie Wasser und Schaum, ein zentral steuerbares Not-Shutdown-System, sowie eine intelligente Alarmierung, integriert in bestehende Leitstände bzw. A-SMGCS-Systeme (Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems), sind essenziell (ACI/ATI 2021; EHSP 2023). Speziell bei LH₂-Anlagen nimmt das Boil-off-Management eine zusätzliche sicherheitsrelevante Rolle ein. Ziel ist eine möglichst geringe kontrollierte Ableitung des Boil-off-Gases. Technische Optionen hierfür umfassen Rückverflüssigung, Nutzung des Boil-off-Gases als GH₂-Puffer (etwa für GSE) oder im letzten Schritt die kontrollierte Abgabe über eine Hochfackel (Schiaroli et al, 2025).

Die Interviews unterstreichen die besondere Bedeutung der frühzeitigen Einbindung von RFFS und operativem Personal. Praktische Übungen, Schulungen und die gemeinsame Entwicklung von Notfallprozeduren werden als entscheidend für Akzeptanz und Genehmigungsfähigkeit beschrieben.

Genehmigungslogik, Haftung und Versicherbarkeit

Die Interviews zeigen übereinstimmend, dass Genehmigungsprozesse für Wasserstoffanlagen an Flughäfen derzeit weniger durch formale Verbote als durch Unsicherheiten in Haftungs-, Verantwortungs- und Versicherungsfragen geprägt sind. Unklarheiten darüber, wer im Schadensfall haftet (Flughafenbetreiber, Infrastrukturbetreiber, Fahrzeughalter), wie Risiken versichert werden können und welche Standards als „Stand der Technik“ gelten, führen in der Praxis zu Verzögerungen und erhöhten Anforderungen seitens der Behörden. Diese Unsicherheiten betreffen insbesondere LH₂-Anlagen, aber auch GH₂-Infrastrukturen im Airside-Bereich.

Standardisierung als Schlüssel zur Umsetzbarkeit

Aus Sicht der befragten Akteure stellt fehlende Standardisierung einen der größten Hemmfaktoren dar. Einheitliche Leitlinien zu Sicherheitszonen, Betankungsprozessen, Rollenverteilung und Genehmigungsverfahren würden den Aufwand für Einzelprojekte erheblich reduzieren und Planungssicherheit schaffen. Die Interviews sprechen sich daher klar für die Entwicklung von Muster-Safety-Cases, standardisierten Genehmigungsleitfäden und übertragbaren Betriebskonzepten aus, insbesondere auf europäischer Ebene.

Für die Praxis bedeutet dies, dass Sicherheitsmanagement und Genehmigungslogik nicht als nachgelagerte Prüfschritte, sondern als frühzeitige Gestaltungsaufgabe verstanden werden müssen. Erfolgreiche Projekte zeichnen sich weniger durch technische Innovation als durch klare Rollenverteilungen, frühzeitige Behördeneinbindung und den Rückgriff auf standardisierte Konzepte aus. Die Weiterentwicklung von Standards und Leitlinien ist damit eine zentrale Voraussetzung für den Hochlauf wasserstoffbasierter Anwendungen an Flughäfen.

3.7. Verzahnung von Masterplanung und H₂-Infrastruktur

Die Interviews verdeutlichen, dass die Einführung von Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen nicht primär eine kurzfristige Investitionsfrage, sondern eine langfristige Planungs- und Vorsorgeaufgabe ist. Masterplanung wird dabei zu einem zentralen Hebel, um spätere Handlungsoptionen offen zu halten, ohne frühzeitig irreversible Entscheidungen zu treffen.

Die Einführung einer Wasserstoffinfrastruktur an Verkehrsflughäfen berührt unmittelbar die bestehende Flächen-, Sicherheits- und Entwicklungslogik des Airport Masterplans. Dieser dient als zentrales Steuerungsinstrument für die räumliche und funktionale Entwicklung eines Flughafens über einen Zeitraum von meist 20 bis 30 Jahren. Er definiert Nutzungszonen (Luftseite, Landseite, Fracht, Wartung, Verkehr, Energieversorgung) sowie die langfristige Flächenvorsorge.

Da Wasserstoffsysteme, etwa Tanklager, Pipelines, Betankungsanlagen oder Elektrolyseure, erhebliche Anforderungen an Sicherheitsabstände, Versorgungstrassen und Medienkopplungen stellen, müssen sie frühzeitig in die Masterplanung integriert werden. Andernfalls entstehen Konflikte mit bestehenden Nutzungen, insbesondere in hochverdichteten Arealen mit konkurrierenden Expansionszielen (z. B. Terminalerweiterungen, Cargo- oder Wartungsflächen).

Die Interviews zeigen jedoch klar, dass Masterplanung derzeit weniger auf den Bau großskaliger H₂-Infrastruktur abzielen sollte, sondern auf eine H₂-Ready-Logik, die modulare Einstiege ermöglicht und spätere Skalierung nicht verbaut.

H₂-Ready statt Vorfestlegung

Unter einer H₂-Ready-Strategie verstehen die befragten Akteure vor allem die Vorsorge von Flächen, Korridoren und Prozessen, ohne sich frühzeitig auf konkrete Technologien oder Ausbaupfade festzulegen.

- Reservierung geeigneter Flächen für temporäre oder mobile Anlagen (z. B. Trailer, Bowser, Skids)
- Sicherung von Verkehrs- und Medienkorridoren (Strom, Daten, ggf. Gas)

- Berücksichtigung potenzieller Sicherheits- und Evakuierungszonen
- Vermeidung konkurrierender Nutzungen in sensiblen Bereichen

Diese Maßnahmen gelten in den Interviews als No-Regret-Moves, da sie unabhängig vom tatsächlichen Hochlaufpfad von Wasserstoff zukünftige Optionen offenhalten.

Zwei getrennte Planungspfade: GH₂ Bodenbetrieb und LH₂ Flugbetrieb

Ein zentrales Ergebnis der Interviews ist die klare Trennung zwischen GH₂-Anwendungen im Bodenbetrieb und LH₂-Anwendungen im zukünftigen Flugbetrieb, sowohl technisch als auch planerisch.

Für die Masterplanung bedeutet dies, dass zwei unterschiedliche Planungspfade berücksichtigt werden sollten:

- **GH₂-Pfad (kurz- bis mittelfristig):** punktuelle, modulare Infrastrukturen für ausgewählte GSE- und Fahrzeuganwendungen, häufig mit mobiler oder semi-stationärer Ausprägung.
- **LH₂-Pfad (langfristig):** strategische Flächen- und Prozessvorsorge für potenzielle Flugzeugbetankung, ohne kurzfristige Bauentscheidungen.

Diese Trennung reduziert Planungsrisiken, verhindert Überdimensionierung und erlaubt eine schrittweise Anpassung an externe Entwicklungen (OEM-Zeitpläne, Regulierung).

Schnittstellen zu Sicherheit, Betrieb und Genehmigung

Die Verzahnung von Masterplanung und H₂-Infrastruktur betrifft nicht nur Flächenfragen, sondern auch betriebliche und sicherheitsrelevante Aspekte. Verkehrsführung, Zutrittskontrollen, RFFS-Zugänge und Notfallrouten müssen frühzeitig mitgedacht werden.

Die Interviews zeigen, dass Masterplanung ein wirksames Instrument ist, um spätere Genehmigungsprozesse zu erleichtern. Frühzeitig berücksichtigte Sicherheitszonen, Zufahrten und Abstände reduzieren den Anpassungsbedarf in späteren Projektphasen und erhöhen die Genehmigungsfähigkeit.

Zeitliche Diskrepanz als strukturelle Herausforderung

Die Interviews unterstreichen die strukturelle Herausforderung, dass Masterplanzyklen (15–30 Jahre) deutlich länger sind als technologische Entwicklungszyklen im Wasserstoffbereich. Um dieser Diskrepanz zu begegnen, wird eine modulare und anpassungsfähige Masterplanung empfohlen, die regelmäßige Review- und Anpassungspunkte vorsieht.

Für die Praxis bedeutet dies, dass Masterplanung nicht als Festlegung eines Endzustands, sondern als strategisches Ermöglichungsinstrument verstanden werden sollte. Flughäfen, die Wasserstoff frühzeitig als Planungsoption berücksichtigen, schaffen sich Handlungsspielräume für Pilotprojekte, regionale Kopplungen und zukünftige Luftfahrtanwendungen – ohne sich auf unsichere Technologien oder Zeitpläne festzulegen. Diese Logik bildet eine zentrale Grundlage für die in den folgenden Kapiteln dargestellten Bewertungs- und Handlungsoptionen.

3.8. Technologischer Reifegrad & Roadmap

Der technologische Reifegrad wasserstoffbezogener Flughafeninfrastrukturen, insbesondere im Bereich großvolumiger LH₂-Systeme, Hydrantentechnik und flugzeugseitiger Betankung, befindet sich

noch in einer frühen Entwicklungsphase. Für viele Komponenten liegen derzeit weder umfassende Betriebserfahrungen noch konsolidierte regulatorische Vorgaben vor, sodass belastbare Roadmaps nur eingeschränkt ableitbar sind.

Die Interviews bestätigen diese Einschätzung und verdeutlichen zugleich, dass der technologische Reifegrad allein kein verlässlicher Indikator für Umsetzbarkeit ist. Entscheidend ist vielmehr das Zusammenspiel aus technischer Verfügbarkeit, regulatorischer Klarheit, wirtschaftlicher Tragfähigkeit und institutioneller Lernkurven. Auf Basis der vorliegenden Desk Research (M2) und der Interviews (M3) lassen sich dennoch robuste Orientierungsrahmen ableiten, die keine festen Zeitversprechen darstellen, sondern wahrscheinliche Entwicklungspfade und Abhängigkeiten beschreiben.

Derzeit deutet der Stand der Forschung darauf hin, dass GH₂-Anwendungen für GSE, Busse und logistiknahe Prozesse kurzfristig technisch am weitesten entwickelt sind, während LH₂-Infrastrukturen vor allem für spätere Flugzeuganwendungen relevant werden könnten. Die zeitliche Verzögerung großmaßstäblicher LH₂-Nachfrage, unter anderem aufgrund der Verschiebungen im Airbus-ZEROe-Programm, verstärkt diese Tendenz. Auch das entstehende deutsche H₂-Kernnetz ist zunächst auf GH₂ ausgelegt, was eine pragmatische Anbindungsperspektive für Flughäfen bietet.

Die Interviews spiegeln diese Einschätzung deutlich wider: GH₂ wird als kurzfristig realisierbarer Einstiegspfad bewertet, während LH₂ primär als langfristiger Vorbereitungspfad verstanden wird. Auch das entstehende deutsche H₂-Kernnetz ist zunächst auf GH₂ ausgelegt, was eine pragmatische Anbindungsperspektive für Flughäfen bietet (vgl. Kapitel 6).

Gleichzeitig wird betont, dass eine Anbindung an überregionale Netze für die meisten Flughäfen mittelfristig keine Voraussetzung für erste Anwendungen darstellt. Mobile Zulieferketten werden als ausreichend und flexibler bewertet.

Roadmap als Pfadlogik, nicht als Zeitplan

Die Interviews machen deutlich, dass Roadmaps für Wasserstoff an Flughäfen nicht als feste Zeitpläne, sondern als Pfadlogiken mit Entscheidungspunkten verstanden werden sollten. Der tatsächliche Fortschritt hängt maßgeblich von externen Triggern ab.

Als besonders prägend werden drei externe Abhängigkeiten benannt:

- OEM-Zeitpläne (Verfügbarkeit von H₂-GSE und wasserstoffbetriebenen Flugzeugen)
- Regulatorische Harmonisierung (Standards, Genehmigungsfähigkeit, Haftung)
- Regionale H₂-Verfügbarkeit (Cluster, Backbone, Lieferketten)

Diese Faktoren liegen weitgehend außerhalb der direkten Steuerbarkeit einzelner Flughäfen und begrenzen die Aussagekraft klassischer technologiegetriebener Roadmaps.

Für die Praxis bedeutet dies, dass der technologische Reifegrad von Wasserstoffanwendungen an Flughäfen weniger durch einzelne Innovationssprünge als durch koordiniertes Lernen, Standardisierung und externe Marktentwicklung bestimmt wird. Flughäfen können diesen Prozess nicht vollständig steuern, wohl aber durch No-Regret-Maßnahmen, modulare Einstiege und regionale Kooperationen aktiv vorbereiten. Kapitel 3 liefert damit den technologisch-infrastrukturellen Rahmen für die in den folgenden Kapiteln dargestellten empirischen Befunde, Bewertungen und Handlungsoptionen.

4. Ökonomische Perspektiven

Der wirtschaftliche Rahmen bestimmt maßgeblich die Realisierbarkeit und Skalierbarkeit von Wasserstoffinfrastruktur an deutschen Verkehrsflughäfen. Neben den technologischen Voraussetzungen (Kapitel 3) sind insbesondere Investitions- und Betriebskosten, Nachfrageentwicklung, Akteurskonstellationen sowie Kooperations- und Finanzierungsmodelle entscheidend für den Markthochlauf und Sinnhaftigkeit von H₂ Lösungen.

Dieses Kapitel fokussiert die ökonomischen Entscheidungsbedingungen für Wasserstoff am Flughafen: Welche Kosten- und Risikotreiber bestimmen die Umsetzbarkeit? Welche Akteure tragen welche Rollen? Und unter welchen Bedingungen werden Projekte robust (No-Regret) statt spekulativ? Dabei werden sowohl unternehmensbezogene Perspektiven (Flughäfen, Bodenabfertiger, Versorger/Betreiber) als auch systemische Rahmenbedingungen (Nachfrage, Skalierung, Förder- und Regulierungslogik) berücksichtigt.

Ziel ist es, zentrale Kosten- und Wirtschaftlichkeitstreiber zu identifizieren, mögliche Geschäftsmodelle und Betreiberrollen zu skizzieren sowie regionale Synergien und H₂-Hub-Konzepte konzeptionell abzuleiten. Dabei wird keine vollständige Wirtschaftlichkeitsberechnung vorgenommen, sondern eine qualitative Bewertung der wesentlichen Einflussfaktoren und Handlungsspielräume.

Die Interviews zeigen dabei einen konsistenten Befund: In der frühen Phase wird die Wirtschaftlichkeit weniger durch den reinen Wasserstoffpreis (€/kg) bestimmt, sondern durch CAPEX-Risiken (Capital Expenditure), Auslastung, Betreiber- und Haftungsfragen sowie die Verfügbarkeit marktfähiger Fahrzeuge (OEM-Lücke).

4.1. Akteursrollen

Die Wasserstoffinfrastruktur am Flughafen erfordert eine Vielzahl von Akteuren wie Flughäfen, Bodenabfertiger (GSE-Dienstleister), Energieversorger, Netzbetreiber, Investoren, Behörden, sowie klar definierte Rollen entlang von Planung, Finanzierung, Betrieb, Risikoübernahme und Genehmigung. Ziel der Untersuchung der Akteurskonstellation ist es, Investitions- und Betriebsrisiken so zu verteilen, dass wirtschaftlich tragfähige und skalierbare Lösungen entstehen, ohne einzelne Akteure, insbesondere Flughäfen, strukturell zu überlasten. Die Interviews zeigen, dass weniger die Anzahl der beteiligten Akteure als vielmehr die Klarheit ihrer Rollen und Verantwortlichkeiten entscheidend für die Umsetzbarkeit wasserstoffbasierter Projekte ist.

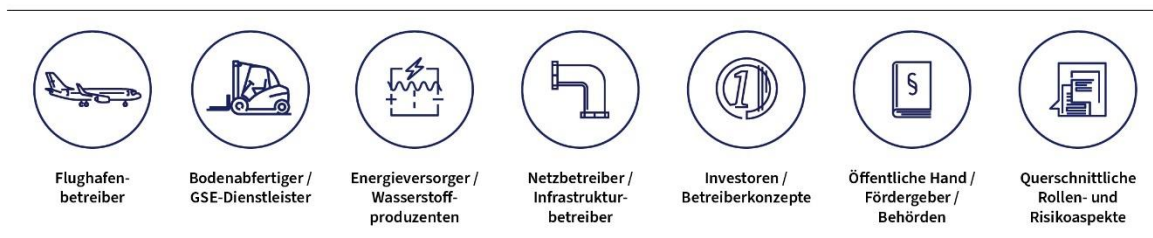


Abbildung 4 Übersicht zentraler Akteursrollen

Flughafenbetreiber:

Verantwortlich für Infrastrukturplanung, Flächenbereitstellung, Integration in den Vorfeld- und

Terminalbetrieb sowie für die Koordination von Sicherheits- und Genehmigungsprozessen. Aus ökonomischer Sicht sehen sich Flughäfen in den Interviews primär als *Ermöglicher* und Koordinatoren, nicht als Hauptinvestoren oder Wasserstoffproduzenten. Die Übernahme einer vollständigen Betreiberrolle wird nur an wenigen, sehr großen oder stark eingebetteten Standorten als realistisch eingeschätzt.

Bodenabfertiger / GSE-Dienstleister: Nutzer der H₂-Infrastruktur für die Betankung von GSE (z. B. Pushback, Schlepper, Sonderfahrzeuge) und damit zentrale Nachfrager; können Betreiber oder Mitbetreiber sein. Die Interviews zeigen jedoch, dass Bodenabfertiger Investitionsentscheidungen stark an Fahrzeugverfügbarkeit (OEMs), Betriebssicherheit und Kostenstabilität knüpfen. Ohne seriennahe H₂-GSE besteht geringe Bereitschaft, langfristige Abnahme- oder Mitbetreiberpflichtungen einzugehen.

Energieversorger / Wasserstoffproduzenten: Liefern Wasserstoff (On-site-Produktion oder Zulieferung) und gestalten das Versorgungsmodell (GH₂ oder LH₂); Schnittstelle zu Stromnetz, Elektrolyse und ggf. regionalen H₂-Clustern. In den Interviews werden Energieversorger häufig als wahrscheinliche Hauptbetreiber der Wasserstoffinfrastruktur gesehen, da sie Skaleneffekte, technisches Know-how und Risikotragfähigkeit einbringen können. Gleichzeitig entstehen Abhängigkeiten hinsichtlich Preisgestaltung, Verfügbarkeit und langfristiger Vertragsbindung.

Netzbetreiber / Infrastrukturbetreiber: Bei Pipelineanbindung oder überregionaler Versorgung verantwortlich für Transport, Druckmanagement und Sicherheitsanforderungen. Für die meisten Flughäfen wird eine direkte Pipelineanbindung kurzfristig nicht erwartet; die Rolle der Netzbetreiber bleibt daher zunächst begrenzt. Mittel- bis langfristig kann sie jedoch für die Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit an Bedeutung gewinnen.

Investoren / Betreiber: Beteiligung an Finanzierung, Bau und Betrieb (z. B. Build–Own–Operate, Service-&-Maintenance-Modelle), ggfs. über Konzessionen oder Public-Private-Partnerships. Die Interviews zeigen, dass externe Betreiber- und Investorenmodelle insbesondere dann attraktiv sind, wenn sie CAPEX-Risiken vom Flughafen entkoppeln und gleichzeitig flexible Skalierungsoptionen bieten.

Öffentliche Hand / Fördergeber / Behörden: Setzen regulatorische Rahmenbedingungen, genehmigen Infrastruktur, stellen Fördermittel bereit und schaffen Planungssicherheit. Aus Sicht der Interviewpartner kommt der öffentlichen Hand eine doppelte Rolle zu: Einerseits als Fördergeber zur Abfederung von Frühphasenrisiken, andererseits als Taktgeber durch Standardisierung, Genehmigungsleitlinien und europäische Harmonisierung.

Querschnittliche Rollen- und Risikoaspekte: Die Interviews machen deutlich, dass wirtschaftliche Unsicherheit weniger aus dem Wasserstoffpreis selbst resultiert, sondern aus ungeklärten Fragen der Haftung, Versicherbarkeit und Auslastungsrisiken. Unklare Zuständigkeiten zwischen Infrastrukturbetreiber, Fahrzeugnutzer und Flughafenbetreiber führen in der Praxis häufig zu Verzögerungen oder zur Zurückhaltung bei Investitionsentscheidungen.

Erfolgreiche Akteursmodelle zeichnen sich daher durch folgende Merkmale aus:

- klare Trennung von Betreiber- und Nutzerrollen

- transparente Risikoallokation (CAPEX, OPEX (Operational Expenditure), Nachfrage)
- vertraglich geregelte Mindestabnahmen oder flexible Exit-Optionen
- frühzeitige Einbindung von Genehmigungs- und Sicherheitsakteuren

Für die ökonomische Bewertung von Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen ist die Akteurskonstellation ein zentraler Erfolgsfaktor. Die Interviews zeigen, dass Projekte weniger an technischen oder finanziellen Einzelparametern scheitern, sondern an unklaren Rollen, Verantwortlichkeiten und Risikoübernahmen. Modelle, die Flughäfen von der Rolle des Hauptinvestors entlasten und gleichzeitig Multi-Use-Nachfrage ermöglichen, werden als besonders robust eingeschätzt.

4.2. Nachfrage-Szenarien & Lastprofile

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Wasserstoffnachfrage und Lastprofilen an Flughäfen befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Während zahlreiche Studien die Rolle von Wasserstoff in Industrie, Schwerlastverkehr oder Energieinfrastruktur analysieren, existieren bislang nur wenige Arbeiten, die sich systematisch mit der Nachfrageentwicklung an Flughäfen und der daraus resultierenden Auslegung von Infrastruktur befassen.

Für die Praxis bedeutet dies, dass Flughäfen ihre Nachfrageabschätzungen bislang überwiegend aus sektorübergreifenden Studien ableiten müssen. Belastbare, standardisierte Lastprofile für flughafenspezifische Anwendungen, insbesondere im Bodenbetrieb, liegen nur eingeschränkt vor. Dies führt dazu, dass Entscheidungsgrundlagen häufig mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, insbesondere im Hinblick auf Investitionsdimensionierung und Skalierungsentscheidungen.

Systemische Einordnung der Nachfrage

Auf übergeordneter Ebene existiert ein relativ breiter Konsens, dass Flughäfen langfristig zu Energie-Knotenpunkten werden können, in denen Strom, Wasserstoff und alternative Energieträger parallel bereitgestellt werden (World Economic Forum, 2024). Die Interviews bestätigen diese Einordnung, betonen jedoch, dass Multi-Use nicht „nice-to-have“, sondern häufig eine Mindestbedingung für wirtschaftliche Tragfähigkeit ist.

Für den Luftfahrtsektor selbst liegen erste belastbare Bedarfsabschätzungen vor. Literaturbasierte Roadmaps deuten darauf hin, dass die Nachfrage vor Verfügbarkeit wasserstoffbetriebener Flugzeuge primär bodenseitig geprägt bleibt (GSE, Busse, Logistik). Erst mit einem signifikanten Anteil LH₂-basierter Luftfahrt verschiebt sich das Lastprofil fundamental in Richtung großskaliger LH₂-Infrastruktur (Scheelhaase et al., 2024; Hoelzen et al., 2022; Krog et al., 2025). Die Interviews ordnen dies ähnlich ein, allerdings mit einer starken Betonung der externen Abhängigkeit: Solange OEMs keine marktfähigen Fahrzeuge liefern und Airlines keine belastbare Nachfrage signalisieren, bleibt die bodenseitige Nachfrage begrenzt und projektgetrieben.

Im Bereich der Bodeninfrastruktur liegt der Schwerpunkt der Forschung bisher auf wasserstoffbetriebenen Bodenabfertigungsgeräten. Einzelne empirische Arbeiten zeigen dabei deutliche Einsparpotenziale bei Emissionen und Kraftstoffverbrauch (Marques et al., 2025). Demonstrationsprojekte wie Exeter Airport (2025) oder TULIPS (TULIPS, o.J.) belegen zudem, dass GH₂-GSE grundsätzlich operational funktional sind, wenngleich Herausforderungen in den Bereichen Betankungslogik,

Sicherheitszonen und Fahrzeugverfügbarkeit bestehen bleiben. Wissenschaftlich valide Daten zu Verbrauchsprofilen, etwa Lastgängen über den Tag, saisonale Effekte oder exakte Betriebsstunden, liegen jedoch nur sehr begrenzt vor und stammen meist aus Pilotumgebungen.

Für die Auslegung von Infrastruktur und Nachfragemodellen ergibt sich daraus ein zentrales Problem: Es existieren kaum standardisierte Lastprofile, die Flughäfen nutzen könnten, um Investitionsentscheidungen zu treffen. Die meisten Studien operieren mit modellhaften Annahmen, typischen Tagesgängen oder hypothetischen Flottenzusammensetzungen. Auch die Frage, wie H₂-Nachfrage aus GSE, ÖPNV, Logistik und später Luftfahrzeugen sinnvoll gekoppelt oder entkoppelt werden kann, bleibt wissenschaftlich noch weitgehend unbeantwortet. Einige Arbeiten schlagen Multi-Use-Ansätze vor (WEF, 2024), doch fehlen bislang operationale Validierungen für Flughäfen unterschiedlicher Größe.

Die wissenschaftliche Literatur beschreibt zwar grundlegende techno-ökonomische Rahmenbedingungen, die konkrete Nachfrageentwicklung an Flughäfen aber nur punktuell beleuchtet. Besonders fehlt eine systematische Analyse der Lastprofile für unterschiedliche Flughafentypen, saisonale Betriebsmuster, GSE-Flotten oder Betankungsroutinen. Die vorliegende Studie adressiert diese Forschungslücke teilweise, indem für drei deutsche Verkehrsflughäfen standortspezifische Nachfrageabschätzungen und Lastprofile entwickelt wurden (siehe Abschnitt 6.6). Dies eröffnet erhebliches Potenzial für eigene Modellierungen und praxisorientierte Analysen im Kontext deutscher und europäischer Flughäfen.

Duale Sicht: GSE heute ↔ Flugbetrieb morgen

Wasserstoff als Energieträger hat verschiedene Anwendungsbereiche im Flughafen Betrieb.

- Ersatz von fossilen Kraftstoffen bei den Bodendiensten (Diesel/Benzin)
- Ersatz von fossilen Kraftstoffen im Flugverkehr (Jet-A1/Avgas)
- Speicherung regenerativer Stromerzeugung vor Ort (Elektrolyse/Pufferspeicher des WKN)
- Wärmeversorgung des Terminals und Liegenschaften des Flughafens. (vor allem Flughäfen, die bestehende Anbindung an das Gasnetz umnutzen könnten)

Zwischen den Anwendungen bestehen Abhängigkeiten, die sich im Zeitverlauf dynamisch entwickeln. Eine hierfür wichtige Perspektive ist die duale Betrachtung. Dabei werden Infrastruktur und Prozesse für den Einsatz von Wasserstoff sowohl in den Bodendiensten als auch im Flugbetrieb gemeinsam analysiert. Der Durchsatz von Passagieren und Fracht hängt im Wesentlichen von der zeitgerechten Bereitstellung von Flugkapazitäten durch Flugzeuge sowie deren fristgerechter Abfertigung durch Bodendienste ab. Diese Prozesse hängen unmittelbar zusammen und erfordern Energie. Abbildung 5 illustriert diese Zusammenhänge sowie die gegenseitigen Erfolgsfaktoren für die Nutzung von Wasserstoff im Bodenbetrieb heute und im Flugbetrieb ab voraussichtlich 2035.

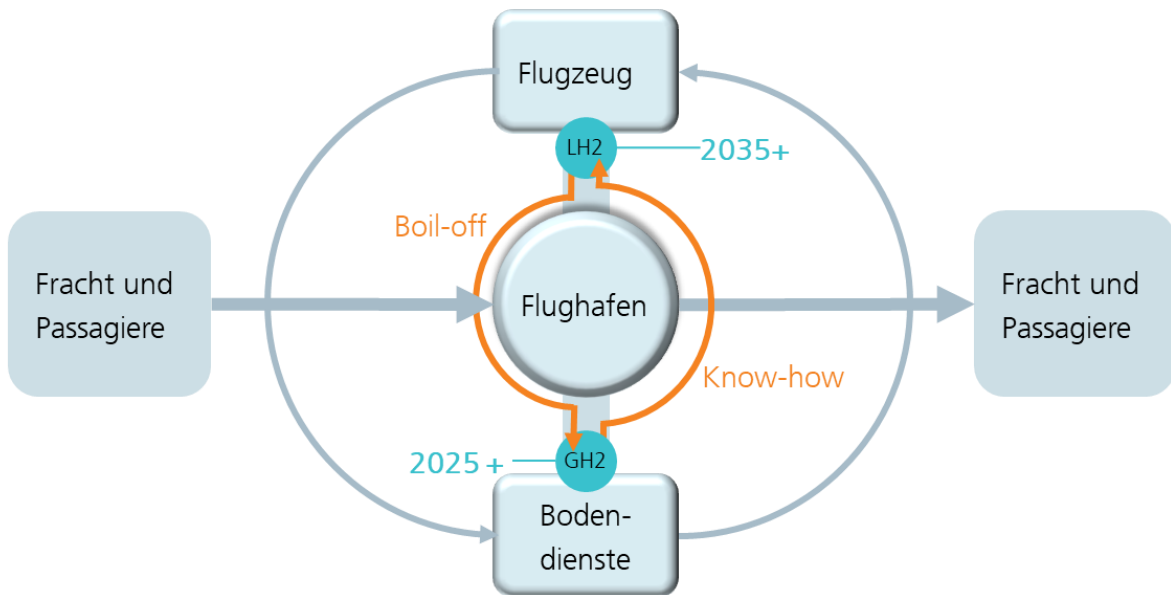


Abbildung 5 Nutzung von Wasserstoff bei Bodendiensten und Flugbetrieb

Da zunächst keine zertifizierten Wasserstoffflugzeuge auf dem Markt erhältlich sind, muss die Integration von Wasserstoff im Flughafenbetrieb zunächst bei den Bodendiensten beginnen, für die es bereits Prototypen gibt. Die Nutzung der existierenden Fahrzeuge und Geräte der Bodendienste wird jedoch vermutlich keine Nachfrage erzeugen, die die nötigen Investitionen in die Flughafeninfrastruktur rechtfertigt. Gründe hierfür sind die geringe Verfügbarkeit einsetzbarer Geräte, deren hohen Anschaffungskosten und das hohe Marktpreisniveau für gasförmigen Wasserstoff. Hinzu kommt die Verfügbarkeit batterieelektrischer Lösungen für die gleichen Fahrzeugtypen.

Bei der Einführung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen ab 2035 kann sich die Nachfrage nach Wasserstoff deutlich erhöhen. Dadurch würden sich die Einsatzfaktoren für Wasserstoff in den Bodendiensten verbessern, da der nötigen Infrastruktur nun eine höhere Nachfrage gegenübersteht. Der Zeitpunkt, an dem Flughäfen Wasserstoff im Flugbetrieb einsetzen werden, hängt jedoch auch maßgeblich vom lokalen Wissen und den verfügbaren Genehmigungen ab. Diese können durch eine frühe Nutzung von Wasserstoff gesteigert werden.

Dieser Synergieeffekt zwischen der Nutzung von Wasserstoff in den Bodendiensten und im Flugbetrieb würde sich noch einmal deutlich verstärken, sobald ab 2040 Flüssigwasserstoff eingesetzt wird. Die Vorhaltung von flüssigem Wasserstoff führt zu Boil-off-Gasen bei den Prozessen zur Lagerung, zum Transport und zur Betankung innerhalb des Flughafens. Der hierbei entstehende gasförmige Wasserstoff kann wie folgt gehandhabt werden:

- Entlassen in die Atmosphäre (Perching) – mit wirtschaftlichen Verlusten und negativen Klimaeffekten verbunden
- Rückverflüssigung – mit hohen Energiekosten
- Nutzung in Fahrzeugen und Geräten der
- Bodendienste (ggf. Aufreinigung nötig)

Eine zusätzliche Beschleunigung der Nachfrage nach Wasserstoff könnte zudem durch die Einbindung flughafenexterner Nutzergruppen erfolgen.

Nachfragefaktoren am Flughafen

Die Wasserstoffnachfrage an Flughäfen entsteht nicht aus einem homogenen Bedarf, sondern aus standortspezifischen Faktoren. Diese betreffen sowohl die operative Struktur des Flughafens als auch die Einbindung in regionale Energiesysteme. Der wissenschaftliche Stand zeigt, dass Flughäfen nur dann eine relevante Rolle im Wasserstoffsystem spielen können, wenn mehrere nachfrageseitige Treiber gleichzeitig wirken und sich gegenseitig verstärken (World Economic Forum, 2024; Oesingmann et al., 2024) Aus Literatur und Interviews lassen sich folgende nachfrageseitige Haupttreiber identifizieren:

- **Bodenbetrieb (GSE):** Umfang, Zusammensetzung und Einsatzprofile der GSE-Flotte; insbesondere Heavy-Duty-Fahrzeuge und Sonderanwendungen.
- **Landseitigem -Verkehr:** Busse, Shuttleflotten und schwere Logistikfahrzeuge mit hohen Einsatzgraden und planbaren Routen.
- **Saisonale Effekte:** Winterdienst und wetterbedingte Spitzen mit hohem Energiebedarf.
- **Feuerwehr- und Spezialfahrzeuge:** Hohe Leistungsanforderungen, geringe Elektrifizierbarkeit.
- **Regionale Co-Nachfrage:** Industrie, Logistik, ÖPNV als Ankerlast für Grundauslastung.
- **Langfristige Luftfahrtentwicklung:** Potenzielle Einführung LH₂-basierter Flugzeuge.

Die Interviews zeigen, dass Wasserstoff insbesondere dort in Betracht gezogen wird, wo batterieelektrische Lösungen an technische oder betriebliche Grenzen stoßen. Leichte GSE mit klaren Lade-fenstern werden dagegen überwiegend als Domäne der Elektrifizierung gesehen.

Lastprofile als Entscheidungsszenarien

Lastprofile sollten im Kontext dieser Studie nicht als Prognosen, sondern als Entscheidungsszenarien verstanden werden, die Flughäfen bei der Bewertung von Infrastruktur- und Investitionsoptionen unterstützen.

1. Selektiver Bodenbetrieb (GH₂):
 - a. Geringe bis moderate Nachfrage aus wenigen definierten Use Cases (z. B. Winterdienst, Heavy-Duty-GSE); hohe Lernwirkung, begrenzte Volumina.
2. Multi-Use-Szenario:
 - a. Kombination aus GSE, ÖPNV, Logistik und ggf. kommunalen Flotten; höhere Grundlast, gleichmäßigere Tagesprofile, bessere Auslastung der Infrastruktur.
3. Saisonales Hochlast-Szenario:
 - a. Stark schwankende Nachfrage mit ausgeprägten Winter-Peaks; Herausforderung bei Dimensionierung zwischen Peak- und Jahresauslastung.
4. LH₂-Aviation-Szenario (langfristig):
 - a. Hohe, stark zeitlich gebündelte Nachfrage durch Flugzeugbetankung; hohe CAPEX, hohe Komplexität; realistisch nur für große Drehkreuze.

Die Interviews zeigen, dass insbesondere Szenarien (1) und (2) als realistische Einstiegspfade betrachtet werden, während Szenario (4) derzeit primär eine strategische Planungsoption darstellt.

Für die ökonomische Bewertung von Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen ist die Nachfrageentwicklung durch hohe Unsicherheit und starke Standortabhängigkeit geprägt. Belastbare Entscheidungen lassen sich daher weniger auf Basis exakter Mengenprognosen treffen als durch die Bewertung robuster Szenarien. Multi-Use-Nachfrage, selektive Anwendung und modulare Skalierung erhöhen die Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich tragfähiger Lösungen deutlich.

Insgesamt zeigt sich, dass die Wasserstoffnachfrage am Flughafen nicht durch einen einzelnen Faktor bestimmt wird, sondern aus einer Vielzahl miteinander interagierender Treiber entsteht. Für viele Flughäfen ergibt sich dadurch ein heterogenes Bild, in dem Wasserstoff nur unter bestimmten Bedingungen sinnvoll erscheint: insbesondere bei hoher bodenseitiger Nachfrage, starker regionaler Co-Nachfrage, eingeschränkter Stromnetzverfügbarkeit oder klarer langfristiger Perspektive auf LH₂-basierte Luftfahrt. Diese Komplexität unterstreicht die Notwendigkeit, Lastprofile und Nachfrageentwicklung für jeden Standort individuell zu modellieren.

Lastprofile: Szenarien für wasserstoffbasierte Flughafen- und Regionalanwendungen

Die Lastprofile eines wasserstofffähigen Flughafens unterscheiden sich deutlich je nach Anwendungsfall und Standortlogik. Im **Basisszenario**, das ausschließlich bodenseitige Anwendungen umfasst, entsteht ein relativ stabiles, aber insgesamt begrenztes Nachfragevolumen. Studien legen nahe, dass in frühen Übergangsphasen vor allem GH₂-basierte GSE-Flotten die initiale Nachfrage prägen, wobei typische Peaks während der operativen Wellen zum Beispiel am Morgen und Mittag auftreten (Marques et al., 2025; Oesingmann et al., 2024). Diese Nachfrage könnte ausreichen, um eine kleine modulare GH₂-Tankanlage wirtschaftlich zu betreiben, sofern eine Mindestflottenstärke und ausreichende Umläufe vorliegen.

Im **Multi-Use-Szenario** steigt die Nachfrage sowohl in Menge als auch in Gleichmäßigkeit. Landseitige Anwendungen wie ÖPNV-Busse, Shuttleflotten und regionale Logistikfahrzeuge erzeugen eine deutlich höhere Grundlast, die nahezu über den gesamten Tagesverlauf stabil bleibt. Dies reduziert die Volatilität der Nachfrage und erhöht die Auslastung der Infrastruktur. Die Literatur betont, dass insbesondere Flughäfen in oder nahe industrieller Cluster oder Logistikregionen erheblich von solchen Synergien profitieren können (World Economic Forum, 2024; NOW GmbH, 2022).

Das **Winter-High-Demand-Szenario** repräsentiert ein Profil mit ausgeprägten saisonalen Schwankungen. An Flughäfen mit starken Winterbedingungen steigt der Energiebedarf für Schneeräumung, Enteisung und schwere Einsatztechnik erheblich. Diese Fahrzeuge weisen häufig hohe Leistungsanforderungen und lange Einsatzzeiten auf, wodurch GH₂ oder, in einzelnen Fällen, sogar LH₂-Varianten technisch vorteilhaft erscheinen. Saisonale Spitzen führen jedoch dazu, dass die Auslegung der Infrastruktur für wenige kritische Wochen im Jahr erfolgen muss, was die wirtschaftliche Bewertung komplexer macht.

Das langfristige **LH₂-Aviation-Szenario** stellt das anspruchsvollste und kapazitätsintensivste Lastprofil dar. Sobald flüssigwasserstoffbetriebene Verkehrsflugzeuge eingeführt werden, erhöht sich der Energiebedarf drastisch. Der Lastverlauf wird dann hauptsächlich durch Betankungsfenster der Luftfahrzeuge bestimmt, die typischerweise vor den Off-Block-Zeiten stattfinden. Dies erzeugt nicht nur hohe Peaks, sondern erfordert auch umfangreiche LH₂-Speicher, redundante Sicherheitssysteme und ein robustes Boil-off-Management (Hoelzen et al., 2022; Krog et al., 2025). Solche Infrastrukturen sind im europäischen Kontext realistisch nur an großen Drehkreuzen zu erwarten, da

kleinere Flughäfen weder den Flugbetrieb noch die Nachfragevolumina zur Rechtfertigung der hohen Investitionen haben (Aussage unter Vorbehalt, Verweis auf M4).

Insgesamt zeigen die vier Szenarien, dass Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen nicht als „one size fits all“-Lösung betrachtet werden kann. Vielmehr hängt die sinnvolle Ausgestaltung von der Flottenzusammensetzung, saisonalen Anforderungen, regionalen Partnerschaften und der langfristigen Rolle des Flughafens in der Luftfahrtentwicklung ab.

4.3. Kosten- und Wirtschaftlichkeitstreiber

Die Einführung von Wasserstoffinfrastruktur an Verkehrsflughäfen ist geprägt von hohen Investitionskosten (CAPEX) sowie relevanten laufenden Betriebskosten (OPEX). Entscheidend für die wirtschaftliche Tragfähigkeit sind darüber hinaus Skaleneffekte, Auslastung sowie Synergien mit weiteren Nutzergruppen oder Infrastrukturen. Die Interviews zeigen übereinstimmend, dass wirtschaftliche Entscheidungen weniger an einzelnen Kostenziffern scheitern, sondern an Unsicherheiten bezüglich Auslastung, Nachfrageentwicklung, Betreiberverantwortung und langfristiger Flexibilität. Kosten müssen daher stets im Zusammenhang mit Risiko und Steuerbarkeit betrachtet werden.

Investitionskosten (CAPEX)

Die Investitionskosten für Wasserstoffinfrastruktur am Flughafen umfassen insbesondere Erzeugungs- bzw. Einspeiseanlagen, Speicher- und Betankungssysteme, Sicherheits- und Überwachungstechnik sowie flughafenspezifische Integrationskosten (Flächen, Sicherheitszonen, Betriebseinbindung).

Laut der Studie „Analysing the costs of hydrogen aircraft“ wurden allein für Flughafeninfrastrukturkosten im Zeitraum 2025–2050 rund € 37 Mrd. für die 100 größten europäischen Flughäfen veranschlagt (Steer, 2023). Der „Hydrogen Infrastructure Report“ von Hydrogen Europe (2024) weist zudem auf einen sogenannten „CAPEX-Bias“ hin, wonach Infrastrukturplanungen häufig kapitalintensive Lösungen bevorzugen, da laufende Betriebskosten regulatorisch weniger stark adressiert werden.

Die Interviews bestätigen diese Einschätzung aus der Praxis: Großskalige, stationäre Infrastrukturen werden als wirtschaftlich besonders risikobehaftet wahrgenommen, solange Nachfrage, Nutzung und regulatorische Rahmenbedingungen nicht ausreichend abgesichert sind.

Beispielhafte Richtwerte aus der Literatur nennen für Elektrolyseanlagen CAPEX von ca. 1.666 €/kW (alkalisch) bzw. 1.970 €/kW (PEM) (European Hydrogen Observatory, 2024). Für den Flughafen-Kontext sind darüber hinaus insbesondere Tank- und Lagerkosten (z. B. LH₂-Kryotanks), Verteilinfrastruktur (Bowser, Trailer, perspektivisch Pipelines) sowie flughafenspezifische Flächen- und Sicherheitsanforderungen relevant.

Aus ökonomischer Sicht wird in den Interviews daher ein klarer Fokus auf modulare, skalierbare und rückbaubare CAPEX-Strukturen gelegt. Mobile GH₂-Lösungen werden als typische Einstiegstechnologien bewertet, während LH₂-Infrastruktur erst bei klarer, langfristig gesicherter Nachfrage als vertretbar gilt.

Betriebskosten (OPEX)

OPEX umfassen Wartung, Energieverbrauch (z. B. Kompressoren, Verdampfer bei LH₂), Personal, Sicherheits- und Überwachungsaufwand, Versicherungen sowie ggf. Leasing- oder Servicekosten.

Die TUHH/Steer-Analyse zum Wasserstoffflugzeug-Szenario zeigt, dass OPEX im Betrachtungszeitraum einen erheblichen Kostenanteil darstellen und zusammen mit CAPEX zu levelisierten Gesamtkosten von ca. 3,90 €/kg H₂ (2035) bzw. 3,45 €/kg H₂ (2050) führen können. (Steer, 2023)

Die Interviews relativieren jedoch die Aussagekraft solcher aggregierten €/kg-Werte für frühe Flughafenwendungen. In der Praxis wird weniger der absolute Preis, sondern die Planbarkeit und Stabilität der OPEX als entscheidend für Investitionsentscheidungen genannt.

Eine Machbarkeitsstudie für den Flughafen Groningen zeigt zudem deutliche Unterschiede in den Transportkosten: GH₂-Pipelines ca. 0,12 €/kg gegenüber GH₂-Lkw ca. 0,64 €/kg über 50 km Distanz. (Groningen Airport Eelde, 2025)

Diese Befunde verdeutlichen, dass Logistik- und Versorgungsmodelle einen erheblichen Einfluss auf die OPEX-Struktur haben. In frühen Phasen werden höhere OPEX durch Trailerlogistik jedoch häufig bewusst in Kauf genommen, um CAPEX- und Lock-in-Risiken zu reduzieren.

Skaleneffekte und zentrale Wirtschaftlichkeitstreiber

Wirtschaftliche Effekte zeigen sich besonders dann, wenn die Infrastruktur mit hoher Auslastung betrieben wird, mehrere Nutzer integriert sind oder Systemkomponenten mehrfach genutzt werden. So heißt es im Hydrogen Europe Report, dass durch größere Systeme („economies of scale“) und Auslastung der spezifische €/kg H₂-Wert gesenkt werden kann. (Hydrogen Europe, 2024) Die ZEFI-Studie („Zero Emission Flight Infrastructure“) stellt dar, dass für Flughäfen fünf Archetypen modelliert wurden und zeigt, wie Kosten je nach Flughafengröße, Betankungsvolumen und Technikwahl variieren (Catapult, 2023). Ein wesentlicher Treiber ist also: Je früher und je dichter Netz, Produktion, Speicher und Abnehmer verknüpft sind, desto geringer werden die Stückkosten. Umgekehrt führen geringe Volumina, Insellösungen oder niedrige Auslastung zu höheren €/kg-Kosten, längeren Amortisationszeiten und größerem Risiko.

Die Interviews bestätigen diesen Zusammenhang, betonen jedoch, dass Skaleneffekte am Flughafen selten allein durch den Luftfahrtbetrieb entstehen. Wirtschaftlichkeit ergibt sich primär durch regionale Kopplung mit Logistik, ÖPNV oder Industrie.

Zentrale Einflussfaktoren auf die Kostenstruktur:

- Technologiereife: Standardisierung senkt CAPEX und OPEX
- Infrastrukturwahl: Pipeline vs. Trailer, GH₂ vs. LH₂
- Flächen- und Sicherheitsanforderungen: Flughafenspezifische Aufschläge
- Auslastung & Nutzeranzahl: Multi-Use als Kostensenker
- Energiepreise: Stromkosten als dominanter OPEX-Treiber
- Regulatorik & Förderung: Einfluss auf Investitionsrisiken
- Logistikdistanzen: Starker Hebel auf OPEX

Aus ökonomischer Sicht wirken diese Faktoren nicht isoliert, sondern in Kombination. Fehlende Auslastung verstärkt CAPEX-Risiken, während regulatorische Unsicherheit die effektiven Kosten erhöht, selbst wenn technische Lösungen verfügbar sind.

Implikationen für Flughäfen

- Einstieg über kleine, modulare GH₂-Systeme reduziert CAPEX-Risiken und ermöglicht Lernkurven.
- LH₂-Infrastruktur ist aufgrund hoher CAPEX und Sicherheitsanforderungen erst bei gesicherter Nachfrage wirtschaftlich vertretbar.
- Multi-Use-Ansätze (Busse, Logistik, Industrie) sind der wichtigste Hebel zur Senkung spezifischer Kosten.
- Wirtschaftliche Bewertung sollte szenario- und sensitivitätsbasiert erfolgen (z. B. Strompreis, Nachfragevolumen, Auslastung).
- Flexibilität und Rückbaubarkeit werden selbst zu ökonomischen Vorteilen, da sie Lock-in-Risiken minimieren.

Für die wirtschaftliche Bewertung von Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen sind nicht einzelne Kostenkennzahlen ausschlaggebend, sondern die Fähigkeit, Investitions- und Betriebsrisiken zu steuern. Modularität, Multi-Use-Nachfrage und flexible Betreiber- und Vertragsmodelle erhöhen die Robustheit wirtschaftlicher Entscheidungen deutlich. Diese Logik bildet die Grundlage für die Betrachtung regionaler H₂-Hubs und Businessmodelle in den folgenden Abschnitten.

4.4. Regionale H₂-Hubs & Sharing-Modelle (Hub-&-Spoke, Multi-Use-Stationen)

Die Entwicklung regionaler Wasserstoff-Hubs gilt als zentraler Baustein für den Markthochlauf wasserstoffbasierter Mobilitäts- und Industriesysteme in Deutschland und Europa. Flughäfen werden in diesem Kontext zunehmend als potenzielle Knotenpunkte betrachtet, die aufgrund ihrer Lage, Infrastruktur und logistischen Bedeutung eine Rolle innerhalb regionaler Wasserstoffsysteme einnehmen können (World Economic Forum, 2024). Allerdings zeigt die Forschungslage, dass diese Einbindung stark von lokalen Rahmenparametern wie industrieller Co-Nachfrage, Netzanschlüssen, Flächensituation und politischen Prioritäten abhängt (NOW GmbH, 2022; DIHK, 2020).

Die Interviews bestätigen diese grundsätzliche Einordnung, machen jedoch deutlich, dass Flughäfen nur unter bestimmten Bedingungen eine aktive Hub-Rolle übernehmen können. In den meisten Fällen werden sie nicht als primäre Nachfrageanker, sondern als *Mitnutzer* oder *integrierte Verbraucher* innerhalb regionaler Wasserstoffsysteme gesehen.

Hub-Logik: wirtschaftliche Voraussetzung statt strategischer Option

Der Atlas der Wasserstoffnetzwerke der NOW GmbH zeigt, dass sich in Deutschland zahlreiche regionale H₂-Cluster herausbilden, die überwiegend von industriellen Anwendungen, Schwerlastverkehrskorridoren und Energieversorgern geprägt sind (NOW GmbH, 2022). Die Interviews unterstreichen, dass Flughäfen ohne Einbettung in solche regionalen Cluster wirtschaftlich kaum in der Lage sind, eigenständige Wasserstoffinfrastrukturen zu tragen. Reine Flughafenlösungen werden überwiegend als kostenintensiv und unterausgelastet eingeschätzt. Gleichzeitig können Flughäfen in

bestehenden oder entstehenden Clustern eine ergänzende Rolle übernehmen, insbesondere wenn landseitige Anwendungen wie ÖPNV-Busse, Logistik- oder kommunale Flotten bereits Teil regionaler H₂-Strategien sind. Die dadurch entstehende Co-Nachfrage verbessert die Auslastung gemeinsamer Infrastrukturen und erhöht die Wirtschaftlichkeit gegenüber isolierten Lösungen. In den Interviews wird diese Co-Nachfrage nicht als Zusatznutzen, sondern als zentrale wirtschaftliche Voraussetzung beschrieben. Ohne stabile Grundlast aus Logistik, ÖPNV oder Industrie lassen sich weder CAPEX noch OPEX langfristig tragen.

Hub-&-Spoke-Modelle

In Hub-&-Spoke-Systemen wird Wasserstoff an einem zentralen Standort erzeugt, gespeichert oder aufbereitet und anschließend zu verschiedenen Verbrauchsstellen transportiert. Die Interviews zeigen, dass dieses Modell insbesondere für kleine und mittlere Flughäfen als realistisch eingeschätzt wird. Der Flughafen fungiert dabei als „Spoke“, während Produktion und ggfs. großskalige Speicherung außerhalb des Flughafengeländes liegen.

Diese Struktur reduziert die Notwendigkeit flughafeneigener Großinvestitionen, erhöht jedoch die Abhängigkeit von regionalen Versorgern und Transportlogistik. Studien wie die Machbarkeitsanalyse für Groningen Airport Eelde zeigen, dass durch Hub-&-Spoke-Ansätze wirtschaftliche Synergien erzielt werden können, die rein standortbezogen nicht erreichbar wären (Stolwijk & Rooze, 2025). Aus ökonomischer Sicht werden Hub-&-Spoke-Modelle als besonders robust bewertet, da sie Skaleneffekte ermöglichen und Investitionsrisiken auf mehrere Akteure verteilen.

Multi-Use-Stationen

Multi-Use-Stationen bedienen mehrere Nutzergruppen gleichzeitig, etwa GSE, Flughafen- und ÖPNV-Busse, Logistikfahrzeuge oder kommunale Flotten. Die Interviews identifizieren Multi-Use-Stationen als den wirtschaftlich attraktivsten Ansatz für frühe Anwendungen. Sie ermöglichen höhere Grundlasten, gleichmäßigere Tagesprofile und damit bessere Auslastung von Kompressoren, Speichern und Dispensern.

Der Vorteil liegt in der Reduktion spezifischer Kosten pro Kilogramm Wasserstoff sowie in einer besseren Absicherung gegen Nachfrageschwankungen einzelner Nutzergruppen. Gleichzeitig wird betont, dass Multi-Use-Modelle erhöhte Anforderungen an Governance, Sicherheitsmanagement und betriebliche Koordination stellen, da unterschiedliche Akteure mit divergierenden Betriebslogiken eingebunden werden müssen.

Pipeline-Anbindung und H₂-Kernnetz (Verweis auf Kapitel 5)

Mit dem geplanten europäischen Wasserstoff-Kernnetz, das ab Anfang der 2030er-Jahre sukzessive aufgebaut werden soll, werden sich neue Möglichkeiten für den Flughafenbetrieb ergeben. Flughäfen mit potenzieller Pipeline-Anbindung könnten langfristig stark sinkende OPEX durch niedrigere Transportkosten, höhere Versorgungssicherheit und geringere Abhängigkeit von Trailerlogistik realisieren (DIHK, 2020). Allerdings werden Pipelineanschlüsse voraussichtlich primär für großindustrielle Cluster priorisiert, sodass viele Flughäfen realistischerweise erst spät oder indirekt profitieren. Diese Entwicklung verschärft die Bedeutung regionaler Kooperationen, da Flughäfen andernfalls den Wettbewerb mit Industrie, Chemie und Schwerverkehr um knappe Wasserstoffmengen verlieren könnten (Oesingmann et al., 2024).

Die Interviews relativieren zudem die kurzfristige Relevanz von Pipeline-Anbindungen für Flughäfen. Diese werden voraussichtlich primär industriegetrieben ausgebaut, während Flughäfen häufig nachrangig angebunden werden.

Für viele Standorte bleibt die Anbindung an regionale Hubs oder die Belieferung per Trailer mittelfristig die realistischere Option. Dies verstärkt die Bedeutung regionaler Kooperationen, da Flughäfen andernfalls im Wettbewerb mit Industrie und Schwerkverkehr um begrenzte Wasserstoffmengen stehen.

Regionale H₂-Hubs und Sharing-Modelle sind kein optionales Zusatzkonzept, sondern eine ökonomische Voraussetzung für den Einsatz von Wasserstoff an Flughäfen. Die Interviews zeigen klar, dass „Airport-Only-Lösungen“ in der Regel weder wirtschaftlich noch robust sind. Erfolgreiche Modelle basieren auf regionaler Co-Nachfrage, klarer Rollenverteilung und einer Einbettung in bestehende oder geplante Wasserstoffcluster. Flughäfen übernehmen dabei überwiegend die Rolle eines integrierten Nutzers und Ermöglichers – nicht die eines alleinigen Infrastrukturtreibers.

4.5. Betreiber- und Businessmodelle für H₂-Infrastruktur an Flughäfen

Die Wahl eines geeigneten Betreiber- und Businessmodells für Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen hängt in starkem Maße von den standortspezifischen Rahmenbedingungen ab. Es gibt keinen universellen Ansatz, der für alle Flughäfen gleichermaßen sinnvoll ist, da Nachfragevolumen, Flächenverfügbarkeit, regionale H₂-Cluster, Kapitalzugang und langfristige Luftfahrtstrategien stark variieren (Scheelhaase et al., 2024; World Economic Forum, 2024). Die Interviews bestätigen diese Einschätzung ausdrücklich und zeigen, dass wirtschaftliche Tragfähigkeit weniger von der Wahl eines „optimalen“ Modells als von der Passfähigkeit zwischen Nachfrage, Risikoallokation und organisatorischer Kompetenz abhängt. Die Literatur weist zudem darauf hin, dass Flughäfen im Wettbewerb mit Industrie, Logistik und kommunalen Akteuren um Wasserstoff und Infrastrukturkapazitäten stehen (DIHK, 2020). Vor diesem Hintergrund müssen Betreiber- und Geschäftsmodelle insbesondere das Auslastungs-, Investitions- und Haftungsrisiko adressieren.

(1) Airport-Owned Model (Flughafen als Betreiber)

In diesem Modell investiert und betreibt der Flughafen die Wasserstoffinfrastruktur selbst. Dies erfordert hohe CAPEX für Kompression, Lagerung, Dispenser, Sicherheitsanlagen und ggf. LH₂-Infrastruktur sowie signifikante OPEX für Wartung, Energie und Betrieb. Die Literatur zeigt, dass dieses Modell nur für Flughäfen sinnvoll ist, die entweder eine hohe und stabile Grundlast (Multi-Use-Anwendungen oder Cargo-Hubs) oder langfristige Perspektiven für wasserstoffbetriebene Luftfahrzeuge haben (Hoelzen et al., 2022). Die Interviews zeigen, dass dieses Modell nur an wenigen Standorten als realistisch eingeschätzt wird, insbesondere dort, wo bereits eine hohe und stabile Grundlast besteht (z. B. große Cargo-Hubs oder Standorte mit Multi-Use-Nachfrage).

Vorteile	Nachteile
Hohe Kontrolle über Betrieb, Sicherheit und Airside-Prozesse	Hohe Kapitalbindung und Unterauslastungsrisiken

Integration in bestehende Energie- und Nachhaltigkeitsstrategien des Flughafens	Volle regulatorische und haftungsrechtliche Verantwortung
Potenzielle Zusatzerlöse durch Drittvermarktung	Langfristiger Lock-in bei unsicherer Nachfrageentwicklung

Insgesamt wird dieses Modell in den Interviews als strategisch ambitioniert, aber ökonomisch risikobehaftet bewertet.

(2) Utility-Owned Model (Energieversorger baut & betreibt)

Hier übernimmt ein Energieversorger oder industrieller H₂-Anbieter Planung, Bau und Betrieb der Infrastruktur. Der Flughafen agiert als Standortpartner und Abnehmer. Dieses Modell wird in mehreren europäischen Studien als wahrscheinlichstes Szenario für kleine und mittlere Flughäfen benannt, da Energieunternehmen über Skaleneffekte, Know-how und starke Bilanzstrukturen verfügen (World Economic Forum, 2024). Dieses Modell wird in den Interviews als das wahrscheinlichste Szenario für kleine und mittlere Flughäfen beschrieben, da es CAPEX-Risiken vom Flughafen entkoppelt und bestehendes Versorger-Know-how nutzt.

Vorteile	Nachteile
Geringe Investitionslast für den Flughafen	Begrenzte Preis- und Gestaltungshoheit des Flughafens
Professionalisierter Betrieb und Risikomanagement	Abhängigkeit von Geschäftsstrategien des Versorgers
Gute Einbettung in regionale H ₂ -Systeme	Erhöhter Koordinationsbedarf im Airside-Kontext

(3) Joint-Venture-Modelle (Airport + Utility + ggfs. Industrie/OEM)

Joint-Venture-Modelle verbinden die Ressourcen und Fähigkeiten mehrerer Akteure. Dazu gehören Flughäfen, Versorger, Logistikunternehmen oder Hersteller. In Machbarkeitsstudien, etwa am Groningen Airport Eelde, zeigt sich, dass JV-Modelle insbesondere bei mittleren Flughäfen attraktiv sind, die weder eine klare Alleinbetreiberrolle ausfüllen können noch vollständig extern betreut werden sollten (Stolwijk, 2025). Die Interviews bewerteten JV-Modelle als besonders geeignet für mittlere Flughäfen, die einerseits Einfluss auf Infrastruktur und Betrieb behalten wollen, andererseits jedoch nicht allein investieren können oder wollen.

Vorteile	Nachteile
Geteilte Risiken und Investitionen	Hoher Koordinations- und Abstimmungsaufwand
Höhere Auslastung durch gemeinsame Nutzung	Komplexe Governance- und Vertragsstrukturen
Kombination unterschiedlicher Kompetenzen	Sensitiv gegenüber Nachfrageunsicherheiten

(4) H₂-as-a-Service (H₂aaS) / Pay-per-Use

Ein zunehmend diskutiertes Modell ist „Hydrogen-as-a-Service“. Bei diesem Modell beziehen Flughäfen Wasserstoff inklusive Infrastruktur als Dienstleistung. Anlagen bleiben im Eigentum des Dienstleisters. Flughäfen kaufen Wasserstoff inklusive Infrastruktur, d. h. Trailer, mobile Speicher, Dispenser oder modulare Containerlösungen werden von einem Dienstleister bereitgestellt. Dieses Modell reduziert die Kapitalbindung und ermöglicht flexible Skalierung, wird aber meist mit höheren OPEX erkaufte. Die Interviews identifizieren H₂aaS als besonders geeigneten Einstiegspfad für Pilot- und Demonstrationsphasen, da CAPEX vollständig vermieden und Skalierung flexibel gestaltet werden kann.

Vorteile	Nachteile
Sehr geringe Einstiegshürden	Höhere laufende Kosten
Hohe Flexibilität und Rückbaubarkeit	Abhängigkeit vom Anbieter
Geeignet für frühe Lernphasen	Begrenzte Skalierbarkeit bei hohen Volumina

(5) Mobile und temporäre Lösungen

Diese Lösungen basieren auf Trailern, mobilen 350/700-bar-Dispensern oder kleineren GH₂-Speichermodulen. Sie werden heute bereits bei mehreren H₂-GSE-Demonstratoren (z. B. Exeter, TULIPS) eingesetzt. Die Interviews sehen mobile Lösungen als klassische No-Regret-Option für frühe Anwendungen, insbesondere bei unsicherer Nachfrage oder begrenzter Flächenverfügbarkeit.

Vorteile	Nachteile
Schnelle Umsetzung	Begrenzte Kapazitäten
Geringe technische Komplexität	Nicht geeignet für LH ₂ oder hohe Peaks
Hohe Flexibilität	Integration in Airside-Sicherheitslogiken teils anspruchsvoll

(6) Build-Own-Operate / PPP-Modelle

BOO- und PPP-Modelle werden in den Interviews als potenziell geeignet für größere Infrastrukturprojekte beschrieben, insbesondere wenn öffentliche Akteure eine koordinierende oder absichernde Rolle übernehmen. Voraussetzung sind jedoch klare Risiko- und Erlösregelungen sowie langfristige Nachfrageperspektiven.

Kritische Erfolgsfaktoren (querschnittlich)

- Auslastung & Nachfrage: Geschäftsmodell nur tragfähig, wenn genügend Nachfrage vorhanden ist (z. B. GSE-Flotte, Busse, Flughafenbetrieb) – geringe Auslastung erhöht Kosten pro kg.
 - Klare Rollen & Risikoallokation: Wer übernimmt welchen Teil (Investition, Betrieb, Wartung, Sicherheit, Versorgungsausfall)? Vertragsmodelle müssen Risikoverteilungsregeln.
 - Flexibilität & Skalierbarkeit: Infrastruktur sollte mitwachsen können – Start mit GSE, später Erweiterung für Flugzeugbetankung.
-

-
- Synergien mit umliegender Nachfrage: Einbindung ÖPNV, Logistik, Industrie verringert spezifische Flughafenkostenanteile.
-
- Förderung & Regulatorik: Staatliche Förderinstrumente und klare regulatorische Rahmenbedingungen senken Investitionsrisiken. Studien weisen aus, dass Infrastruktur in frühen Phasen ohne Unterstützung beklagenswert ist.⁷⁷
-
- Kostenstruktur & Betriebskostenkenntnis: Verlässlichkeit bei H₂-Lieferung, Wartung, Sicherheit erhöht Wirtschaftlichkeit.
-

Die Interviews zeigen, dass Betreiber- und Businessmodelle für Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen nicht isoliert betrachtet werden können. Wirtschaftlich robuste Lösungen zeichnen sich durch flexible Einstiegswege, geteilte Risiken und regionale Einbettung aus. Modelle mit hoher Kapitalbindung und geringer Anpassungsfähigkeit werden dagegen als besonders risikobehaftet eingeschätzt. Die Wahl des Businessmodells ist daher eine zentrale strategische Entscheidung und eng mit Nachfrageentwicklung, Governance und Förderlogik verknüpft.

4.6. Förder-, Finanzierungs- und Vertragsmodelle

Die Finanzierung von Wasserstoffinfrastruktur zählt zu den zentralen Herausforderungen im frühen Markthochlauf, insbesondere für Flughäfen, die als „sekundäre Nachfragezentren“ hinter Industrie und Schwerlastverkehr priorisiert werden. Der Aufbau von GH₂- und insbesondere LH₂-Infrastruktur erfordert hohe Investitionen, lange Amortisationszeiten und ist in frühen Phasen durch geringe Nachfragevolumina geprägt. Daher spielen staatliche Förderinstrumente und risikoentlastende Vertragsmodelle eine entscheidende Rolle, um technologische Pfade überhaupt wirtschaftlich darzustellen (BMWK, 2025; European Commission, 2024).

Die Interviews zeigen, dass Förder- und Finanzierungsinstrumente weniger als dauerhafte Subventionen verstanden werden, sondern primär als Brückenmechanismen, um frühe Investitions- und Marktrisiken abzufedern. Insbesondere Flughäfen werden dabei häufig als nachrangige Nachfragezentren hinter Industrie und Schwerlastverkehr eingeordnet, was den Zugang zu Wasserstoff und Fördermitteln zusätzlich erschwert.

Investitionsförderung (CAPEX-Förderung)

In Deutschland und Europa gehören CAPEX-Förderprogramme zu den wichtigsten Instrumenten, um den Aufbau erster H₂-Stationen, Trailerentladestellen, GH₂-Kompression oder LH₂-Tankssysteme abzufedern. Dazu zählen Programme wie IPCEI Wasserstoff (BMWK, o.J.) die EU Innovation Fund Grants oder nationale Programme über die NOW GmbH, die den Aufbau von Tank- und Speichertechnologien unterstützen könnten. Diese Programme eignen sich insbesondere für Flughäfen, da sie in frühen Phasen die größten Hürden, wie z. B. hohe Anfangsinvestitionen bei gleichzeitig unsicheren Nachfrageverläufen, strukturell abfedern.

Allerdings sind CAPEX-Förderungen kein Garant für langfristige Wirtschaftlichkeit. Mehrere Analysen zeigen, dass niedrige Anfangsinvestitionen zwar den Markteinstieg erleichtern, langfristige OPEX jedoch entscheidend bestimmen, ob der Betrieb nachhaltig tragfähig ist (DIHK, 2020). Dies gilt besonders dann, wenn Wasserstoff weiterhin per Trailer angeliefert wird oder hohe Energieaufwände für Kompression und Kühlung entstehen.

Die Interviews bestätigen die hohe Relevanz von CAPEX-Förderungen für Flughäfen, insbesondere in frühen Projektphasen. Ohne eine signifikante Reduktion der Anfangsinvestitionen werden viele Projekte als wirtschaftlich nicht darstellbar eingeschätzt.

CAPEX-Förderungen eignen sich besonders für:

- Aufbau erster GH₂-Stationen
- Mobile oder modulare Infrastruktur
- Demonstrations- und Pilotprojekte

Gleichzeitig wird in den Interviews kritisch angemerkt, dass reine Investitionsförderung ohne begleitende Maßnahmen zur Nachfragesicherung oder OPEX-Stabilisierung häufig nicht ausreicht, um einen nachhaltigen Betrieb zu gewährleisten.

OPEX-Förderung und marktnahe Preisstabilisierungsinstrumente

Zur Abfederung laufender Kosten gewinnen OPEX-bezogene Instrumente zunehmend an Bedeutung. Dazu zählen insbesondere:

- Carbon Contracts for Difference (CCfD) im Rahmen des deutschen und europäischen Förderrahmens,
- H₂Global als internationaler Doppelauktionsmechanismus,
- Contracts for Difference für erneuerbare Wasserstoffproduktion im EU Innovation Fund.

Diese Instrumente stabilisieren Preisvolatilität zwischen Produktionskosten und Marktpreis und ermöglichen damit langfristige Versorgungssicherheit für Abnehmer. Flughäfen können hiervon indirekt profitieren, insbesondere wenn regionale H₂-Produzenten durch CCfDs abgesichert sind und dadurch verlässlichere Preise anbieten können (European Commission, 2024).

Die Interviews zeigen, dass solche Instrumente für Flughäfen vor allem indirekt relevant sind. Sie stabilisieren Wasserstoffpreise auf Erzeugerseite und verbessern damit die Planbarkeit für Abnehmer, ohne dass Flughäfen selbst Förderempfänger sein müssen. Für Flughäfen existieren bislang keine spezifischen OPEX-Fördermechanismen. Dennoch kann ein stabiler regionaler Wasserstoffpreis die wirtschaftliche Bewertung von GH₂- und Multi-Use-Infrastrukturen erheblich verbessern. Aus Sicht der Interviewpartner ist Planbarkeit wichtiger als ein möglichst niedriger Preis. Volatile Kostenstrukturen werden als wesentliches Investitionshemmnis beschrieben.

Vertragsmodelle als finanzielle Entlastung

Neben direkter Förderung spielen Vertragsmodelle (Contracting) eine zentrale Rolle bei der Risikoreduktion für Flughäfen. Die Interviews zeigen, dass Contracting weniger als Finanzierungsinstrument, sondern als Risikotransfermechanismus verstanden wird.

Zentrale Contracting-Ansätze:

Hydrogen-as-a-Service / Energy-as-a-Service

- Dienstleister errichten und betreiben Infrastruktur; Flughäfen zahlen nutzungsabhängig.
- Besonders geeignet für Pilot- und Übergangsphasen mit unsicherer Nachfrage.

Hydrogen Purchase Agreements (HPA)

- Langfristige Abnahmeverträge sichern Preise und Mengen.
- Interviews zeigen jedoch Zurückhaltung, solange keine seriennahe Fahrzeugverfügbarkeit besteht.

Joint-Venture- und Cost-Sharing-Modelle

- Gemeinsame Finanzierung und Nutzung mit Logistik-, ÖPNV- oder Industriepartnern.
- Werden als besonders robust eingeschätzt, da sie Auslastung und Risiko verteilen.

(4) Öffentliche Absicherung und regulatorische Flankierung

Neben finanzieller Förderung wird die Rolle der öffentlichen Hand in den Interviews auch als strukturgebend beschrieben. Klare Genehmigungsleitlinien, Standardisierung und europäische Harmonisierung werden als ebenso wichtig wie monetäre Förderung eingeschätzt.

Fehlende Standards oder uneinheitliche Auslegung bestehender Regelwerke erhöhen Projektlaufzeiten und indirekte Kosten und wirken damit wie ein wirtschaftlicher Hemmfaktor.

Förder-, Finanzierungs- und Contracting-Optionen sind zentrale Hebel zur Reduktion von Frühphasenrisiken beim Einsatz von Wasserstoff an Flughäfen. Die Interviews zeigen, dass erfolgreiche Projekte nicht primär von der Höhe einzelner Förderbeträge abhängen, sondern von der Kombination aus CAPEX-Entlastung, OPEX-Stabilisierung, klaren Vertragsmodellen und regulatorischer Planungssicherheit. Förderinstrumente wirken dabei am effektivsten, wenn sie gezielt auf modulare, multi-nutzbare und skalierbare Infrastrukturen ausgerichtet sind.

4.7. Räumliche und planerische Restriktionen als Wirtschaftlichkeitsfaktor

Die räumliche und planerische Einbindung von Wasserstoffinfrastruktur stellt einen wesentlichen, häufig unterschätzten Wirtschaftlichkeitsfaktor dar. Die Masterplanlogik eines Flughafens beeinflusst maßgeblich, ob und zu welchen Kosten wasserstoffbasierte Systeme realisiert werden können. Die Interviews zeigen deutlich, dass wirtschaftliche Bewertungen von H₂-Infrastruktur an Flughäfen nicht isoliert von Flächenverfügbarkeit, Sicherheitszonen und langfristigen Entwicklungszielen betrachtet werden können. Fehlende planerische Vorbereitung wirkt in der Praxis wie ein zusätzlicher Kosten- und Risikofaktor.

Flächenverfügbarkeit und Standortwahl

Fehlende oder unzureichend abgestimmte Flächenreserven führen in der Praxis häufig zu erheblichen Mehrkosten, Projektverzögerungen oder zum vollständigen Abbruch von Wasserstoffprojekten.

Die Standortwahl beeinflusst sowohl die CAPEX-Struktur (z. B. Erschließung, Sicherheitsmaßnahmen, Leitungsführung) als auch die OPEX-Seite, etwa durch längere interne Transportwege, zusätzliche Logistikaufwände oder betriebliche Umwege. Insbesondere die Integration in bestehende Land- und Luftseite-Zonen wird als herausfordernd beschrieben, da Wasserstoffanlagen erhöhte Anforderungen an Sicherheitsabstände, Verkehrsführung und Zugangslogiken stellen.

Masterplanung als ökonomischer Hebel

Die Einführung von Wasserstoffinfrastruktur berührt unmittelbar die langfristige Entwicklungslogik des Airport Masterplans, der typischerweise einen Zeithorizont von 20–30 Jahren abdeckt. Die Interviews machen deutlich, dass diese langfristigen Planungszyklen häufig nicht mit den deutlich kürzeren Innovations- und Entscheidungszyklen im Wasserstoffsektor (3–5 Jahre) kompatibel sind. Diese zeitliche Diskrepanz erhöht die wirtschaftliche Unsicherheit und erschwert Investitionsentscheidungen. Wasserstoffinfrastruktur wird in vielen Masterplänen bislang nicht explizit berücksichtigt, sondern nur implizit unter allgemeinen Energie- oder Nachhaltigkeitszielen subsumiert.

Sicherheitszonen und betriebliche Integration

Die wirtschaftliche Bewertung wasserstoffbasierter Anlagen wird zusätzlich durch flughafenspezifische Sicherheitsanforderungen beeinflusst. Sicherheitsabstände, Ex-Zonen, Evakuierungsradien und Zugangsbeschränkungen können nutzbare Flächen deutlich reduzieren. Die Interviews zeigen, dass diese Anforderungen nicht nur technische, sondern auch betriebliche Kosten verursachen, etwa durch Einschränkungen im Vorfeldbetrieb, zusätzliche Schulungsanforderungen oder Anpassungen bestehender Verkehrs- und Logistikkonzepte. Insbesondere bei LH₂-Anlagen steigen Flächenbedarf und planerische Komplexität erheblich, was die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu modularen GH₂-Lösungen weiter verschlechtert.

Schnittstellen, Governance und Projektlaufzeiten

Auch Governance-Strukturen wirken sich indirekt auf die Wirtschaftlichkeit aus. Unklare Zuständigkeiten zwischen Flughafenbetreiber, Energieversorgern, Netzbetreibern und Genehmigungsbehörden verlängern Projektlaufzeiten und erhöhen Planungs- und Transaktionskosten. Die Interviews verdeutlichen, dass Projekte mit frühzeitig klar definierten Schnittstellen, Zuständigkeiten und Genehmigungswegen deutlich schneller und kosteneffizienter umgesetzt werden können. Eine integrierte Planung von Wasserstoffinfrastruktur gemeinsam mit anderen Energie- und Medieninfrastrukturen (Strom, Wärme, SAF, Ladeinfrastruktur) kann dagegen Synergien erzeugen und Kosten reduzieren.

Räumliche und planerische Restriktionen sind kein nachgelagerter Aspekt, sondern ein zentraler Wirtschaftlichkeitsfaktor für Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen. Die Interviews zeigen, dass fehlende Flächenvorsorge, unklare Masterplanintegration und komplexe Sicherheitsanforderungen Investitionskosten erhöhen und Projekte verzögern. Eine frühzeitige, modulare und technologieoffene Einbindung von Wasserstoffinfrastruktur in die langfristige Flughafenplanung kann dagegen wirtschaftliche Risiken reduzieren und spätere Skalierung ermöglichen.

5. Regulatorik & Strategiebezug

Um eine klimawirksame Dekarbonisierung des Luftfahrtsektors voranzutreiben, sind übergreifende regulatorische Rahmenwerke und Verordnungen auf verschiedenen administrativen Ebenen erforderlich. Um die Klimaschutzvorgaben entlang dieser Regularien zeitig und zielgerichtet umsetzen zu können, werden sie auf nationaler und europäischer Ebene von entsprechenden Förderprogrammen begleitet. Entsprechend der Aussagen von Flughafenbetreibern und Geräte-/Fahrzeugherstellern im Rahmen dieser Studie sind diese Förderungen für Investitionsentscheidungen von hoher Relevanz (siehe [Abschnitt 4.6](#)). Sowohl die Regularien als auch die Förderprogramme zielen vor allem auf Maßnahmen ab, die fossile Energieträger durch nachhaltige Alternativen ersetzen. Für die Umsetzung dieser Maßnahmen sind Flughafenbetreiber und Bodenabfertiger jedoch immer noch an die bestehenden Regularien des Flughafenbetriebs gebunden (lokale Regularien). Sämtliche Anpassungen zur Erfüllung der nationalen und europäischen Verordnungen müssen also innerhalb eines stark regulierten Ökosystems

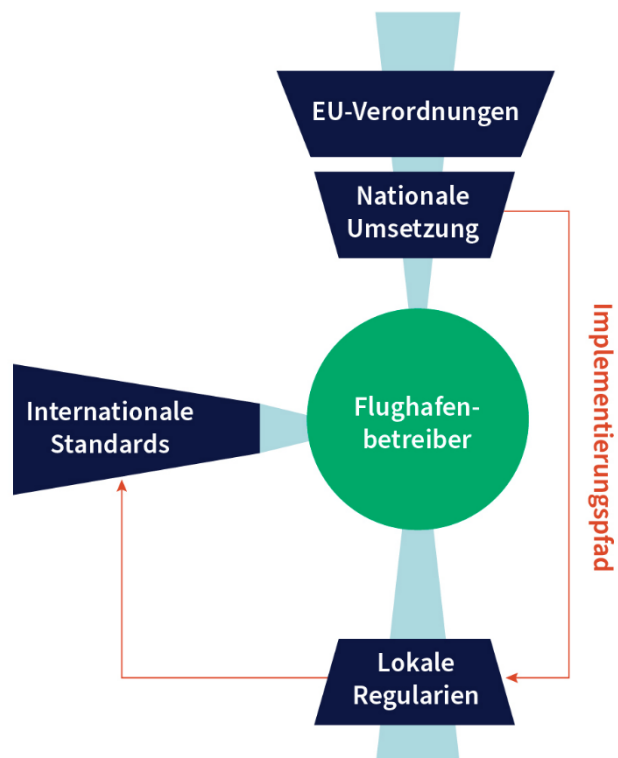


Abbildung 6 Regulatorische Einflussfaktoren für die Implementierung von H₂ im Flughafenbetrieb (ohne wirtschaftliche Dimension)

erfolgen, wodurch die Handlungsoptionen im gewünschten Transformationsprozess oft durch den laufenden Betrieb limitiert werden. Ein weiterer Faktor sind internationale Standards, die für die Betriebserlaubnis und die notwendige Konnektivität im internationalen Flugverkehr von Bedeutung sind. Technische Lösungen, wie Wasserstoffanwendungen, die Flughäfen dabei helfen, die Dekarbonisierung ihres Betriebs voranzutreiben, müssen in diesem Spannungsfeld umsetzbar sein. Die Klimaziele im Sinne des EU Green Deals werden also durch nationale Gesetzgebung verpflichtend und durch Finanzierungsinstrumente gefördert. Die tatsächliche Anpassung im bestehenden Flughafen-Ökosystem erfordert jedoch in erster Linie einen systemkompatiblen Implementierungspfad.

Die Nachhaltigkeitsstrategien der Flughäfen können folglich nur dann in die Umsetzung gehen, wenn sie durch operativ zuverlässige und standardkonforme technische Lösungen gedeckt werden. Abbildung 6 zeigt den aus Sicht der Flughafenbetreiber wirkungsvollsten Implementierungspfad, der bei der nationalen Gesetzgebung beginnt, mit lokalen Regularien und wo nötig internationalen Standards vereinbar ist. Der Einsatz von Wasserstoff als alternativer Kraftstoff hat auf regulatorischer Seite eine hohe Bedeutung, konnte im Implementierungspfad der Flughafenbetreiber bislang aber noch keine tragende Rolle einnehmen. Im Folgenden werden der Strategiebezug deutscher Verkehrsflughäfen und die relevanten regulatorischen Einflüsse erläutert. Am Ende des Kapitels werden pragmatische Anforderungen zusammengefasst.

Strategiebezug

Die Verkehrsflughäfen im europäischen TEN-V-Kernnetz sind durch regulatorische Vorgaben verpflichtet, eine umfassende Nachhaltigkeitsstrategie zu entwickeln. Diese Strategie muss spezifische Klimaziele festlegen und entsprechende Maßnahmen zur Umsetzung dieser Ziele detailliert beschreiben. Während die formulierten Maßnahmen häufig eine allgemeine Natur aufweisen, sind die Klimaziele klarer und greifbarer. Sie dienen als schwacher Indikator zur Beurteilung der Progressivität der Nachhaltigkeitsziele im deutschen Luftfahrtsektor. Ein Vergleich der Klimaziele der deutschen Verkehrsflughäfen mit dem europäischen Gesamtkontext ermöglicht eine Einschätzung der nationalen Auslegung von EU-Verordnungen. Die Differenzierung zwischen den Flughäfen des TEN-V-Kernnetzes und denen des Gesamtnetzes innerhalb Deutschlands erlaubt Rückschlüsse auf die Relevanz der Lage und Größe von Verkehrsflughäfen für deren Dekarbonisierungsstrategien. Die Analyse der Klimaziele und Maßnahmen bietet somit einen wertvollen Einblick in die Nachhaltigkeitsentwicklung im europäischen Luftverkehrssektor.

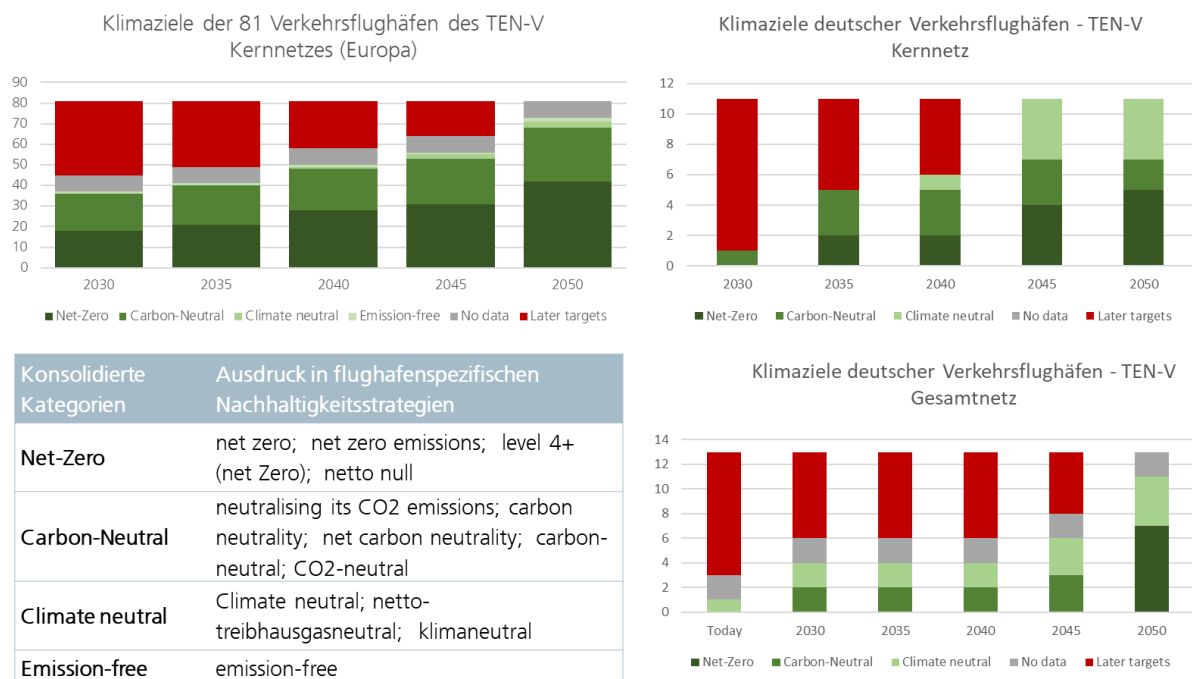


Abbildung 7 Dekarbonisierungsstrategien von Ten-V Flughäfen auf in Europa und Deutschland (Onlineveröffentlichungen)

Auf europäischer Ebene beabsichtigen über 50 % der 81 Flughäfen des TEN-V-Kernnetzes, bis zum Jahr 2035 CO₂-neutral zu werden.¹ Im Gegensatz dazu ziehen es 17 Flughäfen (20 %) vor, den regulatorischen Rahmen bis 2050 vollständig auszuschöpfen, ohne dass eine geografische Korrelation erkennbar ist. Ein Vergleich der deutschen TEN-V-Verkehrsflughäfen mit dem europäischen Durchschnitt zeigt, dass die Klimaziele in den Nachhaltigkeitsstrategien später in Angriff genommen werden, wobei eine vollständige Dekarbonisierung jedoch bereits für das Jahr 2045 angestrebt wird.

¹ Für 8 der 81 Verkehrsflughäfen der TEN-V Kernnetzes konnten keine zuverlässigen Veröffentlichungen über Klimaziele gefunden werden. Diese werden in der Grafik mit „No Data“ dargestellt.

Dieses ambitionierte Ziel wird mutmaßlich durch das [nationale Klimaziel](#) der Nettotreibhausgasneutralität bis 2045 beeinflusst.

Zusätzlich spielen wirtschaftliche Motive eine bedeutende Rolle, insbesondere im Kontext der geplanten Steigerungen der CO₂-Bepreisung. Strategische Zielsetzungen, wie die Erlangung von Zertifikaten, etwa durch das Airport Carbon Accreditation Programm der Airport Council International (ACI Europe), sind ebenfalls von Bedeutung. Der zögerliche Fortschritt in den ersten Jahren kann einerseits auf die hohe Anzahl der Flugbewegungen und die historisch gewachsene Infrastruktur zurückgeführt werden, die eine schnelle Dekarbonisierung erschweren. Darüber hinaus bestehen regulatorische, technische und finanzielle Hürden, die die rasche Umsetzung der Klimaziele weiter verzögern. Letztlich ist die Realisierbarkeit dieser Ziele auch stark von der Unternehmenskultur der jeweiligen Betreiber abhängig.

Ein Vergleich der deutschen TEN-V-Flughäfen des Kernnetzes mit denen des TEN-V-Gesamtnetzes zeigt, dass die Mehrheit der 13 kleineren Verkehrsflughäfen anstrebt, einen CO₂-neutralen Betrieb erst im Jahr 2050 zu erreichen. Dieses Ergebnis ist jedoch insofern eingeschränkt, als für zwei der 13 untersuchten Verkehrsflughäfen keine belastbaren Klimaziele ermittelt werden konnten. Die langsame Annäherung an die Klimaziele ist unter anderem durch einen geringeren Fokus auf Flughäfen des TEN-V Gesamtnetzes bedingt, was auf weniger Flugbewegungen, eingeschränkte Investitionsmöglichkeiten und fehlende Ressourcen für detaillierte Nachhaltigkeitsstrategien zurückzuführen ist. In diesem Kontext passen viele Regionalflughäfen ihre Strategien an die Vorgaben ihres Dachverbands an. Gleichzeitig erkennen die Betreiber jedoch auch Chancen in der Transformation zu erneuerbaren Antrieben wie Wasserstoff, was die Möglichkeit für Testfelder oder den Aufbau eines Kurzstreckennetzes eröffnet. (Siehe auch [Abschnitt 6.8](#))

Obleich die Strategien der deutschen Verkehrsflughäfen in den entsprechenden Veröffentlichungen eher allgemein gehalten sind, wird Wasserstoff zunehmend als potenzieller Energieträger betrachtet. Trotz des Mangels an konkreten Maßnahmen bis 2030 haben sich etwa 75 % der deutschen Verkehrsflughäfen im TEN-V-Kernnetz strategisch mit dem Thema Wasserstoff auseinandergesetzt und zumindest vorübergehend Lösungen im unmittelbaren Flughafenumfeld in Erwägung gezogen. Eine konkrete Umsetzung von Wasserstofflösungen im regulären Flughafenbetrieb wurde jedoch bislang lediglich an zwei der Flughäfen ernsthaft in Betracht gezogen. In beiden Fällen handelt es sich um Verkehrsflughäfen aus der Gruppe, die planen bereits 2035 den Status „Net Zero“ zu erreichen. Dieser Umstand legt die Vermutung nahe, dass die Relevanz von Wasserstoff als ergänzende Technologie im Energiemix der Flughäfen steigt je näher der Flughafen an die vollständige Umsetzung der strategischen Ziele gelangt. Hält diese Annahme an, wäre der Zeitraum zwischen 2040 und 2045 der entscheidendste für die Implementierung sein könnte (Siehe [Abbildung 7](#)). Die Verfügbarkeit und Marktfähigkeit von wasserstoffbetriebenen Bodendiensten mit etablierten Lieferketten und einer standardisierten lokalen Infrastruktur wird zu diesem Zeitpunkt von entscheidender Bedeutung sein. Somit entfällt eine gewichtige Rolle auf die Wasserstoffaffinen Flughäfen ([Typ C](#)) die wichtigen operativen Fragen klären werden. Begleitend stellt sich die Frage, welche Barrieren ausschlaggebend waren und inwiefern die Maßnahmen aus der [NWS 2023](#) und anderen relevanten Rahmenwerken ausreichen bzw. ergänzt werden müssen, um die nahtlose Implementierung von Wasserstoff im Flughafenbetrieb bis spätestens 2040 zu gewährleisten.

5.1. Relevante Rahmenwerke

Flughäfen fungieren als zentrale Übergangspunkte im europäischen Verkehrssystem, wobei ihre Hauptaufgabe in der Organisation und Abwicklung des Transfers zwischen Land- und Luftverkehr liegt. Jede Flugzeugabfertigung, bekannt als Turnaround, erfordert Energie. Wenn diese Energie aus fossilen Brennstoffen stammt, werden die durch die von Reisenden oder Spediteuren genutzte Leistung gebundenen CO₂-Emissionen in gasförmiges CO₂ umgewandelt und in die Atmosphäre freigesetzt. Darüber hinaus entstehen während dieses Prozesses auch weitere klimaschädliche Treibhausgase wie Stickoxide (NO_x), die bislang regulatorisch weniger berücksichtigt werden. Jeder auf fossilen Energieträgern basierende Turnaround erhöht somit die Gesamtkonzentration von CO₂ in der Atmosphäre und trägt zum menschengemachten Klimawandel bei. Die Notwendigkeit, den Übergang zwischen Luft- und Landverkehr aufrechtzuerhalten und gleichzeitig den klimatischen Einfluss zu minimieren, ist ein zentraler Bestandteil der europäischen und deutschen Gesetzgebung.

Für die zielführende Implementierung eines ökologisch nachhaltigen Flughafenbetriebs ist es entscheidend, dass alle Bodendienste und der gesamte [Energiebedarf am Flughafen](#) durch klimaneutrale Alternativen zu fossilen Energieträgern gedeckt werden. Die Wahrscheinlichkeit, dieses Ziel zu erreichen, erhöht sich durch die Reduktion des Energieverbrauchs mittels energieeffizienter Technologien. Der Übergang zu emissionsfreien Energieträgern erfordert einerseits strikte Anforderungen für eine fristgerechte Umsetzung der Maßnahmen und andererseits eine gezielte Förderung der Flughäfen, um die Umstellung zu beschleunigen und finanzielle Risiken sowie Wettbewerbsverzerrungen zu vermeiden. Die deutschen Verkehrsflughäfen sind verpflichtet, die geänderte Gesetzgebung sowie die daraus abgeleiteten Regularien im Flughafenbetrieb umzusetzen und gleichzeitig bestehende sektorspezifische Regularien während dieser Transformation zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden die relevanten gesetzlichen Rahmenwerke und Verordnungen erläutert, um deren Relevanz für die Handlungsoptionen bezüglich des Einsatzes von Wasserstoff im Flughafenbetrieb herauszuarbeiten.

Europäisches Klimagesetz und Fit for 55

Das europäische Klimagesetz bildet die rechtliche Grundlage für den European Green Deal, der eine Reduktion der Treibhausgase um mindestens 55 % bis zum Jahr 2030 sowie die vollständige Treibhausgasneutralität bis 2050 vorsieht. In diesem Kontext kommt dem europäischen Transportwesen, einschließlich der Luftfahrt, eine zentrale Rolle zu, da der Luftverkehr signifikante Treibhausgasemissionen verursacht.

Die bedeutendsten Maßnahmenpakete zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sind im EU-Programm „Fit for 55“ zusammengefasst. Dieses Programm zielt darauf ab, die Treibhausgasemissionen in Europa bis 2030 im Vergleich zu den Werten von 1990, um mindestens 55 % zu senken. Die Transformation des Transportsektors, insbesondere der Luftfahrt, ist in mehreren Unterstrategien explizit verankert. Insbesondere hervorzuheben sind:

- **Refuel EU Aviation:** Diese Initiative fördert die Nutzung nachhaltiger Flugkraftstoffe (SAF) durch verbindliche Beimischungsquoten, einschließlich spezifischer Unterquoten für E-Fuels. Dies ist entscheidend, da SAF als Übergangslösung betrachtet wird, um die CO₂-Emissionen im Luftverkehr signifikant zu reduzieren.

- **Renewable Energy Directive (RED):** Diese Richtlinie zielt auf die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Gesamtenergiemix Europas ab, mit spezifischen Unterquoten für den Verkehrssektor. Der Fokus auf erneuerbare Energien ist ein wesentlicher Bestandteil der europäischen Strategie zur Erreichung der Klimaneutralität.
- **Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR):** Diese Regelung sieht den Aufbau von Tank- und Ladeinfrastruktur für nachhaltige Kraftstoffe in Europa vor. Eine gut ausgebaute Infrastruktur ist entscheidend, um die Nutzung alternativer Energieträger zu fördern und den Übergang zu emissionsfreien Verkehrsmitteln zu unterstützen.

Die Maßnahmenpakete umfassen nicht nur strategische Ansätze, sondern auch spezifische Rechtsvorschriften, die die Transformation der Luftfahrtbranche zur Klimaneutralität operationalisieren sollen. Da die direkt anwendbaren Regularien für Verkehrsflughäfen in erster Linie auf nationaler Ebene geregelt werden, müssen die relevanten EU-Verordnungen zunächst von den Mitgliedstaaten in nationales Recht überführt werden. In der Übergangsphase können Flughäfen auch von nationalen Förderprogrammen profitieren. Zudem stehen ihnen direkte EU-Förderungen durch Forschungs- und Innovationsprojekte wie Horizon Europe sowie Förderprogramme wie die Connecting Europe Facility for Transport (CEF), die Alternative Fuel Infrastructure Facility (AFIF) und der Innovation Fund zur Verfügung.

Relevanz des EU-Klimagesetzes und des Maßnahmenpakets „Fit for 55“ für Handlungsoptionen deutscher Verkehrsflughäfen

Das europäische Klimaschutzgesetz und die Maßnahmen aus dem Paket „Fit for 55“ sind entscheidend für die Handlungsoptionen deutscher Verkehrsflughäfen. Diese Regelungen gelten EU-weit und minimieren klimaspezifische Wettbewerbsverzerrungen zwischen europäischen Flughäfen, was ein einheitliches Wettbewerbsumfeld schafft, und die Zusammenarbeit der Mitgliedstaaten in der Dekarbonisierung des Luftfahrtsektor fördert. Auch zertifizierende Verbände wie ACI Europe profitieren von der Einheitlichkeit der zugrundeliegenden Anforderungen und Mechanismen.

Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger zur Reduktion von Treibhausgasemissionen ist sowohl zulässig als auch förderfähig. Dies ermöglicht die Ausweitung von Nachhaltigkeitsstrategien und Förderungen auf andere europäische Standorte und könnte zur Schaffung eines Netzwerks von Wasserstoffinfrastrukturen beitragen, das den Luftverkehr nachhaltig unterstützt.

Zudem fördert das Gesetz den Hochlauf der Produktion und des Imports von grünem Wasserstoff in Europa, was die Marktsituation für Flughäfen in naher Zukunft voraussichtlich verbessern wird. Der Einsatz von Wasserstoff als alternativen Energieträger kann nicht nur die Emissionen senken, sondern auch die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringern, was angesichts geopolitischer Herausforderungen von großer Bedeutung ist.

Bundesklimaschutzgesetz (KSG)

Das Bundesklimaschutzgesetz (KSG) in Deutschland verankert die Umsetzung internationaler Klimaziele zur Treibhausgasreduktion, die aus dem Pariser Klimaabkommen sowie dem European Green Deal resultieren. Gemäß §3 des KSG müssen die bundesweiten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 in folgenden Abstufungen reduziert werden:

- Bis 2030: mindestens 65 %
- Bis 2040: mindestens 88 %
- Bis 2045: Netto-Treibhausgasneutralität (100 %)
- Bis 2050: Netto-Treibhausgaspositiv / negative THG-Emissionen (> 100 %)

Gegenstand dieser Studie ist die Erfüllung dieser Klimaziele durch den Luftverkehr als Teil des deutschen Transportsektors. Der Transportsektor ist der drittgrößte Emittent von Treibhausgasen in Deutschland, mit einem Anteil von 22 %. Dieser Anteil ist im Vergleich zu den beiden stärksten Emittenten, der Energiewirtschaft und der Industrie, gestiegen, da diese erfolgreich reduzierten Emissionen vorweisen können. Innerhalb des Verkehrssektors zählt der Flugverkehr zu den am schwersten zu dekarbonisierenden Transportmitteln. Deutsche Verkehrsflughäfen und Airlines sind an das Klimaschutzgesetz gebunden und müssen die Klimaziele einhalten, haben jedoch nur begrenzten Spielraum für eine entsprechende Umsetzung.

In diesem Kontext bietet Wasserstoff eine bedeutende Möglichkeit als emissionsfreien Kraftstoff, insbesondere für Brennstoffzellenfahrzeuge, und kann in Bereichen eingesetzt werden, in denen Batterien weniger effizient sind. Der tatsächliche Nutzen von Wasserstoff am Flughafen ist jedoch noch unklar, da sowohl die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff als auch das erforderliche marktfähige Equipment für die Bodendienste gegenwärtig nicht ausreichend vorhanden sind. Die Stimulierung beider Seiten, Verfügbarkeit und Infrastruktur, durch nationale Investitionen und Förderungen ist ein wesentlicher Bestandteil der Nationalen Wasserstoffstrategie, die das KSG unterstützt. Diese Strategie konzentriert sich aktuell vor allem auf die Transformation der Bodendienste, da hier kurzfristig die größten Umsetzungspotenziale bestehen. Da Hersteller (OEMs) voraussichtlich erst ab den 2040er-Jahren wasserstoffbetriebene Flugzeuge in relevanter Größenordnung bereitstellen können, bleibt der direkte Einfluss von Wasserstoff auf Scope-3-Emissionen an Flughäfen zunächst begrenzt. Emissionsminderungen im Flugbetrieb erfolgen daher mittelfristig primär über nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF). Gleichzeitig bietet die frühzeitige Nutzung von Wasserstoff im Bodenbetrieb Flughäfen die Möglichkeit, operative Erfahrungen aufzubauen und organisatorische sowie sicherheitsrelevante Kompetenzen zu entwickeln.

Die folgende Tabelle zeigt eine wahrscheinliche Anwendung von Wasserstoff zur Reduktion von Emissionen im Luftverkehr im Zeitverlauf:

Tabelle 1 Reduktion von THG im Luftverkehr durch H₂ kurz-mittel und langfristig

Zeithorizont	Erwartete Anwendung
Kurzfristig (3-5 Jahre)	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoff wird hauptsächlich in der Bodendienstflotte eingesetzt, insbesondere für Vorfeldfahrzeuge und Sonderfahrzeuge der Flugzeugabfertigung. • Die wasserstoffbetriebene Personenbeförderung könnte aufgrund des Entwicklungsvorsprungs im Automobilssektor schnell umgesetzt werden, mit möglichen Synergien zur Landseite. • Der reguläre Einsatz wird voraussichtlich bei progressiven Flughäfen und in Nischenanwendungen erfolgen. • Flughäfen haben die Chance, Wasserstoff frühzeitig zu integrieren.
Mittelfristig (5-10 Jahre)	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von gasförmigem Wasserstoff für Kurzstreckenflüge beginnt, erste Prototypen werden um 2030 erwartet. • Entwicklung eines Netzes kleinerer Verkehrsflughäfen für Businessjets oder General Aviation.

	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Wasserstoff in den Bodendiensten normalisiert sich, unterstützt durch die Ausmusterung alter Geräte und die steigenden CO₂-Kosten bei sinkenden Wasserstoffkosten.
Langfristig (> 10 Jahre)	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie plant den Einsatz einer Kombination von Flüssigwasserstoff und Brennstoffzellen für Kurz- und Mittelstreckenflüge zwischen 2040 und 2045. • Optimierung des Boil-off von Flüssigwasserstoff, was die Nutzung von gasförmigem Wasserstoff in den Bodendiensten verbessert. • Wasserstoff wird eine entscheidende Rolle in der Dekarbonisierung des Luftverkehrs spielen und zur

Relevanz des KSG für Handlungsoptionen deutscher Verkehrsflughäfen

Das Bundesklimaschutzgesetz (KSG) bietet einen langfristigen Rahmen, der erhebliche Investitionen in die Dekarbonisierung deutscher Verkehrsflughäfen zeitgleich ermöglicht und erforderlich macht. Ziel ist es, die nationalen Klimaziele zu erreichen und den Luftverkehr nachhaltiger zu gestalten. Die Umsetzung dieser Ziele wird durch zahlreiche Innovationsförderungen unterstützt, die neue Handlungsoptionen für Airlines und Flughafenbetreiber eröffnen.

Sollten diese Akteure jedoch nicht proaktiv auf die Herausforderungen reagieren, könnte ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Emittenten gefährdet werden, was zu steigenden Kompensationskosten führt und ihre Marktstellung schwächt. Ohne signifikante Einsparungen bei Treibhausgasemissionen sind zudem Einschränkungen bei den Handlungsoptionen im Rahmen des allgemeinen Branchenwachstums zu erwarten.

Diese Einschränkungen könnten die Entwicklung und Implementierung nachhaltiger Lösungen behindern und den Fortschritt in der Dekarbonisierung des Luftverkehrs verlangsamen. Daher ist es entscheidend, strategische Entscheidungen zu treffen, die sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte berücksichtigen, um eine nachhaltige Zukunft für den Luftverkehr zu sichern.

Renewable Energy Directive (RED II und RED III) BImSchG und die THG-Minderungsquote

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II und RED III) ist ein zentraler Bestandteil des „Fit-for-55“-Maßnahmenpakets der Europäischen Union, das darauf abzielt, den Anteil erneuerbarer Energien im europäischen Gesamtenergiemix signifikant zu erhöhen. Diese Maßnahmen sollen dazu beitragen, CO₂-Emissionen aus dem europäischen Energieverbrauch zu reduzieren. Ursprünglich auf einen Anteil von 20 % (RED I) festgelegt, wurde dieser Zielkorridor in den beiden Revisionen auf zwischen 42,5 % und 45 % des Gesamtenergieverbrauchs angehoben (RED III). Diese Anpassungen dienen der Verstärkung der Anstrengungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und der schnelleren Abnabelung von fossilen Energieträgern.

In Deutschland wurde die nationale Umsetzung der EU-Verordnung durch die Anpassung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) vollzogen, insbesondere durch die Regelungen in den §§ 37a–h und den dazugehörigen Bundes-Immissionsschutzverordnungen (BImSchV). Um den Anpassungsprozess des Energiemixes zu beschleunigen, wurde zudem eine CO₂-Bepreisung eingeführt. Diese besagt, dass Energieerzeuger Strafzahlungen pro Tonne zu viel emittierten CO₂ leisten müssen, wenn sie die festgelegten Reduktionsziele nicht einhalten. Unternehmen, in der Regel Mineralölkonzerne, haben jedoch die Möglichkeit, diese Strafen zu vermeiden, indem sie CO₂-Zertifikate

erwerben, die von Nutzern erneuerbarer Energien ausgestellt werden, die ihre Zielvorgaben übererfüllen.

Ein bedeutender Aspekt der RED III ist der spezifische Fokus auf den Verkehrssektor, der eine verbindliche Unterquote für erneuerbare Kraftstoffe nicht biologischen Ursprungs (RFNBO) einführt. Hierzu zählt auch grüner Wasserstoff, sofern er vollständig aus erneuerbaren Quellen stammt.² Die gesetzlich festgelegte Quote sieht vor, dass der energetische Mindestanteil von RFNBO im Jahr 2026 bei 0,1 % liegen und bis 2040 auf 12 % ansteigen soll. Für die Industrie wurde zudem eine Unterquote von 42 % RFNBO bis 2030 festgelegt.

Die Möglichkeit für Produzenten von grünem Wasserstoff, Produktionskosten durch den Verkauf von Zertifikaten zu senken, könnte sich positiv auf die Preisgestaltung auswirken. Zusätzlich können Nutzer wasserstoffbetriebener Fahrzeuge Zertifikate verkaufen, was ihre operativen Kosten reduziert. Dies ist besonders relevant für den Einsatz wasserstoffbetriebener Fahrzeuge im Flughafenbetrieb, da die höheren Betriebskosten diese Technologien bislang weniger attraktiv gegenüber batterieelektrischen Lösungen erscheinen ließen.

Mit der verpflichtenden RFNBO-Quote ist ein langfristiger Anstieg der Nachfrage nach spezifischen Zertifikaten zu erwarten, was zu einem Anstieg ihres Marktpreises führen dürfte. Ein höherer Marktpreis für diese Zertifikate verbessert die Wirtschaftlichkeit für die Nutzer von Wasserstofftechnologien.

Jedoch bestehen auch Herausforderungen, wie die fehlende Anreizstruktur für Hersteller von grünem Wasserstoff, ihre Produktionskosten durch den Zertifikatsverkauf zu senken, solange kein ausreichender Wettbewerb herrscht. Diese Hürden könnten durch eine Steigerung des Wettbewerbs oder durch die Einrichtung dezentraler Produktionsinseln überwunden werden. Ein weiterer limitierender Faktor ist die generelle Beschränkung der Zertifikate auf Fahrzeuge mit Straßenzulassung, was die Nutzung von wasserstoffbasierten Lösungen im Flughafenbetrieb einschränkt.

Den Flughafenbetreibern bleibt jedoch die Möglichkeit, den Vorfeldbetrieb durch den Ausbau wasserstoffbasierter Lösungen für die landseitige Anbindung zu subventionieren, um eine lokale Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. Diese Maßnahmen könnten durch Joint Ventures unterstützt werden, um die Investitionslast zu teilen.

Die Erweiterung des Angebots an wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen sowie die Ausweitung der Zertifikate auf Vorfeldfahrzeuge sind entscheidend, um die Wirksamkeit der RED III-Verordnung zu erhöhen und den Beitrag der Flughafenbetriebe zur Erfüllung der Treibhausgasminderungsquoten zwischen 2030 und 2040 zu maximieren.

Relevanz der RED III und BImSchG für Handlungsoptionen deutscher Verkehrsflughäfen

² Die Produktionsstätten können in Deutschland seit 2025 von dem Technischen Überwachungsverein (TÜV) und der DEKRA als grün zertifiziert werden. Ein Produktpass, der den Anteil von grünem Wasserstoff bei einem Verbraucher ermittelt, ist derzeit nicht standardisiert verfügbar, wird jedoch notwendig sein, um RED III effizient umzusetzen.

Die RED III bietet signifikantes Potenzial zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff im Flughafenbetrieb. Zertifikate für die Nutzung und Produktion von grünem Wasserstoff können auf die Treibhausgasminderungsquoten gemäß §37a Abs. 4 BImSchG angerechnet werden, was die Investitionsbereitschaft in wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und Infrastruktur positiv beeinflusst. Diese Bereitschaft kann weiter gesteigert werden, wenn Vorfeldfahrzeuge (ohne Straßenzulassung) ebenfalls von der Treibhausgasminderungsquote profitieren.

Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR) und Bodenstromverordnung des BMV

Die Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR) ist eine verbindliche EU-Verordnung (2023/1804), die den Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, insbesondere Strom und Wasserstoff, in Europa vorantreibt. Die Verordnung zielt darauf ab, die [Klimaziele](#) des European Green Deal zu erreichen und ist seit April 2024 in Kraft. Sie muss von den EU-Mitgliedsstaaten auf nationaler Ebene umgesetzt werden.

Ein zentraler Bestandteil der AFIR fordert die vollständige Bereitstellung von nachhaltigem Bodenstrom für stationäre Flugzeuge an Flughäfen des TEN-V-Kernnetzes sowie des erweiterten Netzes. In Deutschland wurde dieser Teil durch die Bodenstromverordnung umgesetzt, die für insgesamt 23 Verkehrsflughäfen des [TEN-V Netzes](#) gilt. An diesen Flughäfen müssen stationäre Flugzeuge ab dem 1. Januar 2025 an Fahrgastbrücken mit nachhaltigem Strom versorgt werden, und ab dem 1. Januar 2030 gilt diese Verpflichtung auch für stationäre Flugzeuge an Außenpositionen. Diese Regelung ist für alle europäischen Flughäfen des TEN-V-Netzwerks mit mehr als 10.000 Flugbewegungen pro Jahr bindend.

Die Umsetzung der Verordnung erfolgt derzeit entweder durch den Austausch konventioneller Bodenstromaggregate gegen batterieelektrische Lösungen, einschließlich entsprechender Ladeinfrastruktur, oder durch den Einsatz von HVO100. Eine weitere Option ist die Nutzung von grünem Wasserstoff als emissionsarmen Kraftstoff für umgerüstete Bodenstromaggregate (GPUs). Wasserstoff wird vor allem dann relevant, wenn batterieelektrische Lösungen aufgrund operativer Einschränkungen, wie dem Verhältnis von Nutzungsdauer zu Ladezyklen, begrenzten Netzkapazitäten oder lokalen regulatorischen Vorgaben, nicht umsetzbar sind.

Die Installation einer netzbasierten, wasserstoffbasierten oder batterieelektrischen Infrastruktur zur Umsetzung der Verordnung wird durch flankierende Förderprogramme mehrerer Bundesministerien unterstützt. Während die Förderung von HVO100-Lösungen dem Zweck der AFIR dient, ist sie in Deutschland nicht förderfähig.

Neben dem direkten Einfluss auf den Flughafenbetrieb schreibt die AFIR auch den Aufbau einer Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur für Pkw und Lkw an städtischen Knotenpunkten sowie alle 200 km auf den Strecken des TEN-V-Kernnetzes vor. Da mindestens elf der deutschen Verkehrsflughäfen an diesen Trassen liegen, ergeben sich aus der Verordnung Optionen für flughafennahe Wasserstoff- bzw. Energiehubs. Dies bietet nicht nur die Anbindung der Flughäfen an das Wasserstoffkernnetz, sondern auch die Möglichkeit, dezentrale Produktionsinseln in der Nähe der Flughäfen zu etablieren, um regelmäßige Wasserstoffbereitstellungen für den Flughafenbetrieb zu gewährleisten. In der Vergangenheit wurden bereits Wasserstofftankstellen an sieben der elf Flughäfen des TEN-V-Kernnetzes errichtet, die in der Regel von lokalen oder internationalen Energieversorgern betrieben werden.

AFIF: EU-Finanzierung für alternative Kraftstoffinfrastruktur

Die Alternative Fuels Infrastructure Facility (AFIF), Teil der Connecting Europe Facility, unterstützt Projekte, die alternative Energieinfrastrukturen über das TEN-T-Netzwerk hinweg bereitstellen. In ihrer letzten Förderrunde stellte die Europäische Kommission mehr als 600 Millionen Euro für 70 Projekte in ganz Europa bereit. Diese Investitionen unterstützen Infrastrukturen, die den Transport in städtischen Gebieten, Häfen und Flughäfen dekarbonisieren.

Für die Luftfahrt kann die AFIF-Finanzierung Projekte unterstützen, die:

- Elektrizität für stationäre Flugzeuge bereitstellen
- APU-off-Betrieb an Gates und Ständen ermöglichen
- Elektrische Kapazitäten und Energieinfrastruktur erweitern
- Die Umweltleistung des Flughafenbetriebs verbessern

Durch die Senkung der Investitionsbarrieren hilft die AFIF-Flughäfen dabei, schneller auf emissionsarme Bodenoperationen umzusteigen.

Relevanz für Handlungsoptionen von Flughäfen

Die AFIF schafft somit einen klaren Rahmen, der den deutschen Verkehrsflughäfen nicht nur die Einhaltung von Umweltvorgaben erleichtert, sondern auch wirtschaftliche Anreize für die Implementierung nachhaltiger Lösungen bietet. Damit tragen sie aktiv zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs bei und sichern ihre Wettbewerbsfähigkeit im europäischen Markt. Die Synergien zwischen AFIF und TEN-T bieten Flughäfen die Möglichkeit, umfassende, nachhaltige Energiekonzepte zu entwickeln, die sowohl den technologischen Anforderungen als auch den finanziellen Möglichkeiten gerecht werden.

EU Emission Trading System (ETS) inkl. Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV)

Das EU-Emissionshandelssystem (ETS) stellt einen entscheidenden Marktmechanismus für die fortschreitende Dekarbonisierung des europäischen Kontinents dar. Energieintensive Unternehmen sind verpflichtet, Emissionszertifikate zu erwerben, die ihren tatsächlichen Emissionen entsprechen. Während anfänglich Zertifikate kostenlos vergeben wurden, müssen diese mittlerweile zu einem Marktpreis gekauft werden. Ein zentraler Handelsplatz ist die Erneuerbare Energien Börse in Leipzig, wo jährlich eine Verknappung des Angebots um durchschnittlich 2,4 % erfolgt. Dies führt zu einem steigenden Marktpreis pro Tonne CO₂, was energieintensive Unternehmen, einschließlich Fluggesellschaften, dazu anregt, ihre Emissionen zu reduzieren.

Direkt betroffen vom ETS sind Betriebe mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 20 MW, darunter große Kraftwerke und energieintensive Industrien wie die Zementproduktion oder die Eisen- und Stahlindustrie. Der Luftverkehr innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) fällt ebenfalls unter das ETS, während internationale Flüge durch das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) reguliert werden. In Deutschland obliegt die Verantwortung für die Umsetzung des ETS und CORSIA der Deutschen Emissionshandelsstelle des Umweltbundesamts.

Obwohl der Flughafenbetrieb aufgrund niedrigerer Feuerungswärmeleistungen nicht direkt vom ETS betroffen ist, könnte er dennoch Preissteigerungen durch Energieversorger erfahren. Der ETS-

Mechanismus ist jedoch von hoher Relevanz für Flughäfen, da er die Finanzierungslücke für den Umbau der Flughafeninfrastruktur verringert. Die Einhaltung der Nachhaltigkeitsziele gemäß dem Bundesklimagesetz erfordert eine rasche Umstellung auf alternative Kraftstoffe, was jedoch nicht nur wirtschaftlich, sondern vor allem regulatorisch motiviert ist. Fluggesellschaften und Energieversorger müssen die ETS-Abgabe entrichten; die daraus generierten Einnahmen können über Programme wie den Innovation Fund oder die Connecting Europe Facility an Flughäfen weitergegeben werden. Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit von Investitionsmaßnahmen zur Reduktion von Emissionen.

Relevanz des EU ETS für Handlungsoptionen von Flughäfen

1. **Umlage von Kosten:** Das ETS ermöglicht es, Kosten für die Umsetzung europäischer und nationaler Verordnungen zur Erreichung von Klimazielen auf Flughäfen umzulegen.
2. **Infrastrukturanforderungen:** Die steigenden Kosten durch das ETS können dazu führen, dass Fluggesellschaften spezifische Infrastrukturen und Bodendienste verstärkt nachfragen, um ETS-bezogene Kosten zu vermeiden.
3. **Steigende Relevanz:** Mit zunehmender Verknappung der Zertifikate wird die Relevanz des ETS für Flughäfen steigen, insbesondere im Hinblick auf die finanziellen Anreize zur Implementierung nachhaltiger Lösungen.

Zusätzlich zeigt der EU Aviation Environmental Report von 2022, dass die Luftfahrt im Rahmen des ETS zur Reduktion des Kohlenstoffausstoßes anderer Sektoren beigetragen hat, indem während des dritten Handelszeitraums (2013-2020) etwa 160 Millionen Tonnen CO₂ eingespart wurden. Die hohe Compliance-Rate von über 99,5 % im Luftfahrtsektor belegt die Wirksamkeit des Systems.

Zukünftige Entwicklungen

In den neuesten legislativen Vorschlägen der Europäischen Kommission wird angestrebt, die Luftfahrtindustrie stärker in die Klimaziele der EU einzubeziehen. Ab 2026 ist eine vollständige Auktionsierung der Emissionszertifikate vorgesehen, wobei die kostenlosen Zuteilungen schrittweise reduziert werden. Zudem werden 20 Millionen ETS-Zertifikate zur Unterstützung der Preisdifferenz zwischen konventionellen und alternativen Kraftstoffen reserviert, was insbesondere für Flughäfen von Bedeutung sein wird. Die Implementierung eines Monitoring-Systems für nicht-CO₂-Effekte ab 2025 sowie die Bereitstellung von ETS-finanzierten Unterstützungen für alternative Flugkraftstoffe verdeutlichen die verstärkten Bemühungen der EU, die Luftfahrt nachhaltig zu gestalten und gleichzeitig wirtschaftliche Anreize für Flughäfen zu schaffen.

Durch die Kombination der regulatorischen Maßnahmen des ETS und der Förderung nachhaltiger Technologien wird ein klarer Handlungsrahmen für Flughäfen geschaffen, um ihre Rolle in der Dekarbonisierung des Luftverkehrs zu stärken und ihre Wettbewerbsfähigkeit im europäischen Markt zu sichern.

Transeuropäisches Netzwerk für Verkehr (TEN-V)

Das TEN-V-Netzwerk ist ein länderübergreifendes Netzwerk europäischer Verkehrsinfrastrukturen. Es zielt darauf ab, den europäischen Binnenmarkt durch eine kontinuierliche Verbesserung der grenzüberschreitenden Konnektivität zu stärken. Es wurde 1996 als europäisches Projekt ins Leben gerufen und umfasst sämtliche Transportmittel. Investitionen fließen vor allem in die Verkehrsadern

mit dem höchsten Personen- und Warentransport. Diese sind in neun sogenannten Korridoren im TEN-V-Kernnetz organisiert, von denen jeder eine separate Koordinationsstelle auf EU-Ebene hat. Während es zunächst um eine Vereinheitlichung von Regularien, technischen Standards und der Reduzierung physischer Barrieren im transeuropäischen Transportsektor ging, legte die Europäische Kommission bei der letzten Revision der TEN-V-Verordnung im Juni 2024 den Fokus verstärkt auf Nachhaltigkeit und Resilienz. Dies bedeutet einerseits, dass die Mitgliedstaaten Förderungen für die Dekarbonisierung auf den nationalen Teilstücken der TEN-T-Korridore erhalten können. Andererseits sind sie im Rahmen der TEN-V-Regularien und deren untergeordneten Verordnungen auch dazu verpflichtet, entsprechende Maßnahmen auf nationaler Ebene umzusetzen. Der Luftfahrtsektor ist vor allem mit seinen Flughäfen im Transportnetzwerk verankert. Diese bilden Gateways für internationale Transporte sowie Knotenpunkte innerhalb des Verkehrsnetzes. Der Lufttransport dient vor allem den schnellen Verbindungen innerhalb des europäischen Transportsystems. Zeitgleich steigert er die Resilienz des Systems für den Fall, dass andere Transportmodi ausfallen oder aus anderen Gründen nicht nutzbar sind. Tabelle 3 zeigt Anzahl und Funktion der Flughäfen im TEN-V-Netz. Eine Auflistung der deutschen Flughäfen im TEN-V Kernnetz und Gesamtnetz findet sich in [Anhang 1](#)

Tabelle 2 Anzahl von Flughäfen im TEN-V Netzwerk Deutschland und Europa (Stand 2025)

Teil des TEN-V Netzes	Funktion der Flughäfen im Gesamtnetz	Anzahl Flughäfen (EU)	Anzahl Flughäfen (D)
Kernnetz	Größere Verkehrsflughäfen entlang der neun Hauptkorridore des TEN V Netzes	81	11
Gesamtnetz	Mittelgroße und regionale Flughäfen oft and Zubringern der Hauptkorridore	236	13
Gesamtanzahl		317	24

Das TEN-V-Netzwerk bildet seit der letzten Reform eine infrastrukturelle Grundlage für die Umsetzung von EU-Vorschriften zur Dekarbonisierung des Europäischen Transportwesens, wie beispielsweise der AFIR. In diesen Richtlinien werden die Flughäfen des TEN-V-Netzwerks oft explizit als umzusetzende Flughäfen erwähnt. Gleichzeitig werden diese Flughäfen als Begünstigte von europäischen oder nationalen Förderprogrammen aufgeführt. TEN-V-Flughäfen haben somit die Pflicht, Maßnahmen im Sinne des Klimaschutzes umzusetzen und diese nach Möglichkeit durch Förderungen kofinanzieren zu lassen. Dies sollte in den übergeordneten Nachhaltigkeitsstrategien der Verkehrsflughäfen hinreichend berücksichtigt werden.

Relevanz für Handlungsoptionen von Flughäfen

Das TEN-V-Netzwerk und seine entsprechenden Transformationsstrategien und Verordnungen sind für deutsche Verkehrsflughäfen von großer Bedeutung, da sich daraus eines der wichtigsten Rahmenwerke für die nationale Umsetzung der europäischen Verordnungen für den EU-Transportsektor ergibt. Flughäfen, die Teil des TEN-V-Netzes sind, sind oft unmittelbar dazu verpflichtet, strategische Maßnahmen zum Erreichen der Klimaziele umzusetzen. Gleichzeitig können diese Flughäfen entsprechende nationale und europäische Förderungen zur Umsetzung der Maßnahmen beantragen.

Das TEN-V Netzwerk gilt dabei als eines der beständigsten Rahmenwerke für Innovationen und Verbesserungen innerhalb des Europäischen Transportnetzes. Es ist von hoher Wahrscheinlichkeit, dass Innovationen entlang dieses Rahmenwerks bis 2050 und darüber hinaus umgesetzt werden. Der strategische Schwerpunkt auf eine nachhaltige Entwicklung, der aus der Revision des Rahmenwerks im Jahr 2024 hervorging, wird die Dekarbonisierung von Flughäfen als Gateways für Handel und Transport weiter vorantreiben.

Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV

Die betrieblichen Abläufe im Bereich des Flughafenbetriebs müssen so gestaltet sein, dass keine Gefahr für die Umwelt oder die Gesundheit von Mitarbeitern, Passagieren oder anderen Personen im Flughafenumfeld besteht. Eine Anpassung dieser Prozesse oder das Errichten von Anlagen und Bauten am Flughafen bedarf einer entsprechenden Prüfung und muss gegebenenfalls von der zuständigen Behörde genehmigt werden. Diese erteilt ihre Zustimmung erst, wenn alle Risiken für Umwelt und Menschen ausreichend berücksichtigt sind.

Für das Vorhalten von Wasserstoff im Flughafenbereich ist eine Speicherlösung mit Druckbehältern erforderlich. Vor der entsprechenden Errichtung benötigt der Flughafenbetreiber eine Erlaubnis nach § 18 der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln kurz *Betriebssicherheitsverordnung* (BetrSichV). Wasserstoffanlagen mit einer Speicherkapazität von über 3 Tonnen unterliegen sowohl der Betriebssicherheitsverordnung als auch dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), da sie als gefährliche Stoffe gelten und potenziell Störfälle verursachen können. Dies erfordert neben einer initialen Genehmigung durch die zuständige Behörde zusätzlich regelmäßige Prüfungen durch die Arbeitsschutz- bzw. Immissionsschutzbehörden, um die Anlagensicherheit und den Umweltschutz zu gewährleisten. Wenn die Errichtung einer Speichervorrichtung mit einem Volumen von mehr als 3 T Speicherkapazität einen B-Plan erfordert, ist eine Kombination aus Baugenehmigung, BImSchG-Genehmigung und BetrSichV-Erlaubnis notwendig. Hierbei ist zu erwähnen, dass im Rahmen der BImSchG Genehmigung oft eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erfolgen muss.

Befindet sich der Druckbehälter in einem beweglichen Fahrzeug/Gerät gelten die sicherheitszertifizierten Tanks (ISO/DIN) und das CE-Zertifikat des Fahrzeugs/Geräts als maßgeblich.

Relevanz für Handlungsoptionen von Flughäfen

- Flughäfen können auf ein bestehendes Genehmigungsverfahren zurückgreifen, um Wasserstoff in ihren Betrieb zu integrieren.
 - Industrielle Standards können nicht ohne Weiteres auf den Flughafenbetrieb übertragen werden und bedürfen einer separaten Prüfung.
-

Wasserstoffbeschleunigungsgesetz – WasserstoffBG

Das Gesetz zur planungs- und genehmigungsrechtlichen Beschleunigung von Erzeugung, Speicherung, Import und Transport von Wasserstoff – kurz Wasserstoffbeschleunigungsgesetz (WasserstoffBG) – ist ein relevanter Einflussfaktor für die Nutzung von Wasserstoff an deutschen Verkehrsflughäfen. Zweck des WasserstoffBG ist es, die rechtlichen Rahmenbedingungen zu schaffen, unter denen der Auf- und Ausbau von Erzeugung, Speicherung, Import und Transport von Wasserstoff beschleunigt und vereinfacht wird. Es bündelt Einzelbeschleunigungsmaßnahmen, um Planungs- und

Genehmigungshürden zu senken, Investitionsrisiken zu verringern und Planungssicherheit für Investoren und Betreiber zu verbessern.

Die Hemmnisse, die das im Februar 2026 vom Bundestag beschlossene Gesetz (Bundestag.de, 2026: Bundestag beschließt Wasserstoff-Beschleunigungsgesetz) adressiert, decken sich mit einigen der Barrieren, die von Flughafenbetreibern in Experteninterviews im Rahmen dieser Studie genannt wurden (siehe [Abschnitt 7.3](#)). Eine zentrale Barriere besteht laut den Experten in dem hohen Aufwand und den hohen Kosten für die Integration von Wasserstoff, der einer zunächst eher geringen Nachfrage gegenübersteht und sich möglicherweise nicht durchsetzt. Ein schnelles Genehmigungsverfahren und einheitliche Standards wurden von lokalen Produzenten von grünem Wasserstoff bzw. Mittelsmännern als gleichwertiges Hemmnis wahrgenommen. Zudem betrifft dies den Lkw-gebundenen Transport zwischen Absperrpunkten des Wasserstoff-Kernnetzes (WKN) und dem Flughafenvorfeld.

Die deutschen Verkehrsflughäfen können sich dank des Beschleunigungsgesetzes auf schnellere und schlankere Genehmigungsverfahren einstellen. Hierbei ist zu erwähnen, dass auch andere bestehende Gesetze im Rahmen des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes angepasst wurden, um den Hochlauf und den Zugriff auf eine stabile Wasserstoffversorgung zu ermöglichen sowie geringere Gesamtinvestitionskosten durch optimierte Prozesse und kürzere Realisierungszeiträume zu erreichen.

Relevanz für die Handlungsoptionen von Flughäfen

Flughäfen können unter anderem in folgenden Bereichen von dem Gesetz profitieren:

- Erstellung lokaler Speicher- und Distributionsinfrastruktur
- Errichtung von flughafennahen, dezentralen Produktionsinseln.
- Errichtung von flughafennahen Auspeisestationen, H₂-Aufbereitungsanlagen und LKW-Füllstationen.
- Errichtung von Anlagen zur Produktion von grünem Wasserstoff und E-SAF, um die Verfügbarkeit von SAF zur Erfüllung der Mandate aus RefuelEU zu steigern.

Langfristig unterstützt der Gesetzesrahmen die Klimaziele, erhöht die Versorgungssicherheit und fördert den Markthochlauf der Wasserstoffinfrastruktur am Flughafenvorfeld einschließlich lokaler Grünerzeugung und logistischer Zwischenstufen. Insgesamt steigert das WasserstoffBG die Wahrscheinlichkeit, dass Wasserstoff als Energieträger im Luftverkehr flächendeckend etabliert wird.

Lokale Regularien und Vorgaben des Flughafenbetriebs

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass alle oben angeführten Regularien von strategischer Bedeutung für die Dekarbonisierung des Betriebs deutscher Verkehrsflughäfen sind. Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger kann die Umsetzung bzw. Erfüllung der Strategien positiv beeinflussen. Somit gilt er als legitimer Ersatz für fossile Energieträger und ist dementsprechend förderfähig.

Gleichzeitig schreibt keine der Regularien die Nutzung von Wasserstoff explizit vor. Sobald jedoch ein ernsthafter Versuch unternommen wird, Wasserstoff in das bestehende Flughafen-Ökosystem zu integrieren, sehen sich Anwender unmittelbar mit den lokalen Regularien konfrontiert, die unabhängig von der Defossilierung des Transportwesens existieren. Die folgende Tabelle listet die wesentlichen lokalen Regularien auf, die im Flughafenbetrieb berücksichtigt werden müssen, um Wasserstoff als Kraftstoff in Pilotprojekten oder im Regelbetrieb einzusetzen.

Tabelle 3 Lokale Regularien des Flughafenbetriebs (Vorfeld)

Regulierung	Beschreibung/Hürden
Nutzungsgenehmigung	Geräte und Fahrzeuge müssen vor Inbetriebnahme bei der Standortleitung angemeldet werden. Nutzer müssen eine betriebliche Genehmigung für das Nutzen und Abstellen im Sicherheitsbereich (Vorfeld) erhalten.
Straßenverkehrsordnung (StVO)	Obwohl es sich faktisch um ein Betriebsgelände handelt, gilt auf den meisten Flughäfen der StVO. Auch wenn keine Kennzeichenpflicht besteht so müssen die Fahrzeugtauglichkeit und Verkehrssicherheit im Vorfeldverkehr gewährleistet werden. Das kann besonders bei Pilotprojekten eine Herausforderung darstellen, bei denen Fahrzeuge zum Einsatz kommen, die keine Zulassung oder TÜV-Überprüfung erhalten.
Betriebssicherheitsverordnung §18	Anlagen mit Druckgeräten einschließlich Fahrzeuge und mobile Geräte müssen am Flughafen immer im Kontext der Sicherheit und Gesundheit des gesamten Umfelds betrachtet und durch eine zuständige Behörde genehmigt werden. Eine Hürde besteht sowohl in dem administrativen Aufwand als auch in den beizulegenden Risikoanalysen im Falle von Prototypenvalidierungen im Realbetrieb.
Bundes Immissionschutzgesetz (BImSchG)	Die Betriebssicherheitsverordnung (§18) regelt die Genehmigung von Anlagen, die explosionsgefährliche Stoffe, wie Wasserstoff, ab einer bestimmten Menge handhaben. Anlagen, die mehr als 3 Tonnen Wasserstoff lagern, unterliegen dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und der Betriebssicherheitsverordnung. Für die Genehmigung sind umfangreiche Unterlagen erforderlich, darunter ein Bauantrag, statische Berechnungen und ein Brandschutzgutachten.
Baugenehmigung	Die Baugenehmigung für ein Wasserstofflager stellt die zuständige Bauaufsichtsbehörde der Gemeinde, des Landratsamtes oder der Stadtverwaltung aus, wobei der Antragsteller in der Regel ein Bauvorlageberechtigter sein muss. Je nach Größe und Art der Anlage kann auch ein Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erforderlich sein, für das wiederum andere Behörden zuständig sind.
Haftung	Der Betrieb von Fahrzeugen oder Anlagen am Flughafen muss versichert werden, um die Haftung an Schnittstellen zwischen verschiedenen Akteuren abzusichern. Dies betrifft die Schnittstelle zwischen dem Flughafenbetreiber und den Airlines aber auch die Sicherheit der Mitarbeiter und Passagiere. Hier ergeben sich Hürden, da Unternehmen oft nicht in der Lage sind hohe Schadenssummen wie z. B. an Flugzeugen zu decken während Flughafenbetreiber nicht gewillt sind die Haftung für eine Technologie zu übernehmen, die ihnen nicht gehört.

Alle operativen oder infrastrukturellen Änderungen im Flughafenbetrieb benötigen eine vorausgehende Sicherheitsprüfung, die gegebenenfalls durch die lokale Luftfahrtbehörde (LBA) abzunehmen ist. In jedem Fall muss die Prüfung jedoch durch die Betriebssicherheitsverordnung abgedeckt sein. Wenn es bei der Veränderung um Verfahren mit einer Umwelteinwirkung, speziell auf Menschen oder Natur, geht, ist die Landesumweltbehörde zu informieren. Um Anpassungen im Betriebsablauf unter verschiedenen Aspekten genehmigen zu lassen, müssen potenzielle Störungen definiert und die mit ihnen einhergehenden Risiken bewertet werden. Um erfolgreiche Szenarien für den sicheren Betrieb zu definieren, die die Grundvoraussetzung darstellen, ist es daher wichtig, die richtigen Stakeholder zu integrieren. Ein Großteil kann hierbei vom Flughafen selbst erarbeitet werden, während ein geringer Anteil von externen Spezialisten erfolgen muss. Entscheidend ist, dass ausreichend nachvollziehbare Grundlagen etabliert werden, um eine Übertragbarkeit bzw. relevante Anpassung von

standardisierten Handhabungen von Wasserstoff aus anderen Industrien in den Flughafenbetrieb zu gewährleisten.

5.2. Ableitung pragmatischer Anforderungen für Flughäfen & Betreiber

Die folgende Tabelle zeigt eine Ableitung pragmatischer Anforderungen aus den relevanten Rahmenwerken für die Nutzung von Wasserstoff and deutschen Verkehrsflughäfen auf:

Tabelle 4 Pragmatische Anforderungen für Flughäfen & Betreiber

Art der Anforderung	Relevanter Umsetzungsbedarf
Rechts- und Regulierungskonformität	Nationale Umsetzung EU-Verordnungen beachten (Klimagesetz, RED, RED III, AFIR, AFIF, ETS/CORSIA). Flughäfen müssen nationale Rechtsvorgaben erfüllen und EU-Vorgaben bei Bedarf auf nationaler Ebene wirksam werden lassen. AFIR-Bodenstromversorgung: Stage-1-Investitionen in nachhaltigen Bodenstrom (TEN-V-Kernnetz; ab 2025 an Fahrgastbrücken, ab 2030 auch Außenpositionen). RED III RFNBO-Verpflichtungen: Nutzung von grünem Wasserstoff und grünen Kraftstoffen muss wirtschaftlich sinnvoll gemacht werden (Herstellerzertifikate, RFNBO-Quote 2026/2030-2030+). ETS-/MRV-Anforderungen beachten; potenziell Kosten auf Flughäfen umlegen; Möglichkeit zur Nutzung von Innovationsfonds/Zuschüssen.
Wasserstoffstrategie und Infrastruktur	Wasserstoff als möglicher Energieträger prüfen (Betriebsstoffe, Bodendienste, Vorfeldfahrzeuge). Lokale Wasserstoffinfrastruktur aufbauen: Speicher, Distribution, Betankung, Vorfeld-LKW, On-Site Produktion, Hub-Standorte nahe Flughäfen. Kernwissen zur Rechtssicherung aufbauen: Genehmigungen gemäß BetrSichV, BImSchG, UVP ggf. erforderlich; das Wasserstoffbeschleunigungsgesetz nutzen
Sicherheit, Genehmigungen, Haftung	BetrSichV, BImSchG, UVP, Bau- und Umweltgenehmigungen rechtzeitig sichern. Sicherheits- und Risikobewertungen (SRA) für neue Prozesse, insbesondere bei Wasserstoffprozessen. Haftungsmodelle klären (Versicherungslösungen, Schnittstellen-Haftung zwischen Flughafenbetreiber, Airlines, Dienstleistern).
Infrastruktur- und Betriebstransition	Austausch/Aufrüstung konventionelle Bodendienste durch emissionsarme Optionen analysieren und Energiemix ausarbeiten (H ₂ , Elektro, HVO100) Lade- und Tankinfrastruktur ausbauen; AFIF-Fördermittel nutzen. Netzinfrastruktur für grüne Energie sicherstellen, inklusive netzbasierte Anbindungen (ggf. Smart Grids für eigens produzierte erneuerbare Energie
Förder- und Finanzierungsstrategie	Nationale Förderprogramme für Wasserstoff, SAF, Batterien, H ₂ -Logistik nutzen. AFIF, Horizon Europe, CEF, Innovation Fund nutzen; RFNBO-Quotenhandel beachten. TEN-V-Korridore nutzen; sich an Förderanträgen für die Dekarbonisierung von TEN-V-Netzabschnitten beteiligen.
Monitoring und Transparenz	ETS-/MRV-Reporting-Daten erfassen; Monitoring-Systeme für nicht-CO ₂ -Effekte ab 2025 implementieren. Fortschritt der Dekarbonisierung regelmäßig berichten; Stakeholder-Transparenz sicherstellen.

Diese Maßnahmen lassen sich zeitlich in folgenden Zeiträumen zusammenfassen:

Zeitraum	Maßnahmen
2025–2027:	Ausbau nachhaltiger Bodenstrominfrastruktur an TEN-V Flughäfen; erste Wasserstoff-GPU-Umrüstungsvorhaben starten.
2026–2030	RFNBO-Quotenstrategie prüfen; Pilotprojekte für wasserstoffbetriebene Bodendienste ausrollen.
2030–2035:	Netzinfrastruktur und dezentrale Produktionsinseln in Betrieb; erste Kurzstreckenflüge mit Wasserstoffprototypen prüfen.
Ab 2040	Skalierung von Wasserstoff-aktivierten Vorfeldprozessen; Integration von H ₂ -E-SAF-Angeboten zur Erfüllung der Reduktionsziele.

Flughäfen sollten für die Implementierung von Wasserstoff im Flughafenbetrieb eine Roadmap entwickeln, die neben den Dekarbonisierungsmaßnahmen auch regulatorische Abhängigkeiten, Investitionspläne und Stakeholder-Governance abbildet und die [Masterplanung](#) am Flughafen adressiert.

5.3. Einordnung der Erkenntnisse in die (NWS 2023) & „Klimaneutrale Luftfahrt“

Die Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie (NWS 2023) berücksichtigt den Luftverkehr nicht in der Tiefe, setzt jedoch gemeinsam mit dem Positionspapier „Klimaneutrale Luftfahrt“ wichtige strategische Akzente aus denen sieben Kernpunkte hervorgehen (Siehe Abbildung 8)



Abbildung 8 Kernpunkte für die Luftfahrt in der Fortschreibung NWS

Im Folgenden werden die einzelnen Kernpunkte, entlang der in M2 und M3 gewonnenen Erkenntnisse, hinsichtlich einer notwendigen Präzisierung in der NWS 2023 (*BMWK (Hg.) Juli 2023*) dargestellt. Die Präzisierung kann durch die teils enge Verzahnung der Kernpunkt nicht trennscharf erfolgen.

Förderung der Entwicklung von Wasserstoff als nachhaltigen Kraftstoff für die Luftfahrt

Aufgrund seiner Eigenschaften besitzt Wasserstoff das Potenzial, fossile Energieträger in der Luftfahrt zu substituieren. Der wirtschaftliche Betrieb von Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen wird jedoch voraussichtlich nicht sofort ermöglichen sein; vielmehr erfordert er verschiedene Anschubfinanzierungen und regulatorische Maßnahmen, um eine kritische Schwelle für den Regelbetrieb zu überschreiten. Zwar können gewisse Effekte externer Faktoren wie Preisgestaltung, Verfügbarkeit und gesetzliche Vorgaben zu einer Verkleinerung dieser Hürde beitragen, doch erfordert die Anlaufphase vor allem eine strategische Förderung durch das Flughafenmanagement bzw. Flughafenverbände. Vor diesem Hintergrund ist eine detaillierte Ausarbeitung der Rolle des Luftverkehrs im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) notwendig.

Konkret sollten folgende Bausteine adressiert werden:

- Foren für einen kontinuierlichen Dialog mit Flughäfen, die es Flughafenbetreibern ermöglichen, sich risikoorientiert und mit geringem Einstiegshindernis schrittweise in das Thema Wasserstoff zu integrieren.

- Entwicklung eines langfristigen Konzepts zur Anbindung von Flughäfen an das Wasserstoffkernnetz via Zwischenlösungen bis zur Erreichung relevanter Verbrauchsmengen.
- Nationale Angleichung europäischer Verordnungen, die Wasserstoff explizit als Alternative zur Elektrifizierung zulassen.
- Vereinfachung von Genehmigungsverfahren für betriebliche Anpassungen im Hinblick auf Infrastruktur und Prozesse, einschließlich der Umsetzung des [Wasserstoffbeschleunigungsgesetz](#) auf lokaler Ebene.

Unterstützung von Forschungsprojekten für die Anwendung von Wasserstofftechnologien im Luftverkehr

Der Hochlauf von Produktions- und Importkapazitäten sowie die bedarfsgerechte Verteilung versprechen zunächst einen Einfluss auf die verfügbare Menge an grünem Wasserstoff; mittelfristig könnten sich daraus auch Marktpreiswirkungen ergeben. Für die Nutzung von Wasserstoff an Flughäfen ist jedoch eine gestärkte Nachfrageseite entscheidend, die nur dann entsteht, wenn Flughäfen über „echte Optionen“ verfügen, fossile Kraftstoffe durch wasserstoffbasierte Fahrzeuge und Geräte zu ersetzen. Aus Betreibersicht gelten Optionen als „echt“, wenn sie verfügbar, einsetzbar und wirtschaftlich vertretbar sind.

Gegenwärtig existieren in Europa diverse Pilotanlagen und Prototypen, jedoch keine marktfertige Lösung für wasserstoffbetriebene Bodendienstfahrzeuge oder Fluggeräte. Folglich bleibt die Nachfrage nach Wasserstoff an Flughäfen bislang auf Kleinstmengen beschränkt, und Investitionen in lokale Infrastruktur erscheinen wirtschaftlich nicht lohnend.

Die Förderung wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen mit Blick auf marktfertige Produkte bleibt folglich relevant; dieser Schwerpunkt war vor allem im zweiten Nationalen Innovationsprogramm für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP 2) und der Bodenstrom Richtlinie verankert. Eine Fortsetzung der Programme oder eine kleinere Version für den Luftverkehrsbereich könnte in der Initialisierungsphase eine wichtige Brücke darstellen, um die Nachfrage nach Wasserstoff an Flughäfen zu stabilisieren und die Risiken für OEMs sowie Flughäfen zu mindern. Forschung und Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Vorfeldfahrzeugen, lokaler Infrastruktur und Betankungsvorgängen einschließlich Kleinstflugzeuge können unmittelbar umgesetzt werden. Langfristige F&E-Projekte für flüssigen Wasserstoff im Flugbetrieb bedürfen zunächst einer Einigung zwischen OEMs und Fluggesellschaften. Eine luftfahrtbezogene Interpretation der Fortschreibung sollte in folgenden Punkten Klarheit finden:

- Voraussetzungen zur Förderung von „wirtschaftlichen Demonstratoren“ und der Markteinführung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen der Bodendienste

Aufbau der notwendigen Infrastruktur für die Produktion, Lagerung und Verteilung von Wasserstoff an Flughäfen

Zusätzlich zu den wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und Geräten benötigt der Flughafen eine eigene Wasserstoffinfrastruktur, um deren Funktionalität als Teil der Gesamtfunktionalität des Flughafens zu gewährleisten. Für die Nutzung von Wasserstoff an Flughäfen wird bis 2035 eine infrastrukturelle Zwischenlösung benötigt, die sich schnell umsetzen lässt, sobald sie auf Managementebene Rückhalt erfährt. Diese Lösung muss ein akzeptables Kosten- und Risikoprofil aufweisen und ohne

langwierige Genehmigungsverfahren umsetzbar sein. H₂ wird sich etablieren, wenn Flughäfen frühzeitig die Vorteile erkennen, statt aufgrund erfahrener Hürden strategische Korrekturen vorzunehmen. Darüber hinaus ist es wichtig, dass Flughäfen für das Wachstum und die Verstetigung der Wasserstoffinfrastruktur einen geordneten Übergang in eine feste Infrastruktur finden. Die NWS sollte Flughäfen als Endverbraucher im Blick behalten, selbst wenn gegenwärtig keine nennenswerte Nachfrage von ihnen ausgeht. Wichtig ist, dass der nationale Wasserstoffhochlauf durch ein grundlegendes Konzept für eine mitwachsende Infrastruktur an Flughäfen und vergleichbaren großen Anlagen der Verkehrsinfrastruktur etabliert wird, das sich entlang der Nachfrage verstetigt. Dies bezieht sich sowohl auf die letzte Meile, durch die Flughäfen mit Ausspeisepunkten des Kernnetzes oder dezentralen Elektrolyseuren verbunden werden, als auch auf die Genehmigungsverfahren und Standards für eine wachsende Wasserstoffinfrastruktur am Flughafen selbst. Zudem sollte die NWS die entgegengesetzte Richtung im Blick behalten und Flughäfen als potenzielle Standorte für Pufferspeicher des Kernnetzes betrachten.

- Ausarbeitung von flughafenspezifischen Beschleunigungsmaßnahmen im Sinne des jüngst beschlossenen [Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes](#)
- Förderungen des Transfers von lokalem Wissen und Kompetenzen zur Umsetzung von Beschleunigungsmaßnahmen für den Aufbau der notwendigen Infrastruktur für die Produktion, Lagerung und Verteilung

Schaffung von rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt

Mit dem Wasserstoffbeschleunigungsgesetz ist bereits eine wesentliche Hürde für die Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen oder vergleichbaren Verkehrsinfrastrukturanlagen überwunden worden. Da betriebliche Änderungen an Flughäfen von verschiedenen Behörden beeinflusst werden, ist es essenziell, dass die Auswirkungen des Gesetzes auf lokaler Ebene umgesetzt werden und dass zentrale Ansprechpartner etabliert werden. Darüber hinaus ist von großer Bedeutung, einheitliche Standards für einzelne technische Schnittstellen und Verfahren zu definieren. Obwohl es existierende Industrienormen für den Umgang mit gasförmigem Wasserstoff gibt, bestehen gegenwärtig verschiedene technische Standards aus anderen Industriezweigen. Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) benötigt einen klaren Fokus auf die einheitliche Übertragung von Normen in den Luftfahrtsektor, um Insellösungen und kostenintensive Anpassungen zwischen den Akteuren zu vermeiden. Der Einsatz von Wasserstoff an deutschen Verkehrsflughäfen erfordert einen klaren nationalen Standard, der auf bestehenden und verfügbaren Technologien aus anderen Sektoren basiert. Die Sektorenkopplung sollte hierbei eine zentrale Rolle spielen, um die Vorteile der Nachfragebündelung zu realisieren. Die nationalen Standards sollten, wo möglich, auf europäischer Ebene koordiniert werden.

Kollaboration mit Unternehmen der Luftfahrtbranche um den Einsatz von Wasserstoff voranzutreiben

Für den relevanten Durchbruch der Nachfrage nach Wasserstoff und der damit verbundenen Infrastruktur in der Luftfahrtbranche bedarf es einer Einigung zwischen Herstellern (OEMs) und Airlines hinsichtlich der Rolle von H₂ im Flugverkehr. Bis dahin wird H₂ vorrangig eine Nischenlösung für Bordingenstände und als Rohstoff für die Produktion von nachhaltigen Flugkraftstoffen (SAF) darstellen, womit eine indirekte Nutzung von Wasserstoff zur Treibhausgasreduktion angestrebt wird. Eine

Kollaboration mit den [Flughafenbetreibern](#), [Bodenabfertigern / GSE-Dienstleistern](#) und Fahrzeug-/Geräteherstellern erfolgt bereits über nationale Innovations- und Transformationsförderungen sowie verschiedenen Formen des Dialogs zwischen den Branchenakteuren und Vertretern den Ministerien des Bundes und der Länder. Diese sollten bis zur Verstetigung des Marktes beibehalten werden.

Die Kollaboration mit Herstellern von wasserstoffbetriebenen Luftfahrzeugen liegt gegenwärtig vor allem bei der technischen Entwicklung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen. Ein entsprechender Fokus fehlt jedoch für die Entwicklung des Flughafennetzwerks, das die entsprechende Infrastruktur vorhält. Laut Brancheninformationen erfolgt eine Nachfrage nach gasförmigem Wasserstoff als primärem Flugkraftstoff zunächst bei Kurzstreckenflügen mit kleineren Flugzeugen (siehe [Abbildung 25](#)). Für den Markteintritt dieser Flugzeugtypen ist der Ausbau eines Netzwerks von Flughäfen entscheidend, an denen wasserstoffbetriebene Flugzeuge eingesetzt werden können. In Frage kommen hierfür deutsche Regional- und Saisonflughäfen sowie Bereiche für General Aviation größerer Verkehrsflughäfen, die Point-to-Point-Flüge anbieten.

Die Koordination dieser Flughäfen zur Etablierung eines bundesweiten bzw. europäischen Netzwerks für das batterieelektrische Fliegen hat bereits im Jahr 2025 mit der Gründung des Albatross-Netzwerks (ALBATROSS 2025) stattgefunden. Die Erweiterung des Netzwerks oder die Einrichtung von Dependancen für wasserstoffbetriebene Flugzeuge wäre der nächste logische Schritt. Dieser Schritt müsste jedoch durch einsatzfähige Wasserstoffflugzeuge gerechtfertigt werden. Die Bundesministerien sollten die Entwicklung im Auge behalten und mit den entsprechenden Herstellern, Flughafenbetreibern und Infrastrukturherstellern im Gespräch bleiben, um das dichte Netz an Flugplätzen und Regionalflughäfen gewinnbringend nutzen zu können.

Dieser Schritt könnte zudem die Debatte zwischen Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit langfristig entschärfen. Bei Point-to-Point-Flügen innerhalb Europas gibt es bei deutschen Verkehrsflughäfen demnach 50 % weniger Angebote als bei Flughäfen aus dem europäischen Ausland (BDL, 2024). Auch wenn weniger innereuropäische Flüge aus Sicht des Klimawandels grundsätzlich einen positiven Effekt darstellen, beeinflussen sie jedoch auch die Konnektivität der Flughäfen und somit deren Wettbewerbsfähigkeit. Der Ausbau eines klimafreundlichen Netzwerks für Kurstreckenflüge mit der Perspektive, dieses in ein europäisches Netz zu erweitern, könnte langfristig Abhilfe in der Vereinbarkeit von Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit schaffen.

Des Weiteren wäre der Lernprozess durch die Nutzung von gasförmigem Wasserstoff an kleineren Verkehrsflughäfen bereits eine wichtige Voraussetzung für den geplanten Einsatz von wasserstoffbetriebenen Mittelstreckenflügen mit Flüssigwasserstoff, der ab 2040 erwartet wird. Für einen raschen Markteintritt wäre es nicht zweckdienlich, erst zu diesem Zeitpunkt relevantes Wissen und die entsprechende Infrastruktur an Flughäfen zu berücksichtigen. Ein grundlegendes Branchenwissen sollte zu diesem Zeitpunkt lediglich bedarfsgerecht angepasst oder skaliert werden. Die Nationale Wasserstoffstrategie sollte folgende Aspekte der Kollaboration berücksichtigen:

- gezielte Kollaboration mit Unternehmen der Luftfahrtbranche etablieren, die zweckdienlich für den Ausbau eines integrierten Flughafennetzes für H₂-Flüge sind
- Standorte stärken, an denen Wissen zu diesem Thema akkumuliert wird, sowie einen Mechanismus festlegen, wie dieses Wissen allen Verkehrsflughäfen zugänglich gemacht wird.

Perspektivisch ist es zudem wichtig, dass die NWS einen starken Harmonisierungsauftrag erhält, durch den einheitliche Genehmigungsverfahren für beispielweise Verflüssigungsanlagen und LH₂-Tanks in allen 16 Bundesländern etabliert werden, um Schnittstellenkonflikte und kostenintensive Konvertierungsmaßnahmen zu vermeiden.

Mitwirkung an der Entwicklung internationaler Standards für die Nutzung von Wasserstoff in der Luftfahrt

Die Entwicklung internationaler Standards für die Nutzung von Wasserstoff in der Luftfahrt muss weiterhin ein zentrales Anliegen der nationalen Wasserstoffstrategie Deutschlands bleiben. Im Luftverkehrssektor treffen grundsätzlich nationale Regularien auf internationale Standards, was eine enge Zusammenarbeit und Koordination zwischen verschiedenen Ländern und Organisationen erfordert. Wie in [Abschnitt 5.1](#) erwähnt, sind internationale Standards ein limitierender Faktor für die Umsetzung von Nachhaltigkeitsstrategien im Flughafen oder Flugbetrieb geht. Eine frühe Einbindung von Institutionen wie IATA, ICAO oder ACI die verschiedenen Akteure der Branche Repräsentieren ist maßgeblich für den Erhalt der Konnektivität und Wettbewerbsfähigkeit deutscher Verkehrsflughäfen entlang der Transformation zu einem defossilisierten Flughafenbetrieb.

Aus technologischer Sicht trägt also jede nationale Maßnahme die Verantwortung, internationale Standards aktiv mitzugestalten. Auch die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger im Flughafenbetrieb kann sich nur im Netzwerk durchsetzen, was bedeutet, dass die Einführung von Wasserstofftechnologien im Luftverkehr nicht national betrachtet werden kann. Flughafenstandards für Point-to-Point-Netzwerke sind entscheidend, um die Effizienz und Sicherheit im Luftverkehr zu gewährleisten. Die Anwendbarkeit von Wasserstoffgeräten an verschiedenen internationalen Flughäfen ist dabei von zentraler Bedeutung. Dies betrifft sowohl den Return on Investment (ROI) für Hersteller als auch die Reichweite von Zertifizierungskosten, die signifikante Einflussfaktoren für die Markteinführung darstellen.

Auch auf europäischer Ebene ist eine Koordinierung der Tätigkeiten unerlässlich, um eine einheitliche und effiziente Regulierung zu gewährleisten. In diesem Kontext spielt das Deutsche Institut für Normung (DIN) eine wichtige Rolle, insbesondere bei Anpassungen an internationale Standards wie ISO und EN. So könnten bereits jetzt sinnvolle Standards zu Sicherheitsbeständen beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur und den operativen Prozessen zur Belieferung und Betankung von Flugzeugen und Fahrzeugen der Betriebsdienste definiert werden. Diese sind essenziell, um die Sicherheit und Effizienz beim Einsatz von Wasserstofftechnologien im Luftverkehr zu gewährleisten und um entsprechende Versicherungsfragen berücksichtigen zu können.

Sicherstellung, dass der Einsatz von Wasserstoff im Luftverkehr zur Erreichung (inter-) nationaler Klimaziele beiträgt

Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Sinne des Bundesklimaschutzgesetzes und des Europäischen Klimaschutzgesetzes und somit zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens müssen einerseits nach ihrem Wirkungsgrad und andererseits nach dem Zeitpunkt ihrer Umsetzung bemessen werden. Wenn Wasserstoff als Alternative zu fossilen Kraftstoffen die Dekarbonisierung des Flughafens vorantreiben soll, muss die Inbetriebnahme so früh wie möglich erfolgen. Entfaltet sich die Wirkung zu spät, wäre die Investition in diese Technologie aus klimapolitischer

Sicht eine ineffiziente Nutzung finanzieller Mittel. In diesem Fall wäre es sinnvoller, eine andere Technologie zu fördern, die eine schnellere Transformation des Energiemixes ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund ist eine differenzierte Betrachtung der Anwendungsbereiche erforderlich: Fördermaßnahmen sollten gezielt auf jene Teilbereiche des Flughafenbetriebs ausgerichtet werden, in denen Wasserstoff kurzfristig oder mittelfristig eine nachweisbare Wirkung entfalten kann. Dazu zählen insbesondere energieintensive und schwer elektrifizierbare Anwendungen im Bodenbetrieb, während andere Bereiche weiterhin effizienter durch batterieelektrische Lösungen oder alternative Kraftstoffe adressiert werden können.

Es muss eine zentrale Aufgabe der NWS bleiben, die Bedingungen der Wasserstoffnutzung an Flughäfen zu verbessern, ohne die Wettbewerbsfähigkeit und die betriebliche Zuverlässigkeit der Flughäfen negativ zu beeinflussen. Die NWS muss weiterhin einen zielführenden Beitrag dazu leisten, dass die Entwicklung wasserstoffbetriebener Lösungen für den Flughafenbetrieb schneller voranschreitet, als es der Markt auf natürlichem Wege erreichen würde. Sie muss Lösungen fördern, bei denen eine solche Entwicklung möglich ist, und dafür Sorge tragen. Sie muss einen Blick auf die europäischen Entwicklungen haben und diese ggf. mit nationalen Entwicklungsprogrammen koordinieren. Dies kann beispielsweise die Zulassung von blauem Wasserstoff als Übergangstechnologie sein, um die gegenwärtigen Bedingungen zu verbessern.

Eine Zusammenfassung der möglichen Maßnahmen für die Präzisierung der Handlungsfelder für den Luftverkehr in der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS2023) findet sich in [Anhang 4](#)

5.4. Wasserstoff im Kontext der systemischen Resilienz

Ein bedeutender, jedoch wenig diskutierter Aspekt des Wasserstoffhochlaufs in Deutschland ist die Widerstandsfähigkeit des europäischen Transportsystems, unabhängig von der ökologischen Nachhaltigkeit. Zwar ist die drastische Reduktion von Treibhausgasen der vorrangige Grund für die Überführung des europäischen Transportsystems in ein de-fossiles Zeitalter, doch erfordern auch die geopolitischen Abhängigkeiten im Erdölsektor und die veraltete Infrastruktur im Stromnetz zunehmend den Hochlauf steuerbarer Energiealternativen, um das Transportsystem im Störfall aufrecht erhalten zu können.

Eine gesunde Grundlage hierfür findet sich im Grundsatz der „Versorgungssicherheit“, der im Energiewirtschaftsgesetz verankert ist und von der Bundesnetzagentur umgesetzt wird. Bedrohungen für diese Sicherheit können diverse Schocks sein, die auf geopolitische Konflikte, Naturkatastrophen oder Sabotageakte zurückzuführen sind. Hinzu kommen schleichende Belastungsrisiken, beispielsweise die Ermüdung der Infrastruktur oder die Auswirkungen des Klimawandels, welche das Transportnetz schwächen und zu Ausfällen führen können. Zwar wurde in der Vergangenheit viel in das Verständnis und die Stärkung bestehender kritischer Infrastrukturen investiert. Der Aufbau von Alternativen im nationalen Energiemix zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Gesamtsystems ist jedoch noch in der strategischen Entwicklung.

Erste Studien auf europäischer Ebene zeigen einen akuten Handlungsbedarf bei der Steigerung der Resilienz des Transportsystems. Der Flughafenverband ACI Europe hat die Bemessung resilienter

Verkehrsflughäfen gemeinsam mit Eurocontrol bereits zu einer strategischen Priorität erklärt. Einige Flughäfen denken bereits über wasserstoffbetriebene Geräte des Bodendienstes nach, um Redundanzen zu schaffen und so einen zuverlässigen Betrieb bei Ausfällen anderer Geräte zu gewährleisten.

Unter den richtigen Bedingungen und bei Berücksichtigung der lokalen Prozesse hat Wasserstoff das Potenzial, die Zuverlässigkeit des Flughafenbetriebs bei spontanen Einzelausfällen zu stabilisieren und einen Mindestbetrieb im Katastrophenfall zu gewährleisten. Diese Betrachtung ist für eine relevante Zukunftsperspektive des Einsatzes von Wasserstoff im Flughafenbetrieb von Bedeutung. Betrachtet man jedoch lediglich das Klimajahr 2045 als Grundlage für die Entscheidung, ob Wasserstoff eine Rolle im Transportsektor und somit im Luftverkehr spielen sollte, so besteht das relevante Risiko, dass die Bereitstellung von grünem Wasserstoff und die Verfügbarkeit wasserstoffbetriebener Flugzeuge und Bodenfahrzeuge zu spät erfolgen, um einen nennenswerten Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen zu leisten. In diesem Fall wäre eine Investition jedoch nicht unnötig, sondern sinnvoll. Der höchste Wirkungsgrad von Investitionen bestünde demnach in Bereichen, die sowohl emissionsmindernd als auch Resilienz-steigernd sind. Für den Flughafenbetrieb gibt es hierzu gegenwärtig keine wissenschaftlichen Untersuchungen. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese aufgrund des wachsenden Bewusstseins für ein nachhaltiges und resilientes Transportwesen in naher Zukunft verfügbar sein werden.

6. Anbindung an das H₂-Kernnetz

6.1. Planungsstand deutsches H₂-Kernnetz (bis 2032) – Relevanz für Flughäfen

Das Wasserstoff-Kernnetz soll bis 2032 potenzielle Nutzer von Wasserstoff an nationale Produktionsstandorte und den Import an Grenzübergangspunkten (GÜP) von grünem Wasserstoff anbinden, hierzu zählen zum Beispiel große Industriezentren (BNetzA, 2026). Für den Antrag sind deutsche Verkehrsflughäfen nicht explizit als Verbraucher erwähnt. Jedoch kann die Annahme getroffen werden, dass die verbesserte Verfügbarkeit und ein erwarteter Preisrückgang von grünem Wasserstoff aus dem WKN einen positiven Einfluss auf die Relevanz des Energieträgers in den Dekarbonisierungsstrategien der deutschen Verkehrsflughäfen haben. Diese Annahme stützt sich auf geführte Experteninterviews mit Wasserstoffverbänden, Fernnetzbetreibern und relevanten Energieexperten der Luftfahrtbranche. Sie wird durch verschiedene Faktoren begünstigt.

Wie in Abbildung 9 ersichtlich ist, befinden sich alle 11 Standorte der TEN-V Verkehrsflughäfen entlang der Trassenführung des genehmigten WKN. Hierbei handelt es sich vorrangig um Umbauleitungen die aufgrund der bestehenden Infrastruktur ein geringeres Planungsrisiko als Neubauleitungen aufweisen. Erfolgt der Wasserstoffhochlauf bis 2032 wie geplant so werden alle 11 Flughäfen des deutschen TEN-V Kernnetzes implizit berücksichtigt. Zeitgleich ist es von entscheidender Bedeutung zu verstehen, welche Handlungsoptionen Flughafenbetreiber bis 2030 hätten, um den Wasserstoff aus der Leitung zum Flughafenvorfeld zu bekommen.

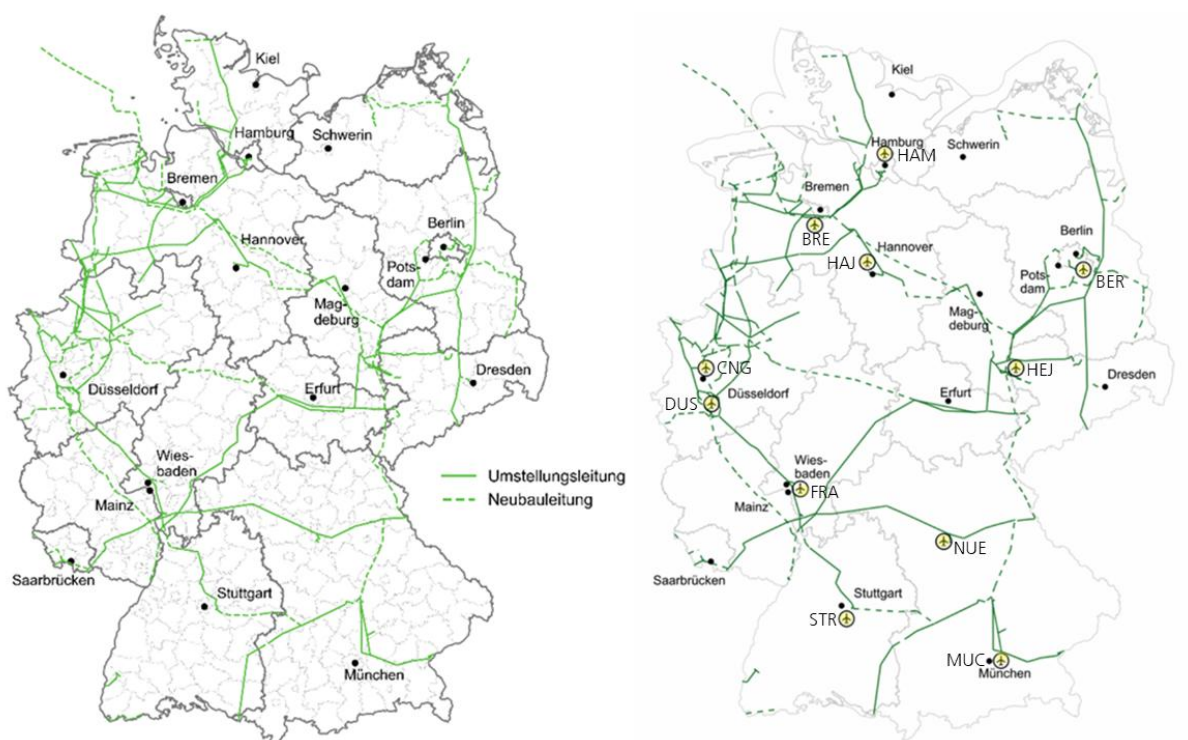


Abbildung 9 Wasserstoff Kernnetz bis 2032 und deutsche TEN-V Verkehrsflughäfen (Kernnetz) - (gem. Genehmigung vom 22.10.2024)

Ein weiterer zu berücksichtigender Indikator für die Verbesserung der Bezugsoptionen von grünem Wasserstoff für Flughäfen durch den Hochlauf des WKN ergibt sich aus dem Abgleich der Flughafenstandorte mit den geplanten nationalen Wasserstoffproduktionsstandorten bis 2030. Tabelle 4 verweist auf relevante, nationale Produktionsketten, die bereits bestehen oder bis 2030 in Betrieb genommen werden sollen. Der Import von grünem Wasserstoff aus den Nachbarländern ist für diese Betrachtung zunächst nicht berücksichtigt. Abbildung 10 lässt erkennen, dass sich die Transportdistanzen mindestens für 7 Flughäfen bis 2030 deutlich reduzieren würden, wenn H₂ aus nahegelegenen Ausspeisepunkten des Kernnetzes entnommen würde. Der Standortvorteil von den Flughäfen, die sich nahe den geplanten Produktionsstätten befinden ist jedoch relativ, da diese auch in das Kernnetz einspeisen können, wodurch sich gemeinsam mit dem Import von grünem Wasserstoff eine höhere Lieferflexibilität für die Flughäfen ergeben könnte. Vorteile ergäben sich für den Flughafen dann ggf. nur durch den Entfall der [Netzentgelte](#) bei Direktbezug per LKW. Entscheidend bleibt jedoch, wie der Wasserstoff von der Abfüllstation zum Vorfeld gelangt.



Abbildung 10 Geographischer Abgleich TEN-V Verkehrsflughäfen und Produktionsstätten für Grünen Wasserstoff

weist auf relevante, nationale Produktionsketten, die bereits bestehen oder bis 2030 in Betrieb genommen werden sollen. Der Import von grünem Wasserstoff aus den Nachbarländern ist für diese Betrachtung zunächst nicht berücksichtigt. Abbildung 10 lässt erkennen, dass sich die Transportdistanzen mindestens für 7 Flughäfen bis 2030 deutlich reduzieren würden, wenn H₂ aus nahegelegenen Ausspeisepunkten des Kernnetzes entnommen würde. Der Standortvorteil von den Flughäfen, die sich nahe den geplanten Produktionsstätten befinden ist jedoch relativ, da diese auch in das Kernnetz einspeisen können, wodurch sich gemeinsam mit dem Import von grünem Wasserstoff eine höhere Lieferflexibilität für die Flughäfen ergeben könnte. Vorteile ergäben sich für den Flughafen dann ggf. nur durch den Entfall der [Netzentgelte](#) bei Direktbezug per LKW. Entscheidend bleibt jedoch, wie der Wasserstoff von der Abfüllstation zum Vorfeld gelangt.

Tabelle 5 Bekannte Produktionsvorhaben für grünen Wasserstoff in Deutschland bis 2030

Produktionsstätte	Betreiber	Status	Kapazität	H ₂ Output max.
Industriepark Leuna	Linde	In Betrieb	24MW 5MW (2025)	3.650 t / Jahr 450 t / Jahr
Chemiepark Bitterfeld Wolfen	Nobian	In Betrieb	Ca. 10 MW	2.700 t/Jahr
Pfaffenläusen	Hy2B Wasserstoff	In Betrieb	5 MW	440-600 t / Jahr, (Max1200 t) Im Mittel 1200 kg/Tag
Industriepark Lingen	RWE	In Betrieb (Pilot)	14MW	270 Kg / Std.
		In Planung (2030)	300 MW	30.000 t/Jahr
	BP	Im Bau (2027)	100 MW	11.000 t / Jahr
Wesseling/Köln	Shell	In Betrieb (Pilot)	10 MW	1300 t / Jahr
		Im Bau (2027)	100 MW	15000 t/Jahr
Schwäbisch Gmünd	Lyfe	In Betrieb	10 MW	4 t/Tag
Hafen Stuttgart	Stadtwerke	Im Bau (2026)	12MW	1.000 t / Jahr erste Stufe
Wasserkraftwerk Grenzach-Wyhlen	EnBW	Pilot in Betrieb Erweiterung 2025	1MW	400 Kg/Tag Bis zu 700 t/Jahr
Hamburg Moorburg	Kraftwerk	Im Bau (2027)	100MW	10000 t/Jahr
Emden	Stadtkraft	Pilot (gestoppt)	10 MW	200 Kg / Std.
		Bau 2027 (gestoppt)	200MW	20.000 t/ Jahr
	EWE	Im Bau (2027)	320 MW	26000 t / Jahr

6.2. Regionale Priorisierungskriterien (Trassennähe, Bündelpotenziale, Reifegrad)

Aufgrund der hohen Dichte an Salzkavernen eignet sich der Norden eher für H₂-Speicher. Hinzu kommen Importmöglichkeiten aus den Niederlanden, deutschen Häfen und der heimischen H₂-Produktion mit überschüssiger Windenergie. (BMWK, 2025; Hamburg, 2024)

Neben den geografischen Gegebenheiten, die einen Standortvorteil für die Produktion, den Import und die Speicherung von grünem Wasserstoff bieten können, gibt es auch auf der Nachfrageseite Bündlungspotenziale. Energieintensive Branchen sind potenzielle Abnehmer großer Mengen Wasserstoff, für die eine exklusive Versorgung sinnvoll erscheint. Doch auch in der Fläche gibt es diverse kleinere Anwendungen und Nachfragepotenziale für Wasserstoff als Energieträger. Neben der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind diese auch mit administrativen und logistischen Hürden konfrontiert, die einen Übergang zur Wasserstoffanwendung verzögern. Die Bündelung der Interessen kleiner Wasserstoffabnehmer in einer Region würde einen Vorteil darstellen, da die gebündelte Nachfrage Investitionen in die Infrastruktur an Ausspeisepunkten risikoärmer gestalten kann. Ein weiterer Vorteil besteht in der Lieferflexibilität bei einer Transportlösung per LKW, da das bestehende Straßennetz genutzt und standardisierte Fahrzeuge eingesetzt werden können.

Entlang der Nationalen Wasserstoffstrategie haben sich in jedem der 16 Bundesländer Wasserstoff-Regionalverbände zusammengeschlossen, um dem Thema koordiniert und kooperativ Vorschub zu leisten. Diese Regionalverbände sind ein guter erster Anlaufpunkt für Investitionen in einen oder mehrere an Lkw gebundene Ausspeisepunkte des Kernnetzes. Dies würde es erlauben, geringe Nachfragemengen lokal und ohne ein statisches Leitungsnetz zu gewährleisten. Im Luftverkehrskontext wäre der Flughafen einer von mehreren Abnehmern kleinerer oder mittelgroßer Mengen Wasserstoff in der Region. Wie in Abschnitt 6.1 erwähnt, wären Flughäfen zunächst Abnehmer kleinerer Mengen, beispielsweise für Bodendienste, mit der Aussicht, dass der Bedarf mittelfristig ansteigt. Ein ortsnaher Ausspeisepunkt mit regionaler Vertriebsstruktur würde sowohl die Planungssicherheit für geringere Mengen als auch die Skalierbarkeit der Nachfragemengen verbessern. Letzteres wäre ein Nachteil bei dezentralen Verfahren wie der On-Site-Elektrolyse.

6.3. Anschluss- und Speicheroptionen (Skizzen; keine Standortplanung)

Ob sich die Bedingungen für die Wasserstoffnutzung an deutschen Verkehrsflughäfen mit dem Hochlauf des WKN verbessern werden, hängt maßgeblich von den Entnahmemöglichkeiten an flughafen-nahen Ausspeisepunkten ab. Diese müssten zunächst eine geringe Entnahmemenge ermöglichen, die flexibel an die steigende Nachfrage angepasst werden kann. Aus Sicht der Flughäfen müsste die Entnahme der geringen Mengen bereits zu marktfähigen Preisen erfolgen.

Das WKN wird von den Fernnetzbetreibern Gas (FNB-Gas) betrieben, deren Geschäftsmodell bis zur Umstellung auf Wasserstoff vorrangig in dem Transport bzw. der Bereitstellung von Erdgas in einem Leitungssystem bestand, an das Endverbraucher nachgelagert angebunden wurden. Flughäfen kämen als Verbraucher nur dann in Frage, wenn eine wirtschaftlich tragbare und skalierbare Lösung für die letzte Meile geschaffen wird. Hierfür wurden in der Studie drei grundsätzliche Optionen betrachtet.

Option A	Direktanbindung per Stichleitung (Pipeline)
Option B	LKW-Transport ab flughafennahem Ausspeisepunkt Einspeisung in permanente lokale Speicherinfrastruktur (Tankstelle)
Option C	LKW-Transport ab flughafennahem Ausspeisepunkt Nutzung des Tube Trailers als temporäre lokale Speicherinfrastruktur (Drop & Swap)

Zusätzlich werden in [Abschnitt 6.4](#) folgende Alternativen und Übergangslösungen zur Anbindung ans WKN betrachtet:

Zu Option A	On-site Elektrolyse Wasserstoffproduktion erfolgt direkt vor Ort mit Auslasshahn oder minimaler Pipeline zum Flughafenvorfeld
Zu Option B/C	LKW-Transport ab flughafennaher Produktionsinsel mit permanenter oder temporärer Speicherung vor Ort.

Option A: Direktanbindung

Eine Direktanbindung von Flughäfen nach dem klassischen Geschäftsmodell ist derzeit nicht attraktiv, da die Nachfrage durch flughafengebundene Verbraucher zu gering wäre, um die hohen Investitionskosten für eine separate Stichleitung zum Flughafen zu rechtfertigen. Selbst die Umnutzung bestehender Erdgaspipelines wäre noch zu teuer für die zu erwartete Abnahmemenge von Wasserstoff. Experteninterviews als Teil der Studie ergaben eine kritische Nachfragemenge 50 bis 100 Tonnen pro Tag, ab der sich eine Direktanbindung von Flughäfen an das WKN lohnen würde. Selbst im Falle einer vollständigen Umstellung der potenziellen Bodendienste an deutschen Verkehrsflughäfen würde die tägliche Nachfrage nach gasförmigem Wasserstoff nicht annähernd in die Nähe der nötigen Bedarfe kommen, die eine permanente Leitung zum Flughafen rechtfertigen würden (vergleiche Diese Menge wird jedoch den gleichen Einschätzungen zufolge nicht ohne den Einsatz von Wasserstoff als Flugkraftstoff erreicht).

Option B / C LKW-Transport mit permanenter und temporärer Speichereinrichtung vor Ort

Da Wasserstoff an deutschen Verkehrsflughäfen nach gegenwärtigen Einschätzungen der Industrie erst nach 2040 großflächig zum Einsatz kommen wird, kann bis dahin von einer Versorgung mit Wasserstoff per LKW ausgegangen werden. (VDI-Nachrichten, 2025) Diese kann nach Auffassung der befragten Experten auf zwei Wegen erfolgen. Die Befüllung eines lokalen permanenten Wasserstoffspeichers oder die Nutzung des Tube Trailers als temporären Speicher vor Ort (Drop and Swap Model). Zwar sind auch LKW-Transporte für die für die Flughäfen relevanten Transportvolumen und Distanzen (unter 50km) kostenintensiv, (DIHK, 2020) jedoch können diese dank etablierter Fahrzeuge, Standards und Prozesse unmittelbar eingesetzt werden, sind skalierbar und erlauben eine bessere Verteilung des Investitionsrisikos. Für die beiden Lieferoptionen können zudem vier verschiedene Betreibermodelle umgesetzt werden (siehe Abbildung 11) Um LKW-Transporte als Lieferbrücke zwischen dem WKN und einem Flughafen als Verbraucher zu etablieren, müssen jedoch drei grundsätzliche Fragen geklärt werden.

- Wo und wie können Ausspeisepunkte für den LKW-Transport (Füllstation) an flughafennahen Abschnitten des WKN oder angeschlossenen Abnehmern definiert werden?
- Wie wird der Wasserstoff für die Betankung von [Vorfeldfahrzeugen \(GSE\)](#) vorgehalten?
- Wer ist verantwortlich für den Transport?

Abbildung 11 zeigt: Optionen für eine Anbindung von Flughäfen an das WKN; Speicheroptionen vor Ort; Betreibermodelle für den Kurzstreckentransport von H₂ zwischen Flughäfen und WKN

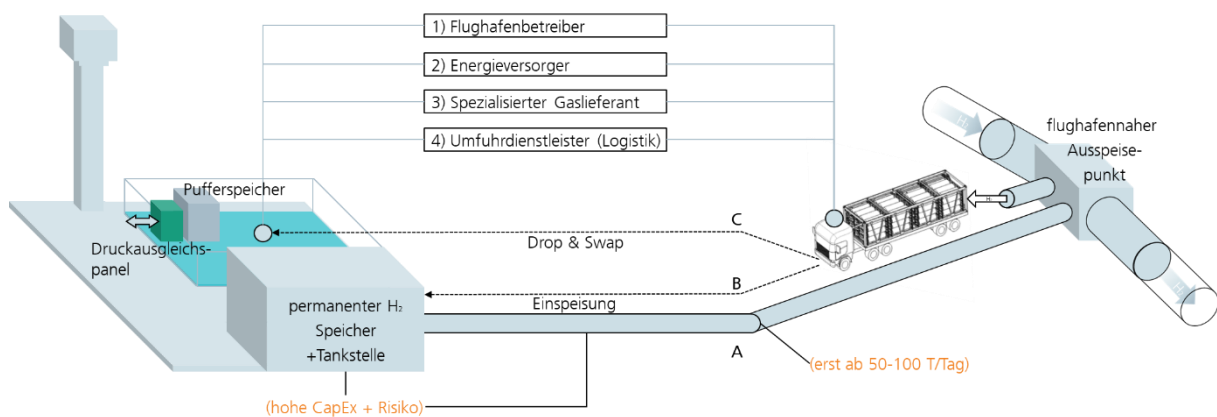


Abbildung 11 Anbindung von TEN-V Flughäfen an das WKN

Für die technische Ausspeisung von H₂ sind sämtliche Standards und Genehmigungsverfahren etabliert und können unmittelbar umgesetzt werden, sobald eine Investitionsentscheidung getroffen wurde. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese von den Fernnetz- oder Flughafenbetreibern getroffen ist nach Auffassung der befragten Experten jedoch gering. Da dies eine Abkehr der gegenwärtigen Geschäftsmodelle bedeuten würde. Die FNB haben zwar klare Anforderungsprofile für die Umsetzung der Netzanschlusseinrichtung inklusive einer Gasregel- und Messanlage jedoch endet die Verantwortung der FNB klassischerweise, sobald das Molekül die Pipeline verlässt. Für die Bezug bzw. Verwendung des Wasserstoffs im Flughafenbetrieb sind neben einer Abfüllstation für LKW am Absperrpunkt jedoch zwei weitere Schritte erforderlich:

1. Aufreinigung des H₂ für die Nutzung in Brennstoffzellen (Typ C).
2. Kompression für den Betankungsvorgang (mindestens 400 bar).

Eine Abfüllstation, die beide Schritte beinhaltet, ist essenziell um den Bezug von Wasserstoff durch Flughäfen aus dem Kernnetz ermöglichen. Sie erfordert Investitionen und Fachwissen vor Ort, weshalb eine kompetente Betreibergesellschaft am Standort eingebunden werden muss. Hierfür eignen sich beispielsweise relevante Vertreter der Gasindustrie bzw. Energieversorger. Zur Vollendung des Ausspeisepunkts aus Flughafensicht bedarf es zudem der Errichtung eines lokalen Speichers und einer Betankungsvorrichtung für LKW, die eine entsprechende Stellfläche und Zuwegung beinhaltet.

Die Errichtung einer solchen Lkw-Abfüllstation durch einen unabhängigen Betreiber würde wahrscheinlicher, wenn diese nicht exklusiv für den Flughafen, sondern im **Regionalverbund** für eine Vielzahl kleiner und mittlerer Abnehmer etabliert werden. In den Verbänden könnten die nötigen Investitionen und Betriebskosten durch eine höhere Nachfrage schneller amortisieren werden. (siehe auch [Abschnitt 6.3](#)) Die Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Aufreinigung, Kompression und Speicherung/Betankung von Wasserstoff sind im [Wasserstoffbeschleunigungsgesetz](#) berücksichtigt und können nach dessen Verabschiedung schneller umgesetzt werden. Dadurch werden Komplexität, Kosten und Zeitaufwand für die Genehmigungen reduziert, was sich positiv auf Investitionsentscheidungen auswirken kann.

In [Abschnitt 6.5](#) werden drei exemplarische Fälle für die Definition eines flughafennahen Ausspeisepunkts für die deutschen TEN-V-Verkehrsflughäfen Berlin Brandenburg (BER), Leipzig Halle (LEJ) und Frankfurt am Main (FRA) beschrieben.

Speicherung vor Ort:

Um die Wasserstofflieferkette der Letzen Meile zu vervollständigen, benötigt der Flughafen eine lokale Speichervorrichtung, um den Mengen- und Zeitversatz zwischen der Nachfrage nach Wasserstoff im Flughafenbetrieb und den wirtschaftlich sinnvollen Liefermengen des Gaslieferanten auszugleichen. Eine derartige Einrichtung kann auf bewährte Standards aus anderen Industrien oder Verkehrsmodi zurückgreifen, die jedoch bei Installation auf dem Flughafengelände in das regulatorische Umfeld eines Flughafens übernommen bzw. angepasst werden muss. Hierzu zählen vor allem Sicherheits- und Risikoabschätzungen nach der [Betriebssicherheitsverordnung und dem Bundesimmissionsschutz-gesetz](#), so wie die relevanten Vorgaben des Baurechts.

Zum Zeitpunkt der Studie bestehen öffentliche Tankstellen für gasförmigen Wasserstoff im unmittelbaren Umfeld von 6 der 11 deutschen Verkehrsflughäfen des TEN-T Netzwerks. Diese wurden zum Teil durch die NIP-Initiative finanziert und bedienen den Straßenverkehr. Fahrzeuge und Geräte des

Bodendienste können hier nur betankt werden, wenn diese eine Straßenzulassung besitzen. Im Falle der flughafenexternen Betankung müssten die Vorfeldfahrzeuge jedoch durch eine Sicherheitskontrolle, um nach der Betankung zum designierten Einsatzort zu gelangen, was aus Prozesssicht eine Einschränkung bedeutet. Für den sinnvollen operativen Einsatz von wasserstoffbetrieber GSE bedarf es somit einer Speichervorrichtung mit Vorfeldanbindung (**Option B**).

Eine permanente Wasserstofftankstelle mit Speicher kann laut Aussagen der befragten Experten als mittelfristige Lösung gesehen werden, wenn Wasserstoff ein fester Bestandteil der Flughafenstrategie bzw. des lokalen Energiemixes geworden ist. Das größte Hindernis für eine Tankstelle mit Vorfeldanbindung sind die hohen Investitionskosten, sowie Betriebskosten, die einer zunächst geringen Nachfrage gegenüberstehen. Hierdurch entsteht ein erhöhtes Finanzierungsrisiko für Flughafenbetreiber und Bodendienste, da bislang nicht absehbar ist wie sich die Nachfrage nach Wasserstoff im Flughafenbetrieb im Zeitverlauf bis 2045 Zeit entwickeln wird.

Es wäre denkbar, dass eine Mischnutzung mit der Landseite zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit führen würde. Zeitgleich haben die Wasserstofftankstellen in Flughafennähe zuletzt ihren Betrieb eingestellt. Diese Situation wird sich jedoch nach der kürzlich überarbeiteten [REDIII Verordnung](#) noch einmal zu Gunsten eines dichteren Wasserstofftankstellennetzes wandeln. Wie in Abbildung 12 dargestellt, kann die permanente lokale Wasserstofftankstelle 3 Formen annehmen:

1. Exklusive Vorfeldtankstelle (innerhalb des Sicherheitsbereichs nach §9 LuftSichG)
2. Auf der Grenze zwischen Luft- und Landseite (zur beidseitigen Nutzung)
3. Auf der Landseite mit Anbindung zur Luftseite (Pipeline) zur beidseitigen Nutzung

Während eine exklusive Vorfeldtankstelle auf Grund der geringen Nachfrage eher als mittelfristige Lösung betrachtet wird, wurde die Lösung einer zentralen Tankstelle, die zum Tankvorgang sowohl von der Luft- als auch Landseite anfahrbar ist von den befragten Experten als nicht praktikabel bewertet da diese zu hohe Komplikationen im Perimeterschutz bedeuten würde. Im Fall einer permanenten Tankstelle stellt eine Tankstelle außerhalb des Flughafengeländes mit entsprechender Zuleitung aus Sicht der befragten Experten, das wirtschaftlich nachhaltigste Modell dar. Zeitgleich stünden hier nach wie vor des Investitions- und Betreiberrisiko einer zunächst geringen Nachfrage gegenüber. Was eine Investitionsentscheidung für die meisten der befragten Experten zunächst unwahrscheinlich macht. Dieses Risiko kann durch eine „Drop & Swap“ Verfahren mitgeleitet in dem der Trailer selbst als mobiler Speicher auf einem Parkplatz auf dem Vorfeld oder mit Vorfeldanbindung abgestellt wird (**Option C**).

Bei dieser Lösung müsste zunächst nur eine asphaltierte Fläche als Abstellort für Wasserstofftrailer vorgehalten werden. Die Fläche müsste durch Bodenmarkierungen und oder einen Zaun gewährleisten, dass Sicherheitsabstände eingehalten und der Zutritt für unbefugte Personen unterbunden werden. Diese Fläche würde als Abstellort für einen Trailer dienen, der an einer Abfüllstation am nahegelegenen Ausspeisungspunkt des WKN befüllt und ausgetauscht werden kann. Ergänzend zu der Stellfläche benötigen die Flughafenbetreiber ein Druckausgleichspaneel, um den Betankungsdruck zwischen dem Trailer und dem Endverbraucher sicher zu regulieren, Schwankungen auszugleichen bzw. feine Druckdifferenzen (z. B. 10-100 mbar) präzise zu regeln. Ein weiteres Hindernis in dieser Lösung besteht, in dem abfallenden Druckniveau innerhalb des Speichers (Trailers) mit zunehmenden Betankungsvorgängen. Sinkt das Druckniveau im Trailer unter das des

Endverbrauchers z. B. 350 Bar bei einem wasserstoffbetriebenen Bodenstromaggregat (GPU), kann dieses nicht mehr vollständig befüllt werden. Was dazu führt, dass die Trailer ab einem gewissen Füllstand frühzeitig ausgetauscht werden müssten. Diese Hürde kann durch einen kleinen Puffer-tank mit Kompressor ausgeglichen werden, der ausreichend Wasserstoff für 1-2 Betankungsvorgänge vorhalten kann. Alle technischen Elemente dieser Lösung sind mit entsprechenden ISO/DIN normen etabliert und marktseitig verfügbar. Eine vergleichbare Lösung wurde bereits mit einer Wasserstofftankstelle für einen Busbetrieb in Südbayern im Regelbetrieb aufgenommen. (HY2B, 2025; Geldhauser, o.J.)

Die Lösung mit dem Drop & Swap Model würde das Investitionsrisiko für Flughafen drastisch reduzieren, da dem Flughafen im Falle einer strategischen Anpassung wenig irreversible Kosten entstanden sind und die Umnutzung der Stellfläche geringe Hürden mit sich brächte. Zeitgleich bleibt zu erwähnen, dass durch dieses Option Teile des Investitionsrisikos auf den Betreiber der Lieferlogistik ausgelagert würde

Betreibermodelle:

Während die Versorgung bei **Option A** durch den Betreiber eines Fern- oder nachgelagerten regionalen Netzes erfolgen kann, wird bei **Option B** oder **C** ein Dienstleister benötigt, der den Transport zwischen einem potenziellen Ausspeisepunkt und dem Flughafenvorfeld plant und umsetzt. Lkw-basierte Transporte von gasförmigem Wasserstoff werden in Deutschland bereits angeboten. Hierbei handelt es sich zu ca. 94 % um grauen Wasserstoff, zu ca. 6 % um Prozesswasserstoff (industrielle Nebenprodukte) und zu weniger als 1 % um grünen Wasserstoff. (KfW Research, 2024) Derzeit bieten nur wenige Anbieter grünen Wasserstoff an, da die Produktionsstätten oft in der Nähe eines großen Verbrauchers oder Speichers errichtet werden. Von hier aus bieten die Produzenten auch Lkw-Transporte für kleinere Energieendverbraucher an. Eine wachsende dezentralisierte Produktionsstruktur durch Elektrolyseure bis zu 10 MW und die allgemeine Verfügbarkeit von größeren Mengen grünem Wasserstoff werden diese aktuellen Betreibermodelle zum Umdenken bewegen. Es ist denkbar, dass aufgrund der steigenden Zahl von Kurzstreckentransporten eine Spezialisierung stattfinden wird, bei der die großen Gasproduzenten weiterhin eine Rolle spielen, jedoch nicht mehr die gesamte Lieferkette abbilden werden.

Für den spezifischen Fall der Anbindung von Flughäfen an das WKN müsste der Wasserstoff zunächst in Aufgereinigt und in der relevanten Druckstufe bereitgestellt werden. Nach der Ausspeisung durch die Netzbetreiber könnte diese Aufgabe durch die Expertise der Wasserstoffproduzenten erfolgen. Danach bieten sich vier Varianten.

Betreibermodell 1	Der Gasproduzent unterhält einen Fuhrpark, mit dem er die Lieferkette ab der Ausspeisung bis zum Energieendverbraucher vervollständigt. Dieses Modell wäre die Fortsetzung des gegenwärtigen Modells von einer betriebsfremden Füllstation.
Betreibermodell 2	Der Transport erfolgt durch einen Energieunternehmen, das Tankstellen betreibt jedoch nicht der Wasserstoffproduzent ist. In diesem Fall würde das Unternehmen einen LKW betreiben, um die eigene Tankstelle zu versorgen und könnte die Lieferkette bis auf das Flughafenvorfeld erweitern.
Betreibermodell 3	Der Flughafen selbst betreibt einen LKW, mit dem er zu einem designierten Ausspeisepunkt fährt, um lediglich seine eigenen Bedarfe zu abzudecken
Betreibermodell 4	Der Transport erfolgt durch einen eigenständigen Logistkdienstleister, der sich lediglich auf den „H ₂ as a Service“ konzentriert und hierfür das gesamte Risiko übernimmt.

Im ersten Fall würde es sich um eine Geschäftsfelderweiterung handeln, bei der ein Produzent seine Flotte erweitern würde. Wissen und Zertifizierungen wären bereits vorhanden jedoch würde das Gas aus dem Kernnetz entnommen und nicht aus der Eigenproduktion. Das Geschäftsmodell würde folglich auf eine Spezialisierung im Bereich der Aufbereitung und des Transports bedeuten

Die Entnahme aus dem Wasserstoffkernnetz könnte durch unterschiedliche Betreibermodelle erfolgen:

Der Flughafen könnte diese Dienstleistung in sein Geschäftsmodell integrieren, indem er einen Wasserstofftrailer bereithält (im Eigenbesitz oder geleast) und die Fahrten mit eigenem Personal oder einem internen Unterauftragnehmer steuert. Dieses Modell würde dem Flughafen die langfristige Kontrolle über die Wasserstoffversorgung sichern. Es würde jedoch das Finanzierungsrisiko zurück ins Boot holen, da die Anschaffungs- bzw. Leasingkosten für einen Wasserstofftrailer hoch sind. Zudem kämen diverse Zertifizierungen und Anforderungen an das eingesetzte Personal hinzu. Dieses Modell war zum Zeitpunkt der Studie bei keinem der befragten Verkehrsflughäfen denkbar.

Eine weitere Möglichkeit wäre, die Lieferkette von konventionellen Energieversorgern, die gegenwärtig Tankstellen in Flughafennähe betreiben, auf das Vorfeld zu verlängern. In diesem Fall würde der Trailer, der die Tankstelle versorgt, nach der Betankung der Tankstelle auch das Vorfeld bedienen. In diesem Modell wäre Option C jedoch weniger relevant.

Welche Option letztlich für den einzelnen Lieferanten relevant ist muss die lokale Situation entscheiden.

Netzentgelte:

Der Preiseffekt durch die kürzeren Transportwege für grünen Wasserstoff ab den Ausspeisepunkten in Flughafennähe im Vergleich zu Lkw-Transporten ab der Produktionsstätte hängt maßgeblich von der Höhe der Netzentgelte ab. Da es sich bei den Leitungen des WKN um privatwirtschaftlich betriebene Infrastrukturen handelt, müssen perspektivisch sowohl einspeisende als auch ausspeisende Unternehmen Entgelte für die Nutzung dieser Infrastruktur entrichten, damit die FNB ihre Investitions- und Betriebskosten decken und letztlich Gewinne erwirtschaften können.

Derzeit sind Elektrolyseure, die bis zum 4. August 2029 in Betrieb genommen werden nach § 118 Abs. 6 Satz 1 EnWG, für einen Zeitraum von 20 Jahren von den Netzentgelten befreit. Diese Regelung soll den Hochlauf der Wasserstoffproduktion in Deutschland fördern. Die Industriefordert zudem eine Vollbefreiung für „netzdienliche Elektrolyseure“ also solche die Überlasten an erneuerbaren Energien ausgleichen bis mindestens 2035 für den gesamten Amortisationszeitraum (i.d.R. 20 Jahre) zu befreien. (DWV, 2026) Preisverzerrungen in der frühen Nutzungsphase des WKN, also bei hohen Investitionskosten und geringer Nachfrage, zu vermeiden, werden zudem die Netzentgelte für die Verbraucher über die Bundesnetzagentur auf Grundlage der §§ 28q, 28r und 28s EnWG gedeckelt und die Fernnetzbetreiber durch eine Amortisationskonto der KfW entlastet. (Bundesministerium der Justiz, o. J.; KfW, o.J.) Im Sinne einer besseren Planungssicherheit konnte die Bundesnetzagentur durch die Festlegung (GBK-24-01- 2#1) WANDA bereits die Verpflichtung der Betreiber von Wasserstoffnetzen zur Bildung von einheitlichen Netzentgelten durchsetzen. (Bundesnetzagentur, 2024)

Ein weiteres Hemmnis besteht in der Etablierung eines entsprechenden Wasserstoffmarkts, über den Verbraucher zuverlässig Kapazitäten reservieren können. Dieser Schritt ist maßgeblich für die

Planbarkeit der zu beschaffenden Wasserstoffmengen, die entlang der Konkurrenzsituationen des Verkehrssektors mit der Chemie- und Stahlindustrie sowie der Energiewirtschaft neben dem Preis pro Kilogramm eine ebenso hohe Bedeutung erhält. Gerade bei Flughäfen ist die Reservierung von Kapazitäten von großer Bedeutung, um die operationale Zuverlässigkeit des Flughafenbetriebs nicht unnötig zu gefährden.

Mechanismus Marktkapazitäten:

Der im Oktober 2025 von den FNB veröffentlichte Eckpunkteplan für den Reservierungsprozess von Wasserstoffkapazitäten im WKN lieferte einen wichtigen Impuls für Marktteilnehmer, weitere Planungen für die Nutzung von Wasserstoff aus dem Kernnetz voranzutreiben. Das Dokument definiert zunächst die Geschäftsgrundlage, über die Endnutzer künftig Wasserstoff über das Kernnetz beziehen können. Es zielt darauf ab, Ein- und Ausspeisekapazitäten zu vermarkten, noch bevor das Kernnetz fertiggestellt ist. Der Marktmechanismus basiert zunächst auf einem Cluster-Konzept. Das bedeutet, dass Marktteilnehmer sogenannte „fest frei zuordenbare Wasserstoffkapazitäten (FWK)“ an Punkten einer Angebotszone buchen können, innerhalb derer Kapazitäten konkurrierend angeboten werden. Durch diese Lösung ist das Verhältnis von Produzenten zu Konsumenten nicht relevant, solange die Nachfrage das Angebot in einer Angebotszone nicht übersteigt. Sollten nicht alle Kapazitäten abgerufen werden, können diese im Bedarfsfall an eine weitere Angebotszone und perspektivisch sogar an weitere Cluster weitergeleitet werden. Mit zunehmendem Netzausbau ermöglichen die FWK dann einen pfadunabhängigen Transport innerhalb des deutschen Marktgebietes. Die Zuordenbarkeit der FWK beschränkt sich demnach zunächst auf die jeweiligen Cluster.

Für die Anfrage von Ein- und Ausspeisekapazitäten an bestimmten Netzpunkten innerhalb der Cluster ist zunächst die Ausarbeitung eines rechtlich-regulatorischen Rahmens entscheidend. Dieser erfolgte unlängst über die Definition eines gemeinsamen Mustervertrags, der als Grundlage für individuelle Geschäftsbedingungen zwischen Fernnetzbetreibern einerseits und Produzenten andererseits dient. Der Mustervertrag ermöglicht den Betroffenen somit die einheitliche Anwendung von Reservierungsbestimmungen und setzt somit ein wichtiges Signal für den Hochlauf des deutschen Wasserstoffmarktes. Um die Kosten für die verschiedenen Nutzergruppen zu nicht zu potenzieren kann das Reservierungsentgelt auf die Transportentgelte angerechnet, sobald die Reservierung durch faktische Kapazitätsbuchungen abgelöst wird. (Jenke, S., 2026) Wie der rechtliche Rahmen für den Bezug von grünem Wasserstoff an Länderübergangspunkten des European Backbone geregelt ist, bleibt derzeit zu klären. Innerhalb Deutschlands hat die Bundesnetzagentur bereits wichtige Schritte getan um die Bilanzierungsregeln und Rollenmodelle für Marktakteure (WASABI) einerseits und Regelungen zu Kapazitätsbuchung, zu Kapazitätsprodukten, zur Transparenz und zu Netzinformationen Wakanda andererseits festzulegen und somit „zentrale Bausteine für die operative Umsetzung eines funktionierenden Wasserstoffbinnenmarkts“ zu schaffen. Die vollständige Umsetzung der Regelungen ist bis zum 01.01.2028 vorgesehen (FNB-Gas, o. J.).

Die Nachfragemengen von Flughäfen bis 2030 sind gegenwärtig nicht attraktiv für die Kapazitätsplanung der Fernnetzbetreiber. Gebündelt in einer regionalen Abnahme von einem regionalen Wasserstoffverband hätte diese jedoch das Potenzial Investitionen in lokale Infrastruktur und entsprechende Geschäftsmodelle von umfuhr Dienstleistern rechtfertigen

6.4. Alternativen und Übergangslösungen (On-Site-Erzeugung, regionale Produktionsinseln)

Die in Abschnitt 6.2 beschriebenen Anschlusslösungen an das WKN hängen maßgeblich mit dem planmäßigen Hochlauf des Netzes bis 2032 zusammen. Der genehmigte Antrag sieht vor, dass einige der flughafennahen Leitungen erst zwischen 2030 und 2032 aktiviert werden sollen. Insgesamt besteht bei der Anpassung funktionaler Systeme grundsätzlich ein komplexitätsbedingtes Verzugsrisiko, durch das sich die vollständige Inbetriebnahme des WKN weiter verzögern kann.

Dies steht im Konflikt mit dem notwendigen Hochlauf der Wasserstoffnachfrage auf der Anwenderseite, deren technologische Umstellung voraussichtlich ein ganzes Jahrzehnt in Anspruch nehmen wird. Für den Einsatz von Wasserstoff an deutschen Verkehrsflughäfen ist es von hoher Bedeutung, dass die Flughafenbetreiber bzw. Bodendienste geringe Mengen an Wasserstoff zu marktfähigen Preisen beziehen können. Dieser liegt bei den befragten Flughäfen bei etwa 7€/Kg langfristig müsste dieser jedoch weiter fallen.

Ein solches Preisniveau könnte bei einer flughafennahen Ausspeisung aus dem Kernnetz, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, durch die Bündelung der Nachfrage durch beispielsweise Wasserstoffregionalverbände und deren Förderung durch öffentliche Mittel erreicht werden (siehe [Abschnitt 6.3](#))

Alternativ zu einer Anbindung an das WKN oder dem Bezug von grünem Wasserstoff über lange Transportwege von heutigen Produktionsstätten können Flughäfen auf zwei Alternativen zurückgreifen, um geringe Mengen Wasserstoff zu marktfähigen Preisen zu erhalten.

- Regionale Produktionsinseln
- Lokale Onsite-Elektrolyse

In Bereichen, in denen die Einspeisung aus dem Kernnetz bis 2030 keine Option ist, bieten dezentrale Elektrolyseure eine Alternative. Diese könnten in jedem mittleren Photovoltaik-Park oder kleineren Windpark entstehen und mit einer Elektrolyseleistung von bis zu 10 MW Wasserstoff produzieren. Eine funktionierende Anlage der Hy2B Wasserstoff GmbH befindet sich im bayerischen Pfeffenhausen. Die Anlage befindet sich ca. 45 km vom Münchner Flughafen entfernt und könnte diesen bereits heute mit grünem Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen versorgen. (Siehe Use Case 4.) Hierbei ist zu erwähnen, dass der Preis vor allem durch intelligentes Sourcing am Strommarkt zustande kommt. Neben Produktionsinseln dieser Art wäre es auch denkbar, das Konzept in einen Flughafen zu integrieren (Onsite-Produktion). Dies wäre möglich, wenn Flughäfen auf eigenen oder angrenzenden Flächen regenerative Energie erzeugen. In diesem Fall wäre jedoch zu prüfen, ob die direkte Nutzung des erzeugten Stroms, in beispielsweise batterieelektrischen Lösungen, mit geringeren Energieverlusten möglich wäre.

6.5. Anwendungsfälle

Zum Zwecke der Studie wurden vier Anwendungsfälle betrachtet, bei denen bei denen gemeinsam mit den FNB geprüft wurde, welche Optionen bestünden einen deutschen Verkehrsflughafen des TEN-V Netzes mit grünem Wasserstoff zu versorgen. Bei drei Anwendungsfällen handelt es sich um eine Versorgung über das geplante Wasserstoffkernnetz, der vierte Anwendungsfall wurde als

Brückenfall betrachtet, bei dem ein Verkehrsflughafen durch eine dezentrale Produktionsinsel versorgt wird. Folgende Voraussetzungen wurden für die Use Cases grundsätzlich angenommen:

- 1) Die Versorgung des Flughafens erfolgt unmittelbar oder in naher Zukunft.
- 2) Die Ausspeisung findet über einen der regulären Absperrpunkte der Leitung statt
- 3) Es erfolgt keine direkte Anbindung, sondern eine Belieferung per LKW

Die Auswahl der drei Verkehrsflughäfen, für die eine Anbindung an das WKN geprüft wurde, entfiel auf folgende Flughäfen entlang der ersten aktiven Trasse des WKN (OPAL JAGAL MEDAL):

- Flughafen Berlin Brandenburg - Willy Brand (**BER**)
- Flughafen Leipzig Halle (**LEJ**)
- Flughafen Frankfurt Main (**FRA**)

Der Brückenfall entfiel auf folgenden Verkehrsflughafen mit einer späten Anbindung an das WKN

- Flughafen München - Franz Josef Strauss (MUC)

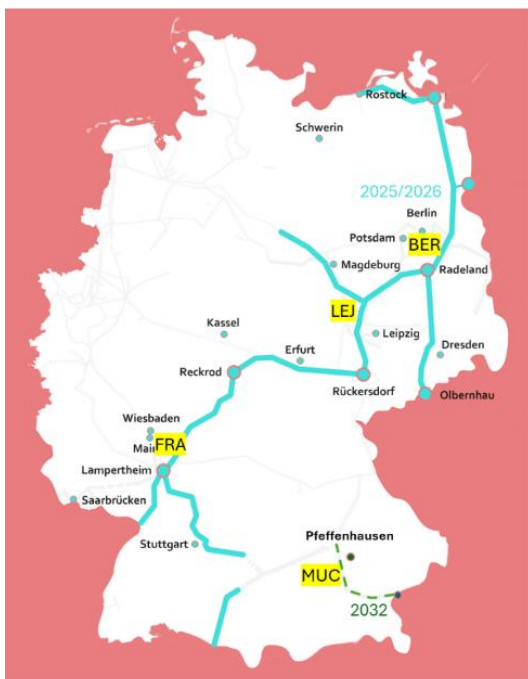


Abbildung 13 Geographische Zuordnung der Anwendungsfälle

Die erste aktive Pipeline des WKN ist die OPAL-Pipeline von Lubmin nach Radeland (siehe Abbildung 13). Sie verläuft in unmittelbarer Nähe zum Flughafen und ist seit Dezember 2025 mit Gas gefüllt. Der nächste Abschnitt, JAGAL, der von Radeland nach Rückendorf verläuft, wird im Jahr 2026 gefüllt sein und am Flughafen LEJ vorbeiführen. Der Abschnitt der MIDAL-Pipeline wird erst Ende 2027 fertiggestellt werden und in der Nähe des Flughafens FRA vorbeiführen. Obwohl der Flughafen FRA die erste Bedingung, somit nicht hinreichend erfüllt, wurde er als Anwendungsfall aufgenommen, da er als größter deutscher Verkehrsflughafen eine gesonderte Bedeutung für die Emissionen des Luftverkehrs hat und zudem von der Fernnetzbetreiberfirma Cascade abgedeckt wird, die die übrigen beiden Use-Cases abdeckt. Somit konnten für die Studie Synergien bei den Interviews genutzt werden und ein differenziertes Bild geschaffen werden. Im Rahmen der Studie sollen für die drei Anwendungsfälle folgende Fragen geklärt werden:

1. Welcher flughafennahe Absperrpunkt eignet sich für eine potenzielle Ausspeisestation?
2. Welche Verbesserung entstünde durch die Verkürzung des Transportweges?
3. Welcher potenzielle Bedarf an Wasserstoff besteht zum heutigen Zeitpunkt und bis 2030?

Fall 1 BER- Berlin Brandenburg

Der Flughafen Berlin Brandenburg hat derzeit kein strategisches Interesse am Einsatz von Wasserstoff im Flughafenbetrieb. Zwar werden Möglichkeiten gesehen, Wasserstoff bei Bodendiensten einzusetzen, das vorrangige Interesse gilt jedoch der Dekarbonisierung durch die Elektrifizierung der

Fahrzeuge. Der Einsatz von Wasserstoff gilt als langfristiges Ziel, das mit der Nutzung des Gases als Flugkraftstoff zusammenhängt. Eine erhöhte Nachfrage und Verfügbarkeit von Boil-off-Gasen würden die Bedingungen grundlegend ändern. Eine solche Entwicklung wird jedoch nicht in den kommenden zehn Jahren erwartet. Grundsätzliche Überlegungen zu einer Wasserstoffinfrastruktur wurden im Rahmen der Masterplanung geprüft und standortspezifische Studien zur Verwendung von Flüssigwasserstoff erarbeitet.

Anbindungspunkte:

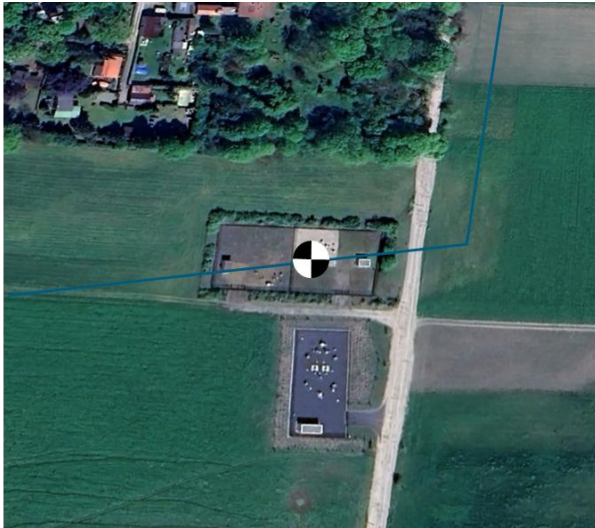


Abbildung 15 Beschaffenheit Absperrpunkt Gräbendorf

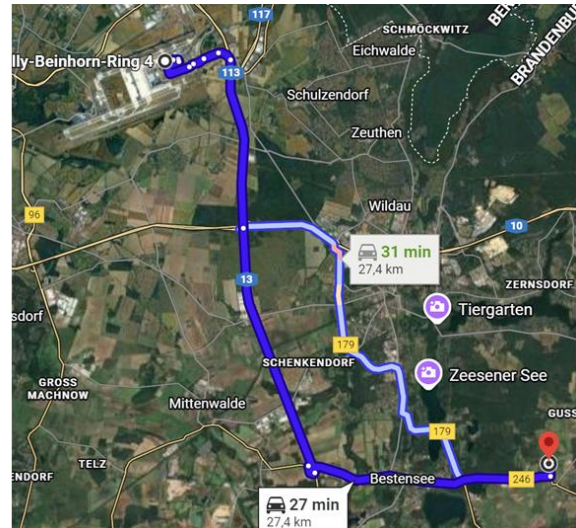


Abbildung 14 Anbindung BER – Absperrpunkt Gräbendorf

Der Flughafen BER könnte an zwei verschiedenen Absperrpunkten an das Wasserstoff Kernnetz angebunden werden. Der naheliegendste wäre die Absperrstation Gräbendorf im Osten von BER. Eine direkte Pipelineanbindung mit dem Absperrpunkt Gräbendorf wäre mit erheblichem Planungsaufwand verbunden, da hier mit unter Verkehrsstraßen, Gewässer oder Landschafts-Schutzgebiete durchquert werden müssen. Eine Anbindung per Kurzstreckentransport hingegen wäre auf Grund der Straßen Anbindung denkbar.

Die nach Erkenntnissen der Studie vorteilhafteste Anbindung würde über den Ausspeisepunkt Gräbendorf erfolgen, der sich in 27 Km Entfernung vom Flughafenvorfeld befindet (siehe Abbildung 14) und damit knapp 115 Km näher an der nächstgelegenen nationalen Produktionsstätte für grünen Wasserstoff in Bitterfeld-Wolfen und sämtlichen Importen aus dem Europäischen Ausland befindet. Für die Erschließung der Ausspeisepunkts in Gräbendorf bedarf es der Aufwertung der lokalen Beschaffenheit für An- und Abfahrten von LKW sowie der Errichtung von Überdachung und Gebäuden für die Ausspeisung Aufreinigung und Kompression des Wasserstoffs. (Siehe Abbildung 15) Es ist im Detail zu klären, ob eine Kürze Stichleitung zu einem geeigneten nahegelegenen Grundstück vorteilhaft wäre. Im Falle einer Investitionsentscheidung wäre der Wasserstoff unmittelbar verfügbar.

Fall 2 LEJ Halle Leipzig

Der Flughafen Halle-Leipzig schreibt der Nutzung von Wasserstoff im Flugverkehr eine strategisch wichtige Bedeutung zu. Im Rahmen des Langzeitprojekts „NetZero LEJ“ werden Wasserstoff und Sustainable Aviation Fuel (SAF) als nachhaltige Optionen für Flugkraftstoffe forciert. (Mitteldeutsche

Flughafen AG. 2024) Der Flughafen profitiert hierbei von günstigen Umständen. Einerseits verläuft die WKN nahe des Flughafengeländes, andererseits bestehen Verbindungen zu geplanten Produktionskapazitäten im sächsischen Leuna. Es ist wahrscheinlich, dass der in Leuna produzierte grüne Wasserstoff zunächst in nachhaltige Flugkraftstoffe umgewandelt wird, bevor er den Flughafen erreicht. Insgesamt wird diese Entwicklung durch den lokal ansässigen Luftfracht-Hub der DHL Group begünstigt. Das Unternehmen hat sich in freiwilliger Selbstverpflichtung zu einem Einsatz von mindestens 30 % SAF auf seinen Express- und Langstreckenflügen bis 2030 verpflichtet. Dies entspricht dem Fünffachen des Werts von 6 %, der durch die [RefuelEU](#)-Mandate der EU gefordert wird (DHL Group, o. J.). Zum Zeitpunkt der Studie lagen keine Informationen über die Nutzung von grünem und dem örtlich angesiedelten DHL-Luftfracht-Hub vor.

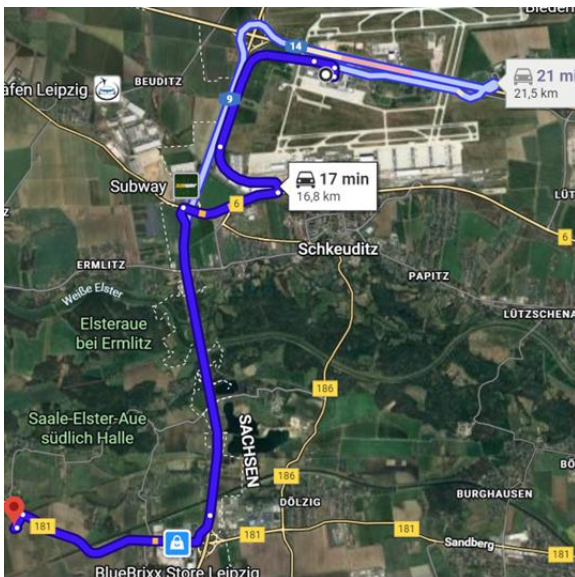


Abbildung 17 Straßenanbindung LEJ – Absperrpunkt Göhren



Abbildung 16 Örtliche Beschaffenheit Absperrpunkt Göhren

Insgesamt ist der Standort Leipzig jedoch ein potenzieller Treiber für die Entwicklung einer nachhaltigen Wasserstoffinfrastruktur. Neben der Dekarbonisierung des Luftverkehrs sind hier nämlich auch Projekte für wasserstoffbetriebene LKW und in der lokalen Industrie in der Erprobung, die eine grundsätzliche Nachfrage nach grünem Wasserstoff und dessen Kopplung an diverse Nutzer zu neuen Logistikprozessen und Geschäftsmodellen hervorrufen können.

Anbindungspunkte:

Der Flughafen LEJ könnte an zwei verschiedenen Absperrpunkten an der JAGAL Leitung angebunden werden: Am Absperrpunkt Göhren ca. 17 Km südwestlich des Flughafens (Siehe Abbildung 16, 17) sowie an der Absperrstation Reideburg ca. 16 Km nordwestlich des Flughafens (siehe Abbildung 18,19).

Bei den möglichen Ausspeisungspunkten handelt es sich um zwei aufeinanderfolgende. Der erste ist der Absperrpunkt der JAGAL-Leitung, die den Flughafen Halle-Leipzig im Westen tangiert. Beide Punkte sind über Bundesstraßen zu erreichen. In beiden Fällen beträgt die Distanz zum Flughafenvorfeld ca. 20 km. Die Absperrstationen sind mit Kraftfahrzeugen erreichbar. Ersten Erkenntnissen zufolge können Erweiterungsbauten stattfinden, die genauen baulichen Maßnahmen

sind jedoch noch zu klären. Die Straßen, die gegenwärtig zu den Absperrpunkten führen, werden derzeit als Servicestraßen genutzt und müssten für den regelmäßigen LKW-Transport vermutlich zunächst asphaltiert werden.

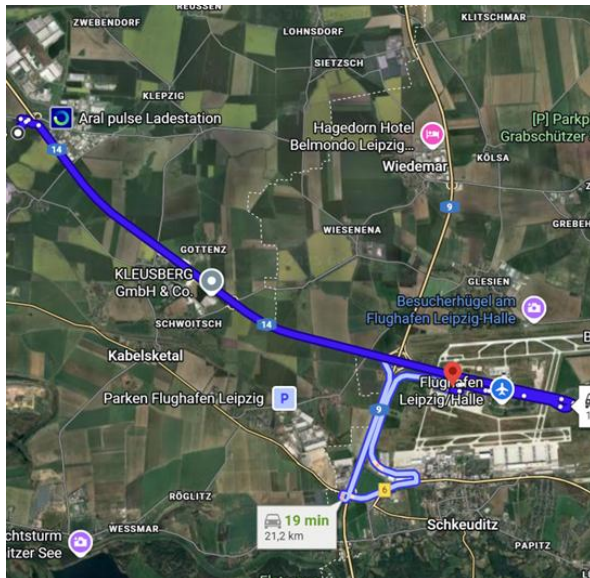


Abbildung 18 Straßenanbindung LEJ – Absperrpunkt Reidburg

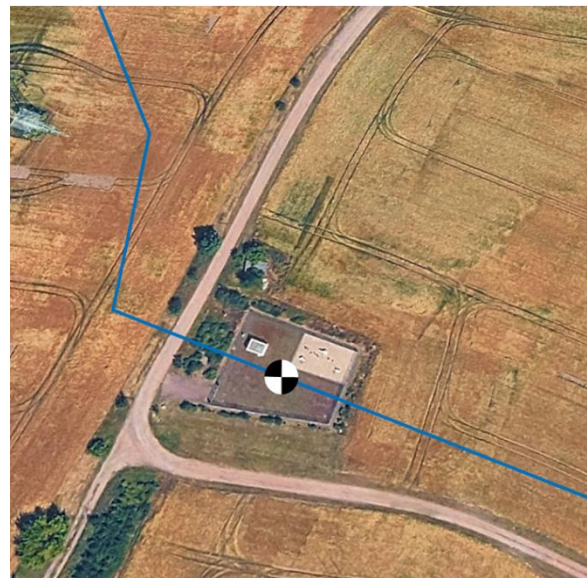


Abbildung 19 Örtliche Beschaffenheit Absperrpunkt Reidburg

Die Erschließung der Ausspeisungspunkte für die Belieferung mit grünem Wasserstoff für die Bodendienste am Flughafen Leipzig/Halle ist jedoch von der Distanz her nicht unbedingt vorteilhaft. Im 30 km entfernten Leuna befindet sich bereits seit 2025 eine Produktionsstätte. Im Laufe des Jahres soll sie erweitert werden ([siehe Tabelle 4](#)). Die Produktion in Leuna dient vorrangig der Herstellung nachhaltiger Kraftstoffe. Da der Bedarf hierfür sehr groß ist, ist unklar, ob zusätzlicher Wasserstoff für den Transport per Lkw zur Verfügung stehen wird.

Im Falle einer exklusiven Nutzung des Wasserstoffs zur Erzeugung nachhaltiger Flugkraftstoffe wäre es strategisch sinnvoll darüber nachzudenken einen regionalen Ausspeisungspunkt aus dem WKN zu definieren über den die lokale Nachfrage diverser Energieendverbraucher inklusive des Flughafens bedient werden können. Dieser könnte über beispielsweise über den HYPOS – Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany e. V. geplant werden und von einem Konsortium aus Glaslieferant für die Aufreinigung und Kompression des Wasserstoffs und einem Umförderteilehersteller für dessen Transport betrieben werden (Siehe auch [Betreibermodelle](#))

Fall 3: FRA- Frankfurt am Main

Die potenzielle Nachfrage nach Wasserstoff für die Betankung und den Betrieb von Bodendiensten am Frankfurter Flughafen ist hoch, da hier noch verhältnismäßig viele konventionelle Fahrzeuge im Einsatz sind. Gleichzeitig ist zu erwähnen, dass der Frankfurter Flughafen strategisch vorrangig auf eine Elektrifizierung mit batterieelektrischen Fahrzeugen und einer entsprechenden Ladeinfrastruktur setzt. Die Nachfrage nach Wasserstoff bleibt somit zunächst ungewiss. Eine Nutzung ist jedoch nicht ausgeschlossen, da der Flughafen diese nicht kategorisch ablehnt, sondern lediglich als nicht vorteilhaft für die lokalen Bedürfnisse und gegenwärtigen Marktverhältnisse sieht. In der Umgebung des Flughafens befinden sich diverse Industriecluster, insbesondere im flughafennahen

Industriepark Höchst. Dadurch ist sowohl eine erhöhte Nachfrage als auch die lokale Produktion von Wasserstoff wahrscheinlich. Gegenwärtig befinden sich diverse Testanlagen für nachhaltige Flugkraftstoffe auf dem Gelände, die grünen Wasserstoff benötigen werden. Aufgrund der hohen Energiekosten ist eine großflächige Produktionsstätte jedoch derzeit noch nicht geplant.

Anbindungspunkt:

Der Flughafen Frankfurt könnte über den Absperrpunkt Jügesheim aus dem Wasserstoffkernnetz versorgt werden. Dieser befindet sich auf dem Trassenabschnitt MIDAL, der den Frankfurter Flughafen ca. 25 km östlich tangiert und planmäßig im Jahr 2029 fertiggestellt werden soll. Die nächste potenzielle Ausspeisung von Wasserstoff könnte am ca. 30 km entfernten Absperrpunkt Jügesheim erfolgen (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20 Straßenanbindung FRA – Absperrpunkt Jügesheim



Abbildung 21 Örtliche Beschaffenheit Absperrpunkt Jügesheim

Der Bezug von grünem Wasserstoff aus der MIDAL-Leitung müsste nicht zwangsläufig am Absperrpunkt Jügesheim erfolgen, da die Leitung bislang noch nicht mit Wasserstoff gefüllt ist. Ein Schnitt an einer nähergelegenen Stelle wäre denkbar, jedoch auch mit höheren Kosten verbunden. Eine Direktanbindung an das WKN ist aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich, weshalb sich die Anbindung an das WKN zunächst auf die Belieferung durch LKW-Transport ab einem nahegelegenen Ausspeisepunkt belaufen wird. Die Bedingungen für einen direkten Anschluss könnten sich jedoch ab dem Jahr 2040 ändern, wenn Wasserstoff für den Vortrieb von Flugzeugen relevanter wird und die Leitungen des Wasserstoff-Regionalnetzes Rh2ein-Main Connect fertiggestellt sind, welche den Flughafen sowohl westlich als auch südlich tangieren werden. (ENTega, o.J.).

Der Bezug von grünem Wasserstoff aus der MIDAL-Leitung muss nicht zwangsläufig am Absperrpunkt Jügesheim erfolgen, da die Leitung bislang noch nicht mit Wasserstoff gefüllt ist. Ein Schnitt an einer nähergelegenen Stelle wäre zwar denkbar, jedoch auch mit höheren Kosten verbunden. Derzeit ist die lokale Beschaffenheit des Ausspeisepunkts eher suboptimal, da es am designierten Absperrpunkt keine gute Anbindung an die nahegelegene Autobahn gibt und eine direkte Befahrbarkeit nur durch einen Ackerweg möglich ist. (Siehe Abbildung 21 rechter Absperrpunkt) Es gibt

eine Rohschleife, die zu einer Anschlussstation des regionalen Energieversorgers auf der anderen Seite der Autobahn führt. (Siehe Abbildung 18 linker Absperrpunkt) Diese Anschlussstation hat grundsätzlich eine bessere bauliche Beschaffenheit, ist allerdings Teil des alten Erdgasnetzes. Eine Option zur Umnutzung für die Wasserstoffauspeisung ist derzeit nicht bekannt.

Fall 4: MUC- Flughafen München

Der Flughafen München hat bereits diverse Erfahrungen mit Tests von Wasserstoffanwendungen gesammelt und zudem eine grobe Vorstellung davon, wie sich der Energieträger in den kommenden Jahren am Flughafen etablieren könnte. (Flughafen München GmbH, o. J.) Eine permanente Integration von Wasserstoff als Energieträger im Flughafenbetrieb scheidet jedoch bislang vor allem an der Wirtschaftlichkeit. Im Falle des Münchner Flughafens wäre eine Anbindung an das Wasserstoffkernnetz voraussichtlich im Jahr 2032 möglich. Das Wasserstoffprojekt HyPipe Bavaria zielt zwar darauf ab, die Infrastruktur für das bayerische Wasserstoffnetz bis 2030 fertigzustellen. Die Fernnetzbetreiber Gas und das regionale Pendant Bayernets gehen jedoch davon aus, dass eine flughafennah verlaufende Trasse erst ab 2032 an den aus dem österreichischen Burghausen kommenden Südlink des Europäischen Kernnetzes angebunden wird. (bayernets GmbH, o. J.). Um die Bodendienste bereits jetzt mit grünem Wasserstoff zu versorgen, kann der Flughafen auf die in Abschnitt 6.3 erwähnte dezentrale Produktionsinsellösung zurückgreifen.

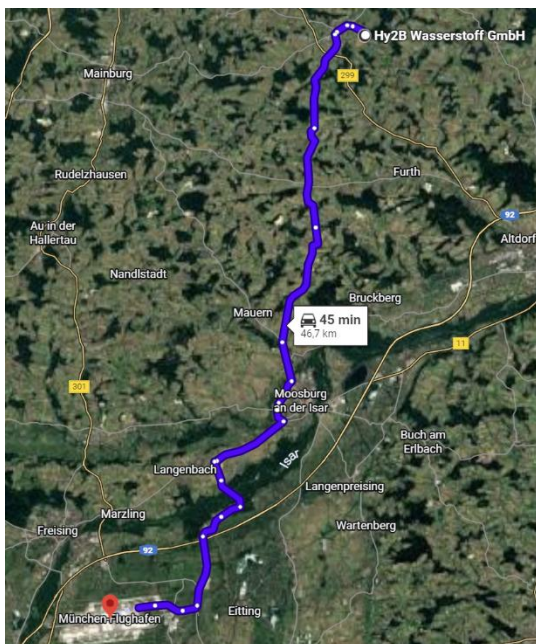


Abbildung 22 Straßenanbindung MUC – dezentrale Produktionsinsel



Abbildung 23 Örtliche Beschaffenheit Dezentrale Produktionsinsel Pfaffenhausen

Abbildung 22 und 23 zeigen die Anbindung und örtliche Beschaffenheit der nahegelegenen Produktionsstätte für grünen Wasserstoff im bayrischen Pfaffenhofen. Sie befindet sich ca. 46 km nördlich des Flughafens und bietet lokalen Abnehmern feste Kontingente oder spontane Käufe von grünem Wasserstoff in der richtigen Druckstufe und dem nötigen Reinheitsgrad an. Die Produktionsstätte ist mit einem 5 MW Elektrolyseur bereits vollständig funktionsbereit und kann beispielhaft für dezentrale Elektrolyseure bis 10 MW stehen, die prinzipiell an jedem kleineren Windpark oder einem mittelgroßen Solarpark errichtet werden können. Im Idealfall handelt es sich um eine Kombination aus

beidem. Diese Lösung ist prinzipiell auf alle deutschen Verkehrsflughäfen übertragbar, wobei eine lokale Prüfung der Vorteilhaftigkeit nötig wäre.



Abbildung 24 Drop & Swap Lösung H₂Busbetrieb Südbayern

Das hier Ansässige Unternehmen hat zudem Erfahrung mit einem permanenten [Drop & Swap Modell](#) für die Versorgung eines Busunternehmens in Südbayern (Siehe Abbildung 24). In diesem Modell übernimmt der Hersteller eine doppelte Rolle: Einerseits ist er Energieerzeuger bzw. Inverkehrbringer, andererseits fungiert er mit einem eigenen Fuhrpark als Lieferant. Er stellt die Trailer Logistik zur Verfügung.

6.6. Potenzielle Nachfrage nach Wasserstoff für Bodendienste

Wie in Abschnitt 6.2 erwähnt, wird die Anwendung von Wasserstoff im Flugverkehr erst nach 2035 von Bedeutung sein. Regelmäßige Flüge mit kleineren Flugzeugen, die mit flüssigem Wasserstoff betrieben werden, werden zwischen 2030 und 2035 erwartet. Diese werden jedoch die Nachfrage nicht wesentlich beeinflussen. Zudem ist unklar, ob die Flüge innerhalb des TEN-V-Netzwerks erfolgen werden oder ob sie ein Netzwerk kleinerer Flughäfen nutzen werden, um ehemalige Kurzstreckenflüge zu ersetzen, die aus Nachhaltigkeitsgründen aus dem europäischen Netzwerk reduziert wurden. Die wahrscheinlichste Nachfrage nach Wasserstoff an deutschen Verkehrsflughäfen entsteht bis 2035 bei den Bodendiensten mit hohen Leistungsanforderungen. ([vergleiche Abschnitt 3.4.](#)). Innerhalb der Branche wurden gegenwärtig vier konkrete Fahrzeug- und Gerätetypen durch deutsche Verkehrsflughäfen als wasserstofftauglich identifiziert:

Tabelle 6 Potenzielle Wasserstoffverbraucher im Flughafen Bodendienst.

Fahrzeug-/Gerätetyp	Daten Quelle /Jahr	Daten Basis
Flugzeugschlepper Pushbacks)	TULIPS Projekt / 2026	Testlauf Flughafen Amsterdam
Gepäck-/Frachtschlepper	Hamburg Airport & HTM/2026	Testlauf Flughafen Hamburg (Gepäckschlepper) Verbrauchsschätzung HTM (Frachtschlepper)
Bodenstromaggregate (GPUs)	TULIPS Projekt / 2025	Testlauf Flughafen Amsterdam
Mobile Klimaanlage (PCAs)	n/a	n/a

Fahrzeuge für den Personal- und Passagiertransport sind bewusst von der Nachfrage ausgeschlossen, da sich bis 2030 keine Vorteilhaftigkeit gegenüber etablierten batterieelektrischen Lösungen abzeichnet, deren Qualität bereits nachgewiesen ist.

Für potenzielle Fahrzeuge der Bodendienste, darunter Flugzeug-, Gepäck- und Frachtschlepper sowie Bodenstromaggregate, wurden bereits marktnahe Lösungen entwickelt und getestet. Es gibt

evidenzbasierte Daten aus den EU-Projekten TULIPS und Stargate sowie aus den Praxistests am Hamburger Flughafen (HAM). Einzig die Werte für den wasserstoffbetriebenen Frachtschlepper wurden noch nicht durch Praxistests validiert. Die Einschätzung erfolgte durch den Systemdesigner des Gepäckschleppers am Hamburger Flughafen. Es ist beabsichtigt, das gleiche System mit größerem Leistungoutput zu nutzen. Für eine wasserstoffbetriebene PCA gibt es derzeit weder einen Prototyp noch verlässliche Verbrauchszahlen.

Um ein besseres Verständnis über die potenziellen Wasserstoffbedarfe an deutschen Verkehrsflughäfen zu generieren, wurden im Rahmen der Studie die Verbräuche pro Betriebsstunde und die durchschnittlichen jährlichen Betriebszeiten der potenziell umrüstbaren Fahrzeuge /Geräte multipliziert, um den erwarteten Maximalwert für spezifische Flughäfen in Deutschland zu definieren. Für die Studie wurden hierzu drei Flughäfen mit unterschiedlichen Charakteristika ausgewählt. (siehe Tabelle 5)

Tabelle 7 Ausgewählte Flughäfen Analyse potenzielle Wasserstoffbedarfe für Bodendienste.

Flughafen	Typ	Region	H ₂ Affinität
HAM	International Airport	Nord	Innovator (Typ C)
FRA	International Airport (Hub)	Zentral	Electric First (Typ A)
MUC	International Airport (Hub)	Süd	H ₂ optional/Innovator (Typ B → C)

Die Berechnung der potenziellen Bedarfe erfolgt zugunsten eines Korridors, innerhalb dessen sich der jährliche Bedarf an Wasserstoff für den Betrieb der Bodendienste entlang der AFIR und TEN-V Direktiven zwischen 2030 und 2035 einpendeln wird.

Für die Berechnung der Bedarfe gelten folgende Voraussetzungen:

- *Die errechneten Bedarfe basieren auf Angaben der jeweiligen Flughäfen.*
- *Die Betriebszeiten sind kumuliert als Jahresdurchschnitt pro Fahrzeug erhoben worden.*
- *Wachstumsprognosen bis 2035 wurden nicht berücksichtigt.*
- *Für die angegebenen Verbräuche wurden evidenzbasierten Daten von Pilotprojekten am Hamburger Flughafen und den Demonstratoren des TULIPS Projekts genutzt.*
- *Der Maximalbedarf an H₂ ist auf die Nutzung durch Bodendienste beschränkt. Er ist hypothetisch und kann durch lokale Strategien variieren.*
- *Der angegebene Korridor zwischen 0 und dem Maximalwert gilt als wahrscheinlichste Spanne für Wasserstoffnachfrage bis zur Einführung von GH₂ oder LH₂ im Flugbetrieb.*
- *Die Rechnung geht davon aus, dass bereits beschafftes BEV nicht durch H₂ Equipment ersetzt wird. Es werden lediglich konventionelle Antriebe (fossile Brennstoffe) als potenzielle Wasserstoffendverbraucher in Betracht gezogen.*

Tabelle 8 Potenzieller Wasserstoffbedarf für Bodendienste HAM

Flughafen Hamburg - Helmut Schmidt (HAM)

	Anzahl Gepäck-schlepper	Anzahl Fracht-schlepper	Anzahl Push-backs	Anzahl GPUs	Anzahl mobile PCA
Gesamt	60	0	23	36	1
Davon BEV				<i>Bodenstrom</i>	
konventionell/CNG	60	0	23		
Betriebszeiten in Std/Jahr	3500	0	3000		n/a
Verbrauch in Kg/Std	1	1,4	2,5	0,665	n/a
Bedarf max.	210000	0	172500	0	n/a
Gesamt	382500	Durchschnittlicher max. Tagesbedarf in t			1,05

Der Hamburger Flughafen kann als Innovator (Typ C) betrachtet werden. Er betreibt aktive Reallabore, um die Funktionsfähigkeit wasserstoffbetriebener GSE im eigenen Betrieb voranzutreiben. Im Rahmen der Dekarbonisierung der Bodendienste liegt der Fokus vor allem auf den 60 mit CNG betriebenen Gepäckschleppern. Während die mobilen GPUs fast vollständig durch Netzstrom ersetzt wurden, sind derzeit keine strategischen Absichten für die Nutzung von Wasserstoff bekannt. Der maximale Wasserstoffbedarf bei einer vollständigen Umrüstung aller konventionellen Fahrzeuge und Geräte der Bodendienste beträgt etwa 382,5 Tonnen pro Jahr, was einem durchschnittlichen Tagesbedarf von 1,05 Tonnen entspricht. Es ist wahrscheinlich, dass der tatsächliche Wert bis 2030 je nach strategischer Ausrichtung zwischen 0 und dem Maximalwert liegt.

Entsprechend der gegenwärtigen Strategie ist davon auszugehen, dass bis 2030 fünf bis 20 Gepäckschlepper auf H₂-Antriebe umgerüstet werden. Dies entspräche einer jährlichen Wasserstoffnachfrage zwischen 17,5 und 70 Tonnen bis 2030.

Tabelle 9 Potenzieller Wasserstoffbedarf für Bodendienste FRA

Flughafen Frankfurt am Main (FRA)

	Anzahl Gepäck-schlepper	Anzahl Fracht-schlepper	Anzahl Push-backs	Anzahl GPUs	Anzahl mobile PCA
Gesamt	150	150	40	40	8
Davon BEV	0	0	0	0	0
Konventionell	150	150	40	40	8
Betriebszeiten in Std/Jahr	1500	2300	2000	2000	125
Verbrauch in Kg/Std	1	1,4	2,5	0,665	n/a
Bedarf max.	225000	483000	200000	53200	n/a
Kummul.	961200	Durchschnittlicher max. Tagesbedarf in t			2,63

Der Flughafen Frankfurt kann als „Electric First“-Flughafen (Typ A) betrachtet werden. Er verfolgt eine grundlegende Elektrifizierungsstrategie. Wasserstoff wird dabei nicht ignoriert, sondern aktiv und durchgängig betrachtet, jedoch ohne strategische Bedeutung zu erlangen. Der Flughafen tendiert zum Typ B, bei dem Wasserstoff zwar für die Luftfahrt, jedoch nicht für GSE in Betracht gezogen wird. Eine klare Positionierung zu Wasserstoff neben dem Einsatz von nachhaltigen Flugkraftstoffen steht jedoch noch aus. Aufgrund der hohen Anzahl von Flugbewegungen und des großen Anteils konventionell betriebener Geräte hat der Flughafen ein großes Potenzial hinsichtlich der

Wasserstoffnachfrage bei Bodendiensten. Bei einem vollständigen Austausch konventioneller Fahrzeuge durch wasserstoffbetriebene Fahrzeuge hätte der Flughafen einen voraussichtlichen jährlichen Bedarf von 961,2 Tonnen Wasserstoff. Dies entspräche einem durchschnittlichen Tagesbedarf von 2,63 Tonnen. Eine Aussage zum erwarteten Bedarf zwischen 0 und dem Maximalwert lässt sich derzeit nicht treffen, da keine entsprechende Strategie für GSE vorliegt. Somit kann gegenwärtig nur von einem Schätzwert von 0 t Wasserstoff für das Jahr 2030 ausgegangen werden.

Tabelle 10 Potenzieller Wasserstoffbedarf für Bodendienste MUC

Flughafen München – Franz Josef Strauß (MUC)

	Anzahl Gepäckschlepper	Anzahl Frachtschlepper	Anzahl Pushbacks	Anzahl GPUs	Anzahl mobile PCA
Gesamt	113	32	35	41	1
Davon BEV	113		9	21	
Konventionell	0	32	26	20	
Betriebszeiten in Std/Jahr	0	1664	1500	1500	n/a
Verbrauch in Kg/Std	1	1,4	2,5	0,665	n/a
Bedarf max.	0	74547,2	97500	19950	n/a
Kummul.	191997,2	Durchschnittlicher max. Tagesbedarf in t			0,53

Der Flughafen München kann zwischen den Typen B und C eingeordnet werden. Wasserstoff wurde an verschiedenen Stellen für die eigenen Fahrzeugflotten des Flughafens getestet und die Nutzung von Wasserstoff für den Flugbetrieb ist präsent, wenn auch nicht klar strategisch verankert. Für die oben erwähnten GSE gab es bislang noch keine Absichten, Wasserstoff einzusetzen. Gegenwärtig wird jedoch sowohl eine Umrüstung der Frachtschlepper als auch eine Wasserstofflösung für mobile PCA-Anlagen in Betracht gezogen. Insgesamt ist das Wasserstoffpotenzial bei den Bodendiensten des Münchner Flughafens trotz einer hohen Zahl an Flugbewegungen eher gering. Dies liegt vorrangig an der voranschreitenden Elektrifizierung der GSE-Flotte. Würde der Flughafen die gesamte, noch nicht umgerüstete Flotte auf den Wasserstoffbetrieb umrüsten, entstünde eine potenzielle Nachfrage von etwa 192 Tonnen Wasserstoff pro Jahr. Dies entspräche einem durchschnittlichen Tagesbedarf von etwa einer halben Tonne.

Der, zwischen 0 und dem Maximalwert, zu erwartender Bedarf hängt maßgeblich mit der potenziellen Umrüstung der Frachtschlepperflotte zusammen. Wird diese positiv bewertet, könnte durch die vollständige Umrüstung der Flotte bereits bis 2030 eine Nachfrage von bis zu 75 Tonnen pro Jahr entstehen. Dieser Wert könnte durch wasserstoffbetriebene PCA-Anlagen ergänzt werden, für die derzeit jedoch keine belastbare Datengrundlage besteht.

6.7. Wissenschaftliche Zusammenfassung

Die Anbindung deutscher Verkehrsflughäfen an das Kernnetz ist grundsätzlich vorteilhaft, da sie sich in der Nähe der Haupttrassen des genehmigten Kernnetzes befinden. Eine flexible Anbindung kann über standardisierte Absperrpunkte erfolgen. Die direkte Anbindung per Pipeline ist aufgrund der geringen Nachfrage nicht realistisch, selbst eine vollständige Umrüstung der konventionellen Bodendienste würde daran nichts ändern. Daher ist davon auszugehen, dass Flughäfen bis zur Einführung wasserstoffbetriebener Flugzeuge weiterhin durch standardisierte Lkw beliefert werden.

Die Belieferung über Lkw von nahegelegenen Ausspeisungs-/Absperrpunkten würde die Lieferdistanz verkürzen und die Lieferbedingungen verbessern, was allen Flughäfen zugutekäme. Weder die Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) noch die Flughäfen zeigen Interesse an der Inbetriebnahme von Abfüllstationen an den Ausspeisungspunkten. Daher ist die Gründung einer dritten Betreibergesellschaft notwendig, um lokale Nachfragen zu bedienen und Wasserstoff aus dem Kernnetz zu verteilen.

Flughafenbetreiber benötigen eine Option um, geringe Mengen grünen Wasserstoffs zu marktgerechten Preisen zuverlässig beziehen zu können. Alternativ zu einer Anbindung an das WKN könnten diese Mengen durch dezentrale Produktionsinseln in der Nähe der Flughäfen bereitgestellt werden. In beiden Fällen wäre der Transport über Lkw erforderlich, was eine Logistikorganisation nach sich zieht. Zudem muss der Wasserstoff für den Flughafenbetrieb hinsichtlich der nötigen Druckstufe und Reinheitsgrad aufbereitet werden.

Zunächst würden Flughäfen eine risiko- und investitionsarme Speicher- und Betankungsinfrastruktur bereitstellen, bis sich der Wasserstoffverbrauch am Flughafen etabliert hat. Hierfür kommen zunächst rückbaubare Optionen, wie Drop and Swap Modelle, in Frage. Die finanzielle Förderung von Infrastrukturmaßnahmen und der Produktion bleibt bis 2035 entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Umstiegs auf Wasserstoffnutzung an Flughäfen. Das Wasserstoffbeschleunigungsgesetz spielt eine wesentliche Rolle bei der Etablierung von Ausspeisepunkten sowie lokalen Produktionsinseln oder On-Site Elektrolyse, indem es Genehmigungsverfahren verkürzt und dadurch finale Investitionsentscheidungen erleichtert.

6.8. Zwei Rollen von Flughäfen im Wasserstoffhochlauf

Abbildung 25 zeigt zwei Pfade die unterschiedliche Potenziale für die Nutzung von Wasserstoff im Flughafenbetrieb beschreiben. Das Potenzial für die THG-Reduktion (roter Pfad) findet sich vor allem an den internationalen Flughäfen des Kernnetzes, da hier die meisten Flugbewegungen stattfinden. Hierangekoppelt sind zeitgleich die meisten Bewegungen an Bodendiensten und Passagieren, was zu einem hohen [Gesamtenergieverbrauch](#) führt, der durch nicht fossile Energieträger zu ersetzen ist.

Der Pfad mit dem höheren Innovationspotenzial (oranger Pfad) könnte hingegen an kleineren Flughäfen mit einem weniger engmaschigen Flugplan und weniger Platzeinschränkungen entstehen. Unter Umständen können diese ein Ökosystem bieten, das sich für die systemische Integration einer neuen Technologie besser eignet. Ergänzt wird dies durch die Wahrscheinlichkeit, dass die ersten Flugzeuge mit einem gasförmigen Wasserstoff-Vortrieb auf Punkt-zu-Punkt-Kurzstreckenflügen von bis zu 1 500 km eingesetzt werden. Für ein entsprechendes Netzwerk müssten Regionalflughäfen oder der Allgemeine Luftfahrtteil (General Aviation) eines internationalen Flughafens im Hub-and-Spoke-Netzwerk mit wenigstens minimaler Wasserstoff-Infrastruktur ausgestattet werden, um eine zuverlässige Verbindung zwischen zwei oder mehr Standorten zu gewährleisten. Eine Übersicht der Flugzeugtypen, die bis 2035 mit gasförmigem Wasserstoff fliegen sollen, ist in Abbildung 25 zu finden.

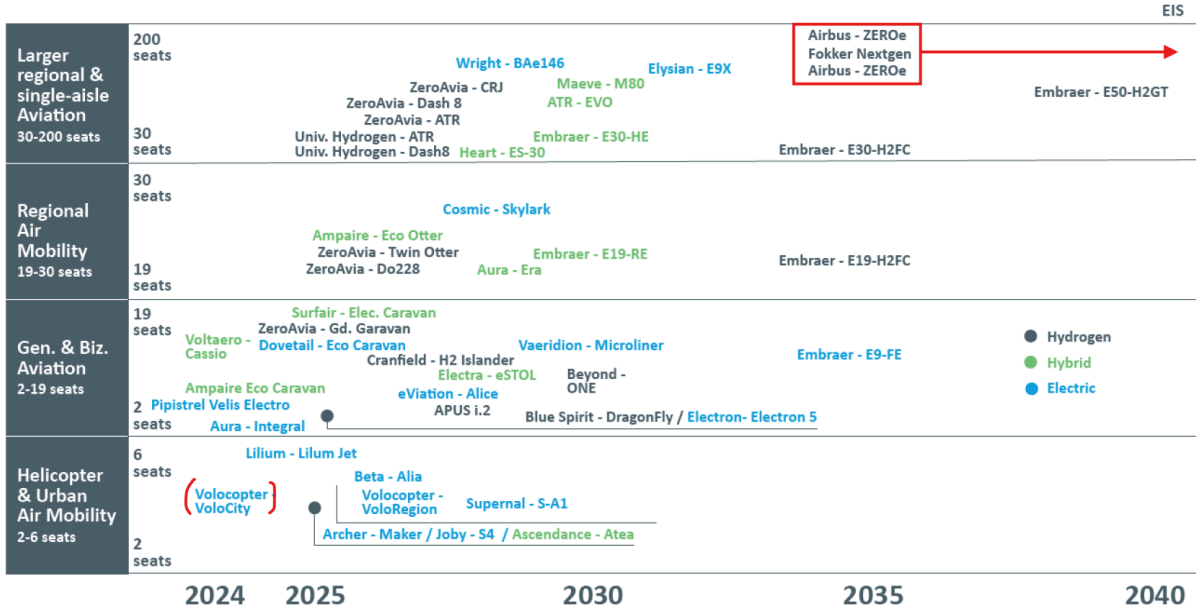


Abbildung 25 AZEA-Vision (2024) Entwicklung von Flugzeugen mit Nichtfossilem Vortrieb bis 2040

Grundsätzlich kann bei beiden Pfaden zunächst die Anzahl der Flugbewegungen herangezogen werden, um die Flughäfen zu ermitteln, die sich für den Einsatz wasserstoffbasierter Antriebe eignen. Hierfür bietet die Airports Council International Europe (ACI Europe) eine gängige Kategorisierung der jährlich beförderten Fluggastzahlen basiert. Eine grobe Kategorisierung über diesen Indikator hilft zunächst, eine Untergrenze für den Innovationspfad zu definieren. Das Reduktionspotential für THG-Emissionen wird zudem über die Wahrscheinlichkeit abgedeckt, dass mit steigenden Passagierzahlen die relevanten Faktoren für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und Geräten der Bodendienste steigen. Für eine differenziertere Betrachtung ist es jedoch wichtig, Kriterien bezüglich der Beschaffenheit des Flughafens und seiner Betriebsbedingungen zu etablieren.

7. Stakeholder-Einbindung

7.1. Stichprobe und Rollen

Im Rahmen der Stakeholder-Einbindung wurden qualitative, semi-strukturierte Experteninterviews durchgeführt, um die Perspektiven zentraler Akteure zur Entwicklung von Wasserstoffinfrastruktur an Verkehrsflughäfen zu erfassen. Der empirische Schwerpunkt der Stichprobe lag bewusst auf Flughafenbetreibern, ergänzt durch eine kleine, gezielt ausgewählte Gruppe weiterer systemrelevanter Stakeholder, um die Flughafenperspektive kontextuell einzuordnen.

Zusammensetzung der Stichprobe

Die Stichprobe umfasst insgesamt Flughafenvertreter:innen aus unterschiedlichen Flughafen- und Systemkontexten sowie fünf weitere Stakeholdergruppen, die eine indirekte, aber strategisch relevante Rolle im Wasserstoffhochlauf spielen:

Flughäfen (Hauptstichprobe):

- 8 TEN-V-Flughäfen (große und mittlere deutsche Verkehrsflughäfen im europäischen Kern- und Gesamtnetz)
- 2 regionale (deutsche) Flughäfen (nicht TEN-V, mit besonderen strukturellen Rahmenbedingungen)
- 3 europäische Referenzflughäfen außerhalb des nationalen Kontexts (Good-Practice- und Vergleichsfälle)

Weitere Stakeholder (Ergänzungsstichprobe):

- Interessen- und Branchenverbände
- Fernnetz- und Infrastrukturbetreiber (Gas / Wasserstoff)
- Logistik- und Speditionsdienstleister
- Flugzeug- bzw. OEM-nahe Akteure
- Weitere systemrelevante Marktakteure entlang der Wertschöpfungskette

Alle Interviews wurden anonymisiert ausgewertet, um organisationsinterne Einschätzungen, strategische Unsicherheiten und nicht öffentlich kommunizierte Abwägungen offen erfassen zu können.

7.2. Leitfaden-Cluster & Auswertungsmethodik

Der vollständige Interviewleitfaden befindet sich in Anhang 2.

Die empirische Erhebung basierte auf leitfadengestützten Expert*inneninterviews, die entlang eines thematisch strukturierten Interviewleitfadens durchgeführt wurden. Der Leitfaden wurde entwickelt, um sowohl strategische als auch operative Perspektiven auf den Einsatz von Wasserstoffinfrastruktur an deutschen Verkehrsflughäfen systematisch zu erfassen.

Inhaltlich gliederte sich der Leitfaden in sechs thematische Cluster, die zentrale Dimensionen der Technologieeinführung adressieren:

1. **Technologie**

Fokus auf bestehende Erfahrungen, technologische Optionen (z. B. GH₂, LH₂, Trailer,

Pipeline), Integrationsanforderungen in bestehende Flughafenprozesse sowie spezifische Anforderungen wasserstoffbetriebener Ground Support Equipment (GSE).

2. **Regulierung**

Erfassung regulatorischer Rahmenbedingungen, Genehmigungsprozesse und wahrgenommener regulatorischer Lücken oder Hemmnisse auf nationaler und europäischer Ebene (u. a. BImSchG, AFIR, RED III).

3. **Wirtschaft**

Bewertung der wirtschaftlichen Machbarkeit, Investitions- und Betriebskosten, Preisannahmen, Akteursrollen sowie möglicher Geschäfts- und Betreibermodelle inklusive sektübergreifender Synergien.

4. **Hemmnisse & Risiken**

Identifikation technischer, wirtschaftlicher, organisatorischer und kultureller Barrieren sowie wahrgenommener Risiken im Zusammenhang mit Sicherheit, Betrieb und Investitionsentscheidungen.

5. **Chancen & Potenziale**

Analyse möglicher Nutzenaspekte von Wasserstoffanwendungen, etwa in Bezug auf Klimaziele, Standortattraktivität, Innovationspotenziale und regionale Wertschöpfung.

6. **Einstellung & Rolle**

Erfassung der Haltung unterschiedlicher Stakeholdergruppen gegenüber Wasserstoff sowie der zugeschriebenen Rolle einzelner Akteure im Transformationsprozess des Luftverkehrs.

Die Clusterstruktur ermöglichte eine vergleichende Analyse über unterschiedliche Flughafentypen und Akteursgruppen hinweg, während offene Frageformate ausreichend Flexibilität für kontextspezifische Vertiefungen boten

Die Auswertung der Interviews erfolgte mittels einer qualitativen, thematischen Inhaltsanalyse, orientiert an einem deduktiv-induktiven Vorgehen.

- Deduktiv wurden die sechs Leitfaden-Cluster als übergeordnete Analysekatoren genutzt.
- Induktiv wurden innerhalb dieser Cluster thematische Subkategorien aus dem Interviewmaterial heraus entwickelt, um neue, nicht vorab antizipierte Aspekte abzubilden.

Die Transkripte bzw. Interviewprotokolle wurden systematisch codiert und anschließend clusterweise ausgewertet. Dabei wurden Aussagen nach drei analytischen Mustern unterschieden:

- Konsens (weitgehend übereinstimmende Einschätzungen),
- Divergenz (konträre oder standortabhängige Bewertungen),
- Offene Fragen bzw. Unsicherheiten (nicht geklärte oder widersprüchliche Aspekte).

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse anonymisiert zusammengeführt und nicht einzelnen Flughäfen oder Organisationen zugeordnet, sondern entlang struktureller Merkmale (z.B. Flughafentyp, Rolle im System) interpretiert. Ziel der Auswertung war nicht die statistische

Repräsentativität, sondern die analytische Verdichtung zentraler Handlungslogiken, Hemmnisse und Entscheidungsbedingungen für den Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur an deutschen Verkehrsflughäfen.

Die qualitative Auswertung bildet die empirische Grundlage für die Ableitung von Implikationen, Handlungsempfehlungen und Policy-Optionen, die in den folgenden Kapiteln der Studie vorgestellt werden.

7.3. Ergebnisse nach Themenclustern



Abbildung 26 Hauptthemencluster Interviews (induktiv/deduktiv)

Technologie

Aus technologischer Sicht wird Wasserstoff von den befragten Akteuren nicht als flächendeckende Lösung, sondern als ergänzende Technologie für klar definierte Anwendungsfälle verstanden. Ein übergreifendes Ergebnis ist, dass Flughäfen in ihrem technologischen Reifegrad und in ihren Einsatzlogiken keine homogene Gruppe darstellen. Entsprechend unterschiedlich fällt die Bewertung des Einsatzpotenzials von Wasserstoff aus.

Für den Bodenbetrieb wird gasförmiger Wasserstoff (GH₂) ausschließlich dort als sinnvoll eingeschätzt, wo batterieelektrische Lösungen an praktische Grenzen stoßen. Dazu zählen insbesondere energieintensive oder dauerhaft genutzte Anwendungen, wie schwere Schlepper, GPUs an Außenpositionen, Winterdienst- oder Feuerwehrfahrzeuge. Für den überwiegenden Teil der GSE gilt die Elektrifizierung hingegen als technisch ausgereift, betrieblich zuverlässig und organisatorisch einfacher.

Ein zentrales, standortübergreifendes Ergebnis ist, dass der technische Engpass nicht in der Infrastruktur, sondern in der fehlenden Verfügbarkeit geeigneter Fahrzeuge liegt. Nahezu alle Interviewpartner berichten, dass serienreife H₂-GSE kaum verfügbar sind und Pilotgeräte überwiegend nur im Rahmen von Forschungs- oder Förderprojekten eingesetzt werden können. Ohne marktfähige Fahrzeuge wird der Einsatz von Wasserstoff im Bodenbetrieb als praktisch nicht umsetzbar eingeschätzt.

Flüssiger Wasserstoff (LH₂) wird technologieübergreifend klar dem zukünftigen Flugzeugbetrieb zugeordnet. Für den betrachteten Zeitraum wird LH₂ nicht als kurzfristige Betriebsoption gesehen, sondern als Thema der Vorbereitung, Demonstration und langfristigen Planung. Die Interviews zeigen deutlich, dass GH₂- und LH₂-Anwendungen konsequent getrennt betrachtet werden müssen, da sie grundlegend unterschiedliche Anforderungen an Infrastruktur, Sicherheit und Organisation stellen.

Wirtschaft

Wirtschaftliche Aspekte prägen die Bewertung von Wasserstoff an Flughäfen in besonderem Maße. Ein zentrales Ergebnis ist, dass nicht der Wasserstoffpreis pro Kilogramm, sondern vor allem die Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur als größte Hürde wahrgenommen werden.

Wasserstofffahrzeuge werden häufig als deutlich teurer als vergleichbare batterieelektrische Lösungen beschrieben. Gleichzeitig verhindern geringe Stückzahlen und unsichere Nachfrage Skaleneffekte. Ein wirtschaftlich tragfähiger Einsatz von Wasserstoff wird daher nur dort gesehen, wo Flughäfen in ein regionales Wasserstoffökosystem eingebettet sind und sich Infrastruktur mehrere Nutzer teilen, etwa aus Logistik, öffentlichem Verkehr oder Industrie.

Ohne diese Mehrfachnutzung wird Wasserstoff am Flughafen überwiegend als nicht wirtschaftlich darstellbar eingeschätzt. Mehrere Interviewpartner weisen darauf hin, dass bestehende Förderinstrumente häufig nicht ausreichend auf die realen Kostenstrukturen und Risiken der frühen Marktphase ausgerichtet sind und insbesondere laufende Betriebskosten unzureichend berücksichtigen.

Regulierung

Regulatorische Rahmenbedingungen werden von den Befragten als einer der zentralen Bremsfaktoren beschrieben. Dabei geht es weniger um explizite Verbote als um Unsicherheit, fehlende Standards und uneinheitliche Auslegung bestehender Regelwerke.

Besonders häufig genannt werden fehlende oder unklare Vorgaben zu Sicherheitsabständen, EX-Zonen, mobilen Betankungssystemen, Haftungs- und Versicherungsfragen sowie zur LH₂-Betankung von Flugzeugen. In der Praxis führt dies zu sehr vorsichtigen Genehmigungsansätzen, die Projekte verzögern oder wirtschaftlich erschweren.

Die Interviews machen deutlich, dass Flughäfen in hohem Maße auf europäische Harmonisierung und Standardisierung angewiesen sind. Ohne klare, übergeordnete Vorgaben sehen sich viele Standorte nicht in der Lage, eigenständig tragfähige Lösungen umzusetzen oder betriebliche Risiken verantwortbar einzugehen. Ein wiederkehrendes Ergebnis ist, dass fehlende Regulierung derzeit als schwerwiegender empfunden wird als technologische Defizite.

Hemmnisse

Die Hemmnisse für den Einsatz von Wasserstoff ergeben sich aus dem Zusammenspiel technischer, wirtschaftlicher, regulatorischer und organisatorischer Faktoren. Neben der fehlenden Fahrzeugverfügbarkeit und regulatorischen Unsicherheit spielen standortspezifische Rahmenbedingungen eine wesentliche Rolle. Dazu zählen begrenzte Flächen, komplexe Luftseite-/Landseite-Schnittstellen, unzureichende Netzanschlüsse oder logistische Einschränkungen.

Darüber hinaus treten kulturelle und organisationale Barrieren deutlich hervor. Viele Interviewpartner beschreiben eine ausgeprägte Risikoaversion im Luftfahrtumfeld sowie ein begrenztes Erfahrungswissen im Umgang mit Wasserstoff. Entscheidungen sind häufig stark von einzelnen Schlüsselpersonen abhängig, was zu Pfadabhängigkeiten und Verzögerungen führen kann. In mehreren Interviews wird betont, dass Akzeptanz weniger durch theoretische Argumente als durch praktische Erfahrungen entsteht.

Chancen und Potenziale

Trotz der genannten Hemmnisse sehen die Interviewpartner relevante strategische Chancen für Wasserstoff an Flughäfen. Insbesondere wird hervorgehoben, dass Flughäfen künftig eine stärkere Rolle als Knotenpunkte zwischen Energie-, Mobilitäts- und Logistiksystemen einnehmen könnten.

Wasserstoff kann in diesem Zusammenhang eine verbindende Funktion erfüllen, insbesondere wenn Flughäfen in regionale oder transnationale Wasserstoffstrukturen eingebettet sind. Frühzeitige Demonstrations- und Pilotprojekte werden dabei als wichtiger Hebel für Kompetenzaufbau, institutionelles Lernen und Akzeptanzbildung gesehen – auch dann, wenn kurzfristig kein wirtschaftlicher Business Case besteht.

Einstellungen und Rollenverständnisse

Die Einstellungen gegenüber Wasserstoff sind insgesamt pragmatisch und differenziert geprägt. Flughäfen verstehen sich überwiegend nicht als Produzenten, sondern als Nutzer, Ermöglicher und Integratoren. Ihre Rolle wird darin gesehen, geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen, externe Akteure zu koordinieren und langfristige Optionen in der Infrastruktur- und Flächenplanung offenzuhalten.

Gleichzeitig zeigt sich eine klare Trennung zwischen kurzfristigem operativem Betrieb und langfristiger strategischer Vorbereitung. Während Wasserstoff im aktuellen Bodenbetrieb häufig nachrangig behandelt wird, besteht ein hohes Bewusstsein dafür, dass zukünftige wasserstoffbetriebene Flugzeuge erhebliche Auswirkungen auf Infrastruktur, Prozesse und Sicherheitskonzepte haben werden. Ob und wann diese Entwicklungen eintreten, wird dabei maßgeblich von externen Faktoren wie OEM-Zeitplänen, politischen Rahmenbedingungen und regionaler Wasserstoffverfügbarkeit abhängig gemacht.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass Wasserstoff an Flughäfen derzeit weniger als sofort einsetzbare Lösung, sondern vielmehr als strategische Option mit langfristiger Relevanz verstanden wird. Der Fortschritt hängt dabei weniger von einzelnen technologischen Durchbrüchen ab als von klaren Rahmenbedingungen, Marktkoordination, Standardisierung und praktischen Lernprozessen. Für die Praxis bedeutet dies, dass gezielte, anwendungsnahe und regional eingebettete Ansätze deutlich wirksamer sind als breit angelegte, technologiegetriebene Programme.

7.4. Typologie von Flughäfen und standortspezifische Implikationen

Die Auswertung der Interviews zeigt, dass Flughäfen im Umgang mit Wasserstoff keine homogene Gruppe darstellen. Vielmehr lassen sich auf Basis strategischer Prioritäten, betrieblicher Rahmenbedingungen, Marktumfeld und institutioneller Einbettung mehrere idealtypische Flughafentypen identifizieren. Diese Typologie ist nicht als starre Klassifikation zu verstehen, sondern als

analytisches Hilfsmittel, um unterschiedliche Entscheidungslogiken, Chancen und Hemmnisse systematisch abzubilden.

Im Folgenden werden vier Flughafentypen beschrieben, die sich in den Interviews wiederholt und konsistent herausgebildet haben. Für jeden Typ werden Charakteristika, zentrale Chancen, Hemmnisse sowie daraus abgeleitete Implikationen dargestellt.

Typ A – „Electric First, Hydrogen Optional“

(Mehrheit der Flughäfen; mittelgroß, überwiegend passagierorientiert)

Flughäfen dieses Typs verfolgen im Bodenbetrieb konsequent eine Elektrifizierungsstrategie. Kurze Fahrwege, gut ausgebaute Ladeinfrastruktur und überschaubare Einsatzprofile führen dazu, dass der GSE-Bedarf weitgehend durch batterieelektrische Lösungen abgedeckt werden kann. Wasserstoff wird nur dort in Erwägung gezogen, wo elektrische Systeme an praktische Grenzen stoßen, etwa im Winterdienst oder bei einzelnen Heavy-Duty-Anwendungen. Ein interner Marktdruck für Wasserstoff besteht in der Regel nicht; externe Nachfrage oder politische Verpflichtungen fehlen häufig.

Chancen ergeben sich vor allem aus einem potenziellen zukünftigen Preisverfall von Wasserstoff sowie aus der Möglichkeit, über GH₂-Trailerlösungen risikoarme Tests und Lernprojekte umzusetzen. Langfristig wird auch hier erwartet, dass wasserstoffbetriebene Flugzeuge bodenseitige Prozesse beeinflussen könnten, jedoch ohne unmittelbaren Handlungsdruck.

Demgegenüber stehen deutliche Hemmnisse: Es fehlt ein belastbarer Business Case, die Nutzung einzelner H₂-GSE ist gering und erzeugt keine Skaleneffekte. Zudem bestehen Wissenslücken bei Regulierung und Sicherheit, verstärkt durch die geringe Verfügbarkeit serienreifer Fahrzeuge (OEM-Lücke).

Implikationen: Für Typ-A-Flughäfen ist keine ganzheitliche Wasserstoffinfrastruktur erforderlich. Sinnvoll sind vielmehr modulare, reversible Lösungen (z. B. Trailer, mobile Betankungslösungen) zur punktuellen Erprobung. H₂-GSE hat eine nachgeordnete Priorität und dient primär als Lernoption. Die Vorbereitung auf LH₂-Flugzeuge erfolgt planerisch (Flächen, Prozesse), nicht operativ.

Typ B – „Hydrogen for Aircraft, not for GSE“

(Einige große, politisch eingebettete Flughäfen)

Flughäfen dieses Typs priorisieren Wasserstoff strategisch für den zukünftigen Flugzeugbetrieb, nicht jedoch für den Bodenbetrieb. GSE bleiben bewusst elektrisch, da diese Lösungen als effizienter, günstiger und betrieblich robuster gelten. Der Fokus liegt auf der frühzeitigen Positionierung als LH₂-ready Airport, häufig im Kontext politischer Programme, nationaler Wasserstoffstrategien oder europäischer Forschungsinitiativen.

Chancen ergeben sich aus hoher politischer Sichtbarkeit, verbessertem Förderzugang sowie dem Aufbau regulatorischer Kompetenz, insbesondere in den Bereichen Sicherheit, Haftung und Schnittstellen. Diese Flughäfen fungieren häufig als Referenzstandorte für konzeptionelle Arbeiten und Demonstrationen.

Gleichzeitig bestehen erhebliche Hemmnisse. Die Verflüssigung von Wasserstoff wird als energieintensiv und teuer eingeschätzt, die LH₂-Betankung als technisch und organisatorisch komplex. Logistiklösungen (Trailer) sind nicht standardisiert, und Airlines zeigen teils geringe Motivation, frühe Investitionsrisiken zu tragen.

Implikationen: Für Typ-B-Flughäfen steht eine systemische Betrachtung von Energie- und Verkehrssystemen im Vordergrund. Der Fokus liegt auf Standardisierung (EX-Zonen, Schnittstellen, Haftung) und „early preparation“ statt auf massiven Investitionen. GH₂ für GSE kommt – wenn überhaupt – nur als Ausnahme oder Demonstrator zum Einsatz.

Typ C – „Field Lab / Innovator / Testplattform“

(Kleine bis mittelgroße Flughäfen mit starkem F&E- und Pilotfokus)

Diese Flughäfen zeichnen sich durch eine hohe Experimentierfreude und den expliziten Anspruch aus, Know-how aufzubauen. GH₂-GSE werden bewusst als Lernfeld genutzt, häufig im Rahmen internationaler Demonstrationsprojekte oder EU-geförderter Vorhaben. Der operative Alltag ist dabei weniger durch Effizienz als durch Erkenntnisgewinn geprägt.

Chancen liegen im Aufbau eines Wissensvorsprungs, in schnellen Entscheidungsprozessen und in der Attraktivität als Partner für Hersteller, Forschungseinrichtungen und Airlines. Diese Flughäfen positionieren sich frühzeitig für zukünftige Flugzeugkonzepte.

Dem stehen Hemmnisse wie eine starke Abhängigkeit von Fördermitteln, hohe regulatorische Komplexität und ein fehlender lokaler Markt gegenüber, der eine wirtschaftliche Skalierung erschwert.

Implikationen: Typ-C-Flughäfen eignen sich besonders als EU-Lern- und Demonstrationsstandorte. Der Fokus sollte auf schlanken, modularen GH₂-Infrastrukturen liegen. Safety Cases, (S)QRA und Genehmigungsprozesse entwickeln sich dabei zu übertragbarem bzw. skalierbarem Wissen. Die Rolle als strategische Testplattform für Airlines und OEMs steht im Vordergrund, nicht die kurzfristige Wirtschaftlichkeit.

Typ D – „Energiegetriebene Standorte / Sonderlagen“

(z. B. Inseln, Flughäfen mit Energieengpässen oder industriellem Umfeld)

Bei diesen Standorten dominieren energiesystemische Fragestellungen die Entscheidungslogik. Wasserstoff wird primär als Energiespeicher und -puffer betrachtet, häufig in Kombination mit PV und Elektrolyse. Der Flughafen übernimmt eine zentrale Rolle im regionalen Energiesystem, weniger im klassischen GSE-Betrieb.

Chancen ergeben sich aus hoher regionaler Relevanz, einer partiellen Unabhängigkeit vom Stromnetz sowie lokalen Multiplikatoreffekten (z. B. Krankenhäuser, Betriebe, Kommunen).

Die Hemmnisse liegen in Netzschwächen, logistischer Isolation (Trailer, Fähren, fehlende Pipeline) sowie kleinen GSE-Flotten, die keinen eigenständigen wirtschaftlichen Case für H₂-GSE begründen.

Implikationen: Für Typ-D-Flughäfen liegt der Schwerpunkt auf der Rolle als Energiehub. Der Fokus liegt auf Elektrolyse, Speicherung und regionaler Versorgung, nicht auf der Transformation der GSE-Flotte. Wasserstoff fungiert hier eher als Ermöglicher für Energie- und Versorgungssicherheit als klimapolitisches Instrument im engeren Sinne.

→ Die Typologie verdeutlicht, dass einheitliche Wasserstoffstrategien für Flughäfen weder realistisch noch zielführend sind. Wirksame Maßnahmen müssen typenspezifisch ansetzen und die jeweilige Rolle des Flughafens im Mobilitäts-, Energie- und Innovationssystem berücksichtigen. Die dargestellten Typen bilden damit eine zentrale Grundlage für die Ableitung differenzierter Handlungsoptionen in den folgenden Kapiteln.

7.5. Konsens, Dissens, offene Fragen

Die Analyse der anonymisierten Interviews zeigt, dass sich trotz unterschiedlicher Flughafentypen und Rahmenbedingungen klare gemeinsame Positionen (Konsens), kontroverse Einschätzungen (Dissens) sowie offene, bislang ungelöste Fragestellungen identifizieren lassen. Diese Dreiteilung ist für die Einordnung des aktuellen Entwicklungsstands von Wasserstoffinfrastruktur an Flughäfen besonders relevant, da sie aufzeigt, wo bereits Handlungsfähigkeit besteht und wo weiterer Klärungsbedarf vorliegt.

Konsens

Über nahezu alle Interviews hinweg lassen sich mehrere Punkte identifizieren, in denen eine hohe Übereinstimmung besteht:

Wasserstoff ist keine kurzfristige „Allzwecklösung“ für Flughäfen. Ein breiter Konsens besteht darin, dass Wasserstoff den batterieelektrischen Antrieb nicht flächendeckend ersetzt. Für den Großteil der GSE wird Elektrifizierung als technisch ausgereift, wirtschaftlich sinnvoll und betrieblich etabliert angesehen. Wasserstoff wird vielmehr als ergänzende Technologie für spezifische Anwendungsfälle betrachtet.

Der größte Engpass liegt in der fehlenden Fahrzeugverfügbarkeit. Unabhängig von Flughafengröße oder strategischer Ausrichtung berichten die Interviewpartner übereinstimmend von einer deutlichen Lücke auf Seiten der Hersteller. Ohne serienreife, betrieblich erprobte H₂-GSE sind weder Pilotprojekte noch ein Markthochlauf realistisch.

Flüssiger Wasserstoff ist ein Flugzeugthema – kein Bodenthema. LH₂ wird von allen befragten Akteuren klar dem zukünftigen Flugzeugbetrieb zugeordnet. Für den Bodenbetrieb wird LH₂ als zu komplex, zu teuer und zu aufwendig angesehen. Die Vorbereitung auf LH₂ wird als strategische Aufgabe verstanden, nicht als kurzfristige Investitionsentscheidung.

Wasserstoff ist nur im regionalen Verbund wirtschaftlich darstellbar. Ein weiterer klarer Konsens besteht darin, dass Flughäfen allein keine ausreichende Nachfrage erzeugen. Tragfähige Modelle setzen auf Mehrfachnutzung mit Logistik, ÖPNV, Industrie oder Häfen. Ohne diese Einbettung wird Wasserstoff als wirtschaftlich nicht tragfähig eingeschätzt.

Standardisierung ist entscheidender als technologische Weiterentwicklung. Die Interviewpartner sind sich weitgehend einig, dass der Mangel an klaren, harmonisierten Standards, insbesondere für Sicherheit, Genehmigung und Haftung, derzeit ein größeres Hemmnis darstellt als fehlende Technologie.

Dissens

Neben diesen gemeinsamen Positionen zeigen die Interviews auch relevante Unterschiede in der Einschätzung, die sich vor allem aus Standortlogik, strategischer Rolle und institutionellem Umfeld ergeben:

Rolle des Flughafens im Wasserstoffsystem. Während einige Flughäfen eine aktive Rolle als Testplattform oder Innovationsstandort einnehmen möchten, sehen sich andere bewusst in einer abwartenden oder rein reaktiven Rolle. Die Spannweite reicht von „Lernstandort für die Branche“ bis zu „Follower, sobald der Markt reif ist“.

Zeitpunkt für erste Investitionen. Uneinigkeit besteht darüber, wann der richtige Zeitpunkt für Investitionen gekommen ist. Einige Akteure befürworten frühe Pilotprojekte zur Kompetenzentwicklung, auch ohne Business Case. Andere lehnen Investitionen ab, solange keine klaren wirtschaftlichen oder regulatorischen Rahmenbedingungen bestehen.

Bewertung der regulatorischen Hürden. Während ein Teil der Interviewpartner Regulierung als grundsätzlich handhabbar einschätzt, sehen andere darin den zentralen Blockadefaktor. Diese Unterschiede hängen stark von den jeweiligen Erfahrungen mit Genehmigungsbehörden und bestehenden Demonstrationsprojekten ab.

Zukünftige Rolle von GH₂ im Bodenbetrieb. Einige Akteure sehen GH₂ langfristig als festen Bestandteil bestimmter GSE-Kategorien, andere betrachten Wasserstoff im Bodenbetrieb eher als Übergangslösung oder reine Nischentechnologie.

Offene Fragen

Die Interviews machen deutlich, dass trotz intensiver Diskussionen eine Reihe von grundlegenden Fragen bislang unbeantwortet ist:

Wie und wann entstehen marktfähige H₂-GSE? Der Zeitpunkt, an dem Hersteller serienreife Fahrzeuge in relevanten Stückzahlen anbieten, bleibt unklar. Eng damit verbunden ist die Frage, welche Akteure den initialen Markthochlauf tragen sollen.

Welche Standards gelten künftig für LH₂ am Flughafen? Insbesondere für Betankungsprozesse, Sicherheitszonen, Haftung und Versicherbarkeit besteht erheblicher Klärungsbedarf auf europäischer Ebene.

Welche Förderlogiken sind für Flughäfen geeignet? Unklar ist, wie Förderinstrumente gestaltet sein müssen, um sowohl Investitions- als auch Betriebskosten abzudecken und gleichzeitig unterschiedliche Flughafentypen zu berücksichtigen.

Welche Rolle sollen Flughäfen langfristig im Energiesystem einnehmen? Die Interviews zeigen unterschiedliche Zukunftsbilder: vom reinen Nutzer bis zum regionalen Energie-Knotenpunkt. Welche dieser Rollen politisch und wirtschaftlich gewollt ist, bleibt offen.

Wie lässt sich Akzeptanz systematisch aufbauen? Neben Technik und Wirtschaft stellt sich die Frage, wie Sicherheitsverständnis, Nutzerakzeptanz und institutionelles Vertrauen in neue Energieträger nachhaltig gestärkt werden können.

Zusammenfassend zeigt sich, dass der Wasserstoffhochlauf an Flughäfen derzeit durch einen klaren fachlichen Konsens, aber zugleich durch strategische Unsicherheit und offene Governance-Fragen geprägt ist. Die identifizierten Dissense und offenen Fragen markieren zentrale Ansatzpunkte für weitere Pilotprojekte, politische Rahmensetzung und koordinierte Lernprozesse.

8. Konsolidierung und Bewertung

Kapitel 8 führt die Ergebnisse aus Meilenstein 2 (M2 – Desk Research) und Meilenstein 3 (M3 – qualitative Interviews) zusammen und bewertet sie im Hinblick auf Konsistenz, Umsetzbarkeit und strategische Relevanz. Ziel ist es, die Erkenntnisse nicht nur zu bündeln, sondern in eine handlungsorientierte Gesamtlogik zu überführen, die technische, wirtschaftliche, regulatorische und systemische Aspekte gleichermaßen berücksichtigt.

8.1. Triangulation M2 × M3: bestätigt, widerlegt, neu

Bestätigt (M2 ↔ M3)

Mehrere zentrale Annahmen aus dem Desk Research werden durch die Interviews klar bestätigt:

- Wasserstoff ist keine kurzfristige Standardlösung für Flughäfen, sondern eine ergänzende Technologie mit klar begrenzten Einsatzfeldern.
- Elektrifizierung dominiert den Bodenbetrieb und bleibt mittelfristig der Referenzpfad für GSE.
- Flüssiger Wasserstoff (LH₂) ist primär im Kontext zukünftiger Flugzeugkonzepte relevant und nicht für den heutigen Bodenbetrieb vorgesehen.
- Regionale Wasserstoffökosysteme gelten als zentrale Voraussetzung für wirtschaftliche Tragfähigkeit.
- Standardisierung und Regulierung werden in der Literatur als kritische Erfolgsfaktoren benannt und in der Praxis als entscheidender Engpass bestätigt.

Diese Übereinstimmungen zeigen, dass die strategischen Leitlinien aus M2 grundsätzlich realitätsnah sind, jedoch in der Umsetzung stark von lokalen und institutionellen Faktoren abhängen.

8.2. Widerlegt bzw. relativiert (M3 vs. M2)

Einige implizite Annahmen aus M2 werden durch die Interviews deutlich relativiert:

- Die Vorstellung, dass Infrastruktur der primäre Engpass sei, wird klar widerlegt. In der Praxis liegt der Engpass bei Fahrzeugen/Flugzeugen (OEMs) und nicht bei Tankstellen oder Energieanlagen.
- Die Annahme eines linear planbaren Hochlaufs erweist sich als nicht realistisch. Stattdessen zeigt sich ein fragmentierter, stark pfadabhängiger Entwicklungsverlauf.
- Die Erwartung, dass Flughäfen aktiv als Produzenten von Wasserstoff auftreten könnten, wird von den meisten Interviewpartnern klar zurückgewiesen.

Diese Abweichungen verdeutlichen eine Lücke zwischen strategischer Zielsetzung und operativer Realität.

Neu (primär aus M3)

Die Interviews liefern mehrere neue Erkenntnisse, die in M2 so nicht explizit adressiert wurden:

- Flughäfen sind keine homogene Gruppe, sondern lassen sich grob in unterschiedliche Typen mit jeweils eigenen Logiken einordnen.
- Kulturelle Faktoren (Risikowahrnehmung, Erfahrungswissen, institutionelle Routinen) beeinflussen Entscheidungen stärker als technische Argumente.
- Akzeptanz entsteht durch Demonstration, nicht durch Konzepte oder Business Cases allein.
- Haftung und Versicherbarkeit werden als eigenständige systemische Barriere sichtbar.
- GH₂ und LH₂ benötigen getrennte strategische Pfade, auch innerhalb eines einzelnen Standorts.

Diese neuen Befunde sind entscheidend für die Ableitung realistischer Umsetzungsstrategien, sowie von Handlungsoptionen.

8.3. Umsetzungs-Matrix: Technik × Wirtschaft × Regulierung × Ökosystem-Reife

Ob Wasserstoffinfrastruktur an einem Flughafen realisierbar ist, hängt nicht allein von der technischen Verfügbarkeit ab. Die Analyse kombiniert deshalb vier Bewertungsdimensionen – technische Reife, wirtschaftliche Tragfähigkeit, regulatorische Klarheit sowie die Reife des regionalen H₂-Ökosystems – zu einer integrierten Umsetzungs-Matrix. Erst das Zusammenspiel aller vier Dimensionen bestimmt den realistischen Umsetzungshorizont (vgl. Abbildung X).

Kurz- bis mittelfristig umsetzbar sind Vorhaben, bei denen alle Dimensionen hinreichend ausgereift sind: GH₂-Anwendungen für ausgewählte GSE wie Schwerlastfahrzeuge und Winterdienstgeräte, modulare Trailer-basierte Versorgungslösungen sowie Standorte mit bestehendem regionalem H₂-Ökosystem. Für diese Felder sind technische Referenzen vorhanden, erste wirtschaftliche Business Cases erkennbar und der regulatorische Rahmen eher erreichbar.

Mittelfristig realisierbar, aber von externen Bedingungen abhängig, sind die Skalierung des GH₂-GSE-Einsatzes bei gesicherter OEM-Verfügbarkeit, standortübergreifende Multi-User-Infrastrukturen für Flughafen, Logistik und ÖPNV, sowie Pilot- und Demonstrationsprojekte mit Fördercharakter. In diesen Feldern fehlen noch regulatorische Klarheit, stabile Nachfragesignale oder ein ausreichend entwickeltes lokales Ökosystem.

Langfristig und unter erheblichem Vorbehalt zu bewerten sind die flughafenseitige LH₂-Produktion, großskalige LH₂-Infrastruktur ohne gesicherte Abnahme sowie ein flughafenweiter H₂-Einsatz als Standardlösung. Die Kombination aus technischer Komplexität, ungeklärter Wirtschaftlichkeit und fehlender Ökosystemreife wirkt hier prohibitiv.

Entscheidend ist: Eine hohe technische Reife allein genügt nicht, und umgekehrt öffnet selbst ein klarer Regulierungsrahmen keine Tür, wenn der wirtschaftliche oder ökosystemische Unterbau fehlt.

8.4. Risiken, Abhängigkeiten und prioritäre Entwicklungspfade

Die Zusammenführung von M2 und M3 zeigt, dass der Hochlauf von Wasserstoff an Flughäfen vor allem an wenigen, aber strukturell wirksamen Unsicherheiten hängt. Das größte Risiko besteht darin, dass Infrastrukturentscheidungen zeitlich vor einem tatsächlich tragfähigen Markt getroffen werden. Dies betrifft insbesondere den Fall, dass Flughäfen in stationäre oder groß dimensionierte Lösungen investieren, bevor marktfähige Fahrzeuge, belastbare Nachfrage und ausreichend standardisierte Genehmigungsprozesse vorhanden sind. Hinzu kommen regulatorische Unsicherheiten, fehlende Harmonisierung sowie begrenzte praktische Erfahrung im Umgang mit Wasserstoff auf Seiten von Personal, Behörden und operativen Einheiten.

Diese Risiken sind eng mit externen Abhängigkeiten verknüpft. Von besonderer Bedeutung sind die Entwicklungszyklen der OEMs, da sowohl die Verfügbarkeit von H₂-GSE als auch die längerfristige Perspektive wasserstoffbetriebener Luftfahrzeuge außerhalb der direkten Steuerbarkeit von Flughäfen liegen. Ebenso prägend sind politische und regulatorische Rahmenbedingungen, etwa bei Förderung, Standardisierung und Genehmigungslogik. Eine weitere wesentliche Abhängigkeit besteht in der regionalen Wasserstoffverfügbarkeit und der Frage, ob Flughäfen in tragfähige Versorgungs- und Nachfragestrukturen eingebettet werden können. Ohne externe Nutzergruppen wie Logistik, ÖPNV oder Industrie bleibt die wirtschaftliche Basis vieler Vorhaben schwach.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich einige robuste Ansatzpunkte für die frühe Umsetzungsphase. Besonders sinnvoll erscheinen kleine, klar abgegrenzte GH₂-Pilotprojekte, die auf betriebliche Lernprozesse und nicht auf sofortige Skalierung ausgerichtet sind. Ebenso vorteilhaft sind mobile und reversible Infrastrukturlösungen, da sie Investitionsrisiken begrenzen und spätere Anpassungen ermöglichen. Die frühzeitige Einbindung von Genehmigungsbehörden, Feuerwehr und operativem Personal kann helfen, Unsicherheiten im Sicherheits- und Betriebsregime abzubauen. Schließlich bietet die Anbindung an bestehende regionale H₂-Initiativen einen pragmatischen Weg, um erste Anwendungen in einen größeren systemischen Zusammenhang einzubetten.

Insgesamt wird deutlich, dass Wasserstoff an Flughäfen kein isoliertes Infrastrukturthema ist, sondern ein systemisches Transformationsprojekt. Der Erfolg hängt daher weniger von einzelnen Technologiesprüngen als von Koordination, Standardisierung, realistischen Zeitpfaden und institutionellem Lernen ab. Flughäfen können diesen Prozess nicht allein steuern, übernehmen jedoch eine zentrale Rolle als Ermöglicher, Integrierten und Plattformen im regionalen und europäischen Kontext.

Vor diesem Hintergrund lässt sich der mögliche Hochlauf von Wasserstoff an Flughäfen auch zeitlich strukturieren. Die Auswertung der Interviews (M3) und der systemischen Analyse (M2) zeigt, dass sich Prioritäten und Handlungsspielräume im Zeitverlauf deutlich verschieben. Während frühe Phasen vor allem durch Pilotprojekte, organisatorisches Lernen und erste Infrastrukturvorbereitungen geprägt sind, gewinnen mit zunehmender Marktreife Fragen der Skalierung, Standardisierung und Integration in regionale Energiesysteme an Bedeutung.

Auf Basis von M2 und M3 lassen sich daher drei zeitlich gestaffelte Entwicklungsphasen, die sich in Priorität, Infrastrukturlogik und Reifegrad grundlegend unterscheiden (vgl. Abbildung 27):



Abbildung 27 Zeitlich gestaffelte Entwicklungspfade des Wasserstoffhochlaufs an Flughäfen

Phase I (bis ~2030): Lernen und Einstieg. Im Vordergrund stehen selektive GH₂-Pilotanwendungen im Bodenbetrieb – insbesondere für Schwerfahrzeuge und Winterdienst-GSE – sowie mobile, Trailer-basierte Versorgungslösungen. Investitionen haben hier primär Lern- und Vorbereitungscharakter: Betriebserfahrungen werden gesammelt, Genehmigungsverfahren erprobt und institutionelle Kapazitäten aufgebaut. Standorte mit bestehendem regionalem H₂-Ökosystem sind bevorzugte Pilotstandorte.

Phase II (2030–2035): Skalieren und Demonstrieren. Mit zunehmender OEM-Verfügbarkeit und klareren regulatorischen Rahmenbedingungen können erste GH₂-GSE-Anwendungen ausgeweitet werden. Multi-User-Infrastrukturen, die Flughafen, Logistik und ÖPNV koppeln, werden wirtschaftlich tragfähiger. Demonstrationsprojekte mit Fördercharakter konsolidieren Lerneffekte und bereiten den Rollout vor. Gleichzeitig beginnt die konzeptionelle Vorbereitung auf LH₂-Anforderungen für den zukünftigen Flugzeugbetrieb.

Phase III (2035–2045): Integrieren und Transformieren. Mit dem erwarteten Markteintritt wasserstoffbetriebener Kurzstreckenflugzeuge (GH₂) gewinnen luftseitige Infrastrukturen an Relevanz. LH₂ rückt als Vorbereitungsthema stärker in den Fokus größerer Flughäfen. Regionale H₂-Drehscheiben entstehen dort, wo Ökosystem-Reife und Nachfrage konvergieren. Großskalige LH₂-Infrastruktur bleibt an eine gesicherte Abnahme gebunden. Die Staffelung macht deutlich: Nicht jede Phase baut zwangsläufig auf der vorherigen auf – vielmehr laufen Pfade für GH₂ und LH₂ zeitweise parallel, bei unterschiedlichen Anwendungsprofilen und Standorttypen.

9. Handlungsoptionen

9.1. Leitprinzipien & Designkriterien

Aus der Analyse der technischen, ökonomischen und institutionellen Rahmenbedingungen lassen sich drei übergreifende Leitprinzipien ableiten, die als Designkriterien für zukünftige Maßnahmen und Infrastrukturentscheidungen dienen können. Sie sollen sicherstellen, dass Investitionen in Wasserstofflösungen robust gegenüber Unsicherheiten bleiben und sowohl technische als auch wirtschaftliche Skalierung ermöglichen.

Sicherheit

Sicherheit stellt die zentrale Voraussetzung für den Einsatz von Wasserstoff im Flughafenbetrieb dar. Gleichzeitig darf der Aufbau neuer Anwendungen nicht durch fehlende oder uneinheitliche Standards blockiert werden. Ein sinnvoller Ansatz besteht darin, Sicherheit als lernendes System zu verstehen, bei dem praktische Erfahrungen aus Demonstrationsprojekten schrittweise in standardisierte Verfahren überführt werden. Insbesondere für GH₂-GSE sowie mobile Betankungssysteme sollten frühzeitig übertragbare Sicherheitskonzepte entwickelt und zwischen Flughäfen, Behörden und Herstellern abgestimmt werden.

Kopplungsfähigkeit

Wasserstoffinfrastruktur am Flughafen sollte von Beginn an so konzipiert werden, dass sie mehrere Nutzergruppen integrieren kann. Eine isolierte Nutzung ausschließlich durch den Flughafenbetrieb führt häufig zu geringen Auslastungen und erschwert wirtschaftliche Skalierung. Die Einbindung von Logistik, ÖPNV, Industrie oder kommunalen Flotten ermöglicht dagegen stabilere Nachfragestrukturen und erhöht die Wirtschaftlichkeit. Ziel ist daher die konsequente Vermeidung von Insellösungen zugunsten regional integrierter Energiesysteme.

Skalierbarkeit

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich Nachfrageentwicklung und Technologiepfaden sollten Infrastrukturentscheidungen möglichst modular und erweiterbar gestaltet werden. Ein schrittweiser Einstieg über Pilot- und Demonstrationsprojekte ermöglicht praktische Lernprozesse, ohne frühzeitig auf bestimmte Endausbaustufen festgelegt zu sein. Mobile oder reversible Infrastrukturlösungen, etwa Trailer-, Container- oder mobile Betankungssysteme, können dabei helfen, Investitionsrisiken zu reduzieren und gleichzeitig zukünftige Skalierung zu ermöglichen.

9.2. Optionen je Akteursgruppe

Die erfolgreiche Einführung von Wasserstoff im Flughafenbetrieb hängt wesentlich von der Koordination verschiedener Akteursgruppen ab. Die Interviews zeigen, dass weniger die Anzahl der beteiligten Akteure als vielmehr die Klarheit ihrer Rollen und Verantwortlichkeiten über die Umsetzbarkeit entscheidet. Aus der Analyse lassen sich für die zentralen Akteursgruppen folgende Handlungsoptionen ableiten.

Bund / Fördergeber

Die öffentliche Hand spielt eine zentrale Rolle bei der Reduktion von Frühphasenrisiken. Förderprogramme sollten daher stärker auf die Marktreife wasserstoffbasierter Anwendungen ausgerichtet werden, insbesondere durch Unterstützung von OEM-Entwicklungen im Bereich H₂-GSE und relevanter Schnittstellen. Ergänzend können marktnahe Instrumente wie Abnahmegarantien oder OPEX-orientierte Fördermodelle dazu beitragen, die Investitionsbereitschaft früher Anwender zu erhöhen. Gleichzeitig erscheint eine stärkere Differenzierung der Förderinstrumente nach Flughafenstyp sinnvoll, da sich Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten zwischen großen TEN-V-Flughäfen und regionalen Innovationsstandorten deutlich unterscheiden.

Förderstrategien sollten zudem stärker mit europäischen Programmen (z. B. AFIF, CEF, Horizon Europe) verzahnt werden. Ergänzend können regulatorische Instrumente wie RFNBO-Zertifikate zusätzliche wirtschaftliche Anreize schaffen und insbesondere nicht-straßengebundene Anwendungen im Flughafenkontext stärken.

Flughäfen

Flughäfen übernehmen im Wasserstoffsystem vor allem die Rolle eines Ermöglichers und Integrators. Zu ihren zentralen Aufgaben gehören die frühzeitige Berücksichtigung wasserstoffbezogener Infrastruktur in der Masterplanung sowie die Bereitstellung geeigneter Flächen und Prozessschnittstellen. Strategisch empfiehlt sich eine parallele Betrachtung zweier Entwicklungspfade: eines kurzfristig orientierten Pfades für selektive GH₂-Anwendungen im Bodenbetrieb sowie eines langfristigen Planungspfad für mögliche LH₂-Infrastrukturen im zukünftigen Flugbetrieb. Gleichzeitig sollten Flughäfen aktiv regionale Partnerschaften mit Energieversorgern, Logistikakteuren und Kommunen entwickeln, um Multi-Use-Strukturen zu ermöglichen.

Darüber hinaus sollten Flughäfen den Energie- und Emissionspfad aktiv gestalten, indem sie den schrittweisen Übergang von fossilen Antrieben zu batterie- und wasserstoffbasierten Lösungen im Bodenbetrieb vorantreiben. Pilotprojekte, etwa für Vorfeldfahrzeuge oder logistiknahe Anwendungen, können hierbei als Einstieg dienen. Gleichzeitig sollten infrastrukturelle Voraussetzungen für zukünftige Anwendungen im Flugbetrieb frühzeitig planerisch berücksichtigt werden.

Bodenabfertiger

Als zentrale Nutzergruppe der Infrastruktur kommt Bodenabfertigern eine wichtige Rolle bei der praktischen Erprobung wasserstoffbasierter Anwendungen zu. Ihre Beteiligung an Pilotprojekten ermöglicht realitätsnahe Einsatzprofile für H₂-GSE und liefert wichtige Rückkopplungen an Hersteller und Infrastrukturbetreiber. Gleichzeitig zeigt die Analyse, dass Akzeptanz und Betriebssicherheit wesentlich von der frühzeitigen Einbindung des operativen Personals abhängen. Schulung, praktische Erfahrung und transparente Sicherheitskonzepte sind daher zentrale Voraussetzungen für eine erfolgreiche Einführung.

Energie- und Netzakteure

Energieversorger und Infrastrukturbetreiber sind zentrale Partner beim Aufbau der Versorgungsstruktur. In frühen Phasen können modulare GH₂-Lösungen, etwa Trailer- oder Containerkonzepte, flexible Einstiegsmöglichkeiten bieten und Investitionsrisiken reduzieren. Mittel- bis langfristig

gewinnt die Integration von Flughäfen in regionale Energie- und Wasserstoffnetze an Bedeutung. Darüber hinaus können Energieakteure eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Multi-Use-Geschäftsmodellen übernehmen, die unterschiedliche Nutzergruppen zusammenführen und so die Auslastung der Infrastruktur verbessern.

Neben der Bereitstellung von Infrastruktur kommt Energieakteuren auch eine wichtige Rolle bei der Entwicklung standortnaher Produktions- und Speicherlösungen zu. Dezentrale Versorgungsansätze können insbesondere in frühen Phasen flexible und wirtschaftlich tragfähige Einstiegswege ermöglichen.

Behörden und Verbände

Regulatorische Klarheit und institutionelle Lernprozesse sind zentrale Voraussetzungen für den Hochlauf von Wasserstoffanwendungen. Behörden und Fachverbände können hierzu beitragen, indem sie harmonisierte Genehmigungsleitfäden für wasserstoffbezogene Infrastruktur entwickeln und Fachkompetenzen bei Genehmigungsstellen sowie Feuerwehren gezielt aufbauen. Gleichzeitig spielen sie eine wichtige Rolle beim Austausch von Erfahrungen und Best Practices sowie bei der Weiterentwicklung technischer Standards auf nationaler und europäischer Ebene.

Gleichzeitig sollten Genehmigungsprozesse weiter beschleunigt und stärker standardisiert werden, um Projektlaufzeiten zu reduzieren. Eine enge Einbindung relevanter Stakeholder, einschließlich Umweltbehörden und lokaler Akteure, kann dabei helfen, Planungs- und Umsetzungsrisiken frühzeitig zu adressieren.

Querschnittliche Erfolgsfaktoren

Einige Handlungsfelder betreffen mehrere Akteursgruppen gleichzeitig. Dazu zählen insbesondere die Einbindung in TEN-V-Korridore, der Aufbau stabiler Lieferketten sowie ein vorausschauendes Risiko- und Kostenmanagement. Die Berücksichtigung von CO₂-Preis- und ETS-Entwicklungen, langfristige Lieferverträge für grünen Wasserstoff sowie realistische Zeit- und Budgetplanung sind dabei zentrale Voraussetzungen für eine wirtschaftlich tragfähige Umsetzung.

No-Regret-Maßnahmen – robuste Schritte unabhängig vom Markttiming

Unabhängig vom konkreten Zeitpunkt eines großskaligen Wasserstoffhochlaufs lassen sich mehrere Maßnahmen identifizieren, die für Flughäfen und ihre Partner als besonders robust gelten. Diese sogenannten „No-Regret-Moves“ verbessern die Vorbereitung auf mögliche Wasserstoffanwendungen, ohne hohe Investitionsrisiken zu erzeugen oder frühzeitig auf bestimmte Technologiepfade festgelegt zu sein.

1. H₂-ready Masterplanung ohne Vorfestlegung

Flughäfen sollten bereits in ihren langfristigen Entwicklungsplänen mögliche Flächenkorridore, Zugänge und Sicherheitszonen für zukünftige Wasserstoffinfrastruktur berücksichtigen. Dabei empfiehlt sich eine getrennte Betrachtung eines kurzfristigen GH₂-Einstiegs im Bodenbetrieb und einer langfristigen Option für LH₂-Infrastruktur im Flugbetrieb, ohne frühzeitig konkrete Ausbauentscheidungen zu treffen.

2. Aufbau einer belastbaren Datenbasis

Realistische Planungen für Infrastruktur und Fahrzeugflotten erfordern verlässliche Daten über Betriebsprofile und Energiebedarf. Dazu zählen insbesondere Einsatzzeiten, Standzeiten, Wegeprofile und saisonale Spitzen von GSE sowie landseitigen Fahrzeugflotten. Diese Daten bilden die Grundlage für spätere Entscheidungen zur Dimensionierung von Energie- und Betankungsinfrastruktur.

3. Stärkung von Genehmigungs- und Sicherheitskompetenz

Frühe Abstimmungen mit Genehmigungsbehörden, Feuerwehr und Sicherheitsorganisationen können spätere Projektverzögerungen deutlich reduzieren. Dazu gehören gemeinsame Übungen, Qualifizierungsmaßnahmen sowie die Entwicklung übertragbarer Sicherheitskonzepte für typische Anwendungen wie GH₂-Betankung oder mobile Infrastruktur.

4. Aufbau regionaler Partnerschaften

Die Einbindung von Flughäfen in regionale Wasserstoff-Ökosysteme erhöht die Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich tragfähiger Lösungen. Kooperationen mit Logistikunternehmen, ÖPNV-Betreibern, Industrie oder Energieversorgern können zusätzliche Nachfrage erzeugen und so die Auslastung gemeinsamer Infrastruktur verbessern.

5. Demonstrationsprojekte als Lerninstrument

Kleine, klar abgegrenzte Pilotprojekte ermöglichen praktische Erfahrungen im Betrieb wasserstoffbasierter Anwendungen. Ihr Ziel sollte nicht primär schnelle Skalierung sein, sondern institutionelles Lernen, Akzeptanzaufbau und die Entwicklung übertragbarer Betriebs- und Sicherheitskonzepte.

9.3. Regionale Pilotpfade & Reallabore

Reallabore und regionale Pilotprojekte können eine wichtige Rolle beim Aufbau praktischer Erfahrung mit Wasserstoffanwendungen im Flughafenbetrieb spielen. Sie ermöglichen es, technische, organisatorische und regulatorische Fragen unter realen Betriebsbedingungen zu erproben und gleichzeitig Erkenntnisse für zukünftige Infrastrukturentscheidungen zu gewinnen.

Entscheidend für den Nutzen solcher Projekte ist jedoch, dass sie nicht nur als einzelne Demonstrationsvorhaben verstanden werden, sondern als strukturierte Lernformate mit klar definierten Governance- und Evaluationsmechanismen. Dazu gehören transparente Verantwortlichkeiten für Betrieb, Sicherheit und Datenauswertung sowie eine systematische Dokumentation von Kosten, Betriebsabläufen und Sicherheitsaspekten.

Ein weiterer zentraler Faktor ist die systematische Weitergabe der gewonnenen Erkenntnisse. Das Teilen von Daten zwischen Projektpartnern, Flughäfen und Behörden kann dazu beitragen, Doppelarbeit zu vermeiden und Standards schneller zu entwickeln. Reallabore sollten daher von Beginn an auf Übertragbarkeit ausgelegt sein und nicht ausschließlich standortspezifische Lösungen hervorbringen.

Besonders sinnvoll erscheinen regionale Pilotpfade, in denen mehrere Flughäfen sowie externe Nutzergruppen gemeinsam eingebunden werden. Solche Kooperationen können Skaleneffekte

erzeugen, Nachfrage bündeln und gleichzeitig die Integration von Flughäfen in regionale Wasserstoffökosysteme stärken.

9.4. KPI-Set & Monitoring

Ein einheitliches Monitoring ist eine wichtige Voraussetzung, um Wasserstoffprojekte an Flughäfen systematisch auszuwerten und zwischen verschiedenen Standorten vergleichbar zu machen. Da viele Anwendungen zunächst im Demonstrations- oder Pilotstadium stattfinden, können standardisierte Kennzahlen dazu beitragen, technische Leistungsfähigkeit, wirtschaftliche Tragfähigkeit und systemische Effekte besser zu bewerten.

Aus der Analyse von M2 und M3 lassen sich mehrere zentrale Beobachtungsdimensionen ableiten.

Technik und Betrieb

Kennzahlen in diesem Bereich erfassen die operative Leistungsfähigkeit der Infrastruktur. Dazu zählen insbesondere der jährliche Wasserstoffdurchsatz (t H₂/Jahr), die technische Verfügbarkeit der Anlagen, typische Betankungszeiten sowie Ausfallraten von Infrastruktur oder Fahrzeugen. Diese Daten ermöglichen Rückschlüsse auf Betriebssicherheit, Prozessintegration und Wartungsanforderungen.

Wirtschaftlichkeit

Für die ökonomische Bewertung sind insbesondere Gesamtkosten pro Kilogramm Wasserstoff (€/kg H₂), Investitions- und Betriebskosten einzelner Anwendungen sowie der Anteil öffentlicher Förderung relevant. Diese Kennzahlen helfen, die Wirtschaftlichkeit verschiedener Infrastrukturmodelle zu vergleichen und Skaleneffekte zu analysieren.

Umweltwirkungen

Ein weiterer zentraler Bewertungsbereich betrifft die Umweltwirkungen. Dazu zählen vor allem die jährliche CO₂-Reduktion sowie die Substitution fossiler Energieträger durch wasserstoffbasierte Anwendungen.

Systemintegration

Da viele wirtschaftliche Effekte erst durch sektorübergreifende Nutzung entstehen, sollten auch Kennzahlen zur Systemintegration berücksichtigt werden. Dazu gehören beispielsweise die Mitnutzungsquote externer Akteure, die Auslastung gemeinsamer Infrastruktur sowie die Anzahl gekoppelter Sektoren innerhalb eines regionalen Energiesystems.

Ein solches KPI-Set ermöglicht es, Pilotprojekte nicht nur technisch zu bewerten, sondern auch ihre wirtschaftliche und systemische Wirkung besser zu verstehen. Gleichzeitig kann ein standardisiertes Monitoring dazu beitragen, Erfahrungen zwischen Flughäfen zu vergleichen und zukünftige Infrastrukturentscheidungen auf eine breitere Datengrundlage zu stellen.

9.5. Roadmap: vom GSE-Einstieg zur regionalen H₂-Drehscheibe und Flugbetriebsintegration

Die Analyse der Interviews und Systemzusammenhänge zeigt, dass sich der Hochlauf von Wasserstoff an Flughäfen voraussichtlich schrittweise entwickeln wird. Anstelle eines schnellen, großskaligen Infrastrukturaufbaus deutet vieles auf einen gestuften Entwicklungspfad hin, der mit begrenzten Anwendungen beginnt und sich mit wachsender Nachfrage sowie zunehmender technischer Reife erweitert.

Ein realistischer Entwicklungspfad lässt sich in vier aufeinander aufbauende Schritte gliedern.

1. Selektiver Einstieg über GH₂-Anwendungen im Bodenbetrieb

In der frühen Phase konzentriert sich der Einsatz von Wasserstoff auf einzelne Anwendungen im Bodenbetrieb, insbesondere dort, wo batterieelektrische Lösungen an technische oder betriebliche Grenzen stoßen. Solche Anwendungen ermöglichen erste Betriebserfahrungen und schaffen Akzeptanz bei Personal und Behörden, ohne sofort umfangreiche Infrastrukturinvestitionen zu erfordern.

2. Aufbau von Multi-User-Infrastrukturen

Mit zunehmender Erfahrung und steigender Nachfrage können Infrastrukturkonzepte entstehen, die mehrere Nutzergruppen integrieren. Dazu zählen beispielsweise Flughafenbetrieb, ÖPNV, Logistik oder kommunale Flotten. Multi-Use-Strukturen erhöhen die Auslastung der Infrastruktur und verbessern damit die wirtschaftliche Tragfähigkeit wasserstoffbasierter Anwendungen.

3. Regionale Einbettung und Skalierung

Im weiteren Verlauf kann sich der Flughafen stärker in regionale Wasserstoffsysteme integrieren. Kooperationen mit Energieversorgern, Industrie oder Logistikclustern ermöglichen größere Versorgungsstrukturen und stabilere Nachfrageprofile. In dieser Phase entwickelt sich der Flughafen zunehmend zu einem Knotenpunkt innerhalb regionaler Energie- und Mobilitätssysteme.

4. Vorbereitung auf mögliche LH₂-basierte Luftfahrt

Langfristig kann Wasserstoff auch für den Flugbetrieb relevant werden. Sollte sich flüssigwasserstoffbasierte Luftfahrt technologisch und regulatorisch durchsetzen, werden größere Infrastrukturen erforderlich. Flughäfen können sich auf diese Entwicklung vorbereiten, indem sie entsprechende Flächen, Schnittstellen und Planungsoptionen frühzeitig berücksichtigen, ohne bereits in großskalige Anlagen investieren zu müssen.

In diesem Entwicklungspfad verändern sich Flughäfen schrittweise von einzelnen Nutzern wasserstoffbasierter Anwendungen zu integralen Bestandteilen regionaler Wasserstoffsysteme. Ihre Rolle liegt dabei weniger in der Produktion von Wasserstoff als in der Bereitstellung von Infrastruktur, Koordination von Akteuren und Integration verschiedener Nutzungsformen.

10. Schlussfolgerungen & Ausblick

10.1. Was ist gesichert, was bleibt zu klären?

Die vorliegende Studie zeigt, dass der Einsatz von Wasserstoff an deutschen Verkehrsflughäfen grundsätzlich technisch möglich, regulatorisch zulässig und politisch flankiert ist, zugleich jedoch durch hohe Unsicherheiten hinsichtlich Zeitpunktes, Umfang und wirtschaftlicher Tragfähigkeit geprägt bleibt. Für Flughäfen, Betreiber und politische Akteure stellt sich damit weniger die Frage, ob Wasserstoff perspektivisch eine Rolle spielt, sondern unter welchen Bedingungen, für welche Anwendungen und in welcher zeitlichen Sequenz ein sinnvoller Einsatz erfolgen kann.

Als gesichert gelten folgende Befunde:

- Wasserstoff stellt keinen generischen Ersatz für batterieelektrische Lösungen dar, sondern eine komplementäre Technologie für klar abgegrenzte Anwendungsfälle, insbesondere dort, wo batterieelektrische Systeme an technische, betriebliche oder saisonale Grenzen stoßen (z. B. Heavy-Duty-GSE, Winterdienst, Spezial- und Sicherheitsfahrzeuge).
- Die Unterscheidung zwischen GH_2 als kurz- bis mittelfristigem Einstiegsfad für bodenseitige Anwendungen und LH_2 als langfristige Vorbereitungspfad für mögliche flugzeugseitige Anwendungen ist fachlich belastbar und wird sowohl durch Literatur als auch durch die Interviews eindeutig gestützt.
- In frühen Marktphasen dominieren mobile, modulare und reversible Infrastrukturlösungen (Trailer, mobile Dispenser, Bowser). Diese gelten als No-Regret-Optionen, da sie Lernprozesse ermöglichen, Investitionsrisiken begrenzen und spätere Pfadentscheidungen offenhalten.
- Die wirtschaftliche Tragfähigkeit wasserstoffbasierter Infrastrukturen entsteht in der Regel nicht durch den Flughafenbetrieb allein, sondern durch die Einbettung in regionale Multi-Use-Ökosysteme (Logistik, ÖPNV, Industrie). Flughäfen fungieren dabei primär als Ermöglicher und Integratoren, nicht als alleinige Nachfrageanker.
- Der derzeit zentrale Engpass liegt nicht in der technischen Machbarkeit, sondern in der Verfügbarkeit seriennaher Fahrzeuge (OEM-Seite), in der fehlenden Standardisierung sowie in Unsicherheiten bezüglich Genehmigung, Haftung und Versicherbarkeit.
- Masterplanung erweist sich als entscheidender Hebel, allerdings weniger im Sinne einer Vorfestlegung auf großskalige H_2 -Infrastruktur, sondern als H_2 -Ready-Vorsorge, die Flächen, Korridore und Sicherheitszonen langfristig sichert.

Demgegenüber bleiben zentrale Aspekte offen bzw. klärungsbedürftig:

- Der konkrete Zeitpunkt und die Marktdurchdringung serienreifer wasserstoffbetriebener GSE sowie – deutlich langfristiger – wasserstoffbetriebener Luftfahrzeuge.
- Einheitliche, übertragbare Standards für Sicherheitszonen, Betankungsprozesse, Genehmigungslogiken und Rollenverteilungen, insbesondere im Airside-Kontext.

- Die wirtschaftliche und operative Einsetzbarkeit komplexerer LH₂-Systeme, insbesondere im Hinblick auf Boil-off-Management, Genehmigungsfähigkeit und Betriebskosten.
- Belastbare, standortspezifische Nachfrage- und Lastprofile, die eine fundierte Dimensionierung von Infrastruktur erlauben.
- Die tatsächliche Rolle von Pipeline- und Netzanschlüssen für Flughäfen, die mittelfristig stark von industriegetriebenen Ausbauprioritäten abhängt.

Insgesamt verdeutlicht die Studie, dass Wasserstoff am Flughafen weniger ein kurzfristiges Umsetzungsprojekt als ein strategischer Transformationspfad mit hoher Pfadabhängigkeit und externen Abhängigkeiten ist.

10.2. Empfehlungen für nachgelagerte Vertiefungen (Business-Cases, Machbarkeit, Standardisierung)

Aus den identifizierten Befunden ergeben sich klare Empfehlungen für vertiefende Arbeiten und Folgeuntersuchungen.

Business-Case-Vertiefungen

Zukünftige Analysen sollten sich weniger auf generische €/kg-Vergleiche konzentrieren, sondern auf **Szenario-basierte Wirtschaftlichkeitsbewertungen**, die Auslastung, Multi-Use-Nachfrage, Strompreisvolatilität, Logistikdistanzen und Betreiberrollen systematisch berücksichtigen. Besonders relevant sind:

- Multi-Use-Stationen (GSE + ÖPNV + Logistik),
- Hub-&-Spoke-Modelle mit externer Erzeugung,
- H₂-as-a-Service-Ansätze als Einstiegspfad,
- Joint-Venture-Modelle zur Risikoteilung.

Machbarkeits- und Umsetzungsstudien

Vertiefende Machbarkeitsanalysen sollten sich auf die letzte Meile am Flughafen konzentrieren: Flächenverfügbarkeit, Sicherheitszonierung, Verkehrsführung, Kompressor-Redundanz, RFFS-Integration sowie die praktische Einbindung in Vorfeld- und Betriebsprozesse. Dabei ist eine klare Differenzierung zwischen GH₂- und LH₂-Anwendungen erforderlich, um Überdimensionierung und Fehlplanungen zu vermeiden.

Standardisierung und Genehmigung

Ein zentraler Hebel für den Hochlauf liegt in der Entwicklung von standardisierten Musterlösungen:

- Muster-Safety-Cases für typische Anwendungsszenarien,
- standardisierte Genehmigungsleitfäden für GH₂-Infrastruktur am Flughafen,

- klare Rollen- und Haftungsmatrizen zwischen Flughafen, Betreiber und Nutzer. Eine europäische Harmonisierung würde nicht nur Genehmigungszeiten verkürzen, sondern auch Investitionsrisiken signifikant reduzieren.

10.3. Hinweise zur Umsetzung & nächsten Schritten

Für die praktische Umsetzung ergeben sich aus der Studie konkrete Handlungsorientierungen:

1. **No-Regret-Maßnahmen priorisieren**

Flughäfen sollten frühzeitig Flächen, Korridore und Sicherheitszonen sichern, Governance-Strukturen aufbauen, relevante Partner identifizieren und belastbare Betriebsdaten (insbesondere zu GSE-Lastprofilen) erheben – unabhängig davon, ob eine konkrete Investitionsentscheidung unmittelbar ansteht.

2. **Modular und lernorientiert einsteigen**

Pilot- und Demonstrationsprojekte mit mobilen GH₂-Lösungen ermöglichen Lernen, Akzeptanzbildung und institutionelle Erfahrung, ohne irreversible Investitionen zu erfordern. Diese Lernprozesse sind selbst ein wesentlicher Mehrwert der frühen Phase.

3. **Regionale Kooperationen aktiv gestalten**

Wirtschaftlich tragfähige Lösungen entstehen dort, wo Flughäfen frühzeitig mit Logistik, ÖPNV, Industrie und Energieversorgern kooperieren. Der Flughafen sollte dabei als Plattform und Koordinator agieren, nicht als alleiniger Infrastrukturträger.

4. **Roadmaps als Pfadlogik verstehen**

Roadmaps sollten keine festen Zeitpläne abbilden, sondern **Entscheidungspunkte**, die an externe Trigger (OEM-Verfügbarkeit, regulatorische Klarheit, regionale Wasserstoffverfügbarkeit) gekoppelt sind. Flexibilität ist dabei ein zentraler Erfolgsfaktor.

5. **Politische Flankierung gezielt nutzen**

Förderinstrumente sollten vor allem frühe CAPEX-Risiken abfedern, modulare Multi-Use-Infrastrukturen adressieren und durch Standardisierung sowie Genehmigungsleitlinien ergänzt werden. Planungssicherheit wirkt dabei stärker als kurzfristige Preisreduktion.

Gesamtfazit

Wasserstoff wird an deutschen Verkehrsflughäfen weder kurzfristig flächendeckend noch isoliert vom regionalen Umfeld zum Einsatz kommen. Seine Relevanz liegt vielmehr in selektiven Anwendungen, regional eingebetteten Systemen und einer schrittweisen, lernorientierten Transformation. Flughäfen, die Wasserstoff heute nicht als Endzustand, sondern als strategische Option mit klaren Einstiegspfaden verstehen, schaffen sich Handlungsspielräume für Dekarbonisierung, Resilienz und zukünftige Luftfahrtkonzepte – ohne sich frühzeitig auf unsichere Technologien oder Zeitpläne festzulegen.

Literaturverzeichnis

ACI. (2025). Zero emission aviation alliance WG 03 aerodromes. ACI Europe. <https://www.aci-europe.org/downloads/resources/AZEA%20Airports%20Infrastructure%20Factsheets%20Tool.pdf>

ACI Europe. (2025). *EU STIP – An important step forward but significant gaps remain* [Pressemitteilung]. ACI Europe. <https://www.aci-europe.org/downloads/content/25-11-05%20EU%20STIP%20An%20important%20step%20forward%20but%20significant%20gaps%20remain%20PRESS%20RELEASE.pdf>

Aerospace Technology Institute & Airports Council International. (2021). *Hydrogen in aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics and climate impact by 2050*. ATI. <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2021/08/aci-ati-hydrogen-report-1.pdf>

ALBATROSS Holding GmbH. (2025). *ALBATROSS gründet Deutschlands erstes koordiniertes Flughafenetzwerk für elektrische regionale Luftmobilität*. ALBATROSS Holding GmbH. <https://albatross-holding.com/de/2025/12/albatross-grundet-deutschlands-erstes-koordiniertes-flughafen-netzwerk-fur-elektrische-regionale-luftmobilitat/>

Alsulaiman, A. (2024). *Navigating turbulence: Hydrogen's role in the decarbonization of the aviation sector*. EconStor. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/296647/1/1878009729.pdf>

Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. (2023). Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001 [u. a.]. *Amtsblatt der Europäischen Union*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302413

Arup. (2023). *Hydrogen in aviation*. Arup. <https://www.arup.com/globalassets/downloads/insights/hydrogen-in-aviation.pdf>

BDL. (2024). Stellungnahme "Konzepte für einen nachhaltig resilienten kundenfreundlichen Flugreiseverkehr". <https://www.bundestag.de/re-source/blob/992840/0a231e949a7752580819f41fa5c12aee/Stellungnahme-Matthi...>

bayernets GmbH. (o. J.). HyPipe Bavaria – The Hydrogen Hub. <https://www.hypipe-bavaria.com/>

bayernets GmbH. (o. J.). Hydrogen networks in Bavaria. <https://www.bayernets.de/infrastruktur/wasserstoff/h2-netze>

Bundesnetzagentur. (2024). Festlegung zur Entgeltmethodik im Wasserstoff-Kernnetz (WANDA). https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2024/GBK-24-01-2x1_WANDA/Downloads/Wanda_Festlegung.pdf

Bundesnetzagentur (2025). Festlegungsverfahren in Sachen Wasserstoff Kapazitäten Grundmodell und Abwicklung des Netzzugangs. BK7-24-01-015

Verfahren der Beschlusskammer 7 https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK7-GZ/2024/BK7-24-0015/BK7-24-01-0015_Beschluss_Internet.html?nn=1041680

Blakseth, S. S., Aasen, A., Massing, A., & Neksa, P. (2024). *Local area cooling versus broad area cooling for boil-off reduction in large-scale liquid hydrogen storage tanks* [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2412.11720>

Braun, M., & Classen, A. B. (2023). Qualitative risk assessment for future hydrogen-enabled airports. *Transportation Research Procedia*, 72, pp. 86-95. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523012541>

Bundesministerium der Justiz. (o. J.). § 28q Wasserstoff-Kernnetz (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG). https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/__28q.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2026). *Carbon Contracts for Difference*. BMWK. <https://www.klimaschutzvertraege.info/en/home>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. J.). *IPCEI Wasserstoff: Gemeinsam einen Europäischen Wasserstoffmarkt schaffen*. BMWK. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/ipcei-wasserstoff.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2025). *Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende*. BMWK. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2022). *Klimaneutrale Luftfahrt: Gemeinsames Papier der Bundesregierung*. BMWK. https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/037-klimaneutrale-luftfahrt.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2023). *Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023*. BMWK. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2025). *Weißbuch Wasserstoffspeicher*. BMWK. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/weissbuch-wasserstoffspeicher-2025.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Bundesnetzagentur. (2024). *Genehmigung eines Wasserstoff-Kernnetzes*. Bundesnetzagentur. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/DL/Genehmigung.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Bundesnetzagentur. (2025). *Festlegung in Sachen Wasserstoff-Ausgleichs- und Bilanzierungsgrundmodell* [Beschluss BK7-24-0014]. Bundesnetzagentur. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK7-GZ/2024/BK7-24-0014/Anlagen/BK7-24-01-0014_Beschluss_Download_BF.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Bundesnetzagentur. (2026). *Wasserstoff-Kernnetz*. Bundesnetzagentur. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/Kernnetz/start.html>

Bundestag. (2026). *Bundestag beschließt das Wasserstoff-Beschleunigungsgesetz*. Deutscher Bundestag. <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2026/kw09-de-wasserstoffhochlauf-1149758>

Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235). (2024). <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>

Catapult. (2023). *Zero emission flight infrastructure: Hydrogen infrastructure options for airports.* Catapult. <https://cp-catapult.s3.amazonaws.com/uploads/2023/03/Zero-Emission-Flight-Infrastructure-%E2%80%93-Hydrogen-Infrastructure-Options-for-Airports.pdf>

Deutsche Energie-Agentur (dena). (2022). *Wie gelingt der Aufbau der Wasserstoff-Netzinfrastuktur in Deutschland und Europa?* dena. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/Analyse_Wie_gelingt_der_Ausbau_der_Wasserstoff-Netzinfrastuktur.pdf

Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DGLR). (2025). *Turnaround simulation and assessment of future hydrogen aircraft concepts.* DGLR. [https://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1\[document_id\]=650138](https://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1[document_id]=650138)

Deutscher Bundestag. (2025). *Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung der Verfügbarkeit von Wasserstoff und zur Änderung weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen* [Drucksache 21/2506]. Deutscher Bundestag. <https://dserver.bundestag.de/btd/21/025/2102506.pdf>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (2024). *Die Rolle von H₂ im deutschen Energiesystem unter besonderer Beachtung des Verkehrssektors.* DLR. <https://elib.dlr.de/215869/1/SYST%C3%96K%20B8%20PolBrief%20H2%20im%20Verkehrssystem%2012-2024.pdf>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (2025). *Sustainable Aviation Fuels (SAF) als Option zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs.* DLR. <https://elib.dlr.de/215867/1/SYST%C3%96K%20B6%20PolBrief%20SAF%20im%20Luftverkehr%202025-05.pdf>

Deutscher Industrie- und Handelskammertag (DIHK). (2020). *Wasserstoff: Faktenpapier.* <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/energie-dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf>

Diverse Sprecher. (2025, September 14). *3rd Hydrogen Airport Conference.* ACI Europe.

Dubec, C., & Milinship, A. (2024). *Powering aviation: When should airports embrace hydrogen?* WTW. <https://www.wtwco.com/en-hk/insights/2024/12/powering-aviation-when-should-airports-embrace-hydrogen>

Deutscher Wasserstoff-Verband (DWV). (2026, 27. Februar). *Stellungnahme zu den Orientierungseckpunkten Speichernetzgelte der Bundesnetzagentur.* <https://dwv-info.de/wp-content/uploads/2026/03/20260227-Stn-DWV-Speichernetzgelte-Elektrolyse.pdf>

DHL Group. (o. J.). *Our sustainability approach: The decisions we make today can make a positive impact on our tomorrow.* <https://group.dhl.com/en/sustainability/sustainability-approach.html>

ENTEKA AG. (o. J.). *Wasserstoff-Regionalnetz Rhein-Main (Karte).* https://www.entega.ag/fileadmin/Pressemeldungen/Karte_Wasserstoff-Regionalnetz_Rh2ein-Main_Connect.jpg

Europäische Kommission. (2024). *Hydrogen*. European Commission. https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen_en

Europäische Kommission. (o. J.). *Reducing emissions from aviation: Aviation in the EU Emissions Trading System*. European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en

Europäischer Rat. (o. J.). *Fit für 55*. Rat der Europäischen Union. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/fit-for-55/>

Europäisches Parlament. (2019). *CO₂-Emissionen des Luft- und Schiffsverkehrs: Zahlen und Fakten* [Infografik]. Europäisches Parlament. https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/12/story/20191129STO67756/20191129STO67756_de.pdf

European Hydrogen Observatory. (2024). *The European hydrogen market landscape*. Clean Hydrogen Partnership. https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2024-11/The%20European%20hydrogen%20market%20landscape_November%202024.pdf

Eschmann, J., Jochem, P., Winter, M., Lang, D., Knitschky, G., Jäkel, K., Lütjens, K., & Hasselwander, S. (2024). *Die Rolle von H₂ im deutschen Energiesystem unter besonderer Beachtung des Verkehrssektors* (SYSTÖK Policy Brief). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). <https://elib.dlr.de/215869/1/SYST%C3%96K%20B8%20PolBrief%20H2%20im%20Verkehrssystem%2012-2024.pdf>

Exeter Airport. (2025). *UK's first hydrogen-powered live aircraft turnaround takes place at Exeter Airport*. Exeter Airport. <https://exeter-airport.co.uk/uks-first-hydrogen-powered-live-aircraft-turnaround-takes-place-at-exeter-airport/>

Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V. (FNBGas). (2024a, Juli 22). *Anlage 6 – Gemeinsamer Antrag für das Wasserstoff-Kernnetz: Maßnahmenkarte*. Bundesnetzagentur. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/DL/Antrag_FNB_Anlage6.pdf?blob=publicationFile&v=1

Fernleitungsnetzbetreiber Gas e. V. (FNBGas). (2024b, Juli 22). *Gemeinsamer Antrag für das Wasserstoff-Kernnetz*. Bundesnetzagentur. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/DL/Antrag_FNB.pdf?blob=publicationFile&v=3

Financial Times. (2023). *Airbus pushes back plans to fly hydrogen plane by 2035*. Financial Times. <https://www.ft.com/content/12490140-dd6d-4191-9495-a0dadb68874c>

Fleiter, T., Fragoso, J., Lux, B., Alibaş, Ş., Al-Dabbas, K., Manz, P., Neuner, F., Weißenburger, B., Rehfeldt, M., & Sensfuß, F. (2025). *Hydrogen infrastructure in the future CO₂-neutral European energy system—How does the demand for hydrogen affect the need for infrastructure?* *Energy Technology*, 13(2), Article 2300981. <https://doi.org/10.1002/ente.202300981>

Flughafen München GmbH. (o. J.). *Climate-friendly propulsion technologies: Hydrogen*. <https://www.munich-airport.de/international/climate-friendly-propulsion>

Franke, F., & Kazula, S. (2025). *Conceptual design of a metal hydride system for the recovery of gaseous hydrogen boil-off losses from LH₂ tanks*. *The Aeronautical Journal*, [2026;130(1343):1-15.

doi:10.1017/aer.2025.10087. <https://www.cambridge.org/core/journals/aeronautical-journal/article/conceptual-design-of-a-metal-hydride-system-for-the-recovery-of-gaseous-hydrogen-boiloff-losses-from-lh2-tanks/0E625596B5B1DFF3F0F82F9DE4FAD1D1>

Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Innovation. (2024). Produktions- und seeseitige Importkapazitäten von grünem Wasserstoff in der Freien und Hansestadt Hamburg: Abschlussbericht. <https://suche.transparenz.hamburg.de/dataset/produktions-und-seeseitige-importkapazitaeten-von-gruenem-wasserstoff-in-der-freien-und-hansest>

Gascade Fernnetzbetreiber Gas. (2025). Kapazitätsreservierungen für den Wasserstofftransport im Kernnetz. Gascade. <https://wasserstoffwirtschaft.sh/de/kapazitaetsreservierung-2026>

Bundesnetzagentur. (2024). Festlegung zu Bestimmungen zur Bildung der für den Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz zu erhebenden Netzentgelte und zur Einrichtung eines Amortisationsmechanismus (WANDA) (Az. GBK-24-01-2#1). https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2024/GBK-24-01-2x1_WANDA/Downloads/Wanda_Festlegung.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesnetzagentur. (2024). [Festlegung von Bestimmungen zur Abbildung der Kosten bestimmter Transportleistungen des Wasserstoffkernnetzes und zur entsprechenden Modifikation der Netzentgelte (KOSMO)] [Beschluss GBK-24-01-2#2]. Bundesnetzagentur. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2024/GBK-24-01-2x2_KOSMO/Downloads/Festlegung_DL.pdf?__blob=publicationFile&v=4

FNB Gas. (o. J.). Rechtlicher Rahmen für den Wasserstofftransport: Netzentgelte. <https://fnb-gas.de/wasserstofftransport/rechtsrahmen/>

Geldhauser. (o. J.). Projekt Wasserstoff: Eine Chronik unserer nachhaltigen Reise. Geldhauser. <https://geldhauser.de/article/wasserstoff-busse>

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge [BImSchG] i. d. F. der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), zuletzt geändert durch ... (2025). <https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/>

Groningen Airport Eelde. (2025). Feasibility study into hydrogen infrastructure at Groningen Airport Eelde completed. Groningen Airport Eelde. <https://www.groningenairport.nl/en/news-media/news/feasibility-study-into-hydrogen-infrastructure-at-groningen-airporteelde-completed>

Gu, Y., Wiedemann, M., Ryley, T., Johnson, M. E., & Evans, M. J. (2023). Hydrogen-powered aircraft at airports: A review of the infrastructure requirements and planning challenges. *Sustainability*, 15(21), Article 15539. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/21/15539>

H₂Giga – Technologieplattform Elektrolyse (TPE). (2025). Leitfaden zur Genehmigung von Elektrolyseanlagen in Deutschland. Wasserstoff-Leitprojekte. https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/b7f31632-fd9c-11ef-a8e4-a0369fe1b534/live/document/H2Giga_Genehmigungsleitfaden.pdf

- Hoelzen, J., Silberhorn, D., Zill, T., Bensmann, B., & Hauke-Rauschenbach, R. (2021).** Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure—Review and research gaps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(5), 3108-3130. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921043184>
- HY2B. (2025).** Hy2B liefert erstmals 100 % RFNBO-grünen Wasserstoff für Linienbusse im Landkreis Ebersberg. HY2B. <https://hy2b.de/hy2b-liefert-erstmals-100-rfnbo-gruenen-wasserstoff-fuer-linienbusse-im-landkreis-ebersberg/>
- Hydrogen Europe. (2024).** *Hydrogen infrastructure: The recipe for a hydrogen grid plan*. Hydrogen Europe. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/10/2024.10_HE_Hydrogen-Infrastructure-Report.pdf
- Hyneat. (2025).** *Green hydrogen supply chain network design for aviation: Model development and case study for German airports in 2050*. Hyneat. <https://www.hyneat.de/en/new-paper-published-green-hydrogen-supply-chain-network-design-for-aviation-model-development-and-case-study-for-german-airports-in-2050/>
- Hyneat. (o. J.).** *Hydrogen supply networks' evolution for air transport*. Hyneat. <https://www.hyneat.de/en/>
- Hyresponder. (o. J.).** *European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders*. Hyresponder. <https://hyresponder.eu/>
- Hysafe. (o. J.).** *Hysafe resources*. Hysafe. <https://hysafe.info/resources/>
- IATA. (2023).** *Energy and new fuels infrastructure net zero roadmap*. International Air Transport Association. <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/energy-and-new-fuels-infrastructure-net-zero-roadmap.pdf>
- IATA. (2025a).** *Concept of operations of battery and hydrogen-powered aircraft at aerodromes*. IATA. <https://www.iata.org/globalassets/iata/publications/sustainability/concept-of-operations-of-battery-and-hydrogen-powered-aircraft-at-aerodromes.pdf>
- IATA. (2025b).** *Hydrogen for aviation: A future decarbonization solution for air travel*. IATA. <https://www.iata.org/globalassets/iata/publications/sustainability/h2-for-aviation-facts.pdf>
- Ianuszkiewicz Marques, G., Da Cruz Oliveira, A., & Roberto Tiago Rodrigues, W. (2025).** *Hydrogen fuel cells in airport ground support equipment: Significant reduction in fuel consumption and CO₂ emissions* [Preprint]. ChemRxiv. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2025-zn1zw>
- Interreg Baltic Sea Region. (o. J.).** *BSR HyAirport: Advancing hydrogen-powered aviation in the Baltic Sea Region*. Interreg Baltic Sea Region. <https://interreg-baltic.eu/project/bsr-hyairport/>
- Jaffary, Z., & Zhang, Y. (2025).** Hydrogen as an aviation fuel: Safety concerns and mitigation strategies. *Transport Economics and Management*, 3, 432–440. <https://doi.org/10.1016/j.team.2025.11.001>

Jenke, S. (2026). Wasserstoff-Kernnetz: Kapazitätsreservierung startet am 19. März. <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/wasserstoff-kernnetz-kapazitaetsreservierung-startet-am-19-maerz/>

KfW. (o. J.). Wasserstoff-Kernnetz. <https://www.kfw.de/%C3%9Cber-die-KfW/Newsroom/Aktuelles/Wasserstoff-Kernnetz.html>

KfW Research. (2024). *Hochlauf der grünen Wasserstoffwirtschaft – wo steht Deutschland?* KfW. <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2024/Fokus-Nr.-475-November-2024-Wasserstoff.pdf>

Klaas, A.-K., Reinecke, A., & Schmidt, C. (2025, November). *H2-Marktindex 2024 – Endbericht: Ergebnisse einer Befragung von Marktakteuren.* Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI). <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/h2-marktindex-2025/>

Krog, H. A., Jooss, Y., Fynh, H., Neksa, P., & Hjorth, I. (2025). *Large-scale LH2 pipeline infrastructure concept for airports* [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2506.09410>

Kühlen, M., Lütjens, K., Ehlers, T., Claßen, A., Scheelhaase, J., Wozny, F., Maertens, S., Eschmann, J., Jochem, P., & Frieske, B. (2025). *Wasserstoff als neuer Energieträger in der Luftfahrt.* DLR. <https://elib.dlr.de/215863/>

Lassen, F., Börger, R., André, J., Muhs, J., & Gebhardt, P. (o. J.). *H²Five – Fünf vor 2030: Empfehlungen des Deutschen Wasserstoff-Verbandes für die 21. Legislaturperiode.* Deutscher Wasserstoff-Verband. <https://dwv-info.de/wp-content/uploads/2025/03/H2Five-DWV-Empfehlungen.pdf>

Meijerink, O., Berg, T., Mohr, M., Liznerova, A., de Hoop, D., Taets van Amerongen, C., Blanshard, A., Yetiskin, Y., & Kelly, M. (2025). *SAF market outlook 2025.* SkyNRG.

Mitteldeutsche Flughafen AG. (2024). *Industrie und Flughafen Leipzig/Halle präsentieren "Net-ZeroLEJ".* <https://www.mdf-ag.com/presse/news/industrie-und-flughafen-leipzig-halle-praesentieren-netzerolej/>

NASA. (2017). *Zero boil-off methods for large scale liquid hydrogen tanks using integrated refrigeration and storage.* NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170006481/downloads/20170006481.pdf>

Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur. (2024). *AFIR: Ziele und Anforderungen an das Laden der Zukunft* [Präsentation]. NOW GmbH. https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2024/05/20240530_Online-Seminar_AFIR_Nationale-Leitstelle-Ladeinfrastruktur-NOWGmbH-1.pdf

Nigam, S., & Singer, D. (2025). *Sustainability in the air: Volume two – Visionaries redefining aviation for a greener world.* SimpliFlying.

NOW GmbH. (2022). *Innovation und Fortschritt: Atlas der Wasserstoff-Netzwerke in Deutschland.* NOW GmbH. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/12/Atlas-der-Wasserstoff-Netzwerke_NOW.pdf

NOW GmbH. (2024a). *Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (RED III)* [Factsheet]. NOW GmbH. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW-Factsheet_REDIII.pdf

NOW GmbH. (2024b). *Wie wirkt sich die ReFuelEU Aviation Verordnung auf den Luftfahrtsektor aus?* [Factsheet]. NOW GmbH. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW-Factsheet_ReFuelEU-Aviation.pdf

NOW GmbH. (2021). *NOW-Atlas der Wasserstoff-Netzwerke*. NOW GmbH. <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/NOW-Atlas-H2-Netzwerke.pdf>

Oesingmann, K., Grimme, W., & Scheelhase, J. (2024). Hydrogen in aviation: A simulation of demand, price dynamics, and CO₂ emission reduction potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 64, 633–642. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924010723>

Pates, M. (2025). *Kickstarting the revolution with mobile hydrogen refueling technology*. ZeroAvia. <https://zeroavia.com/blogs/kickstarting-the-revolution-with-mobile-hydrogen-refueling-technology/>

Reuters. (2025). *Airbus postpones development of new hydrogen aircraft*. Reuters. <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/airbus-postpones-development-new-hydrogen-aircraft-2025-02-07/>

Schiaroli, A., Claussner, L., Campari, A., Cirrone, D., Linseisen, B., Friedrich, A., Torres de Ritter, E. L., Kuznetsov, M., & Ustolin, F. (2024). A comprehensive review on liquid hydrogen transfer operations and safety considerations for mobile applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 107. Pp. 164-182. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924054739>

Steer. (2023). *Analysing the costs of hydrogen aircraft*. Steer. <https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/Study-Analysing-the-costs-of-hydrogen-aircraft.pdf>

TransHyDE. (2024). *Die Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland: Sicher in die Zukunft*. TransHyDE. https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/1C2FE3D69C7714F6E0637E695E86412C/live/document/Die_Wasserstoff-Infrastruktur_in_Deutschland_-_Sicher_in_die_Zukunft.pdf

Transeuropäisches Verkehrsnetz (TEN-V). (2024). *Rat gibt endgültig grünes Licht für neue Verordnung für bessere und nachhaltige Konnektivität in Europa* [Pressemitteilung Nr. 462/24]. Rat der Europäischen Union.

TULIPS. (o. J.). *Innovative & more sustainable airports*. TULIPS. <https://tulips-greenairports.eu/>

van Dijk, D., Ebrahim, H., Jooss, Y., Bodal, E. F., & Hjorth, I. (2024). Integrating liquid hydrogen infrastructure at airports: Conclusions from an ecosystem approach at Rotterdam The Hague Airport. *Journal of Airport Management*, 18(4). Pp. 367-396. <https://henrystewartpublications.com/wp-content/uploads/2025/02/Integrating-liquid-hydrogen-infrastructure-at-airports-van-Dijk-et-al.pdf>

vbw – Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft. (2025). *Aufbau der Wasserstoffwirtschaft*. vbw. <https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2025/Downloads/POS-Aufbau-der-Wasserstoffwirtschaft.pdf>

VDI Nachrichten. (2025). *Airbus verschiebt Pläne für Wasserstoffflugzeug* [Pressemitteilung]. VDI. <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/mobilitaet/airbus-verschiebt-plaene-fuer-wasserstoff-flugzeug/>

Verordnung (EU) 2023/1804 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU. (2023). *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 234, 1–65.

Wehnemann, K., Koßmann, M., Purr, K., Pagel, M., Steinbrenner, J., & Voß-Stemping, J. (2025). *Treibhausgas-Projektionen 2025 – Ergebnisse kompakt*. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7821>

World Economic Forum. (2024). *Pathways for airports to develop into energy hubs*. WEF. https://reports.weforum.org/docs/WEF_AoT_Pathways_for_Airports_to_Develop_into_Energy_Hubs_April_2024.pdf

Yan, Y., Li, S., Zheng, S., Zhou, Y., Yu, J., Wei, W., & Ni, Z. (2026). A boil-off gas control scheme for liquid hydrogen transportation in smart zero carbon emission cities: Risk assessment framework and release control system. *Renewable Energy*, 256 (Part H), 124497. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148125021615>

ZAL. (2021). *New hydrogen tank for aeronautical research*. ZAL. <https://zal.aero/en/news/new-hydrogen-tank-for-aeronautical-research/>

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

Abkürzung	Begriff / Definition
ACI	Airports Council International
ACI Europe	Europäischer Regionalverband des Airports Council International
ACI-ATI	Gemeinsame Studien-/Arbeitsgrundlage von Airports Council International und Aerospace Technology Institute
ADV	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen
AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation; EU-Verordnung zum Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe
Airside	Sicherheitskritischer Betriebsbereich eines Flughafens auf der Luftseite, insbesondere Vorfeld- und Rollverkehrsflächen
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ASU	Air Start Unit; mobiles Aggregat zum Starten von Luftfahrzeugtriebwerken
BEV	Battery Electric Vehicle; batterieelektrisches Fahrzeug
BGBL	Bundesgesetzblatt
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BOG	Boil-off Gas; gasförmiger Wasserstoff, der durch Verdampfung von Flüssigwasserstoff entsteht
Bowser	Mobiles Betankungsfahrzeug bzw. Tankfahrzeug für die Verteilung von Kraftstoffen oder Wasserstoff
CCfD	Carbon Contracts for Difference; Förderinstrument zur Absicherung von Mehrkosten klimafreundlicher Technologien
ConOps	Concept of Operations; konzeptionelle Beschreibung betrieblicher Abläufe
CO₂	Kohlenstoffdioxid
Desk Research	Systematische Auswertung von Literatur, Dokumenten, Studien und sonstigen Sekundärquellen
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EHSP	European Hydrogen Safety Panel / europäischer Kontext von Wasserstoff-Sicherheitsanforderungen (je nach Quelle konkret prüfen)
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ETS	Emissions Trading System; Emissionshandelssystem der Europäischen Union
EU	Europäische Union
FRA	Flughafen Frankfurt am Main
GA	General Aviation; allgemeine Luftfahrt
GH₂	Gaseous Hydrogen; gasförmiger Wasserstoff
GIS	Geographic Information System; geografisches Informationssystem
GPU	Ground Power Unit; Bodenstromaggregat
GSE	Ground Support Equipment; Fahrzeuge und Geräte der Bodenabfertigung
H₂	Molekularer Wasserstoff
HPA	Hydrogen Purchase Agreement; vertragliche Vereinbarung zur Wasserstoffabnahme
HVO100	Hydrotreated Vegetable Oil; paraffinischer Dieselmotorkraftstoff aus hydrierten Pflanzenölen bzw. Reststoffen
ICAO	International Civil Aviation Organization
IoT	Internet of Things; vernetzte Sensorik und Datenerfassung
IPCEI	Important Projects of Common European Interest; wichtiger Förderrahmen der EU
IATA	International Air Transport Association
KPI	Key Performance Indicator; Leistungskennzahl
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LH₂	Liquid Hydrogen; flüssiger Wasserstoff
Landside	Öffentlich zugänglicher bzw. landseitiger Bereich eines Flughafens
LKW	Lastkraftwagen
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
LuftVZO	Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung
M2 / M3 / M4	Arbeitsschritte bzw. Meilensteine der Studie: Desk Research / Stakeholder-Interviews / Konsolidierung
MRV	Monitoring, Reporting and Verification; Messung, Berichterstattung und Verifizierung
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
Multi-Use	Mehrfachnutzung von Infrastruktur durch mehrere Nutzergruppen oder Sektoren

Net Zero	Ziel eines bilanziell treibhausgasneutralen Systems
NOW GmbH	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH
NWS 2023	Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie 2023
OEM	Original Equipment Manufacturer; Hersteller von Fahrzeugen, Geräten oder Systemen
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PCA	Pre-Conditioned Air; klimatisierte Luftversorgung für Flugzeuge am Boden
PEM	Proton Exchange Membrane; Elektrolyse- bzw. Brennstoffzellentechnologie
Pilotprojekt	Zeitlich und räumlich begrenztes Demonstrationsvorhaben zur praktischen Erprobung einer Technologie
Power-to-Liquid (PtL)	Herstellung synthetischer flüssiger Kraftstoffe auf Basis erneuerbaren Stroms und Wasserstoffs
RED III	Renewable Energy Directive III; überarbeitete EU-Richtlinie zu erneuerbaren Energien
REF	Platzhalter für noch einzufügende Literaturreferenz
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin; erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs
RFFS	Rescue and Fire Fighting Services; Flughafenfeuerwehr
RIS	Research Information Systems / Format für Literaturdatenexporte
Roadmap	Strategischer Entwicklungs- und Umsetzungspfad über einen bestimmten Zeitraum
SAF	Sustainable Aviation Fuels; nachhaltige Flugkraftstoffe
Safety Case	Strukturierte sicherheitstechnische Argumentation zur Genehmigung oder Bewertung eines Systems
Scope-3-Emissionen	Indirekte Emissionen entlang der vor- und nachgelagerten Wertschöpfungskette
Skid	Modulare technische Einheit auf Tragrahmen, z. B. für Verdichtung, Speicherung oder Verteilung
SQRA	Safety / Quantitative Risk Assessment; sicherheitsbezogene quantitative Risikoanalyse
TEN-V	Transeuropäisches Verkehrsnetz
TRL	Technology Readiness Level; technologischer Reifegrad
TULIPS	EU-Projekt „Transforming airports into Green hubs“ bzw. vergleichbares Innovationsprojekt für nachhaltige Flughäfen
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
WEF	World Economic Forum
ZEROe	Airbus-Programm bzw. Konzeptfamilie für wasserstoffbetriebene Flugzeuge

Anhänge

Anhang 1 Zusammenfassung wichtiger Ursachen für den hohen Energiebedarf im Flughafenbetrieb.

Funktionsbereiche	Beschreibung	Beispiele für Energiebedarfe
Sicherheit	Flughäfen sind Grenzübergänge, die nationalen Gesetzen unterliegen.	<ul style="list-style-type: none"> • Personen und Gepäckscanner • Elektronische Personenerfassungs- und Identifikationssysteme • CCTV-Prozessüberwachung
	Öffentliche Sicherheit der Passagiere im Terminal	<ul style="list-style-type: none"> • Kamerasysteme+ Überwachungszentrale • Beleuchtung
	Betriebliche Sicherheit zur Gewährleistung des Personenverkehrs nach gängigen Vorschriften	<ul style="list-style-type: none"> • Beleuchtung Vorfeld, Start- und Landebahn • Beleuchtung und Steuerung der Straßen- oder Bahnanbindung inkl. Signaltechnik • Parkraummanagement
Bewegung von Fahrzeugen /Mobilitätshilfen	Jeder Turnaround eines Flugzeugs löst eine Vielzahl von Fahrten und Diensten mit Sonderfahrzeugen und Personenbeförderungsfahrzeugen aus, die klassischerweise mit fossilen Brennstoffen betrieben wurden.	<ul style="list-style-type: none"> • Betankung, Abwasser, Catering • Gepäck Transport • Transport von Bodenstrom/PCA Anlagen • Personentransport Passage/Personal • Pushbacks/Schlepper • Teilweise De-Icing
	Transporte finden von Personen und Gütern innerhalb des Flughafens statt	<ul style="list-style-type: none"> • Terminaltransfers mit Bus oder Bahn • VIP-Transporte • Intralogistik inkl. Ersatzteillogistik und sanitäre Anlagen, etc. • Kurzstreckentransporte von Luftfracht
	Fahrten des allgemeinen Flughafenbetriebs	<ul style="list-style-type: none"> • Follow-me Fahrzeuge • Flächeninspektionen, Instandhaltung • Vogelabwehr
	Mobilitätshilfen sind nötig, um den Passagierfluss innerhalb des Terminals sicher und effizient und barrierefrei zu gestalten	<ul style="list-style-type: none"> • Rolltreppen und Rollbänder • Schiebetüren • Fahrstühle • E-mobile Personentransport
Klima	Flughafengebäude werden zur Kompensation der äußeren Wettersituation temperiert, um angemessene Bedingungen während des Aufenthalts vor, nach oder zwischen Flügen zu gewährleisten.	<ul style="list-style-type: none"> • Heizen von Terminalgebäuden • Kühlen von Terminalgebäuden, Klimaanlage • Heizen und Kühlen von Büro- und Geschäftsräumen im Flughafen
	Mitarbeiter und Passagiere benötigen große Mengen warmes Wasser im Terminalbereich und in den Räumlichkeiten für Bedienstete.	<ul style="list-style-type: none"> • Heißwasser in den Toiletten für Passagiere und Flughafenbedienstete wie z.B. die Flughafen Feuerwehr
	Parkende Flugzeuge müssen mit klimatisierter Luftversorgt werden, um die APU-Nutzung zu vermeiden.	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-conditioned Air für die parkenden Flugzeugen
Sonstiges	Flugzeuge an der Parkposition bekommen Bodenstrom, um die APU-Nutzung zu vermeiden.	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung eines Bodenstrom Aggregats GPU oder eines statischen Konverters (Netzstrom)



+

INTERVIEWLEITFADEN

**POTENTIALANALYSE
WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR
AN DEUTSCHEN
VERKEHRSFLUGHÄFEN**

Fraunhofer IML im
Auftrag von now
GmbH

INHALT

Informationsblatt & Einverständniserklärung zur Teilnahme an einem Experteninterview..	2
Einleitung (ca. 5 Min.)	4
Cluster 1: Technologie (ca. 10-15 Min.)	4
Cluster 2: Regulierung (ca. 10 Min.)	4
Cluster 3: Wirtschaft (ca. 10 Min.)	5
Cluster 4: Hemmnisse & Risiken (ca. 10 Min.)	5
Cluster 5: Chancen & Potenziale (ca. 5-10 Min.)	6
Cluster 6: Einstellung & Rolle (ca. 5-10 Min.)	6
Abschluss (ca. 5 Min.)	6
Zusätzliche Hinweise für die Durchführung	7



Informationsblatt & Einverständniserklärung zur Teilnahme an einem Experteninterview

Projekt: Potenzialanalyse Wasserstoffinfrastruktur an deutschen Flughäfen

Durchführende Institution: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Abteilung Luftverkehrslogistik

Projektleitung: Karsten Uhing und/oder Nadine Richter-Mücklich

Auftraggeber: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH)

Datum: [bitte einfügen]

1. Hintergrund und Ziel der Studie

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderten Potenzialanalyse untersucht das Fraunhofer IML die Voraussetzungen, Herausforderungen und Chancen für den Einsatz von Wasserstoff an deutschen Flughäfen sowie den Anforderungen an eine entsprechende Infrastruktur. Ziel ist es, wissenschaftliche Annahmen aus der Analysephase (M2) durch praktische Perspektiven relevanter Akteure zu validieren und so eine fundierte Grundlage für die Entwicklung von Handlungsoptionen zu schaffen.

2. Zweck des Interviews

Im Interview werden Ihre Einschätzungen, Erfahrungen und Bedarfe im Zusammenhang mit Wasserstoff im Flughafenbetrieb erfasst. Das Gespräch dient ausschließlich wissenschaftlichen und analytischen Zwecken und wird anonymisiert ausgewertet. Es werden keine personenbezogenen oder vertraulichen Unternehmensinformationen veröffentlicht.

3. Ablauf und Dauer

- Dauer: ca. **45-60 Minuten**
- Format: telefonisch, per Videokonferenz oder in Präsenz
- Das Gespräch folgt einem thematisch gegliederten Leitfaden (Technologie, Wirtschaft, Regulierung, Hemmnisse, Chancen, Rolle).
- Auf Wunsch kann das Interview zu Dokumentationszwecken **aufgezeichnet** werden; alternativ erfolgt eine Mitschrift.

4. Datenschutz und Anonymität

- Die Teilnahme ist **freiwillig**. Sie können das Interview jederzeit und ohne Angabe von Gründen abbrechen.
- Alle Daten werden **vertraulich behandelt, pseudonymisiert** gespeichert und ausschließlich zu Forschungszwecken verwendet.
- In Veröffentlichungen und Berichten erfolgt keine Rückführbarkeit auf einzelne Personen oder Organisationen.

2

- Die Daten werden nach Abschluss des Projekts gemäß den geltenden Datenschutzrichtlinien gelöscht.

5. Kontakt

Bei Fragen oder Anliegen wenden Sie sich bitte an:

Karsten Uhing und/oder Nadine Richter-Mücklich

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML)

Abteilung Luftverkehrslogistik

E-Mail: [bitte einfügen]

Einverständniserklärung zur Teilnahme

Ich wurde über Ziel, Ablauf und Zweck des Interviews sowie über Datenschutz und meine Rechte informiert.

Ich erkläre mich mit der Teilnahme am Interview einverstanden.

- Ich stimme der Teilnahme am Interview zu.
- Ich stimme der Audioaufzeichnung des Interviews zu (optional).
- Ich wünsche die Zusendung einer Zusammenfassung der Ergebnisse nach Projektabschluss.

Ort, Datum: _____

Name (freiwillig): _____

Institution (freiwillig): _____

Unterschrift: _____

Hinweis: Mit Ihrer Teilnahme tragen Sie zur wissenschaftlichen Analyse und zur praxisnahen Weiterentwicklung nachhaltiger Flughafeninfrastrukturen bei. Wir danken Ihnen herzlich für Ihre Unterstützung.

3



Einleitung (ca. 5 Min.)

- Kurze Vorstellung des Projekts: „Potenzialanalyse Wasserstoffinfrastruktur an deutschen Flughäfen“
- Ziel des Interviews: Validierung und Ergänzung der bisherigen Analyse (M2) durch Praxiserfahrungen und Perspektiven.
- Hinweis auf Vertraulichkeit und anonymisierte Auswertung.
- Einverständnis zur Aufnahme (nur Transkription via Teams).
- Einstieg: Abgleich lokaler Nachhaltigkeitsziele und strategischer Maßnahmen zu deren Umsetzung. Fokus: Reduktion von Treibhausgasen „Welche Rolle spielt das Thema Wasserstoff derzeit in Ihrem Verantwortungsbereich bzw. an Ihrem Standort?“

Cluster 1: Technologie (ca. 10–15 Min.)

Ziel: Praktische Bedarfe, technische Voraussetzungen und Herausforderungen erfassen

1. Welche Erfahrungen oder Projekte im Zusammenhang mit Wasserstoff gibt es bereits an Ihrem Standort bzw. in Ihrem Verantwortungsbereich?
2. Welche technologischen Optionen werden aus Ihrer Sicht derzeit als realistisch bzw. bevorzugt betrachtet (GH₂, LH₂, Pipeline, Trailer etc.)?
3. Wo sehen Sie aktuell die größten technischen Herausforderungen bei der Integration von Wasserstoff in den Flughafenbetrieb (z. B. Lagerung, Betankung, Sicherheit, Platzbedarf, Schnittstellen)?
4. Welche Anforderungen ergeben sich speziell für den Einsatz wasserstoffbetriebener GSE (z. B. Tankzeiten, Leistung, Einsatzdauer, Sicherheitsabstände)?
5. Gibt es aus Ihrer Sicht technologische Synergien mit anderen Nutzern (z. B. LKW-Betankung, öffentliche H₂-Infrastruktur am Flughafenperimeter)?

Cluster 2: Regulierung (ca. 10 Min.)

Ziel: Regulatorische Rahmenbedingungen, Hürden und Unterstützungsbedarfe erkennen

1. In anderen Industrien ist Wasserstoff technologisch bereits etabliert, F&E wird vorangetrieben und es existieren Standards. Welche nötigen Schritte sind erforderlich, um die Technologie in der Luftverkehrsbranche zu übertragen, und welche entscheidenden Regularien fehlen, um sie auf das Vorfeld zu bringen?
2. Welche Erfahrungen haben Sie mit Genehmigungsprozessen (BImSchG, Bau, Sicherheit, Umwelt etc.) für alternative Energien oder Wasserstoffprojekte gemacht?

4

3. Gibt es regulatorische Vorgaben, die den Einsatz von Wasserstoff am Flughafen erschweren oder verzögern könnten?
4. Welche europäischen oder nationalen Regelwerke (AFIR, TEN-V, RED III etc.) sind aus Ihrer Sicht besonders relevant oder problematisch?
5. Wo sehen Sie Unterstützungsbedarf durch Politik oder Behörden, um Planungssicherheit zu schaffen?

Cluster 3: Wirtschaft (ca. 10 Min.)

Ziel: Wirtschaftliche Realisierbarkeit und Kooperationsmodelle erfassen

1. Wie schätzen Sie die wirtschaftliche Machbarkeit von Wasserstoffinfrastruktur im Flughafenbetrieb ein?
2. Welche Akteure müssten sich aus Ihrer Sicht an Investitionen und Betrieb beteiligen (Flughafen, Bodenabfertiger, Energieversorger, öffentliche Hand)?
3. Welchen Einfluss haben die zusätzlichen Kosten für CO₂ Emissionen heute und in Zukunft auf ihre Wirtschaftlichkeitsrechnung?
4. Bei welchem Preis pro Kilo würde die Nutzung von Wasserstoff interessant für den Flughafenbetrieb an ihrem Standort?
5. Sehen Sie mögliche Geschäftsmodelle oder Betreiberkonzepte, die tragfähig wären (z. B. gemeinschaftliche Nutzung, Betreibermodell, Konzession)?
6. Gibt es Potenziale für Synergien – etwa durch gemeinsame Nutzung mit Straßenverkehr, Industrie oder öffentlicher Mobilität?
7. Welche wirtschaftlichen Hemmnisse oder Unsicherheiten bestehen derzeit (z. B. Förderlogik, Betriebskosten, Energiepreise, Nachfrageentwicklung)?

Cluster 4: Hemmnisse & Risiken (ca. 10 Min.)

Ziel: Wahrgenommene Barrieren und Unsicherheiten dokumentieren

1. Welche zentralen Hemmnisse sehen Sie für den Einsatz von Wasserstoff im Flughafenbetrieb (technisch, wirtschaftlich, organisatorisch, kulturell)?
2. Welche Risiken verbinden Sie mit der Einführung von Wasserstoff (z. B. Sicherheitsrisiken, Betriebsausfälle, Fehlinvestitionen, Akzeptanz)?
3. Welche Voraussetzungen müssten erfüllt sein, damit Sie Wasserstoff als sichere und praktikable Lösung betrachten würden?

5



Cluster 5: Chancen & Potenziale (ca. 5–10 Min.)

Ziel: Positive Anreize, Nutzen und Treiber sichtbar machen

1. Welche Chancen bietet Wasserstoff aus Ihrer Sicht für Flughäfen, Dienstleister oder die Region (z. B. Nachhaltigkeit, Image, Innovation, Wirtschaftsförderung)?
2. Gibt es konkrete Anwendungsbereiche, in denen Wasserstoff aus Ihrer Sicht besonders sinnvoll wäre (z. B. bestimmte GSE-Typen, Gebäude, Busse)?
3. Wie bewerten Sie das Potenzial, dass H₂ ein zentraler Bestandteil der zukünftigen Flughafenenergieversorgung wird?
4. Welchen Einfluss sehen Sie in der Bereitstellung von Wasserstoff im deutschen des Wasserstoffkernnetzes bis 2032. Kennen sie den nächstgelegenen Ausspeisungspunkt zu dem von Ihnen vertretenen Flughafen?

Cluster 6: Einstellung & Rolle (ca. 5–10 Min.)

Ziel: Wahrgenommene Rolle und Haltung der Stakeholder im Transformationsprozess verstehen

1. Wie ist die allgemeine Einstellung gegenüber Wasserstoff in Ihrem Umfeld – insbesondere:
 - im Flughafenbetrieb insgesamt,
 - an Ihrem Standort (Ihrem Flughafen) konkret,
 - und speziell im Bereich der Bodendienste?(Würden Sie diese jeweils eher als aufgeschlossen, abwartend oder skeptisch beschreiben?)
2. Welche Rolle sehen Sie für Ihren Standort bzw. Ihre Organisation in der zukünftigen Wasserstoffentwicklung im Luftverkehr?
3. Welche Unterstützung, Kooperationen oder politischen Signale wären hilfreich, um Engagement und Umsetzung zu fördern?
4. Abschließend: „Was wäre aus Ihrer Sicht der wichtigste nächste Schritt, um den Einsatz von Wasserstoff am Flughafen real voranzubringen?“

Abschluss (ca. 5 Min.)

- Zusammenfassung und Möglichkeit zur Ergänzung: „Gibt es noch etwas, das Sie ansprechen möchten, was bisher nicht zur Sprache kam?“
- Hinweis auf die Weiterverwendung der Ergebnisse (Zwischenbericht M3, Validierung in M4).
- Dank für die Teilnahme und Angebot, Ergebnisse nach Projektabschluss bereitzustellen.

6

Zusätzliche Hinweise für die Durchführung

- **Dauer:** ca. 45–60 Minuten
- **Zielgruppenanpassung:**
 - Flughäfen → Fokus auf Infrastruktur, Genehmigung, strategische Planung
 - Bodenabfertiger → Fokus auf operative Integration, GSE, Wirtschaftlichkeit
 - Energieversorger → Fokus auf Versorgungskonzepte, Synergien, Geschäftsmodelle
 - Behörden/Verbände → Fokus auf Regulierung, Genehmigung, Förderlogik
- **Dokumentation:** Leitfadengestütztes Protokoll – durch Aufzeichnung via Teams, Clusterauswertung nach Konsens, Konflikt, offene Fragen

7



Anhang 3 Deutsche Verkehrsflughäfen im TEN-V Kernnetz und erweiterten Kernnetz

Deutsche Verkehrsflughäfen im TEN-V Kernnetz										
#	City	Airport Name	IATA Code	Country	Country Name	Corridor Affiliation	Primary Emission reduction target	Target Year	LT Emission reduction target	Target Year2
1	Berlin	Berlin Brandenburg	BER	DE	Germany	NS-B; S-M	Carbon-neutral	2045		
2	Bremen	Bremen	BRE	DE	Germany	NS-B; R-D; S-M	Net-zero	2050		
3	Düsseldorf	Düsseldorf	DUS	DE	Germany	NS-R-M	Carbon-neutral	2035	Net-zero	2045
4	Frankfurt	Fraport	FRA	DE	Germany	NS-R-M; R-D	Net-zero	2045		
5	Hamburg	Hamburg	HAM	DE	Germany	R-D; NS-B; S-M	Net-zero	2035		
6	Hannover	Hannover-Langenhagen	HAJ	DE	Germany	NS-B; R-D; S-M	Climate neutral	2045		
7	Köln	Köln/Bonn	CGN	DE	Germany	NS-R-M; NS-B	Climate neutral	2045		
8	Leipzig	Leipzig/Halle	LEJ	DE	Germany	NS-B; R-D; S-M	Carbon-neutral	2030		
9	Munich	München	MUC	DE	Germany	R-D; S-M	Net-zero	2035		
10	Nürnberg	Nürnberg	NUE	DE	Germany	S-M; R-D	Carbon-neutral	2050	Net-zero	2050
11	Stuttgart	Stuttgart	STR	DE	Germany	R-D	Climate neutral	2040		

Deutsche Verkehrsflughäfen im erweiterten TEN-V Kernnetz

#	City	Airport Name	IATA Code	Country	Country Name	primary Emission reduction target	Target Year	LT Emission reduction target	Target Year2
1	Dortmund	Dortmund	DTM	DE	Germany	Carbon-neutral	2045	Net-zero	2050
2	Dresden	Dresden	DRS	DE	Germany	Carbon-neutral	2030	Net-zero	2050
3	Erfurt	Erfurt-Weimar	ERF	DE	Germany	n/a			
4	Frankfurt-Hahn	Hahn	HHN	DE	Germany	Net-zero	2050		
5	Heringsdorf	Heringsdorf	HDF	DE	Germany	n/a			
6	Hof, Plauen	Hof-Plauen	HOQ	DE	Germany	n/a			
7	Karlsruhe	Karlsruhe/Baden -Baden	FKB	DE	Germany	Climate-neutral	2050		
8	Memmingen	Allgäu	FMM	DE	Germany	Climate-neutral	2030		
9	Münster	Münster/Osnabrück	FMO	DE	Germany	Carbon-neutral	2030	Net-zero	2050
10	Paderborn	Paderborn/Lippstadt	PAD	DE	Germany	Net-zero	2050		
11	Rostock	Rostock-Laage	RLG	DE	Germany	Net-zero	2050		

12	Weeze	Niederrhein	NRN	DE	Germany	Climate-neutral	2018	Net-zero	2023
13	Westerland-Sylt	Sylt	GWT	DE	Germany	Net-zero	2050		

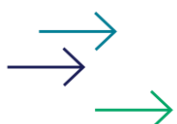
#	Code	Name
1	BS-AS	Baltic Sea- Adriatic Sea
2	NS-B	North-Sea-Baltic
3	Med	Mediterranean
4	S-M	Scandinavian-Mediterranean
5	Atl	Atlantic
6	R-D	Rhine-Danube
7	BS-BS-AS	Baltic Sea - Black Sea - Agean Sea
8	WB-EM	Westen Balkans - Eastern Mediterranean
9	NS-R-M	North Sea - Rhine - Mediterranean

Konsolidierte Kategorien	Ausdruck in flughafenspezifischen Nachhaltigkeitsstrategien
Net-Zero	net zero
	net zero emissions
	level 4+ (net Zero)
	Netto null
Carbon-Neutral	neutralizing its CO ₂ emissions
	Carbon neutrality
	net carbon neutrality
	carbon-neutral
Climate neutral	CO ₂ -neutral
	netto-treibhausgasneutral
emission-free	klimaneutral
	emission-free

Anhang 4 Zusammenfassung Präzisierung der Handlungsfelder für den Luftverkehr (NWS2023)

Handlungsfeld	Ziel	Konkrete Optionen für Ministerien/Behörden
Strategie & Rolle Luftverkehr in der NWS	Luftverkehr explizit als H ₂ -Anwendungsfeld verankern	<ul style="list-style-type: none"> • Luftverkehr (Bodenbetrieb, H₂-Flugzeuge, SAF) ausdrücklich in der NWS fortschreiben und mit Zwischenzielen hinterlegen • Flughäfen ausdrücklich als „Endverbraucher“ und als potenzielle Pufferspeicher des Kernnetzes definieren • Verknüpfung NWS mit Luftverkehrs-, Energie- und Klimapolitik (BMWK, BMDV, BMUV) festsetzen
Nachfrageaufbau an Flughäfen	Wirtschaftlich tragfähige H ₂ -Nachfrage erzeugen	<ul style="list-style-type: none"> • Fortführung/Neuaufgabe von Förderprogrammen (z. B. NIP-Nachfolge) speziell für H₂-Bodendienstfahrzeuge, Vorfeldgeräte und Kleinflugzeuge (BMWK, BMDV) • Förderung „wirtschaftlicher Demonstratoren“ (Investitionszuschüsse, ggf. Betriebskostenzuschüsse) für H₂-Fahrzeuge und -Geräte am Flughafen • Zielgerichtete Förderrichtlinien, die „echte Optionen“ (verfügbar, einsatzfähig, wirtschaftlich) für Flughafenbetreiber schaffen
H ₂ -Infrastruktur an Flughäfen	Versorgung mit H ₂ (Produktion, Speicher, Verteilung) sichern	<ul style="list-style-type: none"> • Langfristiges Konzept zur Anbindung von Flughäfen an das Wasserstoffkernnetz (inkl. Trailer-/Containerlösungen, lokaler Elektrolyse) erarbeiten (BMWK, BNetzA, BMDV) • Flughafenspezifische Beschleunigungsmaßnahmen aus dem Wasserstoffbeschleunigungsgesetz konkretisieren (One-Stop-Shop, Musterverfahren) und in den Ländern operationalisieren • Investitionsförderung für H₂-Infrastruktur (Speicher, Leitungen auf dem Flughafengelände, Betankungsanlagen) bereitstellen • Programme zum Wissenstransfer zwischen Pilotflughäfen und übrigen Verkehrsflughäfen aufsetzen (Handreichungen, Schulungsprogramme, Reallabore)
Genehmigungen & Regulierung	Planungs- und Rechtssicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoffbeschleunigungsgesetz mit klaren Leitfäden für Flughäfen und zuständige Landesbehörden hinterlegen (BMI/BMUV/BMWK mit Ländern) • Nationale Adaption & Klärung europäischer

Handlungsfeld	Ziel	Konkrete Optionen für Ministerien/Behörden
	schaffen, Verfahren verkürzen	<p>Regelwerke (z. B. AFIR, ReFuelEU) zur expliziten Zulassung von Wasserstoff als Alternative zur Elektrifizierung (BMWK, BMDV)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vereinfachte und vereinheitlichte Genehmigungsverfahren für H₂-Anlagen, LH₂-Tanks und Verflüssigungsanlagen in allen Bundesländern etablieren (Mustererlasse, Harmonisierung von Auflagen) • Zentrale Ansprechpartner („Single Point of Contact“) für H₂-Projekte an Flughäfen bei Landesbehörden/Luftfahrtbehörden benennen
Normen & Standards	Einheitliche technische Basis und Sicherheit gewährleisten	<ul style="list-style-type: none"> • Mit DIN/DKE/DVGW nationale Standards für H₂-Infrastruktur am Flughafen (Sicherheitsabstände, Sicherheitsbestände, Betankungsprozesse, Schnittstellen) zügig erarbeiten (BMWK, BMUV, BMDV) • Sektorenkopplung in Normung berücksichtigen (Übertrag von Normen aus Industrie, ÖPNV, Logistik auf Flughäfen) • National einheitliche Standards mit ISO/EN-Normung und EASA-Vorgaben abstimmen
Forschung, Entwicklung & Demonstration	Marktreife Lösungen für Flughäfen beschleunigen	<ul style="list-style-type: none"> • Spezifische F&E-Programme zu H₂-Vorfeldfahrzeugen, H₂-Bodenstrom, Tanklogistik, Sicherheitskonzepten und Kleinflugzeugen fördern (BMWK, BMBF, BMDV) • Förderung von Demonstrationsprojekten an ausgewählten Verkehrs- und Regionalflughäfen (Reallabore) mit klarer Pfadplanung zur Skalierung • F&E zu flüssigem Wasserstoff im Flugbetrieb (Mittelstrecke, ab ~2040) frühzeitig mit Infrastruktur- und Flughafenperspektive verknüpfen
Kollaboration & Flughafenetz	Netz von H ₂ -fähigen Flughäfen aufbauen	<ul style="list-style-type: none"> • Dialogforen mit Flughäfen, Airlines, OEMs, GSE-Dienstleistern und Infrastrukturherstellern institutionalisieren (z. B. „H₂-Luftverkehrsforum“) (BMWK, BMDV) • Bestehende Netzwerke (z. B. ALBATROSS) gezielt um H₂-Komponenten erweitern bzw. H₂-Dependancen



Handlungsfeld	Ziel	Konkrete Optionen für Ministerien/Behörden
		fördern <ul style="list-style-type: none"> • Koordiniertes deutsches Netz aus Regional-, Saison- und Verkehrsflughäfen als erste H₂-Flughafenkette für Kurzstreckenflüge definieren und fördern • Standorte mit besonderer H₂-Kompetenz als „Leitflughäfen“ stärken und Mechanismen zum Wissenstransfer an alle Verkehrsflughäfen etablieren
Internationale & europäische Einbettung	Wettbewerbsfähigkeit und Konnektivität sichern	<ul style="list-style-type: none"> • Aktive Mitgestaltung internationaler Standards bei I-ATA, ICAO, ACI, ISO/EN zu H₂-Infrastruktur, Betrieb und Sicherheit (BMDV, BMWK, BMUV, DIN) • Frühzeitige Festlegung gemeinsamer Flughafenstandards für H₂-Bodenbetrieb und H₂-Flugzeuge in europäischen Netzwerken (EASA, EU-Kommission) • Sicherstellen, dass deutsche Normen und Genehmigungspraktiken mit europäischen/internationalen Standards kompatibel sind (Vermeidung von Insellösungen)
Klimaziele & Förderfokus	Beitrag zu Klima- und Effizienzzielen maximieren	<ul style="list-style-type: none"> • Förderprogramme auf Anwendungen ausrichten, bei denen H₂ kurzfristig/mittelfristig hohe THG-Minderung bei geringer Elektrifizierbarkeit bietet (z.B. schwere Vorfeldfahrzeuge, Spezialgeräte) (BMWK, BMUV) • Kriterien für den temporären Einsatz von blauem Wasserstoff als Übergangstechnologie definieren (Klimawirkung, CCS-Qualität, Laufzeitbegrenzung) • Monitoring-System zur Erfassung der Klimawirkung des H₂-Einsatzes an Flughäfen und zur Anpassung der Förderkulisse einführen • Nationale Programme mit EU-Instrumenten (z. B. Innovation Fund, CEF) abstimmen, um Mittel effizient einzusetzen

