

# Bachelorarbeit

am

Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre,  
insbesondere Marketing  
Prof. Dr. Florian Dost

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg  
Fakultät für Wirtschaft, Recht und Gesellschaft  
Institut für Wirtschaftswissenschaften

## **Marktstudie über die technisch- ökonomischen Chancen von H<sub>2</sub>-Boil-off- Recyclingverfahren innerhalb einer wasserstoffbetriebenen Luftfahrt an deutschen Flughäfen im Jahr 2050**

Eingereicht von:

Betreut von:

Name: Simon Benedict Stein

Prof. Dr. Florian Dost

Matr.-Nr.: 5001793

Florian Franke

Anschrift: Raden Nr. 5

03159 Neiße-Malxetal

Cottbus, 10.02.2026

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
1. Einführung.....	1
1.1    Abstract .....	1
1.2    Einleitung .....	1
2. Theoretische Grundlagen.....	4
2.1    Studienübersicht .....	4
2.1.1    Forschungsfragen .....	4
2.1.2    Hypothesen.....	4
2.1.3    Konzeptionelles Modell .....	5
2.2    Luftverkehrssektor .....	6
2.2.1    Flughafenkategorisierung.....	6
2.2.2    Flughafendaten Leipzig/Halle .....	7
2.2.3    Flughafendaten BER .....	8
2.3    LH <sub>2</sub> -Systeme .....	9
2.3.1    Betankungsfahrzeugsystem.....	10
2.3.2    Pipelinesystem.....	11
2.3.3    Hybridsystem .....	11
2.4    Wasserstoff-Boil-Off.....	12
2.4.1    Venting .....	13
2.4.2    Kompression und Wiederverflüssigung .....	14
2.4.3    Metallhydrid-Kartuschen-System .....	15
3. Methoden.....	16
3.1    Forschungsdesign .....	17
3.1.1    Literaturauswahl.....	17
3.1.2    Hauptkostenparameter.....	19
3.2    Quality-Function-Deployment .....	21
3.2.1    Systemanforderung der Stakeholder .....	22
3.2.2    Qualitätsattribut-Ranking .....	22

4. Auswertung.....	23
4.1 Hypothesen-Analyse .....	23
4.1.1 Flughafenkonzept mittelgroßer Sektor.....	23
4.1.2 Flughafenkonzept großer Sektor .....	26
4.1.3 hybrides Flughafenkonzept großer Sektor .....	28
4.2 Technisch-ökonomische Chancen .....	32
4.2.1 Sensitivitätsanalysen .....	33
4.2.2 Gesamtmarktprognose 2050.....	35
4.2.3 QFD-Analyse .....	36
5. Diskussion .....	38
5.1 Zusammenfassung.....	38
5.2 Fazit.....	39
Literaturverzeichnis.....	VII
Anhangsverzeichnis .....	XIV
Erklärung .....	XLIV

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wege der MH-Kartuschen innerhalb der betrachteten Hypothesen .....	5
Abb. 2: konzeptionelles Modell ökonomischer Nutzen BOG-Recyclingverfahren.....	5
Abb. 3: Lageübersicht Flughafen Leipzig/Halle .....	7
Abb. 4: Lageübersicht Flughafen BER .....	8
Abb. 5: Verfahrensweisen ausgewählter LH <sub>2</sub> -Systeme .....	9
Abb. 6: schematisches Pilotflughafenmodell mit Betankungsfahrzeugsystem.....	10
Abb. 7: schematisches Pilotflughafenmodell mit Pipelinesystem .....	11
Abb. 8: schematisches Pilotflughafenmodell mit hybriden Betankungssystem .....	12
Abb. 9: Methoden zum Umgang mit BOG .....	13
Abb. 10: Ventingprozess eines Betankungsfahrzeugsystems.....	13
Abb. 11: BOG-Recyclingkonzept der Kompression .....	14
Abb. 12: BOG-Recyclingkonzept der Wiederverflüssigung.....	15
Abb. 13: BOG-Recyclingkonzept des MH-Kartuschen-Verfahrens .....	16
Abb. 14: schematischer Verlauf der Analysemethode.....	17
Abb. 15: historischer Verlauf der verwendeten Literatur .....	18
Abb. 16: Zusammensetzung Hauptkostenparameter 2050.....	19
Abb. 17: BOG-Recycling in Prozent Hypothese 1a.....	23
Abb. 18: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 Hypothese 1a.....	24
Abb. 19: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 bis 2060 Hypothese 1b	25
Abb. 20: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 Hypothese 2a .....	26
Abb. 21: BOG-Recycling in Prozent Hypothese 2a.....	27
Abb. 22: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 bis 2060 Hypothese 2b	28
Abb. 23: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 Hypothese 3a.....	29
Abb. 24: BOG-Recycling in Prozent Hypothese 3a.....	29
Abb. 25: Gesamtsumme Hauptkostenparameter LH <sub>2</sub> -Systeme 2050 Hypothese 3a .....	30
Abb. 26: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 bis 2060 Hypothese 3b	31
Abb. 27: Gesamtsumme Hauptkostenparameter LH <sub>2</sub> -Systeme 2050 bis 2060 Hypothese 3b.	32
Abb. 28: Sensitivitätsanalyse mittlerer Sektor .....	34
Abb. 29: Sensitivitätsanalyse großer Sektor .....	34

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Flughafenkategorisierung auf Basis des PAX .....	6
Tab. 2: Flughafendaten Leipzig/Halle .....	7
Tab. 3: Flughafendaten BER .....	8
Tab. 4: Literaturtabelle der Hauptreferenzen .....	18
Tab. 5: CAPEX und OPEX technischer Komponenten .....	20
Tab. 6: BOG-Abgangsraten technischer Komponenten .....	20
Tab. 7: Kraftstoffbedarfsanalyse 2050 an repräsentativen deutschen Flughäfen .....	21
Tab. 8: Medienkosten 2050 für ausgewählte Stoffe .....	21
Tab. 9: Infrastrukturkosten des Hybridsystems Hypothese 1a .....	23
Tab. 10: Anzahl technische Komponenten 2050 Hypothese 1a .....	23
Tab. 11: Medienbedarf 2050 Hypothese 1a .....	24
Tab. 12: Anzahl technische Komponenten 2050 Hypothese 2a .....	26
Tab. 13: Medienbedarf 2050 Hypothese 2a .....	27
Tab. 14: Infrastrukturkosten des Hybridsystems Hypothese 3 .....	28
Tab. 15: Anzahl technische Komponenten 2050 Hypothese 3a .....	30
Tab. 16: Szenarien der Sensitivitätsanalysen .....	33
Tab. 17: Kostenparameter der Szenarien .....	33
Tab. 18: Gesamtmarktprognose 2050 für Deutschland .....	36
Tab. 19: priorisierte Stakeholder-Anforderungen BER .....	37
Tab. 20: priorisierte technische Komponenten BER .....	37

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Abstellposition
B&W	Betriebs- und Wartungskosten
BER	Flughafen Berlin Brandenburg “Willy Brandt“
BOG	Boil-off Gas
CAPEX	Capital Expenditure – Investitionskosten
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FGB	Fluggastbrücken
GH <sub>2</sub>	gasförmiger Wasserstoff
GRF	Großraumflugzeuge
GSP	großer LH <sub>2</sub> -Speicher
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
He	Helium
KSP	kleiner LH <sub>2</sub> -Speicher
LH <sub>2</sub>	flüssiger Wasserstoff
LNG	Liquefied Natural Gas - Flüssigerdgas
MH	Metallhydrid
OPEX	Operational Expenditure – Betriebskosten
PAX	Passagieraufkommen
QAR	Qualitätsattribut-Ranking
QFD	Quality-Function-Deployment
SAF	Sustainable Aviation Fuel – erneuerbares Kerosin
SP	LH <sub>2</sub> -Speichertank
T	Terminal
VA	Verflüssigungsanlage
VA BOG	Wiederverflüssigung mit BOG-Recyclingverfahren

# 1. Einführung

## 1.1 Abstract

Die Umrüstung der kerosinbetriebenen Luftfahrt auf umweltfreundlichere Kraftstoffe stellt nicht nur für Fluggesellschaften zu bewältigende Herausforderungen dar. Dabei ergibt sich die unvermeidliche Verdampfung von kryogenem Wasserstoff als ökonomisches und ökologisches Problem. Die Gesamtmarktergebnisse dieser Arbeit werden zeigen, dass allein im mittleren Luftverkehrssektor mit Verlustkosten in Höhe von ca. 40 000 000 USD<sub>2024</sub> für das Basisjahr 2050 zu rechnen ist.

Es sind somit Minderungsstrategien, wie z. B. das derzeitig untersuchte Metallhydrid (MH)-Kartuschen-Verfahren, erforderlich. Dieses Konzept wird aktuell im Rahmen des Projektes CATCH am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt untersucht. Dem MH-Verfahren wird hierbei ein ökologisches Potenzial mit einer Recyclingrate von 100 % zugeschrieben. Im ökonomischen Vergleich zu anderen Verminderungsverfahren, wie der Kompression oder der Wiederverflüssigung, zeichnen sich jedoch einige wirtschaftliche Hürden für das MH-Verfahren im Basisjahr 2050 ab. Zudem wird der Einsatz solcher Recyclingmethoden durch die Wahl des Betankungssystems am Flughafenstandort bestimmt. Für die jeweiligen Luftverkehrssektoren ergeben sich aus dieser Arbeit verschiedene Ansätze zur Konstruktion von Pilotmodellen. Der mittlere Sektor wird dabei durch den Flughafen Leipzig/Halle repräsentiert, in welchem ein Betankungsfahrzeugsystem als wirtschaftlichste Wahl gilt. Innerhalb des größeren Sektors wird der Flughafen BER betrachtet, wobei sich wirtschaftliche Vorteile eines Pipelinesystems gegenüber eines Hybridsystems ergeben.

Es besteht somit ein zukünftiger Forschungsbedarf bezüglich der Reduzierung der Investitionshöhe des MH-Kartuschen-Verfahrens. Schließlich bedingt die Gestaltung einer klimaneutralen Luftfahrt die Kooperation von Fluggesellschaften, Forschungsinstituten und Kraftstoffversorgungsunternehmen. Hierbei zeichnet sich innerhalb der Stakeholder-Anforderungen eine erhöhte Priorität bezüglich der Bedienungs- und Klimafreundlichkeit, Sicherheit, sowie der Kosteneffizienz ab.

## 1.2 Einleitung

Die Verwendung von nachhaltigen Kraftstoffen innerhalb der kommerziellen Verkehrsinfrastruktur beschäftigt wissenschaftliche Abhandlungen schon seit ca. 50 Jahren (Abel/Allroggen 2023, S. 2). Vor allem in dem Bereich der Luftfahrt zeichnet sich ein wachsendes Interesse an der Einführung von emissionsarmen Kraftstoffsystemen, wie der Verwendung von grünem Wasserstoff (H<sub>2</sub>), ab. Weiterhin ergaben sich in vergangenen Studien unterschiedliche Ansätze zur Substitution von fossilen Brennstoffen, wie z. B. die Synthese von erneuerbarem Kerosin „Sustainable Aviation Fuel“ (SAF) (Tongpun et al. 2019, S. 14) oder die Entwicklung von Erdgas „Liquefied Natural Gas“ (LNG) betriebenen Flugzeugen (Carson et al. 1980, S. 10). In weiteren Studien stellte sich wiederum flüssiger Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) als die zielführendste Alternative in Bezug auf die Emissionsreduzierung innerhalb der Luftfahrt heraus (Janić 2014, S. 16427).

Ein zu beachtender Aspekt ist dabei die unvermeidliche und nicht erwünschte Verdampfung kryogener Medien, welche auch als Boil-Off bezeichnet wird (Bao et al. 2019, S. 1). Dieser Effekt tritt bei der Lagerung, sowie bei den Betankungsvorgängen von LH<sub>2</sub> auf und bedingt somit die Bildung von gasförmigem Wasserstoff „Boil-off Gas“ (BOG). Dieser Umwandlungsprozess führt zu einem potenziellen Sicherheitsproblem. Demnach wird das überschüssige BOG in der Praxis zumeist durch Überdruckventile in die Atmosphäre abgegeben (Morales-Ospino et al. 2023, S. 2). Dieser Vorgang kann auch als Venting bezeichnet werden. Somit ergeben sich sowohl ökonomische als auch ökologische Risiken. Zum einen führt die ungenutzte Abgabe des entstehenden BOG zu einem wirtschaftlichen Verlust, zum anderen entstehen durch die konstante Freisetzung von H<sub>2</sub> größere Umweltbelastungen und klimatische Gefährdungen (Morales-Ospino et al. 2023, S. 6).

Demzufolge werden Verfahren zur Vermeidung und Nutzung von BOG benötigt, um eine sichere und wirtschaftliche Verwendung des grünen Wasserstoffes zu ermöglichen (Kim et al. 2024, S. 1108). Eine BOG-Recyclingmethode stellt die Verwendung eines MH-Kartuschen-Verfahrens dar. Hierbei wird derzeit im Rahmen des Projektes CATCH am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ein innovatives MH-System entwickelt. Weiterhin beschäftigte sich die vergangene Literatur indes mit dem Vergleich der Wiederverflüssigung, der Kompression und dem Venting. Somit ist das Vorhandensein von technisch-ökonomischen Studien gegeben, in welchen sich beispielsweise die Vorteile der Wiederverflüssigung in Bezug auf die Transportfähigkeit des LH<sub>2</sub> für Flughafenkonzepte ergeben (Cardella et al. 2017, S. 13330). Dahingehend ist eine Marktstudie über die Einführung eines MH-Kartuschen-Verfahrens im Vergleich zu den alternativen BOG-Recyclingmethoden im Flughafenbereich noch nicht bekannt.

Dementsprechend ergibt sich ein Forschungsbedarf bezüglich der Anforderungen und der Integrationsmöglichkeiten des MH-Kartuschen-Verfahrens im Luftverkehrssektor. Hierbei gilt es jedoch, die vorläufige Analyse einer wasserstoffbetriebenen Flughafeninfrastruktur zu beachten. Diese Problemstellung wurde in einer Vielzahl vergangener Studien untersucht, welche z. B. auf die Anforderungen eines Betankungssystems für einzelne Flughafenkonzepte aufmerksam machten (Brewer 1976, S. 89). Zudem fand auch die Betrachtung des reinen Wasserstoffbetankungsprozesses mit dem Ziel der technisch-ökonomischen Optimierung des gesamten Flughafenkonzeptes Beachtung (Mangold et al. 2022, S. 20-21). Weiterhin kam es zur Ausarbeitung von technisch-ökonomischen Modellen für konkrete Wasserstoffbetankungssysteme an Beispielflughäfen, um die Investitionskosten (CAPEX) als auch Betriebskosten (OPEX) vergleichen zu können (Hoelzen et al. 2022, S. 11-12). Des Weiteren ist auch auf wirtschaftliche Studien bezüglich der BOG-Recyclingmethoden in anderen Bereichen der Verkehrsinfrastruktur hinzuweisen. So ergibt sich für die Seeschifffahrt die Kompression und die anschließende Verbrennung des gespeicherten gasförmigen Wasserstoffs (GH<sub>2</sub>) als wirtschaftlichste Alternative (Wang et al. 2025, S. 11). Innerhalb dieser Studien erhielt die Verwendung eines MH-Kartuschen-Verfahrens im Seeschifffahrtsbereich wie auch im Luftverkehrssektor keine wirtschaftliche Beachtung.

Demnach wird in dieser wissenschaftlichen Arbeit der ökonomische Nutzen des MH-Kartuschen-Verfahrens für das Basisjahr 2050, sowie im zeitlichen Verlauf bis 2060 untersucht. Hierbei erfolgt die wirtschaftliche Gegenüberstellung des Wiederverflüssigungsverfahrens innerhalb eines Pipelinekonzeptes und eines MH-Kartuschen-Verfahrens für den größeren Luftverkehrssektor. Des Weiteren wird ein Hybridkonzept aus Pipelines und Wiederverflüssigungsanlagen sowie einem MH-Kartuschen-Betankungsfahrzeugsystem innerhalb des größeren Luftverkehrssektors ökonomisch analysiert. Hierzu erfolgt, abgrenzend zu den bestehenden Studien, die Erstellung von zwei Pilotflughafenmodellen. Des Weiteren erfolgt die Kategorisierung der 22 statistisch relevantesten Hauptverkehrsflughäfen in Deutschland. Diese werden in der Zugehörigkeit zu dem kleinen, mittelgroßen und großen Luftverkehrssektor auf Grundlage des Passagieraufkommens (PAX) unterschieden (Flughafenverband ADV 2025). Auf dieser Basis wurden der Flughafen Leipzig/Halle für den mittelgroßen Luftverkehrssektor (Statista 2025b) sowie der Flughafen BER für den größeren Sektor (Statista 2025a) zur Konzepterstellung ausgewählt.

Anschließend werden Pilotmodelle für Flughafenkonzepte mit dem jeweiligen BOG-Recyclingverfahren erstellt. Zudem wird deren ökonomischer Nutzen mit dem voraussichtlich in der Praxis Anwendung findenden Venting verglichen (Morales-Ospino et al. 2023, S. 2). Dementsprechend kommt es zur Auswahl der wirtschaftlichsten Flughafenkonzepte bezüglich der Einführung von MH-Kartuschen-Verfahren und zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen (Sadaghiani et al. 2017, S. 29805). Die Hauptkostenparameter werden hierbei durch die „CAPEX“, „OPEX“, den „Medienbedarf“ und den „BOG-Verlust“ repräsentiert (Wang et al. 2025, S. 6). Weiterhin erfolgt die ökonomische Einschätzung für den Gesamtmarkt 2050 von Deutschland innerhalb des Luftverkehrssektors mit den größten Markteintrittschancen. Zudem wird eine Stakeholder-Analyse an dem Flughafen BER, sowie ein Experten-Interview am DLR durchgeführt. Dabei werden die Methoden des Quality-Function-Deployment (QFD) angewandt. Diese wissenschaftliche Arbeit schließt demnach die Forschungslücke in Bezug auf die technisch-ökonomischen Chancen des MH-Kartuschen-Verfahrens innerhalb kommerzieller Flughafeninfrastrukturen.

Demnach tragen Marktforschungsstudien zu der Entscheidung über die Einführung von BOG-Recyclingverfahren im Luftverkehrssektor bei. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergibt sich im Jahr 2050 ein kumulierter LH<sub>2</sub>-Kraftstoffbedarf für den Flughafen Leipzig/Halle von ca. 77 350 t sowie für den Flughafen BER von ca. 334 000 t. Diese Prognosen erfolgten auf Basis der Berechnung des Äquivalents zu dem Kerosinbedarf innerhalb der Flughafensysteme (Hoelzen et al. 2022, S. 4). Des Weiteren würden für den Flughafen Leipzig/Halle im Jahr 2050 die kumulierten LH<sub>2</sub>-Verlustkosten ca. 4 400 000 USD<sub>2024</sub> betragen. Somit entstehen wirtschaftliche Verluste für die Flughafengesellschaften, die zu einer potenziellen Nachfragehemmung bei der Einführung von erneuerbaren Kraftstoffen innerhalb der Luftfahrt führen. Demzufolge stellen die Erkenntnisse dieser Arbeit wichtige Informationen für Forschungszentren wie dem DLR als auch für Fluggesellschaften dar. Des Weiteren wird durch diese Ergebnisse die Planung und Konstruktion von zukünftigen klimaneutralen Flughafeninfrastrukturen unterstützt.

## **2. Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Studienübersicht**

#### **2.1.1 Forschungsfragen**

Die wirtschaftliche Analyse der Markteinführung von BOG-Recyclingverfahren beruht auf Prognosen. Es ist anzunehmen, dass voraussichtlich im Jahre 2050 der Luftverkehrssektor mit grünem H<sub>2</sub> betrieben wird (Energy Transition Commission 2021, S. 14). Hierbei werden größere Großraumflugzeuge (GRF) von der Untersuchung ausgeschlossen. Es ist dabei nicht davon auszugehen, dass diese in der Anfangsphase mit LH<sub>2</sub>-Antrieben ausgestattet werden können (Hoelzen et al. 2022, S. 17). Demnach sind technische Weiterentwicklungen erforderlich, welche die Ableitung von realistischen Faktoren zur Einführung von kryogenen Kraftstoffen in der Luftfahrt ermöglichen (Hoelzen et al. 2022, S. 15). Somit werden innerhalb dieser Arbeit die folgenden drei Forschungsfragen untersucht.

1. Welchen ökonomischen Nutzen besitzt ein MH-Kartuschen-System für den Bereich des mittleren Luftverkehrssektors, im Vergleich zu alternativen BOG-Recyclingsystemen wie z.B. der Kompression oder des Ventings?
2. Inwieweit ist ein MH-Kartuschen-System im größeren pipelinebetriebenen Luftverkehrssektor wirtschaftlich sinnvoller als das Wiederverflüssigungsverfahren?
3. Welche ökonomischen Chancen weist die Einführung eines Hybridsystems im größeren Luftverkehrssektor auf?

#### **2.1.2 Hypothesen**

Die Analyse der Integrationsmöglichkeiten von BOG-Recyclingverfahren bedingt die vorherige Kategorisierung der Flughäfen, sowie die Einschränkung auf die zu betrachtenden LH<sub>2</sub>-Systeme. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass die steigende Passagieranzahl einen zukünftigen Ausbau der Flughafeninfrastruktur erfordert (Statista 2025k). Innerhalb der Analyse wird dieser Aspekt nicht berücksichtigt. Demnach erfolgt die Betrachtung der Flughafeninfrastruktur 2025 als Basis für die Pilotmodelle. Hierbei werden sowohl der zusätzliche Platzbedarf als auch die benötigten Sicherheitsabstände beachtet, wobei die Erschließung von brachgelegenen Flächen notwendig sein könnte.

Unter diesen Annahmen wurden die folgenden Hypothesen zur Konstruktion von Pilotflughafenmodellen aufgestellt. Eine Übersicht zu den in dieser Arbeit berücksichtigten Systemen und Verfahren ist in Abb. 1 dargestellt.

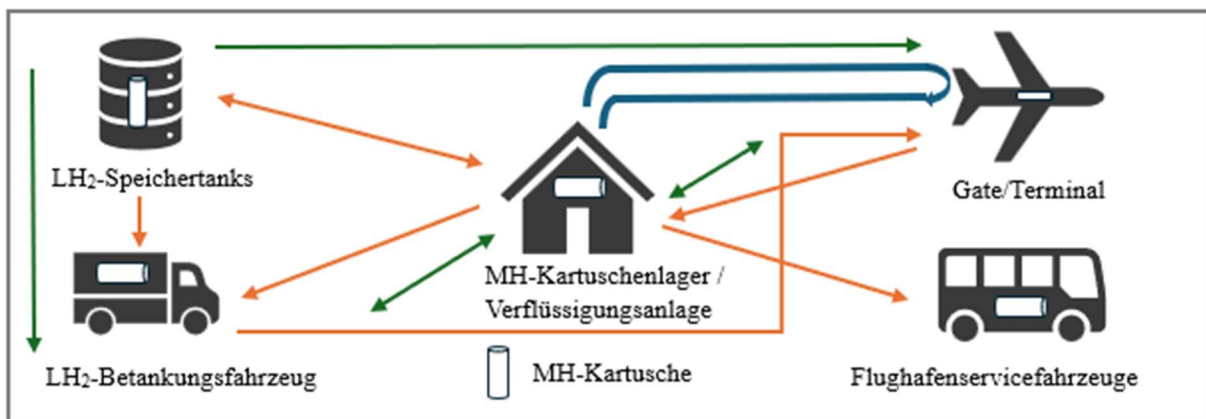
- [H1a] Ein MH-Kartuschen-System weist wirtschaftliche Vorteile innerhalb der Hauptkostenparameter, einschließlich des BOG-Verlusts, gegenüber alternativen BOG-Recyclingsystemen im mittelgroßen Luftverkehrssektor des Basisjahres 2050 auf.
- [H1b] Ein MH-Kartuschen-System des mittelgroßen Luftverkehrssektors weist wirtschaftliche Vorteile gegenüber alternativen BOG-Recyclingsystemen im zeitlichen Verlauf von 2050 bis 2060 auf.

[H2a] Im Pipeline betriebenen größeren Luftverkehrssektor des Basisjahres 2050 ist der Einsatz eines MH-Kartuschen-Systems gegenüber einem Wiederverflüssigungssystem ökonomisch zu bevorzugen.

[H2b] Im Pipeline betriebenen größeren Luftverkehrssektor ist der Einsatz eines MH-Kartuschen-Systems im zeitlichen Verlauf von 2050 bis 2060 gegenüber einem Wiederverflüssigungssystem ökonomisch zu bevorzugen.

[H3a] Ein Hybridsystem bildet, unter Berücksichtigung der Hauptkostenparameter einschließlich des BOG-Verlustes den optimalen ökonomischen Nutzen der LH<sub>2</sub>-Systeme im Basisjahr 2050 ab.

[H3b] Ein Hybridsystem bildet im zeitlichen Verlauf von 2050 bis 2060 den optimalen ökonomischen Nutzen der LH<sub>2</sub>-Systeme ab.



[orange = Hypothese 1a/1b, blau = Hypothese 2a/2b, grün = Hypothese 3a/3b]

Abb. 1: Wege der MH-Kartuschen innerhalb der betrachteten Hypothesen (Quelle: In Anlehnung an Franke/Kazula 2025, S. 5; Brewer 1991, S. 325)

### 2.1.3 Konzeptionelles Modell

Aufgrund des zukünftigen Zeithorizontes kommt es zur Verwendung eines angepassten konzeptionellen Modells, welches in Abb. 2 dargestellt ist.

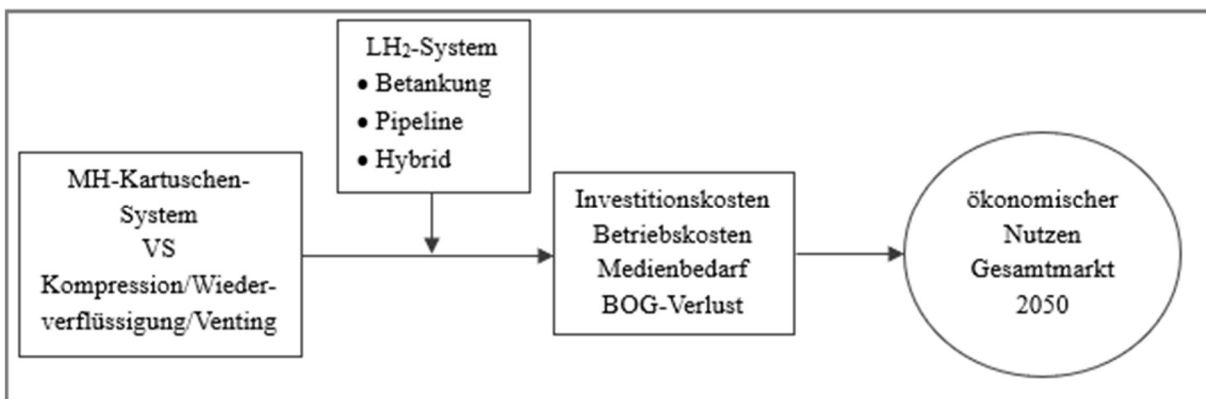


Abb. 2: konzeptionelles Modell ökonomischer Nutzen BOG-Recyclingverfahren (Quelle: In Anlehnung an Morales-Ospino et al. 2023, S. 2; Franke et al. 2024, S. 1503; Wang et al. 2025, S. 6; Kim et al. 2024, S. 1116; Hoelzen et al. 2022, S. 10)

Es wird entgegen traditioneller Studienarbeiten in diesem Bereich keine Befragung mit einer Vielzahl von Probanden durchgeführt. Demnach basiert diese Marktforschungsstudie auf einer Literatur- und Datenanalyse. Hierbei erfolgt der Vergleich der Einflüsse verschiedener unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable. Die abhängige Variable, welche durch den ökonomischen Nutzen des Gesamtmarktes 2050 gekennzeichnet ist, wird innerhalb eines Kreises abgebildet. Diese Darstellung beschreibt eine Abschätzung der abhängigen Variable, da die technologische Entwicklung innerhalb der nächsten 24 Jahre nur prognostiziert werden kann. Der Mediator wird hierbei durch die Hauptkostenparameter in Form von CAPEX, OPEX, Medienbedarf (Kraftstoff- und Spülgasbedarf) und dem BOG-Verlust beschrieben. Die Analyse des Mediators bildet demnach die Grundlage für die Auswahl des ökonomisch sinnvollsten Pilotmodells ab. Durch die Betrachtung der LH<sub>2</sub>-Systeme als Moderator wird die Einordnung der BOG-Recyclingverfahren in den jeweiligen Luftverkehrssektor begründet.

Zudem bedingt die Auswahl der Betankungsprinzipien die BOG-Entstehung. Demnach werden die Variablenbeziehungen im Modell durch den Moderator näher erklärt (Slater 1995, S. 262). Die unabhängigen Variablen sind durch die BOG-Recyclingverfahren gekennzeichnet. Hierbei erfolgt die Auswahl der optimalen Variablenkombination, um ein technisch-ökonomisches Pilotflughafenmodell abzuleiten.

## 2.2 Luftverkehrssektor

### 2.2.1 Flughafenkategorisierung

Innerhalb Deutschlands gibt es derzeit 38 Verkehrsflughäfen. Aufgrund der statistischen Relevanz werden jedoch in dieser Arbeit nur die 22 Hauptverkehrsflughäfen betrachtet. Hierbei wird ein PAX von mehr als 150 000 Fluggästen im jeweiligen Vorjahr als entscheidender Faktor angesehen (Destatis 2025). Im Jahr 2005 erfolgte eine Klassifizierung der Flughafengrößen in vier Oberkategorien durch die Europäische Kommission auf Basis des PAX (Flughafenverband ADV 2025). Ein weiterer Ansatz zur Flughafenkategorisierung bezieht sich indes auf die Anzahl der abgehenden Flugbewegungen (Hoelzen et al. 2022, S. 3). Hierbei ist zu beachten, dass für den wirtschaftlichen Einsatz von H<sub>2</sub>-betriebenen Großraumflugzeugen im Jahre 2050 technische Innovationen notwendig sind. Demnach übersteigen die Bedarfsprognosen an LH<sub>2</sub> für diesen Flugzeugtyp sowohl die Speicherkapazitäten als auch die Produktionsmöglichkeiten (McKinsey et al. 2020, S. 42-43). Es ist somit davon auszugehen, dass dieses Flugzeugsegment vorrangig SAF als Kraftstoff nutzt (Hoelzen et al. 2022, S. 3).

Unter Ausschluss des zweiten Ansatzes erfolgt eine Komprimierung der Klassifizierung der Europäischen Kommission auf drei Oberkategorien. Dies resultiert aus der Betrachtung des Gesamtmarktes von 2050. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird sich auf die in Tab. 1 dargestellte Flughafenkategorisierung bezogen.

Flughafenkategorie	Kleiner Sektor			Mittlerer Sektor			Großer Sektor		
	2005	2035	2050	2005	2035	2050	2005	2035	2050
Jahr									
PAX in Millionen/Jahr	< 1	7.5	10	1 - 20	35	50	> 20	110	135

Tab. 1: Flughafenkategorisierung auf Basis des PAX (Quelle: Flughafenverband ADV 2025; Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 19)

In der Auswertung empfiehlt sich die Betrachtung von Flughäfen im regionalen Umkreis des DLR Standortes Cottbus. Diese Standorteingrenzung dient der Analyse regionaler Marktbereiche sowie der Festigung bestehender Stakeholder-Beziehungen des DLR, wie bspw. mit dem Flughafen BER (Payne 2005, S. 860).

Des Weiteren ist zu beachten, dass der mittlere und größere Luftverkehrssektor die höchsten Anteile an der CO<sub>2</sub>-Emission des Luftverkehrs besitzen (Graver et al. 2020, S. 6). Der kleinere Sektor weist dahingegen eine niedrige LH<sub>2</sub>-Nachfrage auf, woraus eine geringere Marktpriorität resultiert (Hoelzen et al. 2022, S. 15). Demnach wird in dieser Arbeit der kleinere Flughafensektor nicht betrachtet. Der mittlere Sektor wird durch den Flughafen Leipzig/Halle repräsentiert, für den größeren Sektor dient der Flughafen BER als Datenbasis.

## 2.2.2 Flughafendaten Leipzig/Halle

Die Daten für den Flughafen Leipzig/Halle sind in Tab. 2 zusammengefasst. Hierbei ist zu beachten, dass für die stündliche Fahrstrecke eine durchschnittliche Betankungs- und Fahrtzeit von jeweils 30 Minuten anzunehmen ist (Hoelzen et al. 2022, S. 9). Zudem wird bei der Planung der technischen Komponenten die vorhandene Infrastruktur beachtet, bspw. in Bezug auf die Kraftstofflagertanks. Weiterhin ist ein spezifisches Nachtflugverbot von 22.00 Uhr bis 06.00 Uhr zu berücksichtigen (Sachsen.de 2025). Eine Lageübersicht ist in Abb. 3 zu finden.

Flughafen Leipzig/Halle (exkl. GRF)	Flugbewegungen		stündliche Fahrstrecke in km				
	2019	2024	FGB	AP1	AP2	AP3	Mittelwert
	71 927	68 584	1.52	0.8	1.82	2.2	1.585

Tab. 2: Flughafendaten Leipzig/Halle (Quelle: Statista 2025e; Google Maps 2025a)

Die Berechnung der Fahrstrecke von den LH<sub>2</sub>-Speichern (SP) zu den Fluggastbrücken (FGB) und Abstellpositionen (AP) der Flugzeuge wurde mithilfe von Google Maps ermittelt.



Abb. 3: Lageübersicht Flughafen Leipzig/Halle (Quelle: Google Maps 2025a)

## 2.2.3 Flughafendaten BER

Bei den Flughafendaten des BERs wurde für die Errichtung von technischen Komponenten, wie einer Verflüssigungsanlage (VA) die Nähe zu vorhandenen Gewerbeeinheiten beachtet. Demnach erfolgt die Verplanung der VAs im Bereich der Flugzeugwartungsunternehmen. Zudem ist die Nachtflugregelung des BERs zwischen 22.00 und 06.00 Uhr zu beachten (Berlin-Airport 2025a). Die Daten für das zu betrachtende Pilotmodell sind in Tab. 3 zusammengetragen.

Flugbewegungen (exkl. GRF)		FGB	Pipeline Wegstrecke in km (von VA)									stündliche Fahrstrecke in km (von SP)		
2019	2024	Anzahl	SP	AP1	AP2	T1	T2	FGB1	G1	G2	FGB2	AP3	Mittelwert	
277 570	182 137	27	0.95	1.19	1.74	3	2.28	2.36	4.19	2.91	2.09	1.52	1.805	

Tab. 3: Flughafendaten BER (Quelle: Statista 2025d; Berlin-Airport 2025b; Google Maps 2025b)

Die in der Analyse verwendete Pipeline-Wegstrecke ist in G1 und G2 angegeben. Hierbei umfasst G1 den gesamten Flughafenbereich, wohingegen in G2 die Wegstrecke zu FGB2 des ersten Terminals (T) und zur AP3 des zweiten Terminals nicht berücksichtigt wird. Eine Lageübersicht des Pilotmodells ist in Abb. 4 dargestellt.

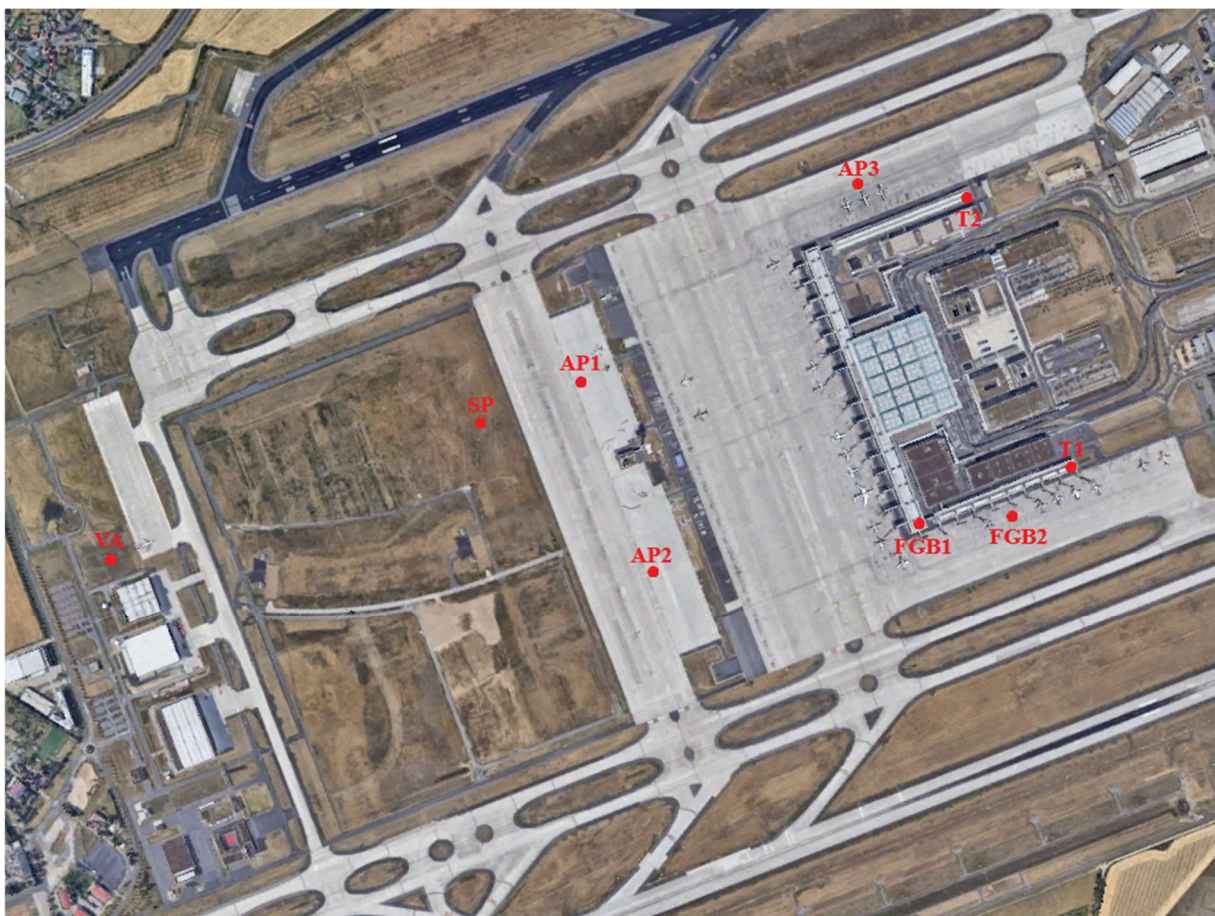
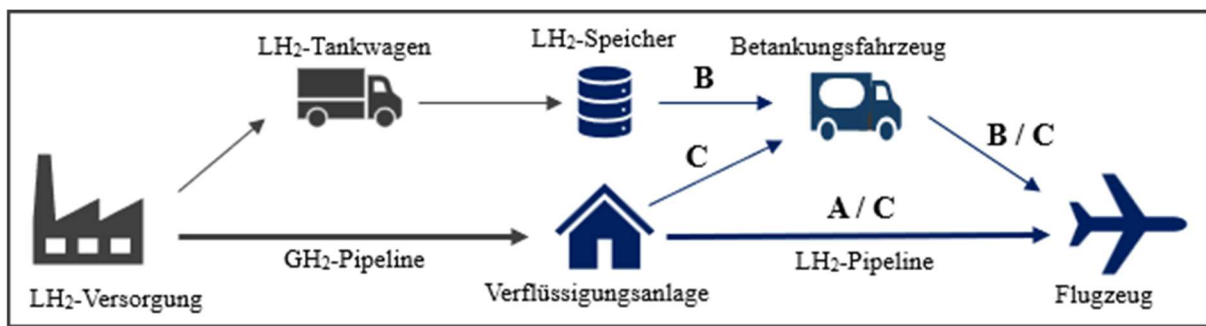


Abb. 4: Lageübersicht Flughafen BER (Quelle: Google Maps 2025b)

## 2.3 LH<sub>2</sub>-Systeme

Die Umstellung der Luftfahrt von fossilen Brennstoffen auf grünen LH<sub>2</sub> erfordert aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff eine Anpassung der weltweiten Flughafeninfrastruktur. Hierbei ist auf die niedrige Dichte und die geringe Siedetemperatur von -253 °C des LH<sub>2</sub> als kryogenes Medium hinzuweisen. Zudem besitzt H<sub>2</sub> eine höhere Entflammbarkeit als Kerosin. Demnach ist eine Kraftstoffversorgung mit den bestehenden Betankungssystemen, welche zumeist auf Jet A-1 ausgerichtet sind, nicht möglich (Abel/Allroggen 2023, S. 1). Innerhalb der bestehenden Literatur zeichnen sich vor allem die Verwendung eines Pipeline- oder Betankungsfahrzeugsystems als wirtschaftlichste Methoden zum Transport von LH<sub>2</sub> ab (Brewer 1991, S. 322). Hierbei wurden die Chancen eines Hybridsystems, einer Kombination von Pipeline- und Betankungsfahrzeugsystem, noch nicht untersucht. Die Verfahrensweisen der in dieser Arbeit betrachteten LH<sub>2</sub>-Systeme sind in Abb. 5 dargestellt.



[dunkelblau = Vorgänge der Flughafeninfrastruktur, grau = Vorgänge der LH<sub>2</sub>-Versorgungskette]

Abb. 5: Verfahrensweisen ausgewählter LH<sub>2</sub>-Systeme (Quelle: Eigene Darstellung)

Innerhalb der Analyse wird angenommen, dass die Versorgung der LH<sub>2</sub>-Systeme für das Pipeline- (A), Betankungsfahrzeug- (B) und Hybridverfahren (C) durch Zulieferung erfolgt. Dies resultiert aus dem erhöhten Strom- und Wasserbedarf, welcher für die eigenständige Elektrolyse am Flughafenstandort benötigt wird (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 21). Somit besteht die Möglichkeit, die Flughäfen mit LH<sub>2</sub>-Tankwagen zu beliefern und die kryogenen Stoffe in Tanks zu speichern (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 18). Zum anderen bietet sich der Transport von GH<sub>2</sub> über Pipelinesysteme für Luftverkehrssektoren mit höherer LH<sub>2</sub>-Nachfrage an. Dadurch kann die konsequente Versorgung gewährleistet und die umliegende Verkehrsinfrastruktur entlastet werden. Dabei ist zu beachten, dass dieses Zulieferungsprinzip eine Umwandlung des GH<sub>2</sub> zu LH<sub>2</sub> mithilfe einer Verflüssigungsanlage am Flughafenstandort erfordert (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 20). Innerhalb dieser Arbeit wird für die Versorgung des mittleren Luftverkehrssektors das Tankwagenprinzip betrachtet und für den größeren Sektor das Pipelineprinzip.

Hierbei ist für beide Systeme die notwendige Reinigung bzw. Inertisierung der technischen Komponenten während der Betankungsvorgänge zu beachten. Als Inertgas, auch Spülgas genannt, wird Helium (He) verwendet, welches innerhalb kleiner Speicher der Tankwagen oder Dispenser Trucks gelagert werden kann. Es wird angenommen, dass die Betankung von 1 t LH<sub>2</sub> eine Spülgasmenge von 1 kg He benötigt. Zudem sind für den Betankungsvorgang am LH<sub>2</sub>-

Speicher bzw. zur Erzeugung eines Massestroms innerhalb der Pipelines kryogene Pumpen erforderlich. Hierbei richtet sich die benötigte Pumpenkapazität nach dem stündlichen Spitzenbedarf an LH<sub>2</sub>. Dabei wird eine Auslastung von 120 % der stündlichen Basisnachfrage angenommen (Hoelzen et al. 2022, S. 7-9).

### 2.3.1 Betankungsfahrzeugsystem

Die LH<sub>2</sub>-Versorgung auf dem Rollfeld innerhalb des Betankungsfahrzeugsystems erfolgt durch den Einsatz von Tankwagen, welche auch als Betankungsfahrzeuge gelten. Des Weiteren werden isolierte Speichersysteme benötigt, um die Lagerung des kryogenen Kraftstoffs zu gewährleisten (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 24). Dieses Versorgungsprinzip bietet vielfältige Integrationsmöglichkeiten für die vorhandene Flughafeninfrastruktur, führt aber zur Erhöhung des Verkehrsaufkommens auf dem Flughafengelände. Weiterhin ist zu beachten, dass die Anzahl der benötigten Tankwagen flexibel an die jeweilige LH<sub>2</sub>-Nachfrage angepasst werden kann. Demnach ergibt sich eine geringe Einstiegshürde in Bezug auf die Investitionskosten. Dennoch ist die Limitation dieses Versorgungsprinzips bezüglich der Betankungsfahrzeug- und Speicherkapazitäten zu berücksichtigen (Hoelzen et al. 2022, S. 6). Hierbei wird eine Speicherauslastung von ca. 4 t für kryogene Tankwagen angenommen (Li et al. 2020, S. 38). Zudem entspricht eine jährliche LH<sub>2</sub>-Nachfrage von 80 000 t einem Bedarf an 10 Betankungsfahrzeugen (Hoelzen et al. 2022, S. 19). Des Weiteren erfolgt der Vergleich von großen LH<sub>2</sub>-Speichertanks mit einer Kapazität von 300 t und kleineren Tanks mit einem Speicherumfang von 25 t um geeignete Flughafenkonzepte ableiten zu können (Abel/Allroggen 2023, S. 5). Hierbei ist ein Trennungsabstand zu anderen LH<sub>2</sub>-Speichern von 1.5 m, zu technischen Gebäuden von 10 m sowie zu anderen LH<sub>2</sub>-Tankwagen von 3 m zu berücksichtigen (Pritchard/Rattigan 2010, S. 21). Ein grafisches Pilotflughafenmodell ist in Abb. 6 zu finden.

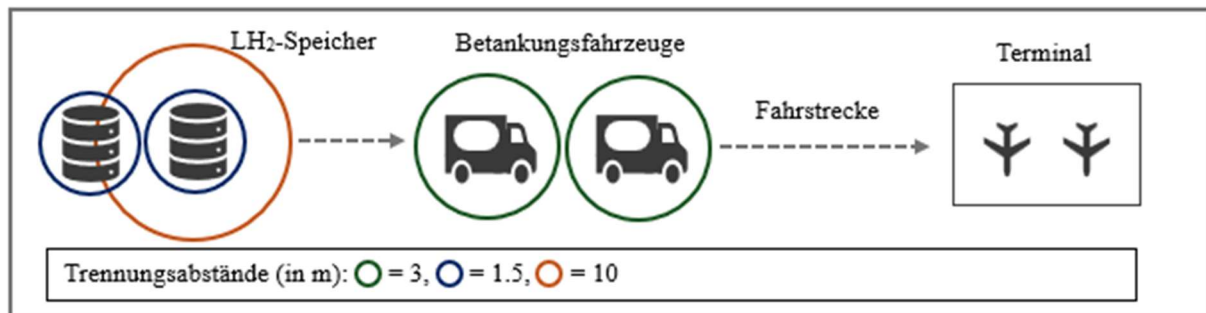


Abb. 6: schematisches Pilotflughafenmodell mit Betankungsfahrzeugsystem (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus der bestehenden Literatur geht hervor, dass der wirtschaftliche Einsatz des Betankungsfahrzeugsystems bis zu einem Jahresbedarf von 125 000 t LH<sub>2</sub> sinnvoll erscheint (Hoelzen et al. 2022, S. 10). Weiterhin ergeben sich aus der bisherigen Forschung widersprüchliche Annahmen in Bezug auf die Beeinflussung der betrieblichen Abläufe aufgrund von geltenden Sicherheitsnormen. Zum einen wird angegeben, dass eine Betankung während des Boardingprozesses nicht möglich sein könnte (Abel/Allroggen 2023, S. 6). Zum anderen wurde die Erkenntnis aufgezeigt, dass es zu keinen Einschränkungen an den Flugsteigpositionen kommt (Brewer 1991, S. 341). Aufgrund der Ungewissheiten in Bezug auf

die Beeinflussung der betrieblichen Abläufe, wird dieser Aspekt von der technisch-ökonomischen Analyse ausgeschlossen. Demnach besteht hierbei ein weiterer Forschungsbedarf innerhalb zukünftiger Studien.

### 2.3.2 Pipelinesystem

Der LH<sub>2</sub>-Transport über ein Pipelinesystem erfordert den Einsatz eines kryogenen Rohrleitungskonzeptes. Hierbei wird das LH<sub>2</sub> direkt von der Verflüssigungsanlage zu den einzelnen Hydranten der Flugzeugpositionen transportiert (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 25). Aufgrund der physikalischen Eigenschaften von LH<sub>2</sub> sind vakuumummantelte Rohrleitungen zu verwenden (Brewer 1991, S. 322). Diese Pipelines erfordern die Konstruktion eines unterirdischen Durchlasses auf dem Flughafengelände. Hierbei ist auf die verringerten Integrationsmöglichkeiten gegenüber dem Betankungsfahrzeugsystem hinzuweisen (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 25). Weiterhin werden Dispenser Trucks benötigt, welche die Schnittstellen zwischen den Flugzeugen und Hydranten der Pipeline bilden (Raab et al. 2024, S. 7). In Abb. 7 ist ein schematisches Pilotflughafenmodell noch einmal veranschaulicht.

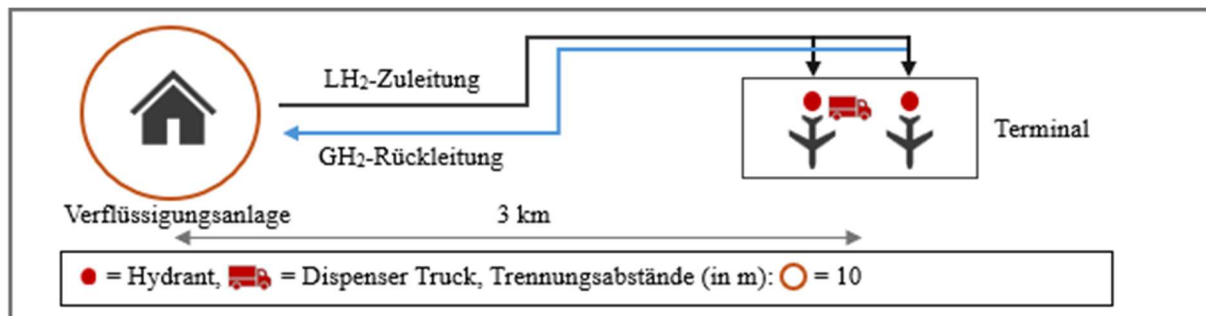


Abb. 7: schematisches Pilotflughafenmodell mit Pipelinesystem (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Verwendung eines zweifach Rohrleitungsnetzes bildet die wirtschaftlichste Option ab (Brewer 1991, S. 325). Hierbei erfolgt die Konstruktion eines Wasserstoffkreislaufes mit einer LH<sub>2</sub>-Zuleitung zu den Flugzeugen und einer GH<sub>2</sub>-Rückleitung zur Verflüssigungsanlage (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 25). Dabei ist die wirtschaftliche Limitation des Rohrleitungsnetzes bis zu einer Länge von 64 km zu beachten (Brewer 1991, S. 322). Die durchschnittliche Wegstrecke zwischen der VA und dem Mittelpunkt eines Terminals wird mit 3 km bemessen (Hoelzen et al. 2022, S. 10). Zudem gilt die Einführung eines Pipelinesystems ab einer jährlichen LH<sub>2</sub>-Nachfrage von über 125 000 t als ökonomisch sinnvoll (Hoelzen et al. 2022, S. 11). Demzufolge wird die Betankung über Pipelines ausschließlich im größeren Luftverkehrssektor als kosteneffizient betrachtet (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 27). Diese Annahme resultiert aus den hohen CAPEX im Vergleich zu einem Betankungsfahrzeugsystem (Hoelzen et al. 2022, S. 13). Es ist zu beachten, dass durch technische Weiterentwicklungen das Pipelinesystem zukünftig auch in dem mittleren Sektor eingeführt werden könnte (Postma-Kurlanc et al. 2022, S. 23).

### 2.3.3 Hybridsystem

Die ökonomischen Chancen eines Hybridsystems wurden bisher nicht untersucht. Demnach erfolgt innerhalb dieser Arbeit die Kombination eines Betankungsfahrzeug- und

Pipelinesystems, um diese Forschungslücke schließen zu können. Hierbei wird ein LH<sub>2</sub>-System für den größeren Luftverkehrssektor konstruiert. Ein Wechsel zu dem Pipelinesystem erfolgt, nachdem der jährliche LH<sub>2</sub>-Bedarf den Wert von 125 000 t überschreitet. Ein Pilotflughafenmodell eines hybriden Betankungssystems ist in Abb. 8 schematisch dargestellt.

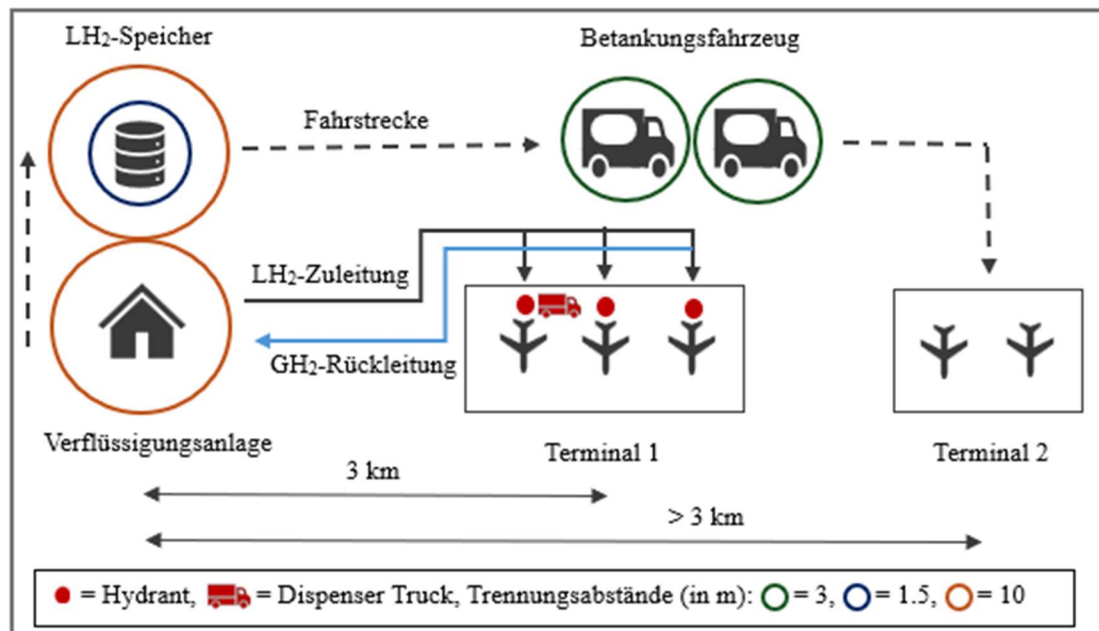


Abb. 8: schematisches Pilotflughafenmodell mit hybriden Betankungssystem (Quelle: Eigene Darstellung)

## 2.4 Wasserstoff-Boil-Off

Die Bestrebungen zur Einführung von nachhaltigen Kraftstoffen sind von zu bewältigenden Herausforderungen geprägt. Hierbei zeichnet sich die unerwünschte Verdampfung von kryogenen Medien als zentrales Problem ab (Franke/Kazula 2025, S. 1). Dieser Umwandlungsprozess von LH<sub>2</sub> zu GH<sub>2</sub> erfolgt aufgrund der Reaktion von Wärme mit dem kryogenen Kraftstoff (Morales-Ospino et al. 2023, S. 3). Trotz der Isolierung der Speichertanks und der Vakuummantelung der Pipelines ist ein Wärmeeintrag unvermeidlich (Bao et al. 2019, S. 1). Dies führt zu der Entstehung von BOG und bedingt eine Druckerhöhung innerhalb der Speichertanks. Hierdurch können Brüche oder Lecks an den Speicherkomponenten entstehen, welche die Gefahr von Explosionen erhöhen (Kim et al. 2024, S. 1108). Der BOG-Prozess führt somit zu einer Gefährdung der Sicherheit auf Flughäfen und bedingt demnach die Entwicklung von Verminderungsstrategien (Huete/Pilidis 2021, S. 37051). In Abb. 9 sind die in dieser Arbeit betrachteten Methoden zum Umgang mit der BOG-Entstehung aufgezeigt. Hierbei wird der BOG-Prozess in Bezug auf die LH<sub>2</sub>-Speicherung sowie bei den Betankungsvorgängen betrachtet. Es wird innerhalb der wirtschaftlichen Analyse eine konstante BOG-Abgangsrate während des Betankungsprozesses angenommen (Franke/Kazula 2025, S. 2). Zudem erfolgt die Annahme, dass das entstandene BOG während des LH<sub>2</sub>-Tankwagen-Versorgungsprozesses nicht aufgefangen werden kann. Hierzu müssten die Zulieferungsunternehmen über eine BOG-Recyclingstrategie verfügen, welche von der Analyse dieser Arbeit ausgeschlossen wird.

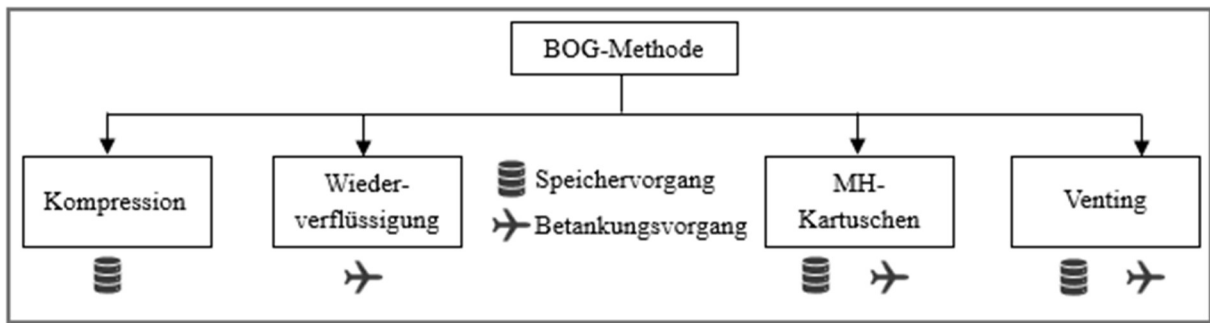


Abb. 9: Methoden zum Umgang mit BOG (Quelle: In Anlehnung an Morales-Ospino et al. 2023, S. 2; Franke et al. 2024, S. 1503)

### 2.4.1 Venting

Bei dem Venting-Verfahren wird überschüssiges BOG durch Überdruckventile in die Umgebung abgegeben und stellt somit die einfachste Lösung des BOG-Problems dar (Morales-Ospino et al. 2023, S. 2). Diese Methode führt jedoch zu einer Verschwendung von Kraftstoff und beeinträchtigt somit den ökonomischen Nutzen eines LH<sub>2</sub>-Systems (Ratnakar et al. 2021, S. 24159). Zudem bedingt die kontinuierliche Freisetzung von BOG einen indirekten Beitrag zur Erderwärmung und stellt somit klimatische Risiken dar (Warwick et al. 2022, S. 54). Demnach werden alternative Recyclingverfahren für einen sicheren und wirtschaftlichen Umgang mit BOG benötigt (Kim et al. 2024, S. 1108).

Weiterhin bestehen in der bisherigen Literatur, bezüglich der Relevanz des Ventings beim LH<sub>2</sub>-Transport, unterschiedliche Annahmen. In einer früheren Studie wird davon ausgegangen, dass durch die geringe Wegstrecke auf dem Rollfeld kein BOG während des Transportes entsteht (Petitpas 2018, S. 40). Aus einer aktuelleren Forschungsarbeit ergibt sich, dass durch den Einsatz geeigneter technischer Konstruktionen die Bildung von BOG während des Transportvorgangs verhindert werden kann (Mangold et al. 2022, S. 1). Demnach werden die Nachteile des Ventings bei dem Tankwagentransport innerhalb dieser Arbeit vernachlässigt.

Des Weiteren findet die BOG-Entstehung innerhalb der LH<sub>2</sub>-Pipeline keine Berücksichtigung aufgrund der geringen BOG-Abgangsrate und der Verwendung eines zweifach Rohrleitungssystems (Abel/Allroggen 2023, S. 5). Zur Veranschaulichung ist in Abb. 10 der Ventingprozess eines Betankungsfahrzeugsystems grafisch dargestellt.

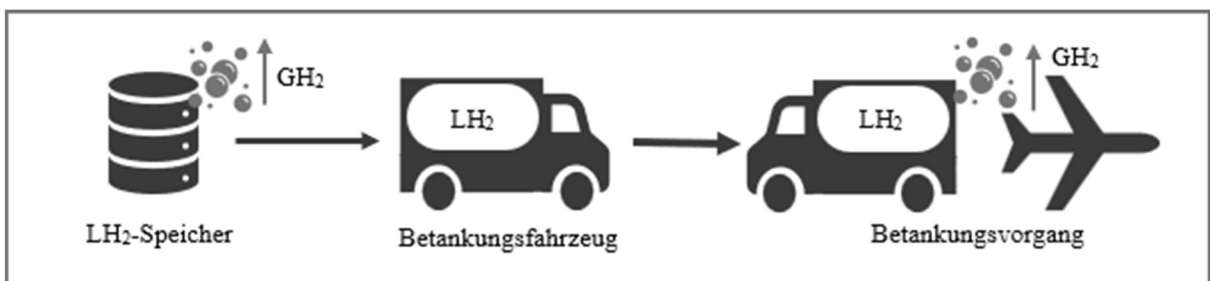


Abb. 10: Ventingprozess eines Betankungsfahrzeugsystems (Quelle: In Anlehnung an Franke et al. 2024, S. 1521)

Ein Bsp. für eine effiziente Nutzung des BOG bildet die Seeschifffahrt ab. Hierbei erfolgt die Kompression des überschüssigen GH<sub>2</sub>, welches anschließend als Brennstoff genutzt wird (Wang et al. 2025, S. 11). Weiterhin ergeben sich aus der bestehenden Literatur die Wiederverflüssigung und der Einsatz des MH-Kartuschen-Verfahrens als BOG-Recyclingmethoden für den Luftverkehrssektor. Eine Wirtschaftlichkeitsstudie für das MH-Kartuschen-Verfahren gegenüber dem Venting wurde derzeit noch nicht durchgeführt.

## 2.4.2 Kompression und Wiederverflüssigung

### *Kompression*

Bei der Kompression wird das BOG auf ein höheres Druckniveau verdichtet und innerhalb von GH<sub>2</sub>-Speichertanks mit einer angenommenen Kapazität von 5.6 kg H<sub>2</sub> aufgefangen (Bao et al. 2019, S. 1; Amica et al. 2020, S. 18795). Zudem ist auf die beschränkte Druckleistung der aktuell verfügbaren Kompressoren hinzuweisen. Demnach sind weitere technische Entwicklungen notwendig, um einen Einsatz unter hoher Auslastung im industriellen Kontext zu ermöglichen (Ratnakar et al. 2021, S. 24155). Die Verwendung von Kompressoren bietet dennoch vielfältige Integrationsmöglichkeiten im Luftverkehr (Sdanghi et al. 2019, S. 165). Um den wirtschaftlichen Effekt der Kompression im Vergleich zu weiteren BOG-Recyclingverfahren untersuchen zu können, wird der Einsatz in einem Betankungsfahrzeugsystem betrachtet. Hierbei werden Kompressoren zur Verdichtung des entstandenen BOG innerhalb der LH<sub>2</sub>-Speicher verwendet. Der Einsatz von Kompressoren innerhalb der Betankungsfahrzeuge wird aufgrund des erhöhten Energiebedarfs ausgeschlossen. In der Analyse wird eine Kompressorkapazität von durchschnittlich 300 kg H<sub>2</sub>/Tag angenommen (HyET 2020). Das BOG-Recyclingkonzept der Kompression für ein Betankungsfahrzeugsystem ist in Abb. 11 zu finden.

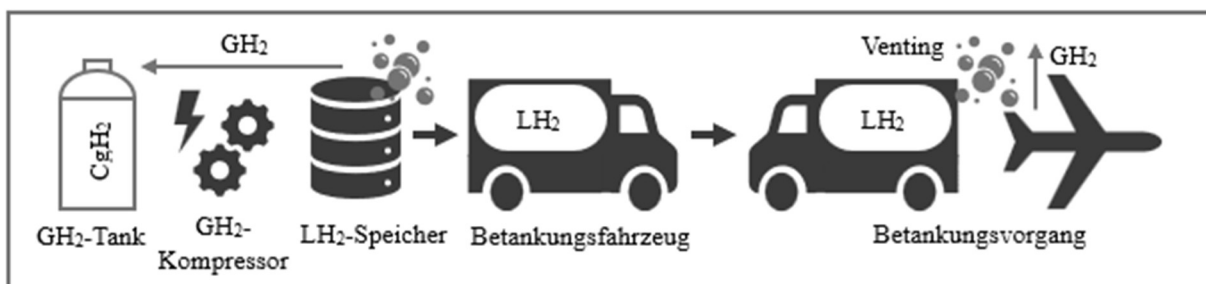


Abb. 11: BOG-Recyclingkonzept der Kompression (Quelle: In Anlehnung an Franke et al. 2024, S. 1521)

### *Wiederverflüssigung*

Bei der Wiederverflüssigung erfolgt die Umwandlung des entstandenen BOG zu LH<sub>2</sub>. Hierbei sind die physikalischen Eigenschaften von LH<sub>2</sub> zu beachten. Demnach muss das BOG auf mindestens -243 °C herabgekühlt werden und einen Druck von ca. 13 Bar besitzen (Ratnakar et al. 2021, S. 24156). Dieser Prozess erfordert einen hohen Energiebedarf und führt somit zu intensiven Betriebskosten (Sadaghiani/Mehrpooya 2017, S. 6033). Aufgrund dieser Erkenntnis wird die Annahme getroffen, dass der Einsatz des Wiederverflüssigungsverfahrens vorrangig im größeren Luftverkehrssektor sinnvoll erscheint. Es ist anzumerken, dass die derzeit größte

deutsche Verflüssigungsanlage eine Produktionsrate von 11.5 t LH<sub>2</sub>/Tag unter vollständiger Auslastung besitzt (Falgowski 2022). Innerhalb dieser Arbeit wird sich auf eine prognostische Verflüssigungs- und Speicherkapazität von 223 t LH<sub>2</sub>/Tag bezogen (Hoelzen et al. 2022, S. 19). Des Weiteren erfolgt die Beachtung einer spezifischen Verlustrate von 1.65 % bei dem Umwandlungsprozess von H<sub>2</sub> zu LH<sub>2</sub> (Hoelzen et al. 2022, S. 7). Das Konzept des BOG-Recyclings der Wiederverflüssigung für ein Pipelinesystem ist in Abb. 12 dargestellt.

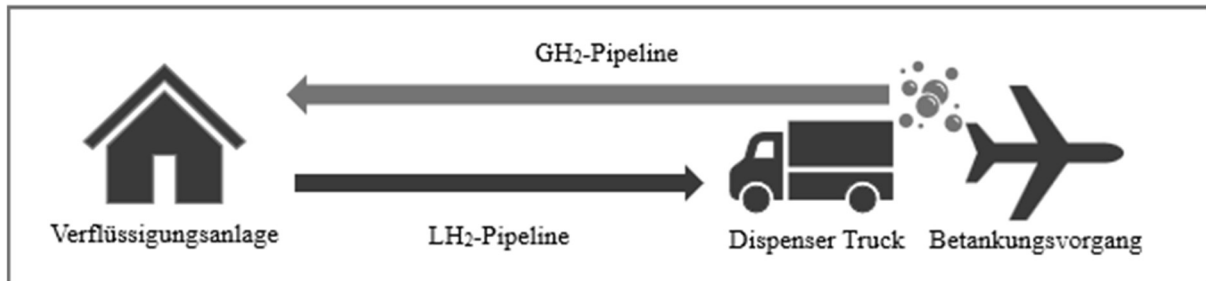


Abb. 12: BOG-Recyclingkonzept der Wiederverflüssigung (Quelle: In Anlehnung an Franke et al. 2024, S. 1521)

### 2.4.3 Metallhydrid-Kartuschen-System

Ein weiteres Verfahren zur Rückgewinnung von BOG stellt die Verwendung von Metallhydriden dar. Bei diesem Verfahren werden MHs durch die chemische Reaktion von H<sub>2</sub> mit metallischen Verbindungen erzeugt (Franke et al. 2024, S. 1503). Dieser Prozess ist aufgrund der Absorptionsefähigkeit von MHs möglich (Rosso/Golben 1987, S. 285). Dabei wird das entstandene BOG unter niedrigem Druck gespeichert und für weitere Anwendungen nutzbar gemacht (Yilmaz 2020, S. 3559). Weiterhin ist auf die Nachteile der Verwendung von MHs zur BOG-Rückgewinnung hinzuweisen. Aus früheren Studien geht hervor, dass dieses Verfahren nicht für bereichsübergreifende oder mobile Anwendungen geeignet ist. Zudem sind die MH-Systeme auf ein spezifisches Druckniveau beschränkt und können dadurch nicht in verschiedenen Verbrauchern eingesetzt werden (Franke/Kazula 2025, S. 3).

Eine Möglichkeit, diesen Problemen entgegenzuwirken, ist die Verwendung von MH-Kartuschen (Franke/Kazula 2025, S. 3). Hierbei werden die technisch-ökonomischen Chancen eines solchen Systems im Rahmen des Projektes CATCH am DLR untersucht. Ein Einsatzgebiet des MH-Kartuschen-Verfahrens stellt der Flughafensektor dar. Dabei zeichnet sich die Kombination eines stationären und mobilen Kartuschen-Systems als vielversprechendste Konstruktion ab. Dieser Ansatz unterstützt die Integrationsmöglichkeiten in verschiedenen Luftverkehrssektoren und LH<sub>2</sub>-Systemen (Franke/Kazula 2025, S. 6-7). In den Pilotmodellen dieser Arbeit wird ein stationäres MH-Kartuschen-Lager im Bereich der LH<sub>2</sub>-Speichertanks sowie ein mobiles System innerhalb der Betankungsfahrzeuge verplant. Hierbei wird eine Speicherkapazität von 2 kg H<sub>2</sub> pro MH-Kartusche angenommen (Franke et al. 2024, S. 1516). Die Anzahl der benötigten MH-Kartuschen für das Jahr 2050 wird durch die BOG-Entstehung pro Prozesseinheit bei der Speicherung und Betankung bestimmt. Um einen vollständigen Recyclingvorgang über die tägliche Betriebsdauer zu gewährleisten, wird ein Pufferaufschlag von 100 % für den Bedarf an MH-Kartuschen beachtet. Dies resultiert aus den alternierenden Prozessen der Be- und Entladung der Kartuschen, wobei eine Dauer von acht

Stunden pro Prozessart angenommen wird (Interview DLR 2025). Die benötigte Kartuschenanzahl ergibt sich demnach aus der BOG-Entstehung für acht Stunden, sowie dem Pufferaufschlag. In Abb. 13 ist das BOG-Recyclingkonzept eines Betankungsfahrzeugsystems unter Verwendung von MH-Kartuschen zu finden.

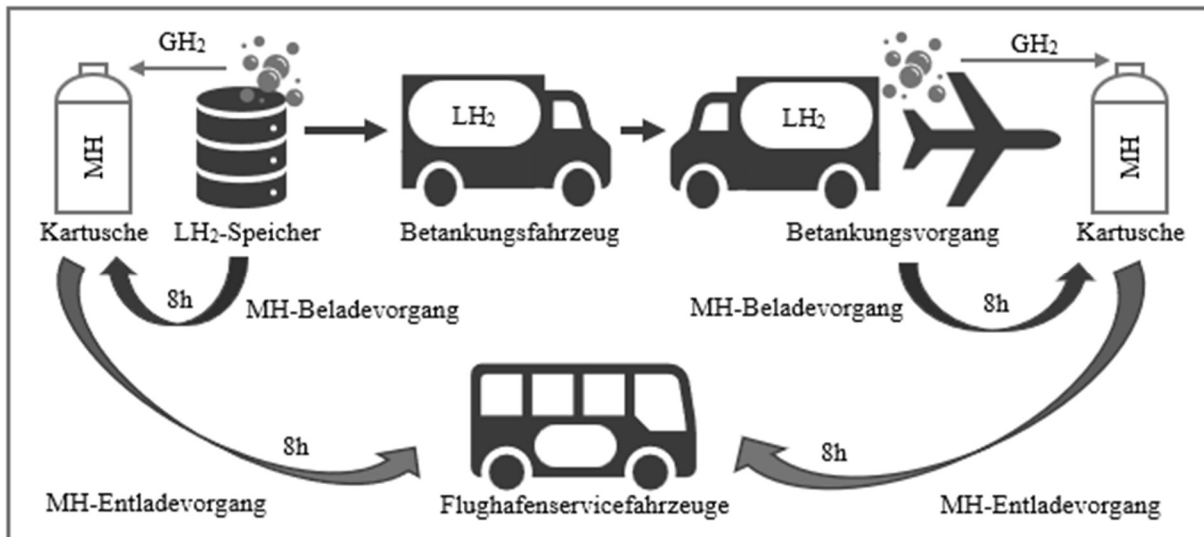


Abb. 13: BOG-Recyclingkonzept des MH-Kartuschen-Verfahrens (Quelle: In Anlehnung an Franke et al. 2024, S. 1516)

Das gespeicherte H<sub>2</sub> kann weiterhin als Kraftstoff für Flughafenservicefahrzeuge genutzt werden, wenn diese mit einer H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle ausgestattet sind. Zudem bestehen weitere Anwendungsbereiche von Metallhydriden bei der „Kabinenklimatisierung“, der „Wasserstoffverdichtung an Bord“ oder in Bezug auf „Wasserstoffsicherheitssensoren“ (Franke et al. 2024, S. 1501).

### 3. Methoden

Die Analyse dieser Arbeit stützt sich auf die Verwendung von Sekundärdaten aus der bestehenden Literatur und auf empirische Statistiken. Demnach wird die Entwicklung der Anzahl von Flugbewegungen und des PAX beachtet. Des Weiteren erfolgt die Gliederung der Hauptkostenparameter, sowie eine Kraftstoffbedarfsanalyse für das Jahr 2050. Zudem werden bei der Analyse des zeitlichen Verlaufs von 2050 bis 2060 die Anzahl an kumulierten Flugbewegungen, sowie die Hauptkostenparameter „OPEX“, „BOG-Verlust“ und „Medienkosten“ des Basisjahres 2050 als Konstanten angenommen. Diese Annahme wird getroffen, um ausschließlich die Auswirkungen der „OPEX“ und des „BOG-Verlustes“ der BOG-Recyclingmethoden vom Basisjahr 2050 bis einschließlich 2060 untersuchen zu können. Somit erfolgt der Gesamtsummenvergleich der ausgewählten Hauptkostenparameter, innerhalb des zeitlichen Verlaufs bis 2060, im Verhältnis zu den CAPEX von 2050 (Interview DLR 2025).

Die Auswahl des optimalen Pilotflughafenmodells ergibt sich aus dem Kosten-Nutzen-Vergleich der Hauptkostenparameter und des recycelten BOG. Weiterhin werden Sensitivitätsanalysen mit den wirtschaftlichsten MH-Kartuschen-Konzepten für den mittleren und größeren Luftverkehrssektor durchgeführt. Hierbei kommt es zur Konstruktion eines jeweiligen Basisfalls, in welchem anschließend einzelne Parameter variiert werden

(Tsvetkova/Quarda 2021, S. 10). Nach der wirtschaftlichen Analyse erfolgt die Ableitung auf den Gesamtmarkt von Deutschland im Jahr 2050. In Abb. 14 ist der schematische Verlauf der Analyseverfahren grafisch dargestellt.



Abb. 14: schematischer Verlauf der Analyseverfahren (Quelle: In Anlehnung an Franke et al. 2024, S. 1511)

Zudem erfolgt eine Stakeholder-Analyse am Flughafen BER sowie ein Experten-Interview mit Herrn Florian Franke (Teamleitung – Energiespeicher und Wasserstofftechnologien für Luftfahrtanwendungen, DLR). Hierbei wird der Erstkontakt zu der Flughafengesellschaft von dem DLR durchgeführt, womit potenziell eine höhere Rückantwortquote erreicht wird (Lockett/Blackman 2004, S. 180). Weiterhin ist zusammenfassend festzustellen, dass eine frühzeitige Kommunikation und ein effizienter Erfahrungsaustausch die Markteinführung neuer Technologien erleichtern (Peter et al. 2002, S. 518). Die gesammelten Informationen aus den Interviews werden innerhalb eines QFD ausgewertet.

### 3.1 Forschungsdesign

#### 3.1.1 Literatursauswahl

Bei der Literatursauswahl erfolgt eine umfangreiche Recherche, welche sich nicht nur auf den Flughafenbereich beschränkt. Demnach werden auch Ansätze aus anderen Sektoren zur Einführung von erneuerbaren Energiesystemen berücksichtigt, wie bspw. bei der Solartechnik (Peter et al. 2002, S. 514). Weiterhin findet die Vorgehensweise einer wirtschaftlichen Analyse für die Nutzung von Windressourcen Beachtung (Tsvetkova/Quarda 2021, S. 1). Durch die Betrachtung von anderen Bereichen besteht die Möglichkeit, für die BOG-Recyclingverfahren geeignete Strategien zur ökonomischen Analyse abzuleiten. Die Auswahlkriterien ergeben sich hierbei aus mehreren Faktoren. Zum einen werden Literaturempfehlungen von Florian Franke berücksichtigt. Zum anderen stützt sich die Verwendung von Quellen mit technischen Inhalten auf den Scimago Journal and Country Rank (SJR 2025). Hierbei wird ausschließlich Literatur mit einem Q1-Rating verwendet. Die Auswahl der Marketing-Inhalte basiert auf dem VHB Publication Media Rating 2024 für Marketing (VHB 2024). Zudem wird der zeitliche Horizont der Literatur beachtet, wobei aktuellere Referenzen in Bezug auf technische Weiterentwicklungen bevorzugt werden. Ein Überblick über den historischen Literaturverlauf zu den Themenbereichen ist in Abb. 15 dargestellt. Des Weiteren ist in Tab. 4 die verwendete Hauptliteratur zusammengefasst. Eine Literaturtabelle zu den verwendeten Referenzen ist in Anhang 1 zu finden.

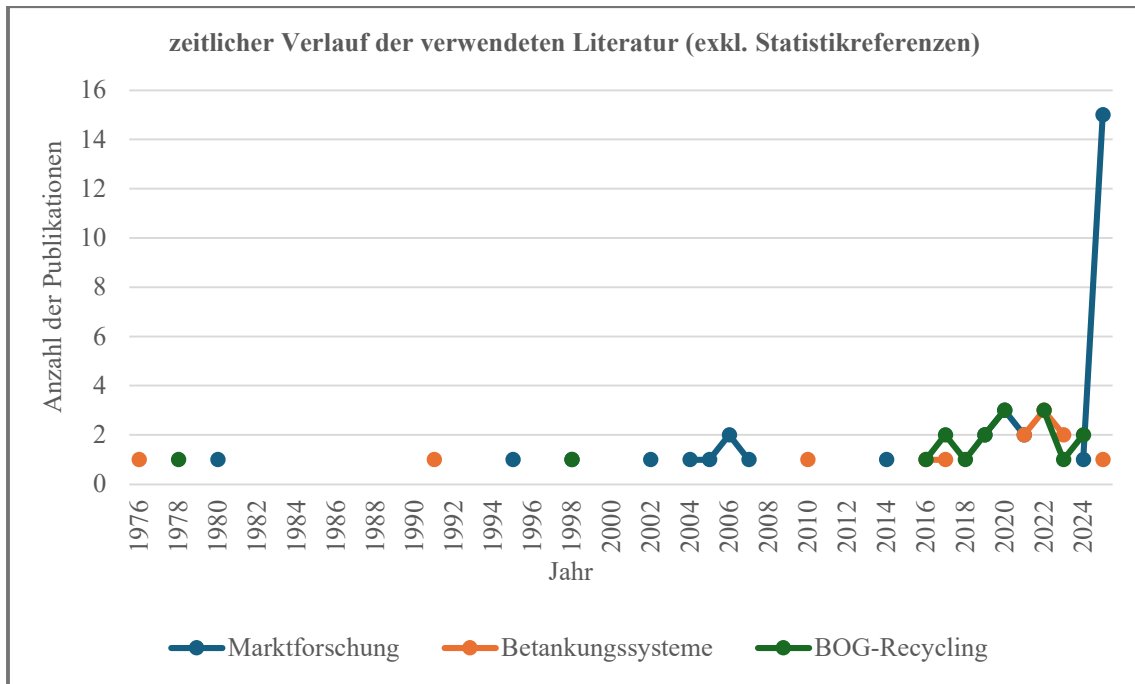


Abb. 15: historischer Verlauf der verwendeten Literatur (Quelle: Eigene Darstellung)

Kategorie	Komponente	Referenz	Hauptinformation
<b>Marktforschung</b>	Sensitivitätsanalyse	Wang et al. (2025)	Sensitivitätsanalyse zur BOG-Nutzung in der Seeschifffahrt
	Marktszenarien	Hoelzen et al. (2022)	Konstruktion verschiedenerer LH <sub>2</sub> -Betankungssysteme an Flughäfen
	empirische Daten	Statista (2025a-q)	Daten ausgewählter deutscher Flughäfen
	QFD	Wang (2007)	Gestaltung QFD des Flugverkehrssektors
<b>LH<sub>2</sub>-Systeme (Betankungssysteme)</b>	Betankungsfahrzeug	Hoelzen et al. (2022)	Konstruktion verschiedenerer LH <sub>2</sub> -Betankungssysteme an Flughäfen
	Pipeline	Postma-Kurlanc et al. (2022)	Flughafenkonstruktion von LH <sub>2</sub> -Betankungssystemen
	Hybrid	Diese Arbeit	
<b>BOG-Recyclingverfahren</b>	Venting	Petitpas (2018)	BOG-Entstehungsursachen und der Einfluss des Ventings
	Wiederverflüssigung	Sadaghiani/Mehrpooya (2017)	Energiebedarf der LH <sub>2</sub> -Wiederverflüssigung
	Kompression	Morales-Ospino et al. (2023)	technisch-ökonomischer Vergleich von BOG-Recyclingverfahren
	MH-Kartuschen	Franke et al. (2024); Franke/Kazula (2025)	Anforderungen/Konzepte von MH-Kartuschen-Systemen in der Luftfahrt

Tab. 4: Literaturtabelle der Hauptreferenzen (Quelle: Eigene Darstellung)

### 3.1.2 Hauptkostenparameter

Die betrachteten Hauptkostenparameter beziehen sich auf die Einführung der LH<sub>2</sub>-Systeme und BOG-Recyclingverfahren im Jahr 2050. Dies ist in Abb. 16 grafisch veranschaulicht.

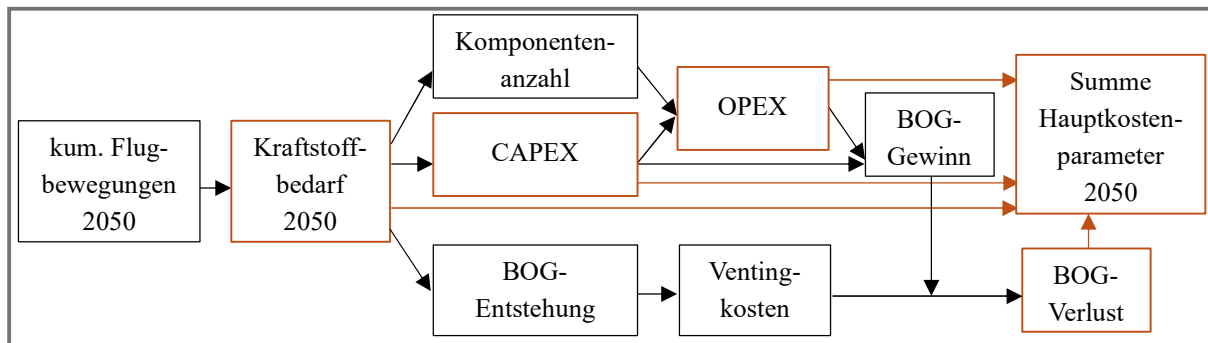


Abb. 16: Zusammensetzung Hauptkostenparameter 2050 (Quelle: Eigene Darstellung)

Die aufgeführten Kosten entsprechen den Mittelwerten der innerhalb der Referenzquellen angegebenen Preisspannen. In Bezug auf die CAPEX erfolgt die Betrachtung der Investitionskosten für die technischen Komponenten aus der Sicht von Stakeholdern. Zudem werden die Abschreibungszeiträume für die verwendeten Positionen in einem Pilotflughafenmodell angegeben. Dahingegen finden die Abschreibungsspannen und Annuitätenzahlungsfaktoren in der Analyse keine Berücksichtigung (Hoelzen et al. 2022, S. 19). Des Weiteren werden gesellschaftliche und weltpolitische Entwicklungen im zeitlichen Verlauf nicht beachtet (Ratnakar et al. 2021, S. 24152). In Bezug auf die OPEX werden die spezifischen Energiekosten der jeweiligen Komponenten, sowie die Betriebs- und Wartungskosten (B&W) betrachtet. Hierbei setzen sich die spezifischen Kosten aus den Stromkosten der technischen Komponenten und den Kosten für das MH-Material der Kartuschen (CAPEX) zusammen. Zudem werden innerhalb eines Betankungsfahrzeugsystems die Kosten für den Tankwagentransport beachtet (Hoelzen et al. 2022, S. 7). Unter Berücksichtigung des allgemeinen Nachtflugverbotes wird eine Betriebsdauer von 16 Stunden für die Betankungskomponenten angenommen (Interview DLR 2025).

Es ist darauf hinzuweisen, dass sämtliche Kosten in USD<sub>2024</sub> angegeben sind. Dabei wird ein Wechselkurs von 0.92 Euro<sub>2024</sub>/USD<sub>2024</sub> angewendet (BMZ 2025). Des Weiteren gilt es, eine kumulierte US-Inflationsrate von 21.2 % innerhalb der Preisentwicklung von 2020 bis 2024, 7.2 % (2022-2024) sowie von 2.9 % für die Entwicklung von 2023 bis 2024 zu berücksichtigen (CoinNews Media Group Company 2025). Die Bestandskosten der technischen Komponenten beziehen sich auf das Basisjahr 2024, wohingegen aktive Kosten für den Medienbedarf auf das Jahr 2050 berechnet werden. Weiterhin ist eine geringe Verfügbarkeit von wissenschaftlichen Prognosen zur Preisentwicklung von erneuerbarem Strom zu beachten. Demnach wird im Jahr 2024 ein einheitlicher Strompreistarif, aus erneuerbarer und konventioneller Stromerzeugung, von 0.2 Euro<sub>2024</sub>/kWh für Industriekunden ausgewiesen (Statista 2025j). Hierfür ist unter Berücksichtigung von §30 EnFG Abs. 3b die minimale Stromabnahmemenge aus erneuerbaren Energien verantwortlich (BAFA 2025). Innerhalb der Literatur ergibt sich für das Jahr 2050 ein prognostizierter grüner Strompreis von umgerechnet 0.06 Euro<sub>2024</sub>/kWh (Hoelzen et al. 2022, S. 7; Reuß et al. 2019, S. 451).

Im Folgenden sind die Parameter für die CAPEX und OPEX in Tab. 5, die BOG-Abgangsraten in Tab. 6, die Kraftstoffbedarfsprognose für 2050 in Tab. 7 sowie der prognostizierten Medienkosten in Tab. 8 zusammengefasst. Die angegebenen Kosten gelten pro Einheit, eine Ausnahme bilden die separaten Definitionen.

CAPEX und OPEX	CAPEX in USD <sub>2024</sub>	Abschreibungszeitraum in Jahren	Energiebedarf in USD <sub>2024</sub>	jährliche B&W in USD <sub>2024</sub>	Referenz
großer LH <sub>2</sub> -Speicher (GSP)	12 653 280	20	n.A.	253 066	Hoelzen et al. 2022, S. 7-9
kleiner LH <sub>2</sub> -Speicher (KSP)	1 181 700	20	n.A.	23 634	
Tankwagen	775 680	12	0.42*A	23 270	
Kryopumpe	1.2*D* 310 636	10	$\frac{((B*1\ 000)*0.1)*0.06}{1.08}$	0.03*C	
Verflüssigungsanlage	413 292 000	20	492 022	16 531 680	
Dispenser Truck	109 080	12	n.A.	3 272	
GH <sub>2</sub> -Kompressor	321 600*G	20	$\frac{((4\ 000*E)*0.06)}{1.08}$	504*E	HyET 2020
GH <sub>2</sub> -Speichertank	514 500*G	n.A.	n.A.	n.A.	Franke et al. 2024, S. 1523
MH-Kartusche	1 543 500* H*0.002	10	3 498 600*H* 0.002	103*E	Franke et al. 2024, S. 1523-1524
LH <sub>2</sub> -Pipeline	5 696 400*F	40*	n.A.	0.03*C	Abel/Allroggen 2023, S. 5
GH <sub>2</sub> -Pipeline	509 040*F	40*	n.A.	0.03*C	

[\*Quelle: Hoelzen et al. 2023, S. 6; n.A. = nicht vorhandene oder vernachlässigbare Positionen; A = durchschnittlich stündliche Fahrstrecke in km; B = LH<sub>2</sub>-Bedarf in t pro Jahr; C = Gesamtsumme CAPEX; D = LH<sub>2</sub>-Bedarf in t pro Stunde; E = BOG-Gesamt in t pro Jahr; F = Pipeline-Wegstrecke in km; G = BOG-Speichertank in t pro Tag; H = MH-Kartuschen-Bedarf]

Tab. 5: CAPEX und OPEX technischer Komponenten (Quelle: siehe Tabelle)

### BOG-Abgangsraten

BOG-Abgangsraten in %	Speicher- verluste pro Tag	Referenz	Betankungs- verluste pro LH <sub>2</sub> -Bedarf	Referenz
großer LH <sub>2</sub> -Speicher	0.2	Kim et al. 2024, S. 1109	9.5	Ghaffari-Tabrizi et al. 2022, S. 268; Fujitani et al. 1998, S. 3)
kleiner LH <sub>2</sub> -Speicher	3	Zhang et al. 2016, S. 14543; Baroutaji et al. 2019, S. 36	9.5	
Kryopumpe	0	Hoelzen et al. 2022, S. 8	0	Hoelzen et al. 2022, S. 8
Tankwagen/ Dispenser Truck	0	Petitpas 2018, S. 40; Mangold et al. 2022, S. 1	2	Franke et al. 2024, S. 1515

Tab. 6: BOG-Abgangsraten technischer Komponenten (Quelle: siehe Tabelle)

### Kraftstoffbedarfsanalyse 2050

Bei der Kraftstoffbedarfsanalyse für 2050 ist eine geringe Datenverfügbarkeit aufgrund des großen Zeithorizontes zu beachten. Demnach erfolgt die Berechnung der kumulierten Anzahl der Flugbewegungen für repräsentative deutsche Flughäfen. Hierbei wird eine jährliche Wachstumsrate von 0.8 % für den inländischen Luftverkehr von 2019 bis 2050 angenommen. Die Auswirkungen der COVID-19 Pandemie auf den Flugverkehr wurden entsprechend berücksichtigt (Statista 2025k). Die Auswahl der zu betrachtenden Flughäfen basiert auf dem jeweiligen Anstieg des PAX. Dabei gilt eine Steigerung um 5 000 000 Passagiere für den mittleren Sektor und eine Erhöhung des PAX um 20 000 000 Passagiere für den größeren Sektor anzuwenden (Flughafenverband ADV 2025). Die Zuordnung des prognostizierten Kraftstoffbedarfs erfolgt auf Basis der LH<sub>2</sub>-Bedarfsspannen der Luftverkehrssektoren 2050, sowie ihrer Mittelwerte (Hoelzen et al. 2022, S. 14).

Sektor	Flughafen	PAX 2024	kum. Flugbewegung 2050 (exkl. GRF)	prog. Kraftstoffbedarf in t LH <sub>2</sub> 2050	LH <sub>2</sub> -Bedarfsfaktor	Sektorfaktor
mittlerer	Hannover	5 216 530	80 460	80 000	0.99	0.84
	Stuttgart	9 141 858	162 835	115 000	0.71	
	Hamburg	14 828 371	180 191	150 000	0.83	
großer	Düsseldorf	20 031 461	289 241	300 000	1.04	0.94
	München	41 547 174	521 823	450 000	0.86	
	Frankfurt	61 499 642	649 725	600 000	0.92	

Tab. 7: Kraftstoffbedarfsanalyse 2050 an repräsentativen deutschen Flughäfen (Quelle: Statista 2025i; Statista 2025n; Statista 2025o; Statista 2025g; Statista 2025m; Statista 2025l, Statista 2025h; Hoelzen et al. 2022, S. 14)

Der LH<sub>2</sub>-Bedarfsfaktor ergibt sich aus der Division des prognostizierten Kraftstoffbedarfs 2050 durch die kumulierten Flugbewegungen 2050. Der Sektorfaktor wird aus dem Mittelwert der LH<sub>2</sub>-Bedarfsfaktoren gebildet.

### Medienkosten 2050

Medium	H <sub>2</sub>	LH <sub>2</sub>	He
Durchschnittskosten in USD <sub>2024</sub> /t	2 573	3 151	21 210

Tab. 8: Medienkosten 2050 für ausgewählte Stoffe (Quelle: Franke et al. 2024, S. 1523; Hoelzen et al. 2022, S. 10; Hoelzen et al. 2022, S. 7)

## 3.2 Quality-Function-Deployment

Das QFD ist eine Methode zur Analyse der Beziehungen zwischen den Systemanforderungen der Stakeholder und den technischen Komponenten eines Systems (Chang 2006, S. 289). Innerhalb der Analyse wird die Verwendung der technischen Bestandteile jeweils im optimalen Luftverkehrssektor angenommen, bspw. ein Pipelinesystem im größeren Sektor. Dadurch ist die Ableitung einer Prioritätshierarchie in Bezug auf die bedeutendsten Voraussetzungen für die

Einführung eines BOG-Recyclingverfahrens möglich (Liang et al. 2006, S. 540). Demnach bildet diese Analyse eine Auflistung von Faktoren ab, auf die in der Entwicklung von BOG-Recyclingverfahren besondere Aufmerksamkeit gelegt werden sollte (Wang 2007, S. 221). Die Ergebnisse werden hierbei in einem „House of Quality“ grafisch dargestellt. Im Keller des Hauses wird die Summe der Gesamtpunkte aus den Bewertungen der technischen Komponenten in Abhängigkeit von den Systemanforderungen zusammengefasst. Hierzu erfolgt die Multiplikation der Einschätzungswerte der Stakeholder-Anforderungen mit den Werten der jeweiligen technischen Komponenten. Die rechte Hausseite spiegelt einen Prioritätsvergleich der Systemanforderungen wider. Hierbei werden die Multiplikationen der Bewertungen der technischen Komponenten und der Einschätzungen der Systemanforderungen aufsummiert. Zudem wird der relative Anteil für die Faktoren auf Basis der Gesamtpunktschritte berechnet. Es ist dabei höheren Prozentsätzen eine bedeutendere Rolle in der Entwicklung von BOG-Recyclingverfahren zuzuschreiben (Wang 2007, S. 222).

Die Einschätzung der Wechselwirkungen im Dachgiebel und der technischen Komponenten erfolgt durch ein persönliches Experten-Interview mit Herrn Florian Franke (Interview DLR 2025). Des Weiteren wird eine Umfrage am Flughafen BER bezüglich der Systemanforderungen von Stakeholdern durchgeführt. Die Kontaktaufnahme erfolgt hierbei durch eine Online-Präsentation des Marktforschungsprojektes, welche in Anhang 2 dargestellt ist.

### **3.2.1 Systemanforderung der Stakeholder**

Die Kategorisierung der Stakeholder-Anforderungen erfolgt durch eine Faktorenanalyse. Hierbei werden die Anforderungen auf inhaltliche Zusammenhänge geprüft und entsprechend zu Oberkategorien zusammengefasst. Dadurch wird die Anzahl der zu bewertenden Merkmale verringert und führt somit zu einer Komprimierung auf die wesentlichen Informationen (Hair et al., S. 14). Die verwendete Klassifizierung wurde mithilfe der Ergebnisse des Experten-Interviews mit Herrn Florian Franke und einer Literaturrecherche ausgearbeitet. Eine ausführliche Beschreibung der Anforderungen zur Bewertungshilfe für die Stakeholder ist in Anhang 3 angegeben.

### **3.2.2 Qualitätsattribut-Ranking**

Die Gewichtung der Bewertungen innerhalb eines QFD wird auch als Qualitätsattribut-Ranking (QAR) bezeichnet. Diese Einstufung beschreibt die Prioritätsebenen der Systemanforderungen der Stakeholder wie auch der Experteneinschätzung der technischen Komponenten. Die Einschätzung der Attribute erfolgt auf einer 5er-Likert-Skala, wobei gilt: 1 = „nicht erforderlich“, 2 = „vernachlässigbar“, 3 = „neutral“, 4 = „bedeutend“, 5 = „sehr bedeutend“ (Wang 2007, S. 223). Eine detaillierte Beschreibung der Gewichtung für die Systemanforderungen ist in Anhang 4, zur Unterstützung der Stakeholder, dargestellt. Die Experteneinschätzung der Wechselwirkungen zwischen den technischen Komponenten erfolgt in drei Gewichtungen und ist als positiv (+), neutral (0) oder negativ (-) im Dachgiebel zu bewerten.

## 4. Auswertung

Die in der Auswertung durchgeführten Kalkulationen, erstellten Berechnungstools und Grundwerte sind in den ergänzenden Materialien in Anhang 5 zu finden.

### 4.1 Hypothesen-Analyse

#### 4.1.1 Flughafenkonzept mittelgroßer Sektor

##### *Hypothese 1a*

Innerhalb der Analyse von Hypothese 1a wird der Flughafen Leipzig/Halle, mit kumulierten 92 081 Flugbewegungen im Basisjahr 2050, als Pilotmodell betrachtet. Demnach erfolgt die Berechnung der spezifischen Systemkosten als Gesamtsumme der Hauptkostenparameter für die Kompression, des MH-Kartuschen-Verfahrens und des Ventings. Hierbei kommt es zur Berücksichtigung eines Betankungsfahrzeugsystems innerhalb des mittleren Luftverkehrssektors. Weiterhin sind Medienkosten für LH<sub>2</sub> und He in Höhe von 245 364 226 USD<sub>2024</sub> im Jahr 2050 zu erwarten. Die Infrastrukturkosten, welche zur Umstrukturierung des Flughafenstandorts auf eine flüssigwasserstoffbetriebene Luftfahrt benötigt werden, sind in Tab. 9 zusammengefasst.

Kosten in USD <sub>2024</sub>	Venting		Kompression		MH-Kartuschen	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
<b>Infrastruktur</b>	26 488 077	24 429 737	26 488 077	24 429 737	26 488 077	24 429 737

Tab. 9: Infrastrukturkosten des Hybridsystems Hypothese 1a (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Kategorie „BOG-Verlust“ stellt die Ventingkosten abzüglich des BOG-Recyclinggewinns dar. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abb. 17 bis Abb. 18, sowie in Tab. 10 bis Tab. 11 zu finden.

technische Komponenten 2050											
Komponente	Tankwagen	GSP	KSP	MH-Kartuschen		Kryopumpen		Kompressor		GH <sub>2</sub> -Speichertanks	
<b>Anzahl</b>	10	1	9	2 262 (GSP)	4 240 (KSP)	1 (GSP)	9 (KSP)	2 (GSP)	22 (KSP)	76 (GSP)	1 136 (KSP)

Tab. 10: Anzahl technische Komponenten 2050 Hypothese 1a (Quelle: Eigene Darstellung)

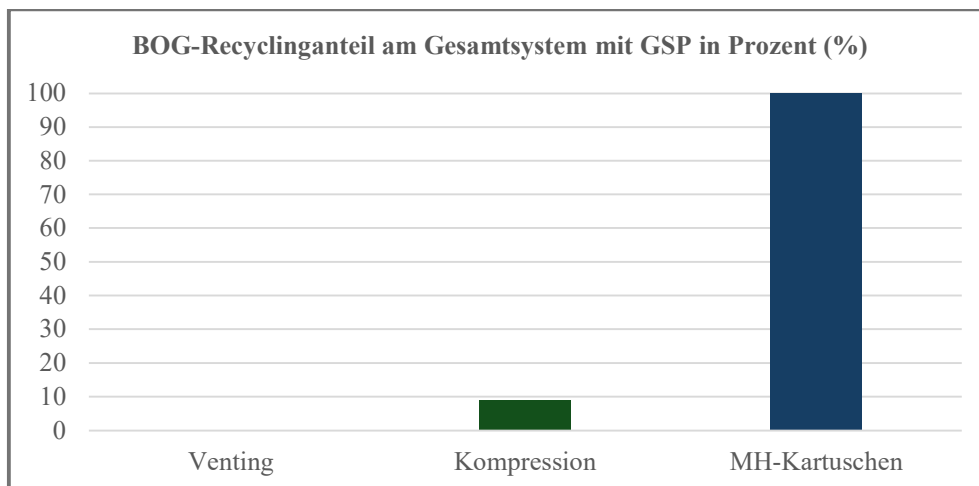


Abb. 17: BOG-Recycling in Prozent Hypothese 1a (Quelle: Eigene Darstellung)

Medienbedarf 2050				
Medium	t LH <sub>2</sub> pro Jahr	t LH <sub>2</sub> p. Tag	t LH <sub>2</sub> p. Stunde	t He p. Jahr
Bedarf	77 348.04	211.91	8.83	77.35

Tab. 11: Medienbedarf 2050 Hypothese 1a (Quelle: Eigene Darstellung)

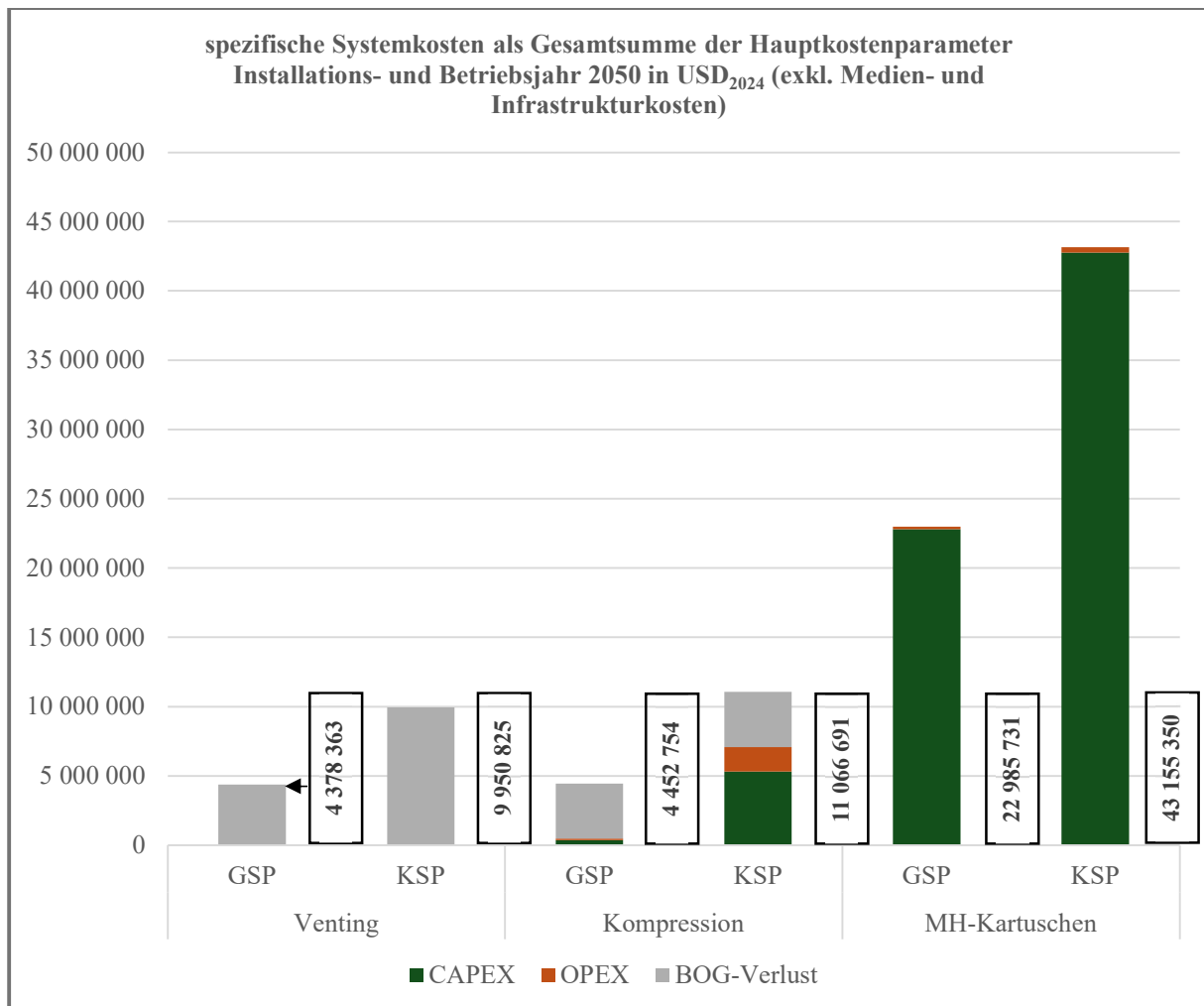


Abb. 18: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 Hypothese 1a (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Einsatz von größeren LH<sub>2</sub>-Speichern für ein Betankungsfahrzeugsystem im mittleren Luftverkehrssektor zu bevorzugen ist. Dies resultiert aus dem geringeren BOG-Verlust, welcher wiederum zu niedrigeren CAPEX und OPEX für die BOG-Recyclingverfahren führt. Zudem ergibt sich im Basisjahr 2050 das Ventingverfahren als wirtschaftlichste Methode für den Umgang mit BOG. Im Vergleich der BOG-Recyclingverfahren zeichnet sich indes die Kompression als ökonomischste Variante ab. Die Nachteile des MH-Kartuschen-Verfahrens bestehen vorrangig in den hohen CAPEX für die Metallhydrid-Materialien. Eine detaillierte Aufschlüsselung der CAPEX und OPEX für die technischen Komponenten ist in Anhang 6 zu finden.

Demnach wird Hypothese 1a verworfen, da das MH-Kartuschen-Verfahren im Basisjahr 2050 keine wirtschaftlichen Vorteile gegenüber der Kompression oder des Ventings aufweist. Jedoch ergeben sich unter Beachtung der Umweltauswirkungen des Ventings und der geringen BOG-

Recyclingrate von 9 % bei der Kompression ökologische Chancen für das MH-Kartuschen-Verfahren. Es ist weiterhin darauf hinzuweisen, dass durch technische Weiterentwicklung bis zum Jahr 2050 der Verwendung von MH-Kartuschen ein hohes Potenzial zugeschrieben wird. Hierbei sind die flexiblen Einsatzmöglichkeiten der Kartuschen und eine BOG-Recyclingrate von 100 % hervorzuheben.

### Hypothese 1b

Bei der Untersuchung von Hypothese 1b werden die Infrastrukturkosten aus Hypothese 1a als Grundwerte angenommen. Zudem ergeben sich im zeitlichen Verlauf von 2050 bis 2060, Medienkosten in Höhe von 2 699 006 486 USD<sub>2024</sub>. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abb. 19 dargestellt, eine jährliche Aufschlüsselung der Hauptkostenparameter ist in Anhang 7 zu finden.

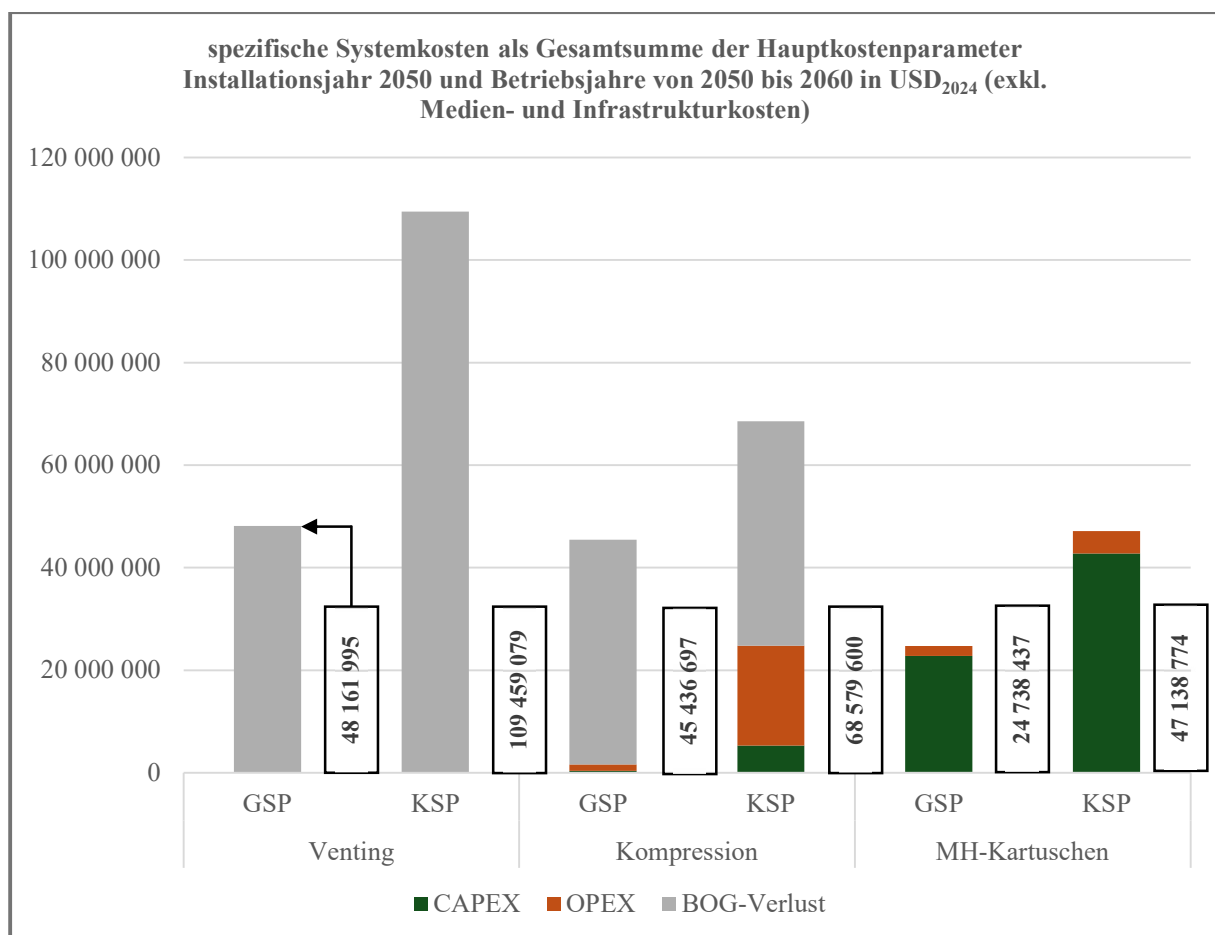


Abb. 19: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 bis 2060 Hypothese 1b (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass im zeitlichen Verlauf bis 2060 das MH-Kartuschen-Verfahren die wirtschaftlichste BOG-Recyclingmethode ist. Dies resultiert aus den geringeren OPEX und Ventingkosten des MH-Kartuschen-Verfahrens im Vergleich zur Kompression. Zudem bildet diese Variante auch einen ökologischen Mehrwert zur Minderung der Umweltbelastung durch freigesetztes BOG ab. Demnach wird Hypothese 1b angenommen. Der Break-Even-Point des MH-Kartuschen-Verfahrens gegenüber der Kompression und dem Venting befindet sich am Ende des Jahres 2055 und ist in Anhang 7 aufgezeigt.

## 4.1.2 Flughafenkonzept großer Sektor

### Hypothese 2a

Als Datenbasis für ein Pilotmodell des größeren Luftverkehrssektors dient der Flughafen BER mit einer kumulierten Anzahl von 355 344 Flugbewegungen im Basisjahr 2050. Hierbei ist mit Infrastrukturkosten in Höhe von 2 203 320 536 USD<sub>2024</sub> zurechnen. Weiterhin betragen die zu erwartenden Medienkosten, im Jahr 2050 für H<sub>2</sub> und He, 880 707 535 USD<sub>2024</sub>.

Bei der Auswertung von Hypothese 2a wird angenommen, dass ein MH-Kartuschen-Verfahren keine GH<sub>2</sub>-Rückleitung benötigt. Demnach erfolgt die Berechnung der Gesamtsumme der Hauptkostenparameter für ein zweifach Rohrleitungssystem mit Wiederverflüssigung (VA BOG) und einem MH-Modell mit einfacher Rohrleitung. Zudem bilden die CAPEX und OPEX der Verflüssigungsanlagen die Grundwerte der Infrastrukturkosten der beiden Modelle ab. Die Analyseergebnisse sind in Abb. 20 bis Abb. 21 und in Tab. 12 bis Tab. 13 zusammengefasst.

technische Komponenten 2050						
Komponente	MH-Kartuschen	Kryopumpen	VA BOG	VA	Dispenser Trucks	Pipeline in km
Anzahl	9 152	7	5	5	27	4.19

Tab. 12: Anzahl technische Komponenten 2050 Hypothese 2a (Quelle: Eigene Darstellung)

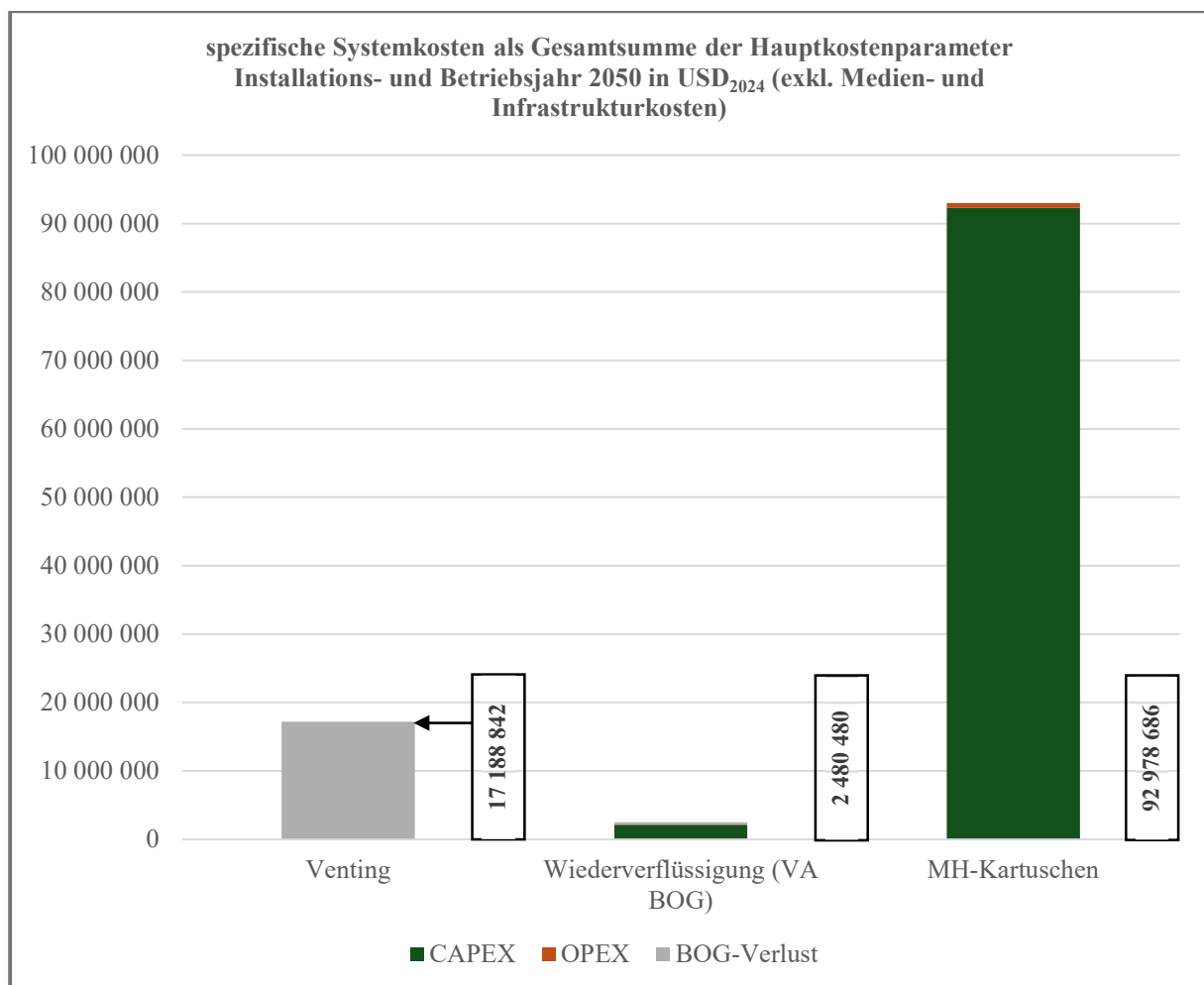


Abb. 20: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 Hypothese 2a (Quelle: Eigene Darstellung)

Medienbedarf 2050					
Medium	t LH <sub>2</sub> pro Jahr	t LH <sub>2</sub> p. Tag	t LH <sub>2</sub> p. Stunde	t He p. Jahr	t H <sub>2</sub> p. Jahr
Bedarf	334 023.36	915.13	38.13	334.02	339 534.75

Tab. 13: Medienbedarf 2050 Hypothese 2a (Quelle: Eigene Darstellung)

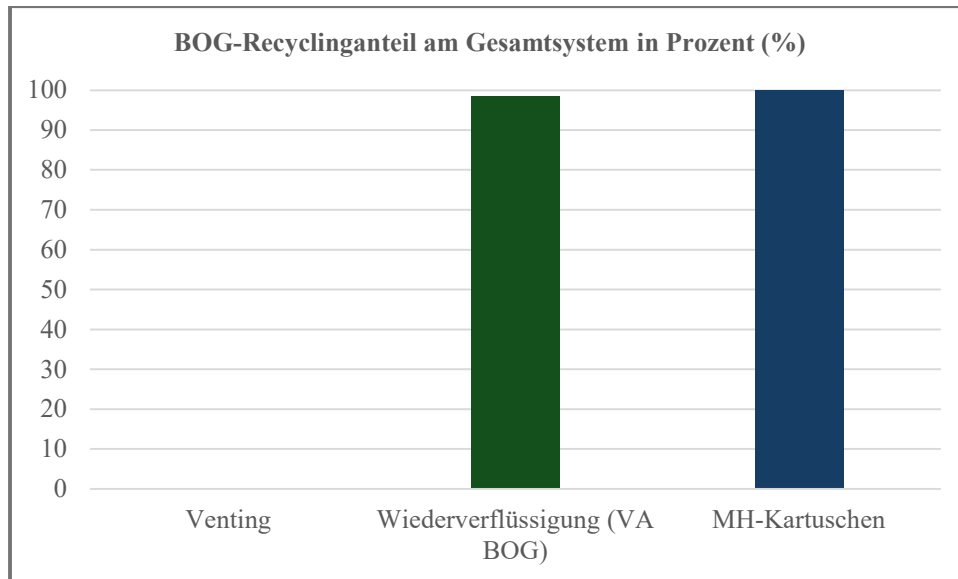


Abb. 21: BOG-Recycling in Prozent Hypothese 2a (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Ergebnisse zeigen, dass im Basisjahr 2050 der Einsatz eines zweifach Rohrleitungssystems die wirtschaftlichste BOG-Recyclingmethode innerhalb eines Pipelinesystems ist. Hierbei weist die Wiederverflüssigung gegenüber dem Venting eine geringere Gesamtsumme innerhalb der Hauptkostenparameter auf. Das MH-Kartuschen-Verfahren besitzt aufgrund der hohen CAPEX keine ökonomischen Vorteile innerhalb des Pipelinesystems. Es wurde hierbei angenommen, dass die CAPEX in Höhe von 2 066 460 000 USD<sub>2024</sub> und OPEX von 85 118 510 USD<sub>2024</sub> für die Verflüssigungsanlagen als Grundinvestition für beide Modelle dienen. Eine ausführliche Kostenaufteilung der technischen Komponenten ist in Anhang 8 dargestellt.

Demnach wird Hypothese 2a verworfen. Zudem weist die Wiederverflüssigung eine BOG-Recyclingrate von 98.35 % auf. Die Verwendung von MH-Kartuschen führt indes zu einer Minderung des Ventings um 100 %. Somit können mithilfe beider Verfahren ökologische Belastungen reduziert werden. Es ist dennoch auf die flexibleren Integrations- und Einsatzmöglichkeiten der MH-Kartuschen hinzuweisen, welche innerhalb eines zweifach Rohrleitungssystems nicht gegeben sind. Demnach sollten auch die Stakeholder-Anforderungen bei der Einführung von BOG-Recyclingverfahren beachtet werden.

### *Hypothese 2b*

Bei der Analyse von Hypothese 2b dienen die Infrastrukturkosten aus Hypothese 2a als Basiswerte. Weiterhin sind im Zeitraum von 2050 bis einschließlich 2060 Gesamtmedienkosten in Höhe von 9 687 782 890 USD<sub>2024</sub> zu erwarten. Innerhalb von Abb. 22 sind die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt. Eine detaillierte Auflistung der Hauptkostenparameter im zeitlichen Verlauf ist in Anhang 9 zu finden.

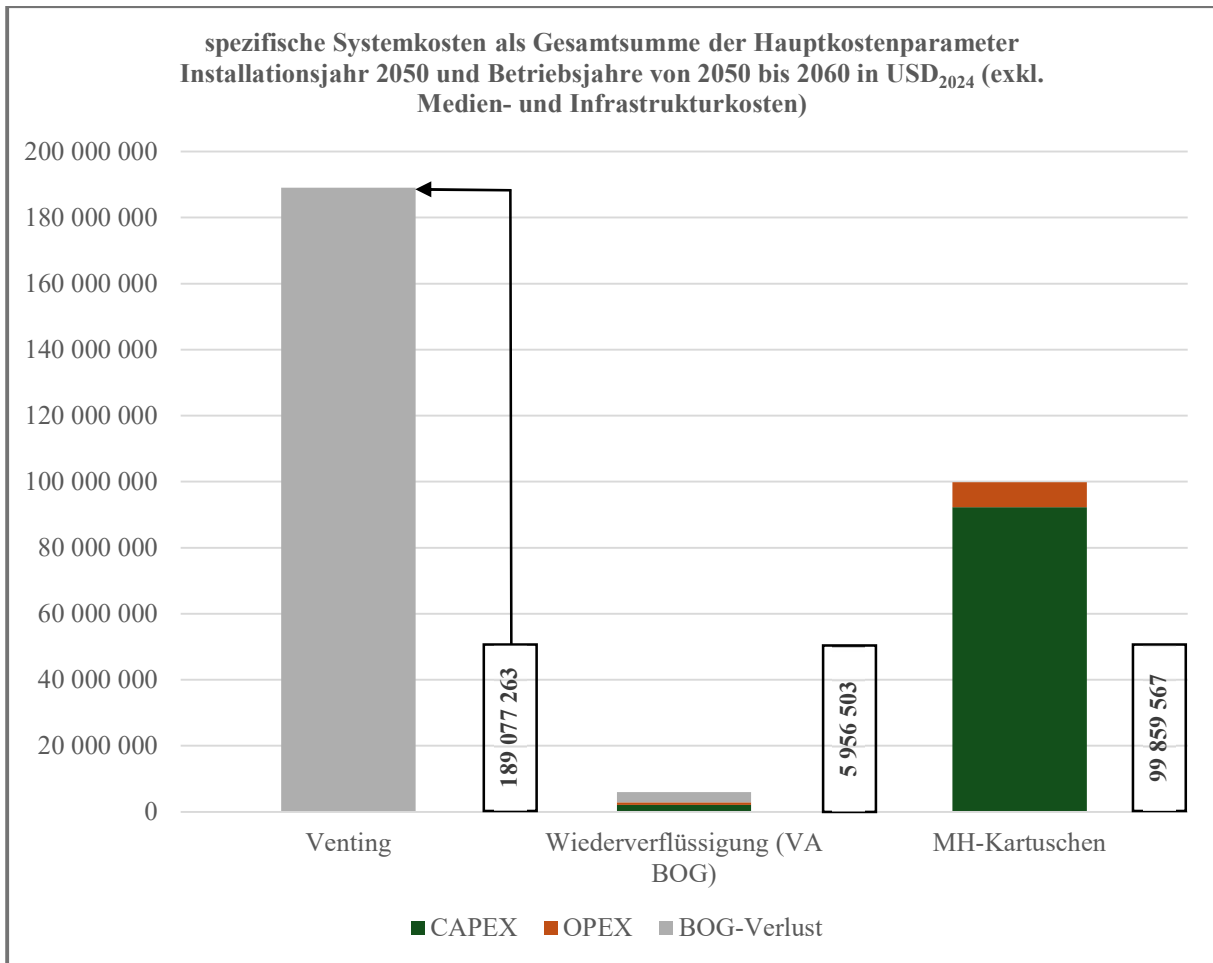


Abb. 22: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 bis 2060 Hypothese 2b (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus der Auswertung geht hervor, dass vergleichend zu den Ergebnissen von Hypothese 2a wiederum die Wiederverflüssigung die wirtschaftlichste BOG-Recyclingmethode im zeitlichen Verlauf bis 2060 ist. Das MH-Kartuschen-Verfahren weist hierbei höhere CAPEX und OPEX gegenüber der GH<sub>2</sub>-Pipeline des Wiederverflüssigungsverfahrens auf. Demnach wird Hypothese 2b verworfen. Es ist zu beachten, dass das Ventingverfahren im zeitlichen Verlauf die größte Gesamtsumme der Hauptkostenparameter besitzt und daher zukünftig nicht zu empfehlen ist.

### 4.1.3 hybrides Flughafenkonzept großer Sektor

#### Hypothese 3a

Die Analyse des hybriden Flughafenkonzeptes erfolgt wiederum auf Basis des Flughafens BER. Demnach betragen die zu erwartenden Medienkosten im Jahr 2050 für H<sub>2</sub> und He eine Höhe von 880 707 535 USD<sub>2024</sub>. Die Infrastrukturkosten stehen innerhalb eines Hybridsystems in Abhängigkeit von der Verteilung der technischen Komponenten, dies ist in Tab. 14 abgebildet.

Kosten in USD <sub>2024</sub>	Venting		Kompression		MH-Kartuschen	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
<b>Infrastruktur</b>	2 233 064 711	2 224 126 695	2 234 590 456	2 225 652 440	2 234 590 456	2 225 652 440

Tab. 14: Infrastrukturkosten des Hybridsystems Hypothese 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

Bei der Auswertung wird der Einsatz eines zweifach Rohrleitungssystems mit Wiederverflüssigungsverfahren als Grundlage angenommen. Eine Ausnahme bildet das Ventingverfahren, bei dem ein einfaches Rohrleitungssystem ohne GH<sub>2</sub>-Rückleitung, siehe Abb. 8, verplant ist. Die Kompression oder die Verwendung von MH-Kartuschen ergänzen das BOG-Recyclingverfahren und sind auf den Anteil des Betankungsfahrzeugsystems beschränkt. Demnach werden die Gesamtsummen der Hauptkostenparameter verglichen, sowie die LH<sub>2</sub>-Systeme im größeren Luftverkehrssektor. Die Ergebnisse sind in Abb. 23 bis Abb. 25, sowie in Tab. 15 dargestellt.

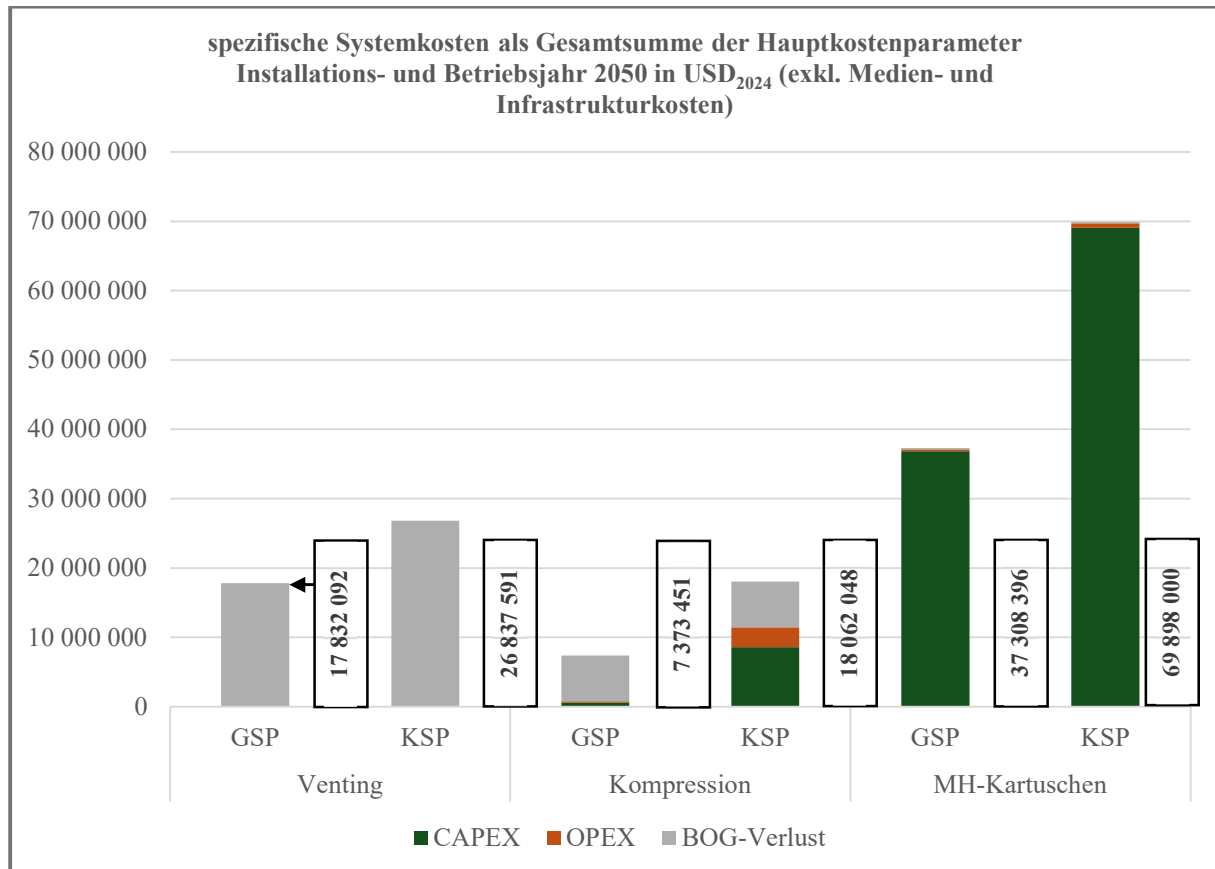


Abb. 23: Spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 Hypothese 3a (Quelle: Eigene Darstellung)

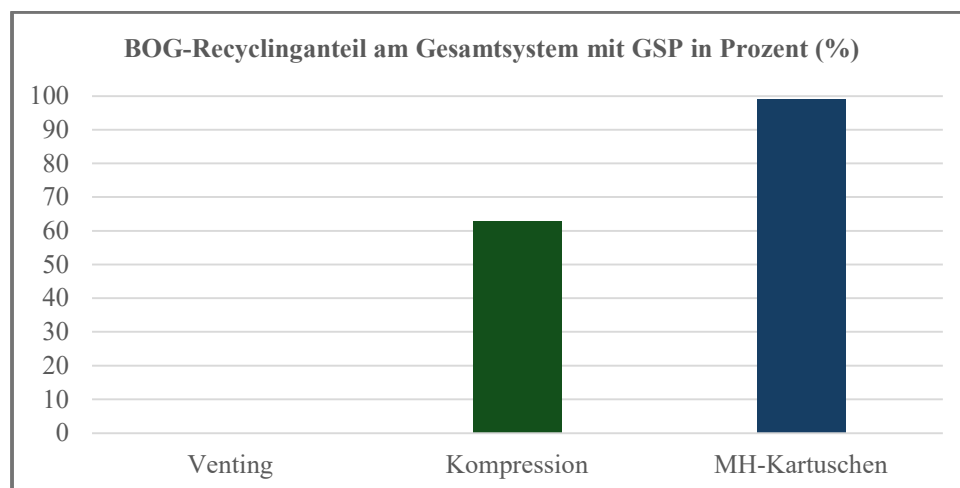


Abb. 24: BOG-Recycling in Prozent Hypothese 3a (Quelle: Eigene Darstellung)

technische Komponenten 2050					
<b>Komponente</b>	MH-Kartuschen	Kryopumpen	VA BOG	VA	Dispenser Trucks
<b>Anzahl</b>	3 654	20	5	5	15
<b>Komponente</b>	Pipeline in km	Tankwagen	GSP	GH <sub>2</sub> -Kompressor	GH <sub>2</sub> -Speichertanks
<b>Anzahl</b>	2.91	16	2	3	123

Tab. 15: Anzahl technische Komponenten 2050 Hypothese 3a (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus der Analyse geht hervor, dass innerhalb des Anteils des Betankungsfahrzeugsystems die Installation von größeren LH<sub>2</sub>-Speichern zu empfehlen ist. Zudem bildet das Ventingverfahren im Basisjahr 2050 die wirtschaftlichste Variante im Umgang mit BOG im Hybridsystem ab. Unter Ausschluss des Ventings ergibt sich die Kompression als ökonomischste BOG-Methode, wobei auf eine geringere Recyclingrate am Gesamtsystem von ca. 63 % hinzuweisen ist. Demnach bildet die Verwendung von MH-Kartuschen, mit einer Recyclingrate von 100 %, die ökologischste Alternative zur Reduzierung der Umweltbelastung durch BOG ab. Es ergibt sich jedoch auch hierbei der Nachteil der hohen CAPEX zur Einführung der MH-Kartuschen innerhalb eines Hybridsystems. Eine detaillierte Aufschlüsselung der CAPEX und OPEX für die technischen Komponenten ist in Anhang 10 zu finden.

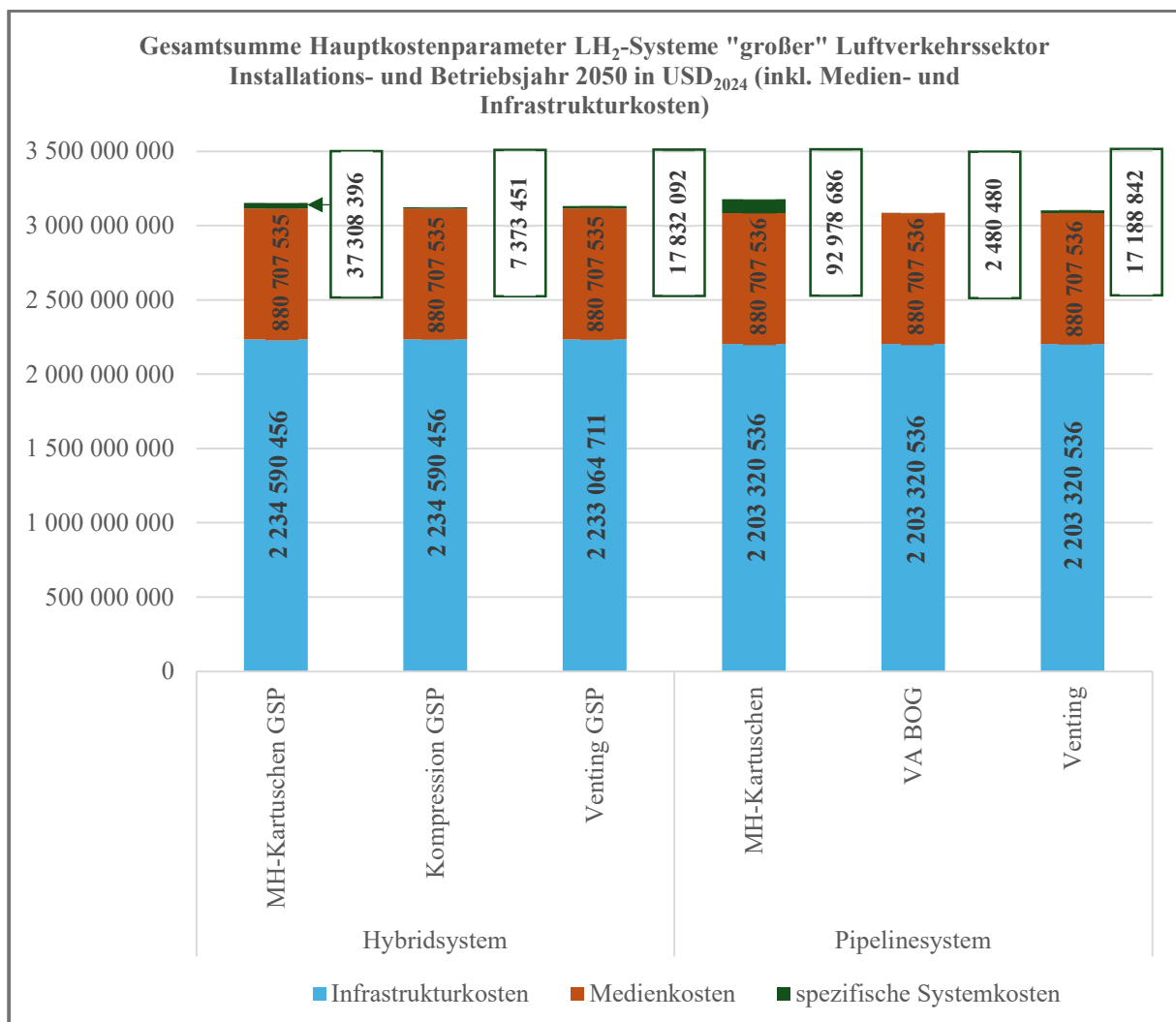


Abb. 25: Gesamtsumme Hauptkostenparameter LH<sub>2</sub>-Systeme 2050 Hypothese 3a (Quelle: Eigene Darstellung)

Der Vergleich der LH<sub>2</sub>-Systeme im Basisjahr 2050 zeigt, dass die Konstruktion eines reinen Pipelinesystems mit Wiederverflüssigung (VA BOG) wirtschaftliche Vorteile gegenüber einem Hybridsystem aufweist. Demnach wird Hypothese 3a verworfen. Es ist dennoch zu beachten, dass die Wahl eines Hybridsystems für einzelne Flughafeninfrastrukturen sinnvoll erscheinen kann. Dies resultiert aus den flexibleren Integrationsmöglichkeiten. Zudem sollte die Kombination von LH<sub>2</sub>-Systemen auch in zukünftigen Studien beachtet werden, da das Potenzial des Hybridsystems durch die technische Weiterentwicklung der einzelnen Systemkomponenten beeinflusst wird.

### Hypothese 3b

Bei der Analyse von Hypothese 3b werden die Grundannahmen und Infrastrukturkosten aus Hypothese 3a verwendet. Zudem ergeben sich im zeitlichen Verlauf bis 2060, Gesamtmedienkosten in Höhe von 9 687 782 890 USD<sub>2024</sub>. Die Gesamtsummen der Hauptkostenparameter des Hybridsystems bis 2060 sind in Abb. 26 dargestellt. Ein Vergleich der LH<sub>2</sub>-Systeme im zeitlichen Verlauf ist in Abb. 27 zu finden. Eine Aufschlüsselung der einzelnen Hauptkostenparameter im zeitlichen Verlauf ist in Anhang 11 angegeben.

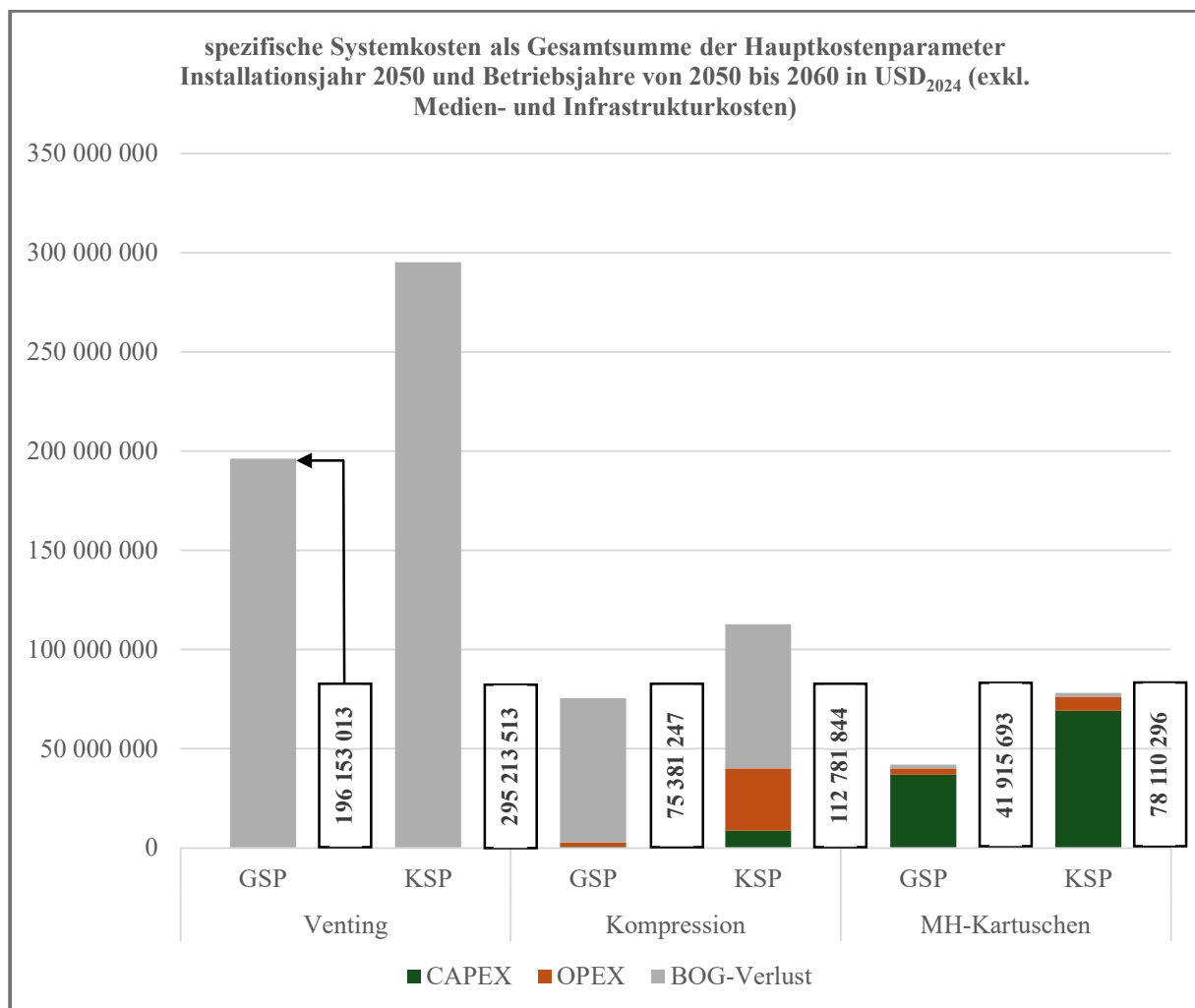


Abb. 26: spezifische Systemkosten der Hauptkostenparameter 2050 bis 2060 Hypothese 3b (Quelle: Eigene Darstellung)

Innerhalb der Analyse des zeitlichen Verlaufs von 2050 bis 2060 ergibt sich das MH-Kartuschen-Verfahren als wirtschaftlichste BOG-Recyclingmethode. Dies lässt sich wiederum an den geringeren OPEX und Ventingkosten gegenüber der Kompression ableiten. Das Ventingverfahren besitzt auch hierbei die größte Gesamtsumme innerhalb der Hauptkostenparameter und sollte somit in der zukünftigen Praxis vermieden werden.

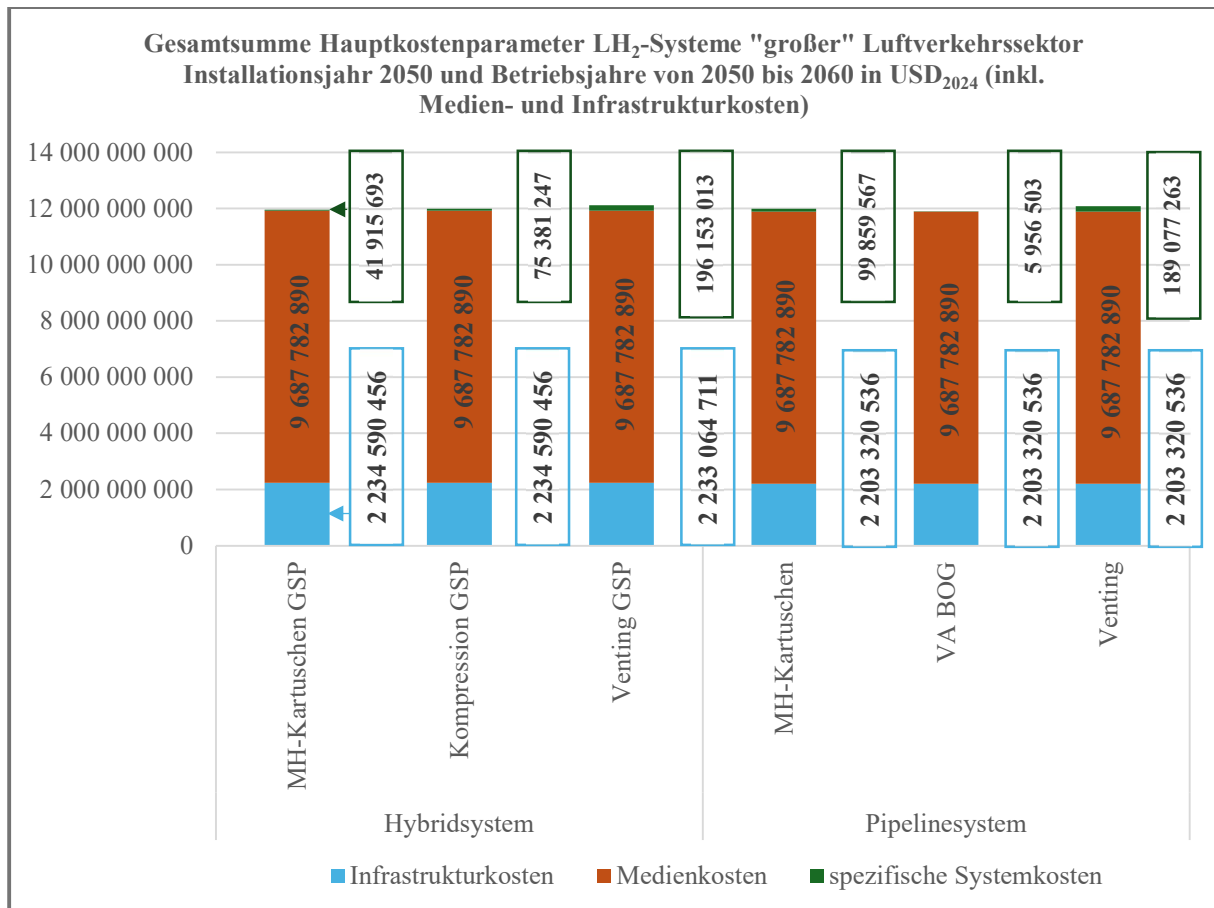


Abb. 27: Gesamtsumme Hauptkostenparameter LH<sub>2</sub>-Systeme 2050 bis 2060 Hypothese 3b (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Konstruktion eines reinen Pipelinesystems im zeitlichen Verlauf bis 2060 wirtschaftliche Vorteile gegenüber einem Hybridsystem aufweist. Innerhalb des Pipelinesystems zeichnet sich dabei die Wiederverflüssigung als ökonomischste BOG-Recyclingmethode ab. Demnach wird Hypothese 3b verworfen.

## 4.2 Technisch-ökonomische Chancen

Bei der Analyse der technisch-ökonomischen Chancen erfolgt die Betrachtung des MH-Kartuschen-Verfahrens innerhalb eines Betankungsfahrzeugsystems des mittleren Sektors und eines Pipelinesystems des größeren Sektors. Diese Eingrenzung resultiert aus den Ergebnissen der vorherigen Auswertung der Hypothesen. Hierbei zeichnet sich innerhalb des konzeptionellen Modells, ein Zusammenhang zwischen dem Hauptkostenparameter „Investitionskosten“, der unabhängigen Variable „MH-Kartuschen-System“ und der abhängigen Variable „ökonomischer Nutzen des Gesamtmarktes 2050“ ab. Zudem erfolgt die Analyse der Stakeholder-Anforderungen durch die Auswertung des QFDs.

## 4.2.1 Sensitivitätsanalysen

Bei den Sensitivitätsanalysen erfolgt die Betrachtung der CAPEX als kritische Hauptkostenparameter des MH-Verfahrens. Diese setzen sich aus den Kosten für die Rohkartuschen und dem Metalllegierungsmaterial zusammen. Hierbei liegt der Analysefokus vorrangig auf den Legierungskosten, da diese stark variieren und somit die Gesamtsumme der CAPEX maßgeblich beeinflussen (Franke et al. 2024, S. 1523). Zudem kommt es zur Variation der angenommenen Prozessdauer des Be- und Entladevorgangs der MH-Kartuschen. Hierbei könnten durch zukünftige Forschung innovative Wechselverfahren für die Kartuschen in den Betankungsfahrzeugen und an den LH<sub>2</sub>-Speichern entwickelt werden. Demnach wäre eine optimistische Reduzierung der Prozessdauer auf eine Stunde annehmbar (Interview DLR 2025).

Ausgehend von den Ergebnissen aus Kapitel 4.1 werden in der Analyse ein Betankungsfahrzeugsystem mit großen LH<sub>2</sub>-Speichern sowie ein Pipelinesystem untersucht. Hierbei dienen wiederum der Flughafen BER und der Flughafen Leipzig/Halle als Datenbasis für die jeweiligen Sektoren. Innerhalb der Auswertung erfolgt die Berechnung der Kostendifferenzen und Differenzanteilen zu den Basisszenarien 1.0 und 2.0. Eine Übersicht der zu betrachtenden Szenarien ist in Tab. 16 dargestellt. In Tab. 17 sind die angenommenen Kostenparameter der Szenarien zu finden. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse des mittleren Sektors ist in Abb. 28, sowie für den größeren Sektor in Abb. 29 grafisch veranschaulicht. Eine Gesamtkostenübersicht zu den Sensitivitätsanalysen ist in Anhang 12 angegeben.

Szenarien	Szenario 1.0	Szenario 1.1	Szenario 1.2	Szenario 1.3	Szenario 2.0	Szenario 2.1	Szenario 2.2	Szenario 2.3
<b>Sektor</b>								
<b>mittlerer</b>	x	x	x	x				
<b>großer</b>					x	x	x	x
<b>LH<sub>2</sub>-Systeme</b>								
<b>Betankungsfahrzeug</b>	x	x	x	x				
<b>Pipeline</b>					x	x	x	x
<b>Legierungskosten</b>								
<b>Mittelwert</b>	x			x	x			x
<b>optimistische</b>		x				x		
<b>pessimistische</b>			x				x	
<b>Prozessdauer</b>								
<b>8 Stunden</b>	x	x	x		x	x	x	
<b>1 Stunde</b>				x				x

Tab. 16: Szenarien der Sensitivitätsanalysen (Quelle: Eigene Darstellung)

Kosten in USD <sub>2024</sub> /tH <sub>2</sub>	Mittelwert	optimistische	pessimistische
<b>Rohkartusche</b>	1 543 500	1 543 500	1 543 500
<b>Legierung</b>	3 498 600	1 543 500	5 042 100

Tab. 17: Kostenparameter der Szenarien (Quelle: Franke et al. 2024, S. 1523)

### Sensitivitätsanalyse mittlerer Sektor

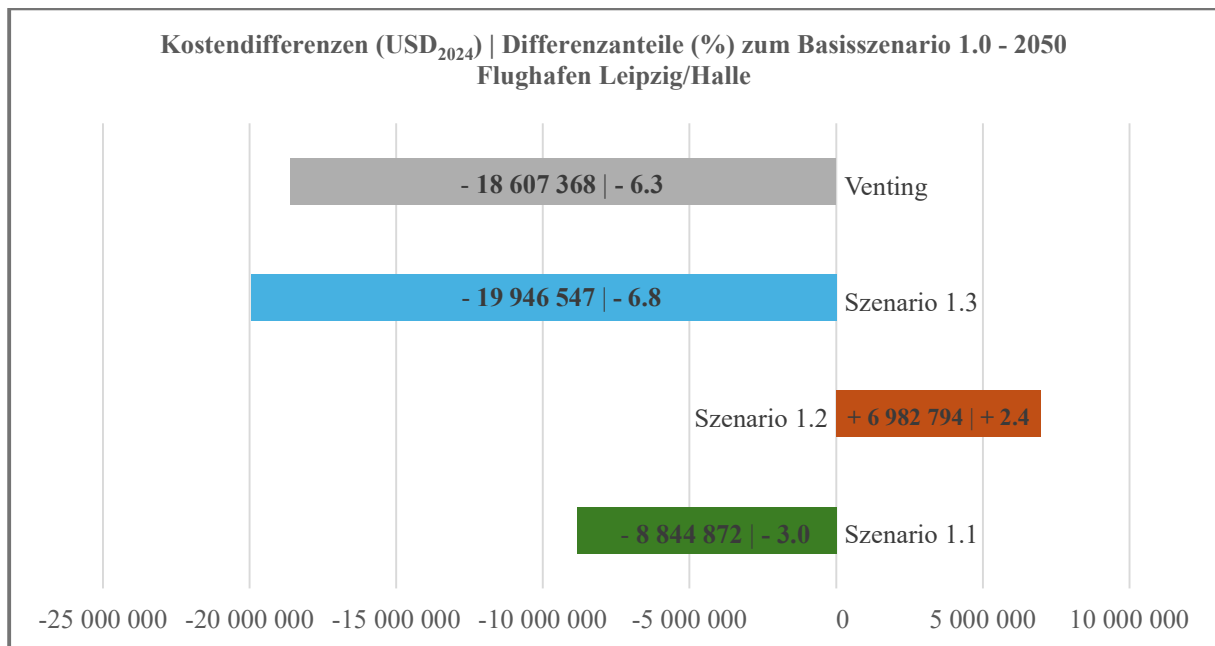


Abb. 28: Sensitivitätsanalyse mittlerer Sektor (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Analyseergebnisse zeigen, dass unter Berücksichtigung von optimistischen Legierungskosten das MH-Verfahren weiterhin wirtschaftliche Nachteile gegenüber dem Venting aufweist. Im Gegensatz dazu, führt die Reduzierung der Prozessdauer auf eine Stunde zu einem ökonomischen Vorteil des MH-Kartuschen-Verfahrens. Demnach sollte der zukünftige Forschungsschwerpunkt auf der Optimierung des Be- und Entladevorganges, sowie auf innovativen Kartuschen-Wechselverfahren liegen. Dadurch könnte die benötigte Kartuschenanzahl verringert werden und somit zu einer Minderung der CAPEX beitragen.

### Sensitivitätsanalyse großer Sektor

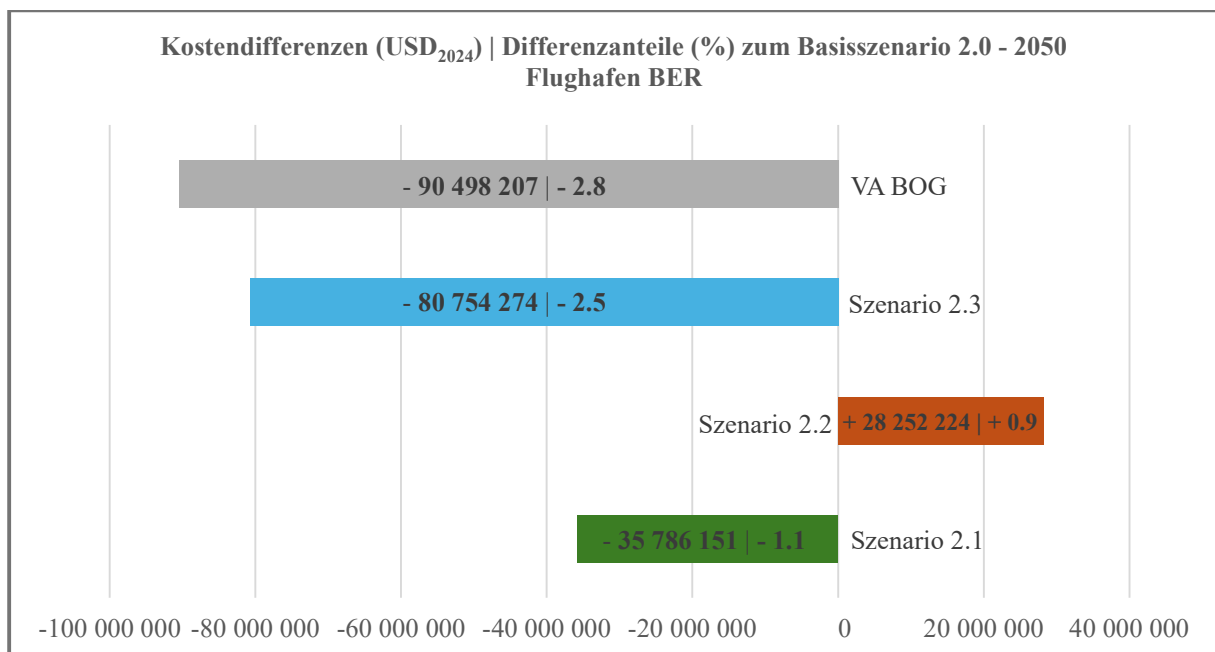


Abb. 29: Sensitivitätsanalyse großer Sektor (Quelle: Eigene Darstellung)

Unter der Annahme von optimistischen Legierungskosten des MH-Kartuschen-Verfahrens weist die Wiederverflüssigung dennoch ökonomische Vorteile auf. Zudem ergibt sich unter Berücksichtigung einer optimistischen Prozessdauer ein wirtschaftlicher Nachteil des MH-Kartuschen-Verfahrens innerhalb des größeren Luftverkehrssektors gegenüber dem Wiederverflüssigungsverfahren.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen geht hervor, dass die Annahme von optimistischen Legierungskosten für beide Luftverkehrssektoren nicht ausreichend ist. Innerhalb des mittleren Sektors ergeben sich, unter der Annahme einer optimistischen Prozessdauer, sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Chancen für das MH-Kartuschen-Verfahren. Hierbei wird der Break-Even-Point bei einer Prozessdauer von einer Stunde und 28 Minuten erreicht. Es bedarf somit weiterer technischer Entwicklungen, um dieses Potenzial des MH-Kartuschen-Verfahrens in der Praxis umsetzen zu können. Es ist demnach in zukünftigen Studien zu untersuchen, inwieweit eine solche Verminderung der Prozessdauer möglich wäre. Zudem ergeben sich für das MH-Kartuschen-Verfahren, aus der Auswertung der Sensitivitätsanalysen, größere Markteintrittschancen im mittleren Luftverkehrssektor.

## **4.2.2 Gesamtmarktprognose 2050**

### *Marktpotenzial und Markteintrittschancen*

Innerhalb des größeren Sektors ergab sich die Wiederverflüssigung als effizienteste BOG-Recyclingmethode. Somit werden dem MH-Kartuschen-Verfahren erschwerte Markteintrittschancen zugeschrieben. Hierbei ist zu beachten, dass der Platzbedarf und die Integrationsmöglichkeiten am jeweiligen Flughafenstandort zu einer positiven Präferenz für die MH-Kartuschen beitragen können. Innerhalb des mittleren Sektors steht dem MH-Kartuschen-Verfahren die Kompression gegenüber, wobei mit einer geringeren BOG-Recyclingrate für das Gesamtsystem zu rechnen ist. Unter Berücksichtigung der ökologischen Aspekte des Recyclings und der effizienteren Betriebskosten im zeitlichen Verlauf wird daher die Verwendung von MH-Kartuschen empfohlen. Demnach erstreckt sich das Marktpotenzial für den Einsatz der MH-Kartuschen vorrangig über den mittleren Luftverkehrssektor.

### *Prognose 2050*

Bei der Gesamtmarktprognose werden die 13 deutschen Flughäfen des mittleren Luftverkehrssektors im Jahr 2024 betrachtet (Statista 2025i). Hierbei erfolgt die Berechnung der kumulierten Flugbewegungen sowie eine Prognose der Gesamtkosten für die Einführung des MH-Kartuschen-Verfahrens im Jahr 2050. Die Ergebnisse der Gesamtmarktprognose stellen demnach wichtige Informationen für Forschungsinstitute dar, um eine Abschätzung der Marktnachfrage durchführen zu können. Es ist darauf hinzuweisen, dass innerhalb der Analyse eine vorhandene LH<sub>2</sub>-Infrastruktur an den Flughäfen angenommen wird. Zudem erfolgt die Annahme, dass Flughafengesellschaften sich unabhängig von der Wirtschaftlichkeit für das MH-Kartuschen-Verfahren entscheiden. Die Gesamtkosten werden unter Berücksichtigung des Szenarios 1.0 berechnet. In Tab. 18 sind die Ergebnisse der Prognose dargestellt. Eine Gesamtübersicht zu den kumulierten Flugbewegungen ist in Anhang 13 zu finden.

Flughafen	Flugbewegungen (exkl. GRF)		2050		MH-Kartuschen (in USD <sub>2024</sub> )		
	2019	2050	BOG- Entstehung in t H <sub>2</sub>	Ventingkosten in USD <sub>2024</sub>	CAPEX	OPEX	Gesamt
Hamburg	140 753	180 191	3 330	8 567 930	44 612 501	342 984	44 955 484
Köln	130 869	167 538	3 096	7 966 270	41 486 399	318 898	41 805 297
Stuttgart	127 195	162 835	3 009	7 742 626	40 316 632	309 946	40 626 577
Hannover	62 850	80 460	1 487	3 825 811	19 926 379	153 151	20 079 531
Nürnberg	42 669	54 625	1 009	2 597 351	13 532 996	103 975	13 636 971
Dortmund	26 948	34 499	638	1 640 381	8 551 402	65 666	8 617 068
Leipzig	71 927	92 081	1 702	4 378 347	22 810 460	175 270	22 985 730
Bremen	29 534	37 809	699	1 797 796	9 378 306	71 968	9 450 274
Münster	22 862	29 268	541	1 391 658	7 260 624	55 710	7 316 334
<b>Gesamt</b>	<b>655 607</b>	<b>839 306</b>	<b>15 510</b>	<b>39 908 172</b>	<b>207 774 857</b>	<b>1 597 568</b>	<b>209 473 266</b>

Tab. 18: Gesamtmarktprognose 2050 für Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung; Referenzen zu Flugbewegungen: Statista 2025g, Statista 2025p, Statista 2025o, Statista 2025n, Statista 2025q, ODD 2025, Statista 2025e, Statista 2025c, Statista 2025f, Statista 2025k)

Unter Berücksichtigung des Ausschlusses von vier Flughäfen aufgrund unzugänglicher Daten ergibt sich für den Gesamtmarkt von 2050 eine Kostensumme von ca. 210 000 000 USD<sub>2024</sub>. Hierdurch würden Ventingkosten in Höhe von ca. 40 000 000 USD<sub>2024</sub> und eine weitere Umweltbelastung durch 15 500 t verdampften H<sub>2</sub> vermieden. Die Reduzierung der Ventingkosten stellt somit eine Anreizwirkung zur Einführung kryogener Kraftstoffe für Fluggesellschaften dar. Demnach besteht zukünftig ein vorrangiges Interesse an ökologischen und ökonomischen BOG-Recyclingverfahren. Die Erkenntnisse der Gesamtmarktprognose bestätigen somit den weiteren Forschungsbedarf in Bezug auf das MH-Kartuschen-Verfahren.

### 4.2.3 QFD-Analyse

Bei der Auswertung der Interviews werden sowohl die Bewertung der Prioritäteneinschätzungen der Stakeholder als auch die Angaben zur Entwicklung einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur beachtet.

Das Online-Interview fand am 23.10.2025 von 10.00 bis 10.35 Uhr in Form einer Video-Besprechung statt. Hierbei wurde der Flughafen BER vertreten durch die Nachhaltigkeitsmanager Herr Dr. Arne Diedrich und Herr Anton Förtsch. Das Interview-Protokoll ist in Anhang 14 zu finden.

Des Weiteren erfolgte das Experten-Interview zum Thema QFD mit dem DLR, vertreten durch Herrn Florian Franke, am 18.12.2025 in der Zeit von 10.30 bis 11.30 Uhr. Das Meeting fand hierbei in einem Online-Format statt. Es ist weiterhin zu beachten, dass innerhalb des Zeitraumes vom 04.11.2025 bis 31.01.2026 ein inhaltlicher Austausch in einem zweiwöchigen Rhythmus mit Herrn Florian Franke durchgeführt wurde. Das Protokoll zum Experten-Interview, sowie Hinweise zur Bewertung des QFDs sind in Anhang 15 zu finden.

Es ist anzumerken, dass der BER zum aktuellen Zeitpunkt keine zukünftige Einführung einer wasserstoffbetriebenen Infrastruktur plant. Diese Entscheidung resultiert aus internen Studien, wobei die Herausforderung der Zulieferung von grünem Flüssigwasserstoff betont wurde. Des Weiteren wird aufgrund des hohen Energiebedarfes auch eine eigenständige Verflüssigungsanlage am Flughafenstandort vorerst ausgeschlossen. Zudem verwiesen die Vertreter des BERs auf den benötigten Platzbedarf, die hohen Umstrukturierungskosten und die Ausfallzeit während der Baumaßnahmen. Demzufolge plant der BER eine zukünftige Nutzung der bestehenden Kraftstoffinfrastruktur unter Verwendung von SAF betriebenen Flugzeugen. Abschließend wurde hervorgehoben, dass der BER an weiteren Studienergebnissen zur Einführung von Wasserstoff als Treibstoff interessiert sei (Interview BER 2025).

### Auswertung QFD

Bei der Auswertung des QFDs werden sowohl das QAR aus dem Interview mit dem BER als auch das QAR von Herrn Florian Franke berücksichtigt. Die sich aus der Analyse ergebenden priorisierten Stakeholder-Anforderungen sind in Tab. 19 dargestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse des QFDs in Tab. 20 zusammengefasst. Das ausgefüllte „House of Quality“ ist in Anhang 16 zu finden.

Stakeholder	Systemanforderungen						
	Kosten-effizienz	Sicherheit	Integrations-möglichkeiten	Leistung	BOG-Einsatz-möglichkeiten	Klima-freundlichkeit	Bedienungs-freundlichkeit
<b>relativer Anteil</b>	0.17	0.17	0.10	0.12	0.07	0.18	0.19

Tab. 19: priorisierte Stakeholder-Anforderungen BER (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Systemanforderungen „Bedienungsfreundlichkeit“, „Klimafreundlichkeit“, „Kosteneffizienz“ und „Sicherheit“ eine positive Präferenz besteht. Demnach sind diese Schwerpunkte mit einer erhöhten Priorität in der zukünftigen Planung einer wasserstoffbetriebenen Luftfahrt zu beachten, um eine Anreizwirkung bei den Stakeholdern erzielen zu können.

technische Komponenten	LH <sub>2</sub> -Betankungssysteme			BOG-Recyclingverfahren			
	Betankungsfahrzeug	Pipeline	Hybrid	Wieder-verflüssigung	Kompression	MH-Kartuschen	Venting
<b>relativer Anteil</b>	0.15	0.18	0.14	0.17	0.13	0.16	0.07

Tab. 20: priorisierte technische Komponenten BER (Quelle: Eigene Darstellung)

Innerhalb der LH<sub>2</sub>-Betankungssysteme zeichnet sich eine erhöhte Priorität in Bezug auf die Verwendung von Pipelines ab. Dies resultiert aus den wirtschaftlichen Vorteilen eines reinen Pipelinesystems innerhalb des größeren Sektors, sowie der potenziellen Möglichkeit zur zukünftigen Installation in unteren Sektoren. Weiterhin wird die Verwendung von Betankungsfahrzeugen im mittleren Sektor durch die Analyseergebnisse bekräftigt. Innerhalb der BOG-Recyclingverfahren ergibt sich eine positive Präferenz für die Wiederverflüssigung im größeren Sektor und eine erhöhte Priorität des MH-Kartuschen-Verfahrens im mittleren Sektor.

Zudem stellte sich in der Analyse eine positive Wechselwirkung in Bezug auf ein Hybridsystem heraus. Des Weiteren zeichneten sich das MH-Kartuschen-Verfahren innerhalb eines Betankungsfahrzeugsystems sowie die Wiederverflüssigung in einem Pipelinesystem als vorteilhaft ab. Demnach ergibt sich eine positive Präferenz der Stakeholder für die weitere Erforschung des MH-Kartuschen-Verfahrens und der Wiederverflüssigung.

## **5. Diskussion**

### **5.1 Zusammenfassung**

Die Substitution von fossilen Kraftstoffen durch grünen LH<sub>2</sub> in der Luftfahrt bedingt weitere technische Innovationen. Zudem ist davon auszugehen, dass in der Anfangsphase nicht alle Flugzeugtypen mit kryogenen Kraftstoffen betrieben werden können. Demnach wurden Großraumflugzeuge wie auch der kleinere Luftverkehrssektor aufgrund einer geringeren Marktpriorität von der Analyse ausgeschlossen. Für den mittleren Sektor kam es zur Erstellung eines Pilotmodells auf Basis des Flughafens Leipzig/Halle. Innerhalb dieses Konzeptes stellte sich das Ventingverfahren als wirtschaftlichste Methode zum Umgang mit BOG innerhalb eines Betankungsfahrzeugsystems des Basisjahres 2050 heraus. In der Analyse des zeitlichen Verlaufs von 2050 bis 2060 ergaben sich jedoch ökonomische Vorteile des MH-Kartuschen-Verfahrens. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass ein MH-Kartuschen-System eine höhere BOG-Recyclingrate gegenüber der Kompression aufweist. Demnach ist unter Berücksichtigung der ökologischen und zeitlichen Aspekte die Verwendung von MH-Kartuschen im mittleren Sektor zu bevorzugen. Es ist dennoch auf die ökonomischen Nachteile im Jahr 2050, aus dem Mediatorenvergleich aufgrund der hohen CAPEX zu anderen BOG-Recyclingverfahren, hinzuweisen.

Innerhalb des größeren Luftverkehrssektors ergab sich die Wiederverflüssigung unter Verwendung eines zweifach Rohrleitungssystems als vielversprechendste BOG-Recyclingmethode im Basisjahr 2050. Auch innerhalb des zeitlichen Verlaufs von 2050 bis 2060 stellt die Wiederverflüssigung das ökonomischste BOG-Recyclingverfahren dar. Hierbei wurden die Daten des Flughafens BER zur Analyse verwendet. Für das MH-Kartuschen-Verfahren zeichnen sich vorrangig die hohen CAPEX als negatives Argument gegenüber der GH<sub>2</sub>-Pipeline des Wiederverflüssigungsverfahrens ab. Zudem weisen beide Verfahren eine erhöhte BOG-Recyclingrate auf, sodass ökologische Risiken verringert werden können. Des Weiteren besitzt das Ventingverfahren innerhalb der zeitlichen Analyse die größten Gesamtkosten und ist demnach zukünftig nicht zu empfehlen.

Aus den Moderatorergebnissen geht hervor, dass die Installation eines reinen Pipelinesystems im Vergleich zu einem Hybridsystem größere ökonomische Chancen besitzt. Diese Erkenntnis konnte sowohl für das Basisjahr 2050 als auch für den zeitlichen Verlauf von 2050 bis 2060 festgestellt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit eines Hybridsystems stark von den Hauptkostenparametern der technischen Komponenten beeinflusst wird. Zudem weist das Hybridsystem flexiblere Integrationsmöglichkeiten in die bestehende Flughafeninfrastruktur auf. Demnach hängt die Wahl des LH<sub>2</sub>-Systems nicht

ausschließlich von der ökonomischen Dimension ab, sondern wird auch durch die Anforderungen der einzelnen Flughafengesellschaften bestimmt.

Die Analyse der Stakeholder-Anforderungen am Flughafen BER ergab, dass die Bedienungs- und Klimafreundlichkeit, Kosteneffizienz, sowie die Sicherheit auf dem Flughafengelände als entscheidende Faktoren für die Einführung alternativer Kraftstoffsysteme gelten. Der BER plant, unabhängig von den Annahmen dieser Arbeit, die zukünftige Verwendung von SAF als Treibstoff, um eine kostenintensive Umstrukturierung des Flughafenstandortes zu vermeiden. Innerhalb der QFD-Auswertung zeichnet sich dahingegen die Weiterentwicklung des MH-Kartuschen-Konzeptes und des Wiederverflüssigungsverfahrens als Lösung der Vereinbarkeit von Stakeholder-Anforderungen und technischen Komponenten ab.

Aus den Sensitivitätsanalysen resultiert ein weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf die Reduzierung der CAPEX des MH-Kartuschen-Konzeptes. Hierbei konnte das MH-Kartuschen-Verfahren unter Annahme von optimistischen Legierungskosten keine wirtschaftlichen Vorteile gegenüber der Kompression im mittleren Luftverkehrssektor aufweisen. Eine mögliche Alternative zur Minderung der CAPEX stellt die Optimierung der Prozessdauer dar. Dadurch könnte die benötigte Kartuschenanzahl gesenkt werden und somit zu einer positiven Präferenz des MH-Kartuschen-Verfahrens im mittleren Sektor beitragen. Für den größeren Sektor ist unter Berücksichtigung einer optimistischen Prozessdauer dennoch das Wiederverflüssigungsverfahren zu empfehlen.

Die Auswertung der Gesamtmarktprognose von 2050 bestätigt die Relevanz des MH-Kartuschen-Verfahrens in der Luftfahrtforschung. Hierbei ergab sich für den mittleren Sektor eine BOG-Entstehung von 15 500 t H<sub>2</sub>, welche zu Ventingkosten in Höhe von 40 000 000 USD<sub>2024</sub> führt. Demnach könnten diese ökonomisch-ökologischen Nachteile durch die Erforschung von innovativen Kartuschen-Wechselverfahren und der Optimierung des Be- und Entladevorganges reduziert werden.

Ergänzend zu der bestehenden Literatur, ergibt sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit das Hybridsystem als ein weiteres Betankungskonzept für den größeren Luftverkehrssektor. Des Weiteren wurden mit den durchgeführten Analysen die Herausforderungen bei der Einführung des MH-Kartuschen-Verfahrens innerhalb des mittleren Sektors identifiziert. Demnach konnte die bestehende Forschungslücke in Bezug auf die ökonomischen Chancen des MH-Kartuschen-Verfahrens gegenüber ausgewählten BOG-Recyclingverfahren geschlossen werden. Somit stellt die Verwendung von MH-Kartuschen im Basisjahr 2050 nicht die wirtschaftlichste Alternative dar. Jedoch bildet der Einsatz von MH-Kartuschen im zeitlichen Verlauf von 2050 bis 2060 das vielversprechendste BOG-Recyclingverfahren im mittleren Luftverkehrssektor ab. Zudem ist die Möglichkeit von technisch-ökonomischen Innovationen innerhalb der nächsten 24 Jahre zu beachten, wodurch die flexiblen, ökologischen und langfristigen Vorteile des MH-Kartuschen-Verfahrens ergänzt werden könnten.

## **5.2 Fazit**

Innerhalb dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sowohl positive Argumente als auch negative Anreizwirkungen zur Einführung von MH-Kartuschen in der zukünftigen Luftfahrt

gegeben sind. Aufgrund des großen Zeithorizontes der Marktforschungsstudie sowie der geringeren Flugdatenverfügbarkeit für das Jahr 2050 erfolgte die Betrachtung von prognostischen Konzepten. Demnach ist eine eingeschränkte Aussagekraft der Ergebnisse zu beachten. Bei der Gesamtmarktanalyse erfolgte die ausschließliche Betrachtung von deutschen Flughafenstandorten. Zudem wurde die Flughafeninfrastruktur des Jahres 2025 als Konstruktionsbasis angenommen. Somit konnten die Kosten für zukünftige Flächenerschließungen oder Gebäudeerweiterungen, welche zur Bewältigung des wachsenden PAX notwendig sind, nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren ist die Analyse des zeitlichen Verlaufs von 2050 bis 2060 auf die Grundwerte der Hauptkostenparameter des Basisjahres 2050 limitiert. Zeitlich positive Auswirkungen aufgrund von Annuitätenzahlungsfaktoren oder Abschreibungsspannen wurden somit von der Wirtschaftlichkeitsanalyse ausgeschlossen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Konsequenzen der Kraftstoffsubstitution auf den betrieblichen Ablauf am Flughafen vernachlässigt wurden. Somit könnten neue Sicherheitsnormen oder weltpolitische Veränderungen die Planung von wasserstoffbetriebenen Flughafenkonzepten maßgeblich beeinflussen.

Es sind somit zukünftige Studien notwendig, um eine genaue Abschätzung der technisch-ökonomischen Chancen für das MH-Kartuschen-Verfahren durchführen zu können. Hierbei sollte ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit der Fokus auf innovative Kartuschen-Wechselverfahren gelegt werden. Demnach würde die technische Erforschung in Bezug auf die Reduzierung der Prozessdauer des Be- und Entladevorgangs gegenüber weiteren Marktforschungsstudien im Vordergrund stehen. Dennoch sind Marktanalysen nicht ausschließlich zu vernachlässigen, da die Bedürfnisse der Stakeholder in die Entwicklung von neuen BOG-Recyclingverfahren miteinzubeziehen sind. Es ist zu empfehlen, die mit dem Flughafen BER durchgeführte QFD-Analyse dieser Arbeit auch mit weiteren Flughafengesellschaften in Deutschland zu absolvieren. Für eine umfangreiche Gesamtnachfrageprognose wäre eine globale Marktforschungsstudie zu den BOG-Verlusten im zeitlichen Verlauf denkbar. Dabei sollte sich nicht nur auf die Luftfahrt beschränkt werden, sondern auch andere Bereiche der Verkehrsinfrastruktur wie z.B. die Seeschifffahrt miteinbezogen werden.

Im Jahr 2050 ergaben sich Ventingkosten in Höhe von ca. 17 200 000 USD<sub>2024</sub> für den Flughafen BER und eine Summe von ca. 4 400 000 USD<sub>2024</sub> für den Flughafen Leipzig/Halle. Demnach ist ein erhöhtes Interesse der Fluggesellschaften an geeigneten BOG-Recyclingstrategien zu prognostizieren. Weiterhin werden in Zukunft auch LH<sub>2</sub>-Versorgungsunternehmen von der BOG-Recyclingforschung profitieren. Zum einen könnten diese Unternehmen ihre eigenen Verlustkosten bei dem LH<sub>2</sub>-Transport zu den Kunden reduzieren. Zum anderen ergibt sich ein indirekt positiver Effekt auf die LH<sub>2</sub>-Nachfrage durch die Einführung von BOG-Recyclingverfahren. Demzufolge sollten Flughafengesellschaften, Forschungsinstitute wie das DLR und LH<sub>2</sub>-Versorgungsunternehmen zukünftige Kooperationen anstreben, um ein optimales LH<sub>2</sub>-Gesamtversorgungssystem für die Luftfahrt entwickeln zu können. Ein weiterer Einfluss durch weltpolitische und gesellschaftliche Entwicklungen in den nächsten 24 Jahren ist dabei nicht auszuschließen.

## Literaturverzeichnis

- Abel, J.; Allroggen, F. (2023): Global Costs and Infrastructure Requirements for LH2 Airport Refueling, in: American Institute of Aeronautics and Astronautics Aviation 2023 Forum, 2023, 3406, 1-16
- Amica, G.; Arneodo Larochette, P.; Gennari, F.C. (2020): Light metal hydride-based hydrogen storage system: Economic assessment in Argentina, in: International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45, 18789-18801
- Bao, J.; Yuan, T.; Zhang, L.; Zhang, N.; Zhang, X. (2019): Comparative study of three boil-off gas treatment schemes: From an economic perspective, in: Energy Conversion and Management, 2019, 201, 1-15
- Baroutaji, A.; Wilberforce, T.; Ramadan, M.; Olabi, A. G. (2019): Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 106, 31-40
- BER (2025): Online-Interview mit dem Flughafen BER vertreten durch Dr. Arne Diedrich und Anton Förtsch, Thema: Stakeholder-Anforderungen für BOG-Recyclingsysteme, am 23.10.2025
- Berlin-Airport (2025a): Hinweise zum Nachtflug, in: BER Flughafen Berlin Brandenburg, URL: <https://corporate.berlin-airport.de/de/nachhaltigkeit/umwelt/fluglaerm/hinweise-zum-nachtflug.html>, 07.11.2025
- Berlin-Airport (2025b): Fluggastbrücken, in: BER Flughafen Berlin Brandenburg, URL: <https://werbung.berlin-airport.de/de/homepage/advertising/specials0/fluggastbruecken.html>, 18.12.2025
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle – BAFA (2025): Energie, Merkblatt stromkostenintensive Unternehmen 2024, in: BAFA, URL: [https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/bar\\_merkblatt\\_unternehmen\\_2024.html](https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/bar_merkblatt_unternehmen_2024.html), 11.11.2025
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung – BMZ (2025): ODA-Zahlen, Offizieller DAC-Umrechnungskurs, in: BMZ, URL: <https://www.bmz.de/de/ministerium/zahlen-fakten/oda-zahlen/hintergrund/dac-umrechnungskurs-35300>, 18.12.2025
- Brewer, D. G. (1991): Hydrogen Aircraft Technology, 1.Auflage, New York, DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203751480>
- Brewer, D. G. (1976): LH2 AIRPORT REQUIREMENTS STUDY, Lockheed-California Company, California, DOI: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770003090>
- Cardella, U.; Decker, L.; Klein, H. (2017): Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction, in: International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42, 13329-13338

- Chang, C. L. (2006): Application of Quality Function Deployment Launches to Enhancing Nursing Home Service Quality, in: Total Quality Management, 2006, 17, 3, 287-302
- CoinNews Media Group Company (2025): US Inflation Calculator, in: CoinNews Media Group Company, URL: <https://www.usinflationcalculator.com/>, 18.12.2025
- Carson, L. K.; Davis, G. W.; Versaw, E. F.; Cunnington Jr., G. R.; Daniels, E. J. (1980): Study of Methane Fuel For Subsonic Transport Aircraft, Lockheed-California Company, California, DOI: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19800024025>
- Destatis (2025): KORREKTUR: 7,7 % mehr Fluggäste im Jahr 2024, in: Destatis Statistisches Bundesamt, URL: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/01/PD25\\_042\\_464.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/01/PD25_042_464.html), 18.12.2025
- DLR (2025): Interview am DLR Standort Cottbus vertreten durch Florian Franke, Thema: MH-Kartuschen-Systeme und QFD im Flughafenbereich, am 18.12.2025
- Energy Transition Commission (2021): Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy, in: The Making Mission Possible Series, 2021 Vol. 1.2, 1-92
- Falgowski, A. (2022): In Leuna entsteht die größte PEM-Elektrolyse-Anlage der Welt, in: IMG Sachsen-Anhalt, URL: <https://www.investieren-in-sachsen-anhalt.de/report-invest/in-leuna-entsteht-die-groesste-pem-elektrolyse-anlage-der-welt>, 07.11.2025
- Flughafenverband ADV (2025): Kategorisierung, in: Flughafenverband ADV, URL: <https://www.adv.aero/randomizer/kategorien/>, 18.12.2025
- Franke, F.; Kazula, S.; Enghardt, L. (2024): Elaboration and outlook for metal hydride applications in future hydrogen-powered aviation, in: The Aeronautical Journal, 2024, 128, 1501-1531
- Franke, F.; Kazula, S. (2025): Conceptual Design of a Metal Hydride System for the Recovery of Gaseous Hydrogen Boil-Off Losses from Liquid Hydrogen Tanks, in: Engineering Proceedings, 2025, 90, 17, 1-9
- Fujitani, S.; Nishimura, K.; Sato, K.; Yonezu, I.; Nishio, K. (1998): System for storing and utilizing hydrogen, in: Google Patents, URL: <https://patents.google.com/patent/US5728483A/en>, 18.12.2025
- Ghaffari-Tabrizi, F.; Haemisch, J.; Lindner, D. (2022): Reduction Hydrogen Boil-Off Losses during Fuelling by Pre-Cooling Cryogenic Tank, in: Hydrogen, 2022, 3, 255-269
- Google Maps (2025a): Kartierung Flughafen Leipzig/Halle, in: Google Maps, URL: [https://www.google.com/maps/@51.4226682,12.2290903,1886m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?entry=tту&g\\_ep=EgoyMDI1MDgxMy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/@51.4226682,12.2290903,1886m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDgxMy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D), 18.12.2025

- Google Maps (2025b): Kartierung Flughafen BER, in: Google Maps, URL: [https://www.google.com/maps/place/Flughafen+Berlin+Brandenburg/@52.3620032,13.496228,2760m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x47a846d3cf283051:0x9014409747516a08!8m2!3d52.3649645!4d13.5010472!16zL20vMDFueGpx!5m1!1e4?entry=tту&g\\_ep=EgoyMDI1MDgxMy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Flughafen+Berlin+Brandenburg/@52.3620032,13.496228,2760m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x47a846d3cf283051:0x9014409747516a08!8m2!3d52.3649645!4d13.5010472!16zL20vMDFueGpx!5m1!1e4?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDgxMy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D), 18.12.2025
- Graver, B.; Rutherford, D.; Zheng, S. (2020): CO2 Emissions from commercial aviation 2013, 2018, and 2019, in: The International Council on Clean Transportation, 2020, 1-29
- Hair, J.; Anderson, R.; Tatham, R.; Black, W. (1998): *Multivariate Data Analysis*, rev. 5. Auflage, Upper Saddle River
- Hoelzen, J.; Flohr, M.; Silberhorn, D.; Mangold, J.; Bensmann, A.; Hanke-Rauschenbach, R. (2022): H2-powered aviation at airports – Design and economics of LH2 refueling systems, in: *Energy Conversion and Management: X*, 2022, 14, 1-21
- Hoelzen, J.; Koenemann, L.; Kistner, L.; Schenke, F.; Bensmann, A.; Hanke-Rauschenbach, R. (2023): H2-powered aviation – Design and economics of green LH2 supply for airports, in: *Energy Conversion and Management: X*, 2023, 20, 1-36
- Huete, J.; Pilidis P. (2021): Parametric study on tank integration for hydrogen civil aviation propulsion, in: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46, 37049-37062
- HyET (2020): Hyet, electrochemical hydrogen purifiers and compressors (EHP/EHC), in: Netherlands Innovation Network China, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=OrMVOibGfGA>, 18.12.2025
- Janić, M. (2014): Greening commercial air transportation by using liquid hydrogen (LH2) as a fuel, in: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39, 16426-16441
- Kim, K.; Roh, G.; Kwag, K.; Hwang, P.; Kim, W. (2024): Economic study of hybrid power system using boil-off hydrogen for liquid hydrogen carriers, in: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 61, 1107-1119
- Li, X. J.; Allen, J. D.; Stager, J. A.; Ku, A. Y. (2020): Paths to low-cost hydrogen energy at a scale for transportation applications in the USA and China via liquid-hydrogen distribution networks, in: *Clean Energy*, 2020, 4, 1, 26-47
- Liang, G. S.; Chou, T. Y.; Kan, S. F. (2006): Applying Fuzzy Quality Function Deployment to Identify Service Management Requirements for an Ocean Freight Forwarder, in: *Total Quality Management*, 2006, 17, 5, 539 –554
- Lockett, A.; Blackmann, I. D. (2004): Conducting market research using the internet: the case of Xeno Laboratories, in: *Journal of Business & Industrial Marketing*, 2004, 19, 3, 178-187
- Mangold, J.; Silberhorn, D.; Moebis, N.; Dzikus, N.; Hoelzen, J.; Zill, T.; Strohmayer, A. (2022): Refueling of LH2 Aircraft—Assessment of Turnaround Procedures and Aircraft Design Implication, in: *Energies*, 2022, 15, 7, 1-41

McKinsey; Clean Sky 2 JU; FCH 2 JU (2020): Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050, 1. Auflage, Luxemburg

Morales-Ospino, R.; Celzard A.; Fierro, V. (2023): Strategies to recover and minimize boil-off losses during liquid hydrogen storage, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 182, 1-16

ODD – Open Data Dortmund (2025): Flughafen Dortmund 2019, in: open-data.dortmund.de, URL: <https://open-data.dortmund.de/explore/dataset/ds-dortmund-airport21-flugbewegungen-und-fluggastaufkommen-seit-1990/table/?flg=de-de&disjunctive.jahr&refine.jahr=2019&sort=jahr>, 18.12.2025

Payne, A.; Ballantyne, D.; Christoph, Martin (2005): A stakeholder approach to relationship marketing strategy: The development and use of the “six markets” model, in: European Journal of Marketing, 2005, 39, 7/8, 855-871

Peter, R.; Ramaseshan, B.; Nayar, C.V. (2002): Conceptual model for marketing solar based technology to developing countries, in: Renewable Energy, 2002, 25, 511-524

Petitpas, G. (2018): Boil-off losses along LH2 pathway, in: Lawrence Livermore National Laboratory, 2018, LLNL-TR-750685, 1-63

Postma-Kurlanc, A.; Leadbetter, H.; Pickard, C. (2022): Hydrogen Infrastructure and Operations, in: FlyZero - Aerospace Technology Institute, 2022, FZO-CST-POS-0035, 1-78

Pritchard, D. K.; Rattigan, W. M. (2010): Hazards of liquid hydrogen, RR769, Buxton

Raab, M.; Dietrich, R.-U.; Philippi, P.; Gibbs, J.; Grimme, W. (2024): Aviation fuels of the future A techno-economic assessment of distribution, fueling and utilizing electricity-based LH2, LCH4 and kerosene (SAF), in: Energy Conversion and Management: X, 2024, 23, 1-17

Ratnakar, R. R.; Gupta, N.; Zhang, K.; Doorne, C. v.; Fesmire, J.; Dindoruk, B.; Balakotaiah, V. (2021): Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH2 storage and transportation, in: International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46, 24149-24168

Reuß, M.; Grube, T.; Robinius, M.; Stolten, D. (2019): A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany, in: Applied Energy, 2019, 247, 438-453

Rosso, M. J.; Golben, P. M. (1987): Capture of liquid hydrogen boil-off with metal hydride absorbers, in: Journal of the Less-Common Metals, 1987, 131, 283-292

Sachsen.de (2025): Luftaufsicht - Nachtflugregelung am Flughafen Leipzig/Halle und zugelassene Ausnahmen im Jahr 2025, in: Sachsen.de, URL: [https://www.lids.sachsen.de/luftverkehr/?ID=18665&art\\_param=476](https://www.lids.sachsen.de/luftverkehr/?ID=18665&art_param=476), 07.11.2025

Sadaghiani, M. S.; Mehrpooya, M. (2017): Introducing and energy analysis of a novel cryogenic hydrogen liquefaction process, in: International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42, 6033-6050

Sadaghiani, M. S.; Mehrpooya, M.; Ansarinasab, H. (2017): Process development and exergy cost sensitivity analysis of a novel hydrogen liquefaction process, in: International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42, 29797-29819

Scimago Journal & Country Rank – SJR (2025): Journal Rankings, Renewable Energy; Sustainability and the Environment, in: SJR, URL: [https://www.scimagojr.com/journalrank.php?category=2105&page=4&total\\_size=299](https://www.scimagojr.com/journalrank.php?category=2105&page=4&total_size=299), 18.12.2025

Sdanghi, G.; Maranzana, G.; Celzard, A.; Fierro, V. (2019): Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 102, 150-170

Slater, S. F. (1995): Issues in conducting marketing strategy research, in: Journal of Strategic Marketing, 1995, 3:4, 257-270

Statista (2025a): Entwicklung des Passagieraufkommens an den Berliner Flughäfen\* in den Jahren 1991 bis 2024 und eine Prognose für das Jahr 2029, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5805/umfrage/passagieraufkommen-an-den-flughafen-berlin-seit-1991/>, 18.12.2025

Statista (2025b): Entwicklung des Passagieraufkommens am Flughafen Leipzig/Halle in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5828/umfrage/passagieraufkommen-am-flughafen-leipzig-halle-seit-1991/>, 18.12.2025

Statista (2025c): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Bremer Flughafen im Zeitraum von 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5810/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-bremer-flughafen/>, 18.12.2025

Statista (2025d): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs an den Flughäfen in Berlin\* in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5845/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-berlin/>, 18.12.2025

Statista (2025e): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Leipzig/Halle in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/6040/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-leipzig-halle/>, 18.12.2025

Statista (2025f): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Münster/Osnabrück in den Jahren 1991 bis 2023, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5866/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-muenster-osnabrueck-seit-1991/>, 18.12.2025

Statista (2025g): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Hamburg in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5857/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-hamburg/>, 18.12.2025

Statista (2025h): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Frankfurt in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5852/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-frankfurt/>, 18.12.2025

Statista (2025i): Top Flughäfen nach Anzahl der Passagiere in Deutschland in den Jahren 2019 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5646/umfrage/passagiere-auf-internationalen-verkehrsflughafen-in-deutschland/>, 18.12.2025

Statista (2025j): Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2014 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154902/umfrage/strompreise-fuer-industrie-und-gewerbe-seit-2006/>, 18.12.2025

Statista (2025k): Prognose über das jährliche Wachstum des Flugverkehrs in Ländern Europas von 2019 bis 2050, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1390265/umfrage/prognose-ueber-das-jaehrliche-wachstums-des-flugverkehrs-in-laendern-europas-bis-2050/>, 18.12.2025

Statista (2025l): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen München in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5864/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-muenchen/>, 18.12.2025

Statista (2025m): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Düsseldorfer Flughafen im Zeitraum von 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5850/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-duesseldorf/>, 18.12.2025

Statista (2025n): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Hannover in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5859/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-hannover/>, 18.12.2025

Statista (2025o): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Stuttgart in den Jahren 1991 bis 2023, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5870/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-stuttgart/>, 18.12.2025

- Statista (2025p): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Köln/Bonn in den Jahren 1991 bis 2024, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5862/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-koeln-bonn/>, 18.12.2025
- Statista (2025q): Anzahl der Flugzeugbewegungen des gewerblichen Verkehrs am Flughafen Nürnberg in den Jahren 1991 bis 2023, in: statista, URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5869/umfrage/entwicklung-der-flugzeugbewegungen-am-flughafen-nuernberg/>, 18.12.2025
- Tsvetkova, O.; Quarda, T. B. M. J. (2021): A review of sensitivity analysis practices in wind resource assessment, in: *Energy Conversion and Management*, 2023, 238, 1-29
- Tongpun, P.; Wang, W.-C.; Srinophakun, P. (2019): Techno-economic analysis of renewable aviation fuel production: From farming to refinery processes, in: *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226, 6-17
- Verband der Hochschullehrerinnen und Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e. V. - VHB (2025): VHB Rating 2024 für Publikationsmedien, Teilrating Marketing (MARK), in: VHB, URL: <https://www.vhbonline.org/verband/wissenschaftliche-kommissionen/marketing/vhb-rating-2024-marketing>, 18.12.2025
- Wang, J.; Alkhaledi, A. NFNR; Hughes, T. J.; Webley, P. A. (2025): Technoeconomic investigation of optimal storage pressure and boil-off gasutilisation in large liquid hydrogen carriers, in: *Applied Energy*, 2025, 384, 1-16
- Wang, R. T. (2007): Improving service quality using quality function deployment: The air cargo sector of China airlines, in: *Journal of Air Transport Management*, 2007, 13, 221–228
- Warwick, N.; Griffiths P.; Keeble, J.; Archibald, A.; Pyle, J. (2022): Atmospheric implications of increased Hydrogen use, Cambridge
- Yilmaz, C. (2020): Optimum energy evaluation and life cycle cost assessment of a hydrogen liquefaction system assisted by geothermal energy, in: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45, 3558-3568
- Zhang, F.; Zhao, P.; Niu, M.; Maddy, J. (2016): The survey of key technologies in hydrogen energy storage, in: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41, 14535-14552

## Anhangsverzeichnis

Anhang 1	Literaturtabelle Gesamtübersicht .....	XV
Anhang 2	Präsentation Projekt CATCH .....	XX
Anhang 3	Bewertungshilfe für Stakeholder.....	XXII
Anhang 4	Gewichtung für die Systemanforderungen.....	XXIV
Anhang 5	Berechnungen und Grundwerte.....	XXV
Anhang 6	CAPEX und OPEX der technischen Komponenten Hypothese 1a.....	XXVIII
Anhang 7	jährliche Aufschlüsselung der Hauptkostenparameter Hypothese 1b .....	XXIX
Anhang 8	CAPEX und OPEX der technischen Komponenten Hypothese 2a.....	XXXI
Anhang 9	jährliche Aufschlüsselung der Hauptkostenparameter Hypothese 2b.....	XXXII
Anhang 10	CAPEX und OPEX der technischen Komponenten Hypothese 3a.....	XXXIV
Anhang 11	jährliche Aufschlüsselung der Hauptkostenparameter Hypothese 3b .....	XXXV
Anhang 12	Gesamtkostenübersicht der Sensitivitätsanalysen.....	XXXVII
Anhang 13	Gesamtübersicht kumulierte Flugbewegungen .....	XXXVIII
Anhang 14	Protokoll: Experten-Interview vom 23.10.2025.....	XXXIX
Anhang 15	Protokoll: Experten-Interview vom 18.12.2025.....	XLI
Anhang 16	House of Quality BER.....	XLIII

# Anhang 1 Literaturtabelle Gesamtübersicht

	Referenz	Aspekte der Marktforschung				LH <sub>2</sub> -Systeme			BOG-Recyclingverfahren			
		Sensitivitätsanalyse	Marktszenarien	empirische Daten	QFD	Betankungsfahrzeug	Pipeline	Hybrid	Venting	Wiederverflüssigung	Kompression	MH-Kartuschen
alternative Sektoren	Rosso/Golben (1987)											
	Slater (1995)											
	Hair et al. (1998)											
	Peter et al. (2002)											
	Lockett/Blackmann (2004)											
	Payne et al. (2005)											
	Chang (2006)											
	Liang et al. (2006)											
	Cardella et al. (2017)											
	Sadaghiani/Mehrpooya (2017)											
	Sadaghiani et al. (2017)											
	Petitpas (2018)											
	Bao et al. (2019)											
	Reuß et al. (2019)											
	HyET (2020)											



Pritchard/Rattigan (2010)											
Jani'c (2014)											
Zhang et al. (2016)											
Baroutaji et al. (2019)											
Sdanghi et al. (2019)											
Tongpun et al. (2019)											
Amica et al. (2020)											
Graver et al. (2020)											
Li et al. (2020)											
McKinsey et al. (2020)											
Huete/Pilidis (2021)											
Ghaffari-Tabrizi et al. (2022)											
Hoelzen et al. (2022)											
Mangold et al. (2022)											
Postma-Kurlanc et al. (2022)											
Warwick et al. (2022)											
Abel/Allroggen (2023)											
Hoelzen et al. (2023)											
Franke et al. (2024)											

Raab et al. (2024)			■	■		■	■			■	
Berlin-Airport (2025a)	■		■								
Berlin-Airport (2025b)			■								
Destatis (2025)		■	■								
Flughafenverband ADV (2025)			■								
Franke/Kazula (2025)					■	■		■			■
Google Maps (2025a)			■								
Google Maps (2025b)			■								
Interview BER (2025)		■	■								
Interview DLR (2025)		■	■								
ODD (2025)			■								
Sachsen.de (2025)	■		■								
Statista (2025a)		■	■								
Statista (2025b)			■								
Statista (2025c)			■								
Statista (2025d)			■								
Statista (2025e)			■								
Statista (2025f)			■								
Statista (2025g)			■								

Statista (2025h)											
Statista (2025i)											
Statista (2025j)											
Statista (2025k)											
Statista (2025l)											
Statista (2025m)											
Statista (2025n)											
Statista (2025o)											
Statista (2025p)											
Statista (2025q)											
Diese Arbeit											

keine inhaltliche Abdeckung
  teilweise inhaltliche Abdeckung
  inhaltliche Abdeckung

Quelle: Eigene Darstellung



## Marktstudie CATCH-Projekt Präsentation

Marktstudie über die Verwendung eines H<sub>2</sub>-Boil-Off Recyclingsystem basierend auf einem Metall-Hydrid-Kartuschen Verfahren in der Luftfahrt im Jahr 2050

**Simon Benedict Stein**

(Certified Junior Project Manager – IAPM)

Oktober 2025

Simon Benedict Stein  
**Marktstudie zur Anwendung von BOG-Recyclingverfahren in der Luftfahrt im Jahr 2050**

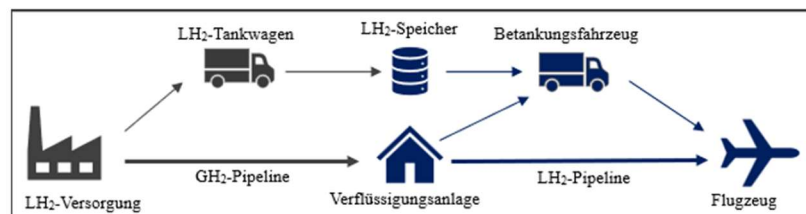
- 1. Überblick
- 2. Ziele
- 3. Anfrage

Zusammenarbeit:  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR, Standort Cottbus, Florian Franke  
Fachgebiet ABWL, insbesondere Marketing  
Prof. Dr. Florian Dost  
<https://www.b-tu.de/fg-marketing/>

Oktober 2025 Folie 2

### 1. Überblick

#### Marktstudie für ein BOG-Recyclingsystem basierend auf einem MH-Kartuschen Verfahren in der Luftfahrt



Pilotflughafenkonzept zur Kraftstoffversorgung 2050 (Quelle: eigene Darstellung)

- Erstellung von wasserstoffbetriebenen Pilotflughafenmodellen in Bezug auf die Kraftstoffversorgung und BOG-Recyclingverfahren an ausgewählten Flughäfen
- Prognostizierung der Investitions- und Betriebskosten unterschiedlicher BOG-Recyclingverfahren für den Gesamtmarkt von Deutschland im Jahr 2050
- Ableitung von Entwicklungs- und Handlungsempfehlungen für Forschungsinstitute, Flughafengesellschaften und Flugzeughersteller

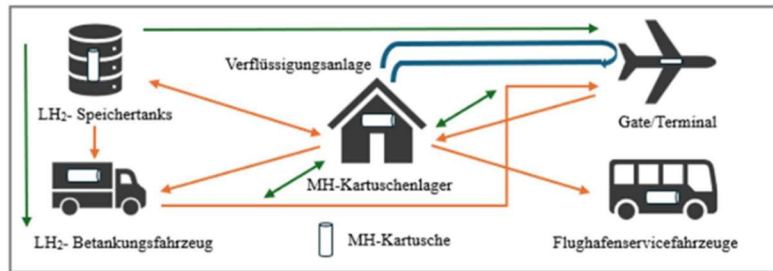
Simon Benedict Stein  
**Marktstudie zur Anwendung von BOG-Recyclingverfahren in der Luftfahrt im Jahr 2050**

1. Überblick
2. Ziele
3. Anfrage

Zusammenarbeit:  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR, Standort Cottbus, Florian Franke  
 Fachgebiet ABWL, insbesondere Marketing  
 Prof. Dr. Florian Dost  
<https://www.b-tu.de/fg-marketing/>  
 Oktober 2025 Folie 3

## 2. Ziele

### Vorteile für Flughafeneseellschaften und Forschungsinstitute



Flughafenkonzept inklusive LH<sub>2</sub>-Systemen und BOH-Recyclingverfahren (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Franke/Kazula 2025, S.5; Brewer 1991, S.325)

- Pilotmodell zur Kraftstoffversorgung und BOG-Recyclingmöglichkeiten basierend auf bestehender Flughafeninfrastruktur
- Überblick der technisch-ökonomischen wie auch ökologischen Chancen einer wasserstoffbetriebenen Luftfahrt am Flughafenstandort
- Analyse der Stakeholder-Anforderungen in Bezug auf die Entwicklung, sowie die Gestaltung einer kosteneffizienten und klimafreundlichen Luftfahrt im Jahr 2050

Simon Benedict Stein  
**Marktstudie zur Anwendung von BOG-Recyclingverfahren in der Luftfahrt im Jahr 2050**

1. Überblick
2. Ziele
3. Anfrage

Zusammenarbeit:  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR, Standort Cottbus, Florian Franke  
 Fachgebiet ABWL, insbesondere Marketing  
 Prof. Dr. Florian Dost  
<https://www.b-tu.de/fg-marketing/>  
 Oktober 2025 Folie 4

## 3. Anfrage

- Ihre Prioritätsbewertung der Stakeholder-Anforderungen anhand eines Quality-Function-Deployment (7 komprimierte Schwerpunkte *grüner Bereich*)
- Sind Flugbewegungs- und Passagieraufkommensprognosen für Ihren Flughafenstandort für das Jahr 2050 bekannt?
- Gibt es eine geplante zukünftige Wasserstoffstrategie für Ihren Flughafenstandort?

Anforderung	Attribut	Wechselwirkung						
		1 = nicht relevant	2 = wenig relevant	3 = mittel	4 = hoch relevant	5 = sehr hoch relevant	6 = nicht bestimmbar	7 = nicht bestimmbar
Systemanforderung	Qualitätsattribut							
Stakeholder	Ranking							
Kosten								
Effizienz								
Sicherheit								
Integrationsmöglichkeiten								
Leistung								
BOG-Einsatzmöglichkeiten								
Klima								
Flexibilität								
Skalierbarkeit								
Gesamtpriorität								
relativer Anteil								

schematisches Quality-Function-Deployment (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Wang 2007, S.222)

**Vielen Dank für Ihr Interesse!**

Referenzen und ergänzende Dokumente unter:  
<https://www.b-tu.de/owncloud/s/NSfSe6bXSbkmeRc>



## **Anhang 3      Bewertungshilfe für Stakeholder**

### *Kosteneffizienz*

Bei der Kosteneffizienz ist die Priorität des Kosten-Nutzen-Vergleiches zu bewerten. Hierbei ist die Einstellung der Stakeholder gegenüber den Installations- und Betriebskosten eines BOG-Recyclingsystems anzugeben (Franke et al. 2024, S.1511). Die Bewertung der technischen Konzepte erfolgte hierbei, abweichend von den weiteren Anforderungen, auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit.

### *Sicherheit*

Die Bewertung der Sicherheitsanforderungen umfasst die Nutzung von BOG-Recyclingsystemen im Kontext einer zukünftigen wasserstoffbetriebenen Luftfahrt. Dabei ist die Einstellung der Stakeholder in Bezug auf die Sicherheitspräferenzen bei dem Führen und Betanken von Flugzeugen anzugeben. Zudem ist auch die Lagerung von gespeichertem BOG auf dem Rollfeld und im Flugzeug zu berücksichtigen. Diese Speicherung ermöglicht in Notsituationen einen Zugriff auf Reservedepots und trägt somit potenziell zur Verbesserung der Sicherheit bei (Franke et al. 2024, S.1511).

### *Leistung*

Diese Anforderungskategorie beschreibt den Betrieb eines BOG-Recyclingsystems im Flughafenkontext. Hierbei ist die Einstellung der Stakeholder in Bezug auf die Anwendung der Systeme anzugeben. Innerhalb dieser Kategorie ist auch die Bedeutung von Synergien zwischen den Flughafenkomponenten einzubeziehen. Demnach würde die Möglichkeit bestehen, mehrere Arbeitsprozesse parallel und ggf. mit einem einzelnen System durchzuführen zu können (Franke et al. 2024, S.1511).

### *BOG-Einsatzmöglichkeiten*

Die BOG-Einsatzmöglichkeiten beschreiben weitere Nutzungsformen des gespeicherten BOG, die nicht dem Betrieb von Flugzeugen zugeschrieben werden. Dazu zählen z.B. die Kabinenklimatisierung der Flugzeuge, Verwendung in Brennstoffzellen von Flughafenservicefahrzeugen oder die Anwendung von Wasserstoffsicherheitssensoren (Franke et al. 2024, S.1511). Hierbei ist die Einstellung der Stakeholder gegenüber der Vielzahl an weiteren Einsatzmöglichkeiten anzugeben.

### *Klimafreundlichkeit*

Innerhalb dieser Kategorie ist die Einstellung der Stakeholder in Bezug auf die Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von BOG-Recyclingsystemen anzugeben. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Verringerung der Umweltbelastung durch die Innovation des Gesamtwirkungsgrads eines Energiesystems bestärkt wird. Diese Verbesserung ist bspw. durch die Kombination von Materialverbrauch und Wiederverwertbarkeit des BOG möglich (Franke et al. 2024, S.1511).

### *Integrationsmöglichkeiten*

Die Integrationsmöglichkeiten beschreiben die infrastrukturellen Anforderungen an die Flughäfen, wie z.B. Platzbedarf, Umgebungsbedingungen (Klima) und Beeinflussung anderer Flughafengebäude (Franke et al. 2024, S.1511). Hierbei ist die Einstellung der Stakeholder gegenüber flexiblen Installationsmöglichkeiten der BOG-Recyclingsysteme anzugeben.

### *Bedienungsfreundlichkeit*

Diese Kategorie umfasst die Mensch-System-Anforderungen. Demnach sind die Erlernbarkeit, Ausführbarkeit und Bedienbarkeit der BOG-Recyclingsysteme für die Nutzung zu berücksichtigen. Hierbei ist die Einstellung der Stakeholder in Bezug auf ein niedriges Anforderungsniveau innerhalb der Arbeitsprozesse anzugeben. Das Anforderungsniveau bezieht sich auf die Fachausbildung und Qualifikation der Arbeitnehmenden der Flughafengesellschaft.

## Anhang 4 Gewichtung für die Systemanforderungen

Qualitäts- attribut- Ranking	Gewichtung				
	1 nicht erforderlich	2 vernachlässigbar	3 neutral	4 bedeutend	5 sehr bedeutend
<b>Kosteneffizienz</b>	Kosten übersteigen Nutzen, Betriebsgefährdung	Kosten übersteigen Nutzen, nicht betriebsgefährdend	Kosten entsprechen Nutzen	Nutzen übersteigt Kosten, marginal	Nutzen übersteigt Kosten, resultierender Gewinn
<b>Sicherheit</b>	Aufhebung geltender Sicherheitsnormen	Herabsetzung geltender Sicherheitsnormen	Einhaltung geltender Sicherheitsnorm	verbesserte Systemsicherheit	verbesserte Flughafensicherheit
<b>Integrations- möglichkeiten</b>	keine Anpassbarkeit, Neukonstruktion	erhöhte Kosten, Platzbedarf/ Flughafengebäude/ Umweltbedingungen	Anpassbarkeit an, Platzbedarf	Anpassbarkeit an, Platzbedarf/ Umweltbedingungen	Anpassbarkeit an, Platzbedarf/ Umweltbedingungen/ Flughafengebäude
<b>Leistung</b>	keine parallelen Prozesse, Betankung/Recycling/ Speicherung	parallele Prozesse, Recycling/Speicherung	parallele Prozess, Betankung/ Recycling	parallele Prozess, Betankung/Recycling/ Speicherung	einzelnes System, Betankung/Recycling/ Speicherung
<b>BOG-Einsatz- möglichkeiten</b>	keine Verwendung, Venting	Speicherung	Wiederverwendung, BOG-Verursacher z.B. Flugzeug	Verwendung, Flughafenkontext z.B. Fuel Bowser	Verwendung, alternative Bereiche z.B. Wärmegewinnung
<b>Klima- freundlichkeit</b>	zusätzliche Umweltgefährdung, Venting (Flugbetrieb)	erhöhte Umweltbelastung, marginal Venting (temporär) Speicherung	Emissionsausgleich, BOG-Verursacher z.B. Flugzeug	Emissionsausgleich, Flughafenkontext	Emissionsreduzierung, gegenüber fossilen Brennstoffen
<b>Bedienungs- freundlichkeit</b>	(längere) spezifische Einarbeitungszeit, Fachausbildung nötig	Fachausbildung nötig	(längere) spezifische Einarbeitungszeit, Berufsfeldausbildung	Berufsfeldausbildung nötig	Schulungsmaßnahmen, keine Fach-/ Berufsfeldausbildung nötig

Quelle: Eigene Darstellung, Interview DLR 2025

## Anhang 5 Berechnungen und Grundwerte

### Grundwerte

Umrechnungswerte							
Parameter	Jahr	Tag	Tonne	Strompreistarif	Wechselkurs	Betankungsfahrzeug Anzahl	Betriebsdauer
Wert	<b>365</b>	<b>24</b>	<b>1000</b>	<b>0.06</b>	<b>1.08</b>	<b>0.000125</b>	<b>16</b>
Einheit	Tage	Stunden	kg	Euro <sub>2024</sub> /kWh	USD <sub>2024</sub> /Euro <sub>2024</sub>	Stück/tLH <sub>2</sub>	Stunden
Referenzen				Hoelzen et al. 2022, S. 7; Reuß et al. 2019, S. 451	BMZ 2025	Hoelzen et al. 2022, S.19	Interview DLR 2025

Medienbedarf				
Parameter	Verflüssigung-Aufschlag	Spülgas-Bedarf	Kraftstoff m Sektor	Kraftstoff g Sektor
Wert	<b>1.0165</b>	<b>0.001</b>	<b>0.84</b>	<b>0.94</b>
Einheit	tH <sub>2</sub>	tHe	tLH <sub>2</sub>	tLH <sub>2</sub>
Referenzen	Hoelzen et al. 2022, S. 7	Hoelzen et al. 2022, S.9	siehe Hauptarbeit	siehe Hauptarbeit

BOG				
Parameter	Speicherung		Betankung	
	großer Speicher (GSP)	kleiner Speicher (KSP)	großer/kleiner Speicher	Tankwagen/Dispenser Truck
Wert	<b>0.002</b>	<b>0.03</b>	<b>0.095</b>	<b>0.02</b>
Einheit	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor
Referenzen	Kim et al. 2024, S. 1109	Zhang et al. 2016, S. 14543; Baroutaji et al. 2019, S. 36	Franke et al. 2024, S. 1515	

Medienkosten			
Parameter	tH <sub>2</sub>	tLH <sub>2</sub>	tHe
Wert	<b>2573</b>	<b>3151</b>	<b>21210</b>
Einheit	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub>
Referenzen	Franke et al. 2024, S.1523	Hoelzen et al. 2022, S. 10	Hoelzen et al. 2022, S. 7

CAPEX												
Parameter	großer Speicher (GSP)	kleiner Speicher (KSP)	Kryopumpe Grundwert	Tankwagen	Kryopumpe Spitzenauslastung (h)	Verflüssigungsanlage	Dispenser Truck	GH <sub>2</sub> -Kompressor Grundwert	MH-Kartusche Grundwert	LH <sub>2</sub> -Pipeline Grundwert	GH <sub>2</sub> -Pipeline Grundwert	GH <sub>2</sub> -Speichertank Grundwert
Wert	<b>12653280</b>	<b>1181700</b>	<b>310636</b>	<b>775680</b>	<b>1.2</b>	<b>413292000</b>	<b>109080</b>	<b>321600</b>	<b>1543500</b>	<b>5696400</b>	<b>509040</b>	<b>514500</b>
Einheit	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub> /(tLH <sub>2</sub> /h)	USD <sub>2024</sub>	Faktor	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub> /(tH <sub>2</sub> /d)	USD <sub>2024</sub> /tH <sub>2</sub>	USD <sub>2024</sub> /km	USD <sub>2024</sub> /km	USD <sub>2024</sub> /tH <sub>2</sub>
Referenzen	Hoelzen et al. 2022, S. 7-9							HyET 2020	Franke et al. 2024, S. 1523-1524	Abel/Allroggen 2023, S. 5		Franke et al. 2024, S. 1523

B&W											
Parameter	großer Speicher (GSP)	kleiner Speicher (KSP)	Betankungsfahrzeug	Kryopumpe (von gesamte CAPEX)	Verflüssigungsanlage	Dispenser Truck	GH <sub>2</sub> -Kompressor (H <sub>2</sub> -Verlust)	MH-Kartusche (H <sub>2</sub> -Verlust)	LH <sub>2</sub> /GH <sub>2</sub> Pipeline (von gesamte CAPEX)		
Wert	<b>253066</b>	<b>23634</b>	<b>23270</b>	<b>0.03</b>	<b>16531680</b>	<b>3272</b>	<b>504</b>	<b>103</b>	<b>0.03</b>		
Einheit	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub>	Faktor	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub>	USD <sub>2024</sub> /tH <sub>2</sub>	USD <sub>2024</sub> /tH <sub>2</sub>	Faktor		
Referenzen	Hoelzen et al. 2022, S. 7-9						HyET 2020	Franke et al. 2024, S. 1523-1524	Abel/Allroggen 2023, S. 5		

Energiebedarf					
Parameter	Betankungs- fahrzeug (pro km)	Kryopumpe kWh	Verflüssigungs- anlage	GH <sub>2</sub> - Kompressor kWh	MH-Materialkosten (H <sub>2</sub> - Verlust)
Wert	<b>0.42</b>	<b>0.1</b>	<b>492022</b>	<b>4000</b>	<b>3498600</b>
Einheit	USD <sub>2024</sub> /km	kWh/kgLH <sub>2</sub>	USD <sub>2024</sub>	kWh/tH <sub>2</sub>	USD <sub>2024</sub> /tH <sub>2</sub>
Referenzen	Hoelzen et al. 2022, S. 7-9			HyET 2020	Franke et al. 2024, S. 1523-1524

Kapazität											
Parameter	Betankungs- fahrzeug	großer Speicher (GSP)	kleiner Speicher (KSP)	GH <sub>2</sub> - Kompressor (pro Tag)	Verflüssigungs- anlage (pro Tag)	MH- Kartusche	Pipeline Länge	Betankungs- fahrzeuggrenze	Puffer- aufschlag	GH <sub>2</sub> - Speichertank	MH- Prozess- dauer
Wert	<b>4</b>	<b>300</b>	<b>25</b>	<b>0.3</b>	<b>223</b>	<b>0.002</b>	<b>3</b>	<b>125000</b>	<b>2</b>	<b>0.0056</b>	<b>8</b>
Einheit	tLH <sub>2</sub>	tLH <sub>2</sub>	tLH <sub>2</sub>	tH <sub>2</sub>	tLH <sub>2</sub>	tH <sub>2</sub>	km	tLH <sub>2</sub>	Faktor	tH <sub>2</sub>	Stunden
Referenzen	Li et al. 2020, S. 38	Abel/Allroggen 2023, S. 5		HyET 2020	Hoelzen et al. 2022, S. 19	Franke et al. 2024, S. 1516	Hoelzen et al. 2022, S. 10-11	Interview DLR 2025	Interview DLR 2025	Amica et al. 2020, S. 18795	Interview DLR 2025

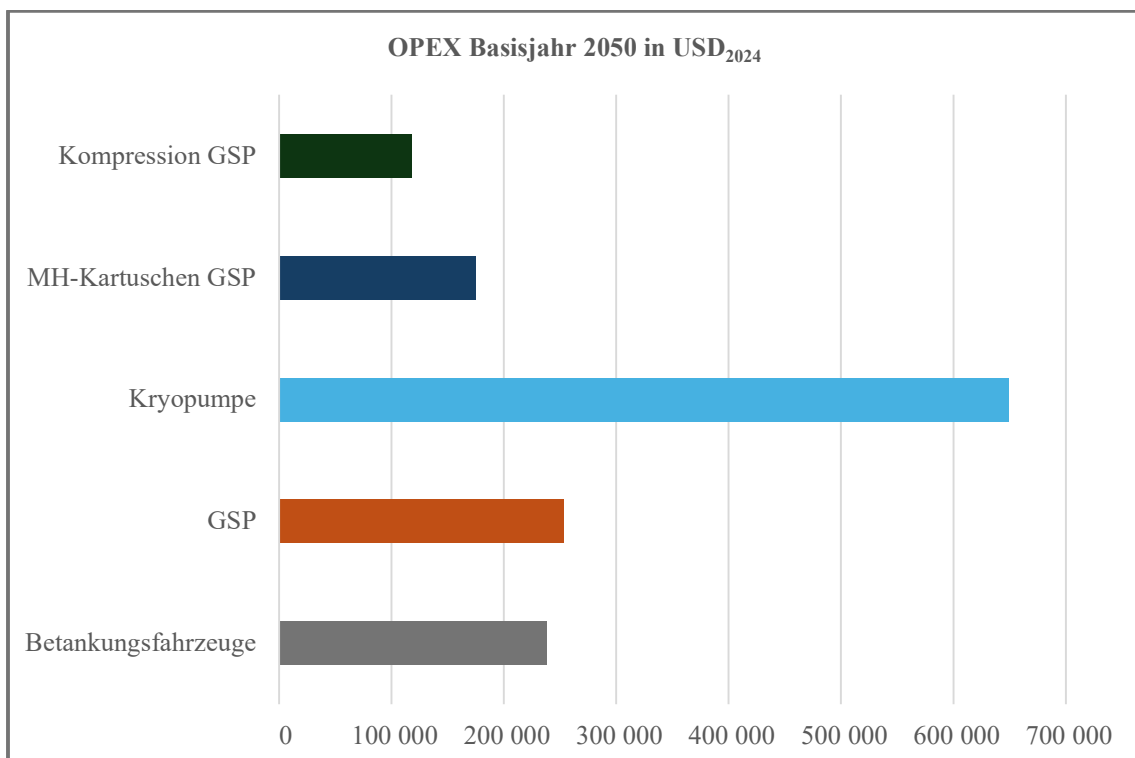
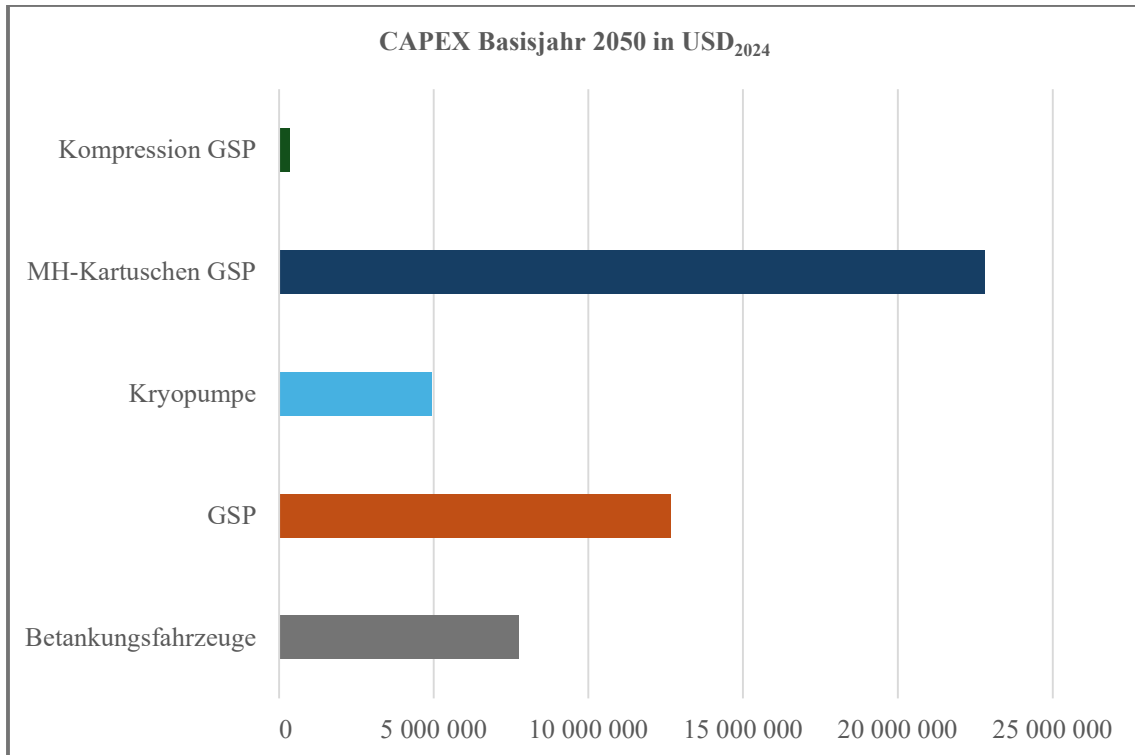
### Berechnungen

Die durchgeführten Berechnungen, sowie ein selbst erstelltes Gesamtkosten-Berechnungstool für die LH<sub>2</sub>-Systeme sind in den ergänzenden Materialien zu finden. Diese stehen unter dem angegebenen Link oder auf dem beiliegenden physischen Datenträger zur Verfügung.

Eine Variation der Ausgangsparameter ist ausschließlich in den gelb markierten Bereichen möglich. Zudem deutet eine rote Umrandung auf die Ergebnisse des berechneten LH<sub>2</sub>-Systems hin.

Link: <https://www.b-tu.de/owncloud/s/TwZCoC9wb6ZLiQs>

## Anhang 6 CAPEX und OPEX der technischen Komponenten Hypothese 1a



Quelle: Eigene Darstellung

## Anhang 7 jährliche Aufschlüsselung der Hauptkostenparameter Hypothese 1b

Venting	Infrastruktur		CAPEX		OPEX		BOG-Verlust		Medienkosten		Gesamtverlauf	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
2050	26488077	24429737	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	276230667	279744789
2051	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	525973256	535059840
2052	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	775715845	790374891
2053	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	1025458434	1045689943
2054	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	1275201023	1301004994
2055	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	1524943612	1556320045
2056	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	1774686201	1811635097
2057	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	2024428790	2066950148
2058	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	2274171380	2322265199
2059	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	2523913969	2577580251
2060	0	0	0	0	0	0	4378363	9950825	245364226	245364226	2773656558	2832895302
Gesamt	26488077	24429737	0	0	0	0	48161995	109459079	2699006486	2699006486	2773656558	2832895302

Kompression	Infrastruktur		CAPEX		OPEX		BOG-Verlust		Medienkosten		Gesamtverlauf	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
2050	26488077	24429737	354360	5315400	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	276305058	280860654
2051	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	525767678	531976171
2052	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	775230298	783091688
2053	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	1024692918	1034207204
2054	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	1274155538	1285322721
2055	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	1523618158	1536438238
2056	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	1773080778	1787553755
2057	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	2022543399	2038669272
2058	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	2272006019	2289784789
2059	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	2521468639	2540900305
2060	0	0	0	0	118064	1770961	3980330	3980330	245364226	245364226	2770931259	2792015822
Gesamt	26488077	24429737	354360	5315400	1298705	19480568	43783632	43783632	2699006486	2699006486	2770931259	2792015822

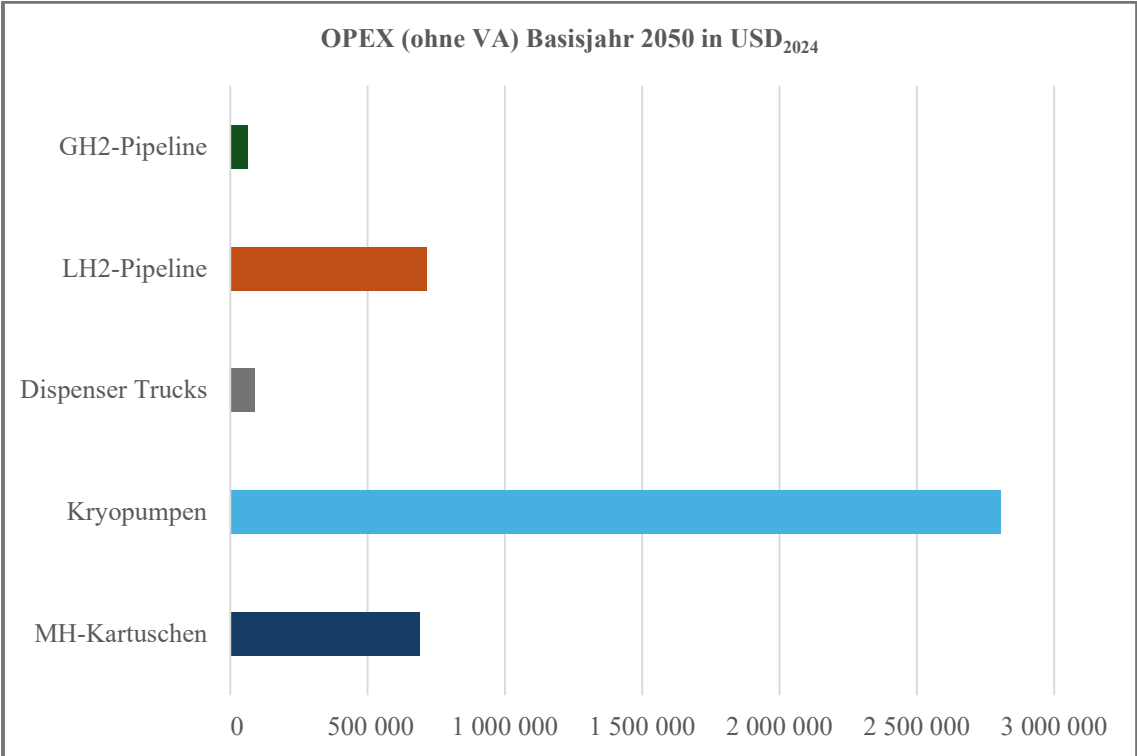
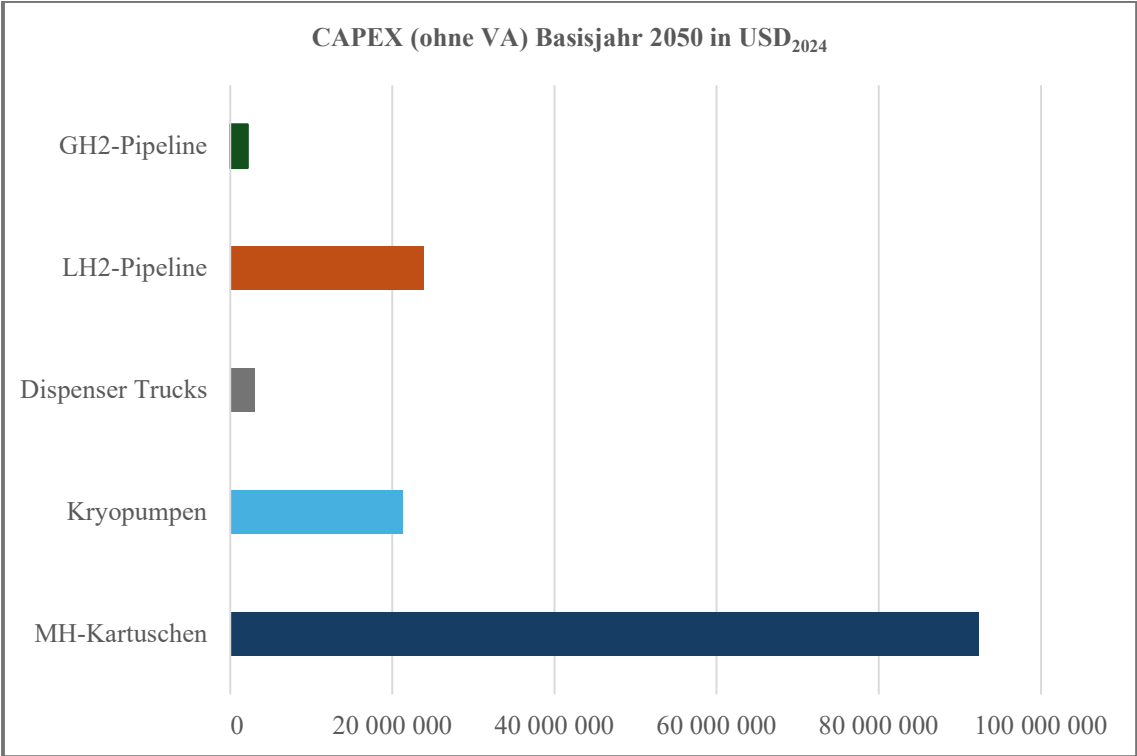
MH-Kartuschen	Infrastruktur		CAPEX		OPEX		BOG-Verlust		Medienkosten		Gesamtverlauf	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
2050	26488077	24429737	22810460	42757008	175271	398342	0	0	245364226	245364226	294838034	312949314
2051	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	540377531	558711882
2052	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	785917028	804474451
2053	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	1031456524	1050237019
2054	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	1276996021	1295999587
2055	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	<b>1522535518*</b>	1541762156
2056	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	1768075014	1787524724
2057	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	2013614511	2033287292
2058	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	2259154007	2279049861
2059	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	2504693504	2524812429
2060	0	0	0	0	175271	398342	0	0	245364226	245364226	2750233001	2770574998
Gesamt	26488077	24429737	22810460	42757008	1927977	4381766	0	0	2699006486	2699006486	2750233001	2770574998

\* Break-Even-Point

Gesamtvergleich	Venting		Kompression		MH-Kartuschen	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
Infrastruktur	26488077	24429737	26488077	24429737	26488077	24429737
CAPEX	0	0	354360	5315400	22810460	42757008
OPEX	0	0	1298705	19480568	1927977	4381766
BOG-Verlust	48161995	109459079	43783632	43783632	0	0
Medienkosten	2699006486	2699006486	2699006486	2699006486	2699006486	2699006486
Gesamtsumme	2773656558	2832895302	2770931259	2792015822	2750233001	2770574998

Quelle: Eigene Darstellung

# Anhang 8 CAPEX und OPEX der technischen Komponenten Hypothese 2a



Quelle: Eigene Darstellung

## Anhang 9

### jährliche Aufschlüsselung der Hauptkostenparameter Hypothese 2b

Venting	Infrastruktur	CAPEX	OPEX	BOG-Verlust	Medienkosten	Gesamtverlauf
2050	2203320536	0	0	17188842	880707535	3101216913
2051	0	0	0	17188842	880707535	3999113291
2052	0	0	0	17188842	880707535	4897009668
2053	0	0	0	17188842	880707535	5794906046
2054	0	0	0	17188842	880707535	6692802424
2055	0	0	0	17188842	880707535	7590698801
2056	0	0	0	17188842	880707535	8488595179
2057	0	0	0	17188842	880707535	9386491556
2058	0	0	0	17188842	880707535	10284387934
2059	0	0	0	17188842	880707535	11182284311
2060	0	0	0	17188842	880707535	12080180689
Gesamt	2203320536	0	0	189077263	9687782890	12080180689

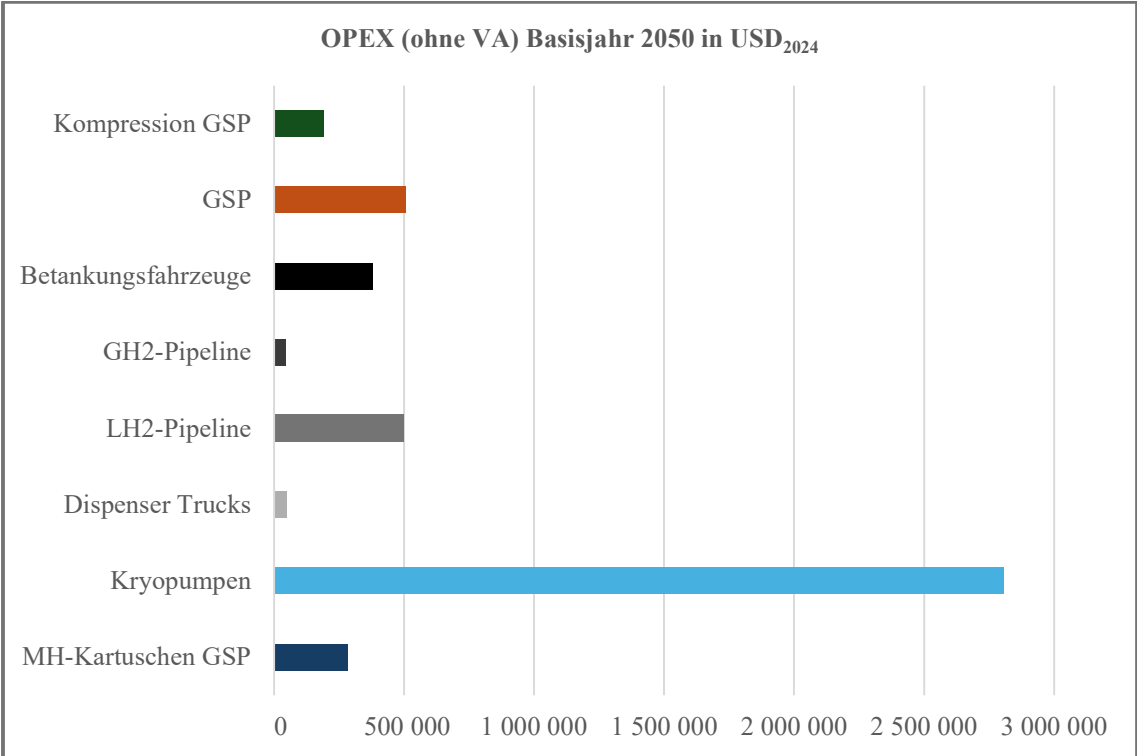
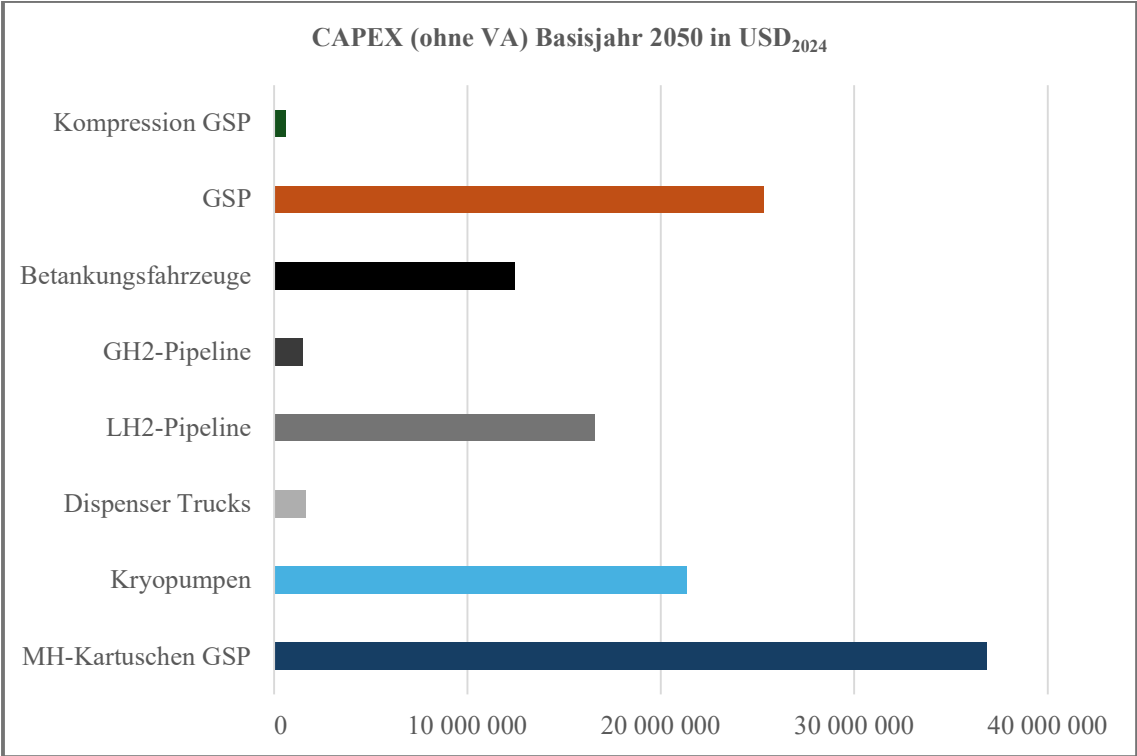
Wiederverflüssigung	Infrastruktur	CAPEX	OPEX	BOG-Verlust	Medienkosten	Gesamtverlauf
2050	2203320536	2132878	63986	283616	880707535	3086508551
2051	0	0	63986	283616	880707535	3967563689
2052	0	0	63986	283616	880707535	4848618826
2053	0	0	63986	283616	880707535	5729673964
2054	0	0	63986	283616	880707535	6610729102
2055	0	0	63986	283616	880707535	7491784239
2056	0	0	63986	283616	880707535	8372839377
2057	0	0	63986	283616	880707535	9253894515
2058	0	0	63986	283616	880707535	10134949653
2059	0	0	63986	283616	880707535	11016004790
2060	0	0	63986	283616	880707535	11897059928
Gesamt	2203320536	2132878	703850	3119775	9687782890	11897059928

<b>MH-Kartuschen</b>	<b>Infrastruktur</b>	<b>CAPEX</b>	<b>OPEX</b>	<b>BOG-Verlust</b>	<b>Medienkosten</b>	<b>Gesamtverlauf</b>
2050	2203320536	92290598	688088	0	880707535	3177006758
2051	0	0	688088	0	880707535	4058402381
2052	0	0	688088	0	880707535	4939798005
2053	0	0	688088	0	880707535	5821193628
2054	0	0	688088	0	880707535	6702589252
2055	0	0	688088	0	880707535	7583984876
2056	0	0	688088	0	880707535	8465380499
2057	0	0	688088	0	880707535	9346776123
2058	0	0	688088	0	880707535	10228171746
2059	0	0	688088	0	880707535	11109567370
2060	0	0	688088	0	880707535	11990962994
<b>Gesamt</b>	2203320536	92290598	7568969	0	9687782890	11990962994

<b>Gesamtvergleich</b>	<b>Venting</b>	<b>Wiederverflüssigung</b>	<b>MH-Kartuschen</b>
Infrastruktur	2203320536	2203320536	2203320536
CAPEX	0	2132878	92290598
OPEX	0	703850	7568969
BOG-Verlust	189077263	3119775	0
Medienkosten	9687782890	9687782890	9687782890
<b>Gesamtsumme</b>	12080180689	11897059928	11990962994

Quelle: Eigene Darstellung

# Anhang 10 CAPEX und OPEX der technischen Komponenten Hypothese 3a



Quelle: Eigene Darstellung

# Anhang 11

# jährliche Aufschlüsselung der Hauptkostenparameter Hypothese 3b

Venting	Infrastruktur		CAPEX		OPEX		BOG-Verlust		Medienkosten		Gesamtverlauf	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
2050	2233064711	2224126695	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	3131604338	3131671822
2051	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	4030143966	4039216950
2052	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	4928683594	4946762078
2053	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	5827223221	5854307205
2054	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	6725762849	6761852333
2055	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	7624302476	7669397460
2056	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	8522842104	8576942588
2057	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	9421381732	9484487716
2058	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	10319921359	10392032843
2059	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	11218460987	11299577971
2060	0	0	0	0	0	0	17832092	26837592	880707535	880707535	12117000614	12207123098
Gesamt	2233064711	2224126695	0	0	0	0	196153013	295213513	9687782890	9687782890	12117000614	12207123098

Kompression	Infrastruktur		CAPEX		OPEX		BOG-Verlust		Medienkosten		Gesamtverlauf	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
2050	2234590456	2225652440	572671	8590068	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	3122671443	3124422024
2051	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	4010179758	4014601539
2052	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	4897688073	4904781054
2053	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	5785196388	5794960569
2054	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	6672704703	6685140085
2055	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	7560213018	7575319600
2056	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	8447721334	8465499115
2057	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	9335229649	9355678630
2058	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	10222737964	10245858145
2059	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	11110246279	11136037660
2060	0	0	0	0	190800	2862000	6609980	6609980	880707535	880707535	11997754594	12026217175
Gesamt	2234590456	2225652440	572671	8590068	2098800	31482000	72709776	72709776	9687782890	9687782890	11997754594	12026217175

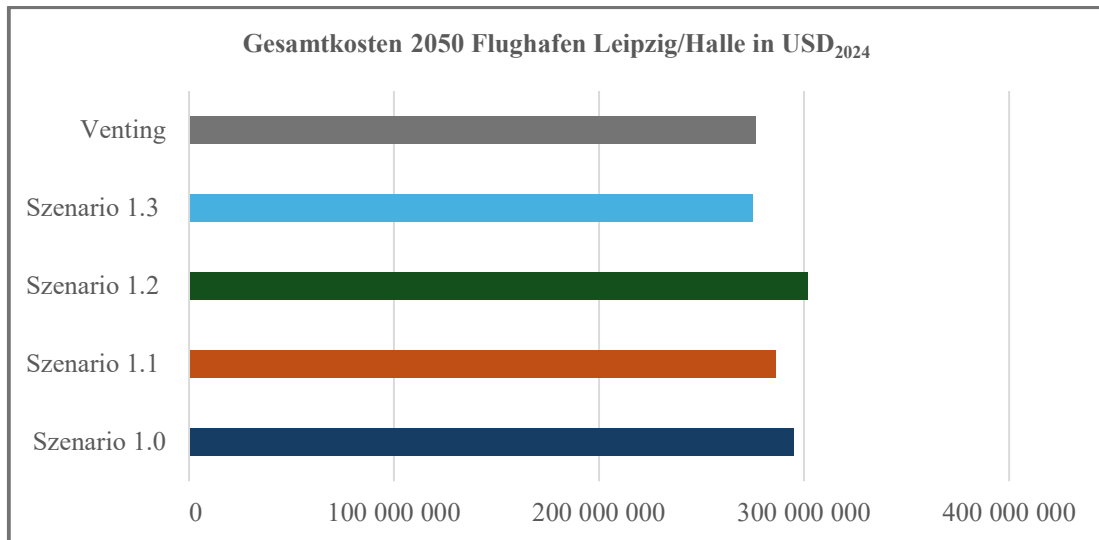
MH-Kartuschen	Infrastruktur		CAPEX		OPEX		BOG-Verlust		Medienkosten		Gesamtverlauf	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
2050	2234590456	2225652440	36847667	69076770	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	3152606388	3176257976
2051	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	4033774653	4057786741
2052	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	4914942919	4939315506
2053	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	5796111184	5820844271
2054	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	6677279449	6702373036
2055	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	7558447714	7583901801
2056	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	8439615979	8465430566
2057	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	9320784244	9346959331
2058	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	10201952509	10228488097
2059	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	11083120774	11110016862
2060	0	0	0	0	283250	643750	177480	177480	880707535	880707535	11964289040	11991545627
Gesamt	2234590456	2225652440	36847667	69076770	3115750	7081250	1952276	1952276	9687782890	9687782890	11964289040	11991545627

Gesamtvergleich	Venting		Kompression		MH-Kartuschen	
	GSP	KSP	GSP	KSP	GSP	KSP
Infrastruktur	2233064711	2224126695	2234590456	2225652440	2234590456	2225652440
CAPEX	0	0	572671	8590068	36847667	69076770
OPEX	0	0	2098800	31482000	3115750	7081250
BOG-Verlust	196153013	295213513	72709776	72709776	1952276	1952276
Medienkosten	9687782890	9687782890	9687782890	9687782890	9687782890	9687782890
Gesamtsumme	12117000614	12207123098	11997754594	12026217175	11964289040	11991545627

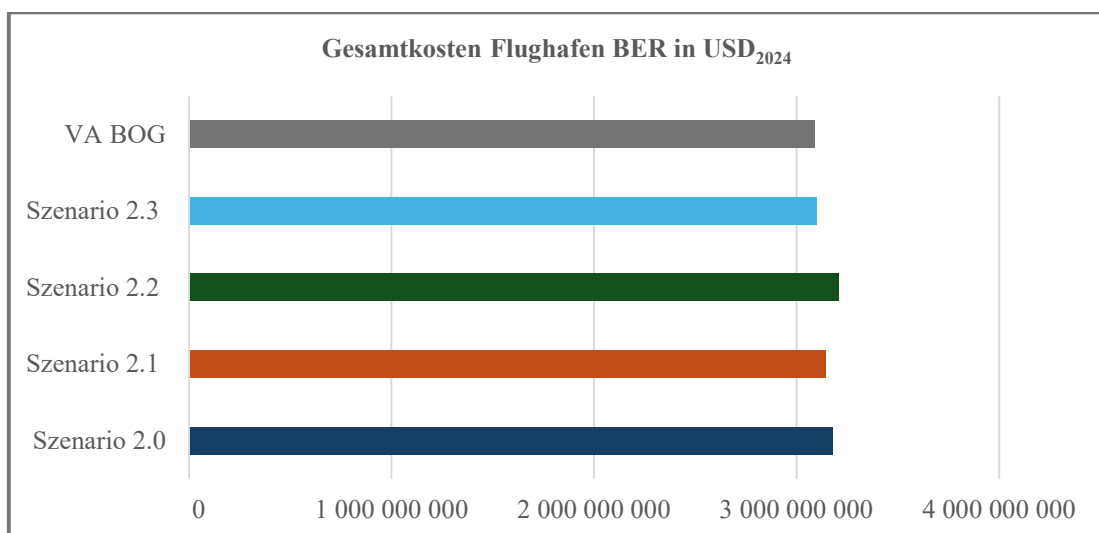
Quelle: Eigene Darstellung

## Anhang 12 Gesamtkostenübersicht der Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalyse mittlerer Sektor	Szenario 1.0	Szenario 1.1	Szenario 1.2	Szenario 1.3	Venting
Gesamtkosten in USD <sub>2024</sub>	294838034	285993162	301820828	274891487	276230667
Kostendifferenzen in USD <sub>2024</sub>	0	-8844872	6982794	-19946547	-18607368
Differenzanteil in %	0.0	-3.0	2.4	-6.8	-6.3



Sensitivitätsanalyse großer Sektor	Szenario 2.0	Szenario 2.1	Szenario 2.2	Szenario 2.3	VA BOG
Gesamtkosten in USD <sub>2024</sub>	3177006758	3141220607	3205258982	3096252484	3086508551
Kostendifferenz in USD <sub>2024</sub>	0	-35786151	28252224	-80754274	-90498207
Differenzanteil in %	0.0	-1.1	0.9	-2.5	-2.8



Quelle: Eigene Darstellung

## Anhang 13 Gesamtübersicht kumulierte Flugbewegungen

Jahr	Hamburg	Köln	Stuttgart	Hannover	Nürnberg	Dortmund	Leipzig	Bremen	Münster
2019	140753	130869	127195	62850	42669	26948	71927	29534	22862
2020	141879	131916	128213	63353	43010	27164	72502	29770	23045
2021	143014	132971	129238	63860	43354	27381	73082	30008	23229
2022	144158	134035	130272	64370	43701	27600	73667	30249	23415
2023	145311	135107	131314	64885	44051	27821	74256	30490	23602
2024	146474	136188	132365	65405	44403	28043	74850	30734	23791
2025	147646	137278	133424	65928	44759	28268	75449	30980	23982
2026	148827	138376	134491	66455	45117	28494	76053	31228	24173
2027	150017	139483	135567	66987	45478	28722	76661	31478	24367
2028	151218	140599	136652	67523	45841	28952	77275	31730	24562
2029	152427	141724	137745	68063	46208	29183	77893	31984	24758
2030	153647	142857	138847	68607	46578	29417	78516	32239	24956
2031	154876	144000	139958	69156	46950	29652	79144	32497	25156
2032	156115	145152	141077	69710	47326	29889	79777	32757	25357
2033	157364	146313	142206	70267	47705	30128	80415	33019	25560
2034	158623	147484	143344	70829	48086	30369	81059	33284	25765
2035	159892	148664	144490	71396	48471	30612	81707	33550	25971
2036	161171	149853	145646	71967	48859	30857	82361	33818	26178
2037	162460	151052	146811	72543	49250	31104	83020	34089	26388
2038	163760	152260	147986	73123	49644	31353	83684	34362	26599
2039	165070	153478	149170	73708	50041	31604	84353	34636	26812
2040	166391	154706	150363	74298	50441	31856	85028	34914	27026
2041	167722	155944	151566	74892	50845	32111	85708	35193	27242
2042	169064	157191	152779	75491	51251	32368	86394	35474	27460
2043	170416	158449	154001	76095	51661	32627	87085	35758	27680
2044	171779	159717	155233	76704	52075	32888	87782	36044	27901
2045	173154	160994	156475	77318	52491	33151	88484	36333	28125
2046	174539	162282	157726	77936	52911	33416	89192	36623	28350
2047	175935	163581	158988	78560	53334	33684	89906	36916	28577
2048	177343	164889	160260	79188	53761	33953	90625	37212	28805
2049	178761	166208	161542	79822	54191	34225	91350	37509	29036
2050	180191	167538	162835	80460	54625	34499	92081	37809	29268
Referenz*	Statista 2025g	Statista 2025p	Statista 2025o	Statista 2025n	Statista 2025q	ODD 2025	Statista 2025e	Statista 2025c	Statista 2025f

[\*Statista 2025k; Flugbewegungen exkl. GRF]

Quelle: Eigene Darstellung, Referenzen siehe Tabelle

## **Anhang 14      Protokoll: Experten-Interview vom 23.10.2025**

### **Teilnehmende:**

Dr. Arne Diedrich      (Nachhaltigkeitsmanager des Flughafens BER)

Anton Förtsch      (Nachhaltigkeitsmanager des Flughafens BER)

Florian Franke      (Gruppenleitung – Energiespeicher und Wasserstofftechnologien für Luftfahrtanwendungen des DLR)

Simon Benedict Stein

### **Meetingformat:**

Das Interview erfolgte über die Online-Software Microsoft Teams. Hierbei hatten die Vertreter des BERs um die Verwendung dieser Plattform gebeten. Die Online-Besprechung fand am 23.10.2025 von 10.00 bis 10.35 Uhr in Form eines Video-Calls statt.

### **Auswertung:**

Bei der Auswertung des Interviews werden sowohl die Bewertung der Prioritäteneinschätzung der Stakeholder als auch die Angaben zur Entwicklung einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur beachtet.

Innerhalb des Qualität-Attribut-Rankings des QFDs ergab sich eine hohe Priorität in Bezug auf die Aspekte der Kosteneffizienz, Sicherheit, Klimafreundlichkeit sowie der Bedienungsfreundlichkeit. Dahingegen wurden die BOG-Einsatzmöglichkeiten wie auch die Leistung der Systeme mit einer geringen Priorität bewertet. Diese Bewertung wird durch den aktuellen Standpunkt des BERs gegenüber einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur gefestigt. Aus dem Interview geht hervor, dass einer Einführung von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen am Standort BER kritisch gegenübergestellt wird. Dies beruht auf internen Studien des BERs, in welchen sich keine Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Konstruktion einer Wasserstoffinfrastruktur ergab. Hierbei wurde vor allem die Herausforderung der Zulieferung von grünem Flüssigwasserstoff betont. Nach Angaben des BER würde eine eigenständige Verflüssigung von H<sub>2</sub> auf dem Flughafengelände durch eine Verflüssigungsanlage die vorhandenen nachhaltigen Energieressourcen weit übersteigen. Demnach wäre eine Zulieferung von benachbarten Kohlekraftwerken vonnöten um den Energiebedarf zu decken. Demzufolge wird davon ausgegangen, dass eine Produktion von grünem Wasserstoff am Standort BER vorerst nicht möglich ist. Eine angesprochene Alternative bildet die Zulieferung von Flüssigwasserstoff über den Schienenverkehr ab. Hierbei wird seitens des BERs auf die Herausforderung des Schienennetzes in Deutschland hingewiesen, sowie auf den Platzbedarf an Flughäfen. Demnach besitzen länger bestehende Flughäfen zumeist keine Möglichkeit zur Flächenerweiterung, sodass infrastrukturelle Veränderungen nicht durchführbar sind. Nach

Angaben des BERs besteht die Möglichkeit zur Erweiterung der Infrastruktur am eigenen Flughafenstandort. Dennoch ist eine Umstrukturierung des Flughafengeländes, wie z. B. die Installation eines LH<sub>2</sub>-Pipelinesystems, zukünftig nicht geplant. Hierbei werden die Kosten für den Umbau des Rollfeldes, sowie der Flugausfälle innerhalb der Bauzeit größer eingeschätzt als der resultierende Nutzen. Zudem wird die Bestrebung der Wiederverwendung vorhandener Kraftstoffinfrastruktur innerhalb des Interviews betont. Demnach bestehen für den BER in der Umrüstung der aktuellen Flugzeugtypen auf SAF als Treibstoff größere ökologisch-ökonomische Chancen als in der Einführung einer Flüssigwasserstoffinfrastruktur. Mit dieser Maßnahme sowie dem Ausbau von erneuerbaren Energiesystemen bezüglich der Stromversorgung soll der jährliche Anstieg des Passagieraufkommens von 2 bis 3 % bewältigt werden. Die Vertreter des BER betonten, dass weiterhin Interesse an alternativen Kraftstoffsystemen besteht. Hierbei gelten die Kosteneffizienz, die Klimafreundlichkeit und die Installationsmöglichkeiten auf dem Flughafengelände als entscheidende Faktoren. Zudem wurde hervorgehoben, dass Einschränkungen auf dem Rollfeld vermieden und der Verkehr von Bodenfahrzeugen minimiert werden soll. Abschließend haben die Vertreter des BER darauf hingewiesen, dass für eine Umstrukturierung und Erweiterung der Flughafeninfrastruktur ein Planungs- und Beantragungszeitraum von mindestens 10 Jahren im Voraus berücksichtigt werden muss.

## **Anhang 15      Protokoll: Experten-Interview vom 18.12.2025 sowie für den Zeitraum vom 04.11.2025 bis 31.01.2026**

### **Teilnehmende:**

Florian Franke            (Gruppenleitung – Energiespeicher und Wasserstofftechnologien für  
Luftfahrtanwendungen des DLR)

Simon Benedict Stein

### **Meetingformat:**

Das QFD-Interview erfolgte innerhalb eines Online-Meetings. Dieses fand am 18.12.2025 von 10.30 bis 11.30 Uhr statt. Zudem wurde innerhalb des Zeitraumes vom 04.11.2025 bis 31.01.2026 ein inhaltlicher Austausch in einem zweiwöchigen Rhythmus sowohl in Präsenz als auch online durchgeführt.

### **Auswertung:**

Aus den Besprechungen geht hervor, dass für die alternierenden Prozesse der Be- und Entladung der Kartuschen vorläufig eine Dauer von acht Stunden pro Prozessart anzunehmen ist. Durch zukünftige Forschungen könnten innovative Wechself Verfahren für die Kartuschen in den Betankungsfahrzeugen und an den LH<sub>2</sub>-Speichern entwickelt werden, wobei eine Reduzierung der Prozessdauer auf eine Stunde denkbar erscheint. In Bezug auf die tägliche Betriebsdauer der technischen Komponenten sind die allgemeinen Nachtflugverbotsregelungen der Flughafengesellschaften zu berücksichtigen. Um die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des MH-Kartuschen-Verfahrens im zeitlichen Verlauf analysieren zu können, ist die Betrachtung der OPEX und des BOG-Verlusts im Verhältnis zu den CAPEX des Basisjahres zu empfehlen. Hierbei ist zu beachten, dass zeitliche Veränderungen der Ausgangswerte wiederum zu zusätzlichen Investitionskosten im zeitlichen Verlauf führen. Demnach werden konstante Werte für die Basisdaten bis zum Jahr 2060 angenommen.

Zudem ergaben sich aus dem zweiwöchigen Austausch sowohl Hinweise zur grafischen Darstellung der Ergebnisse als auch zur Gestaltung der Prozessabbildungen für die LH<sub>2</sub>-Systeme. Des Weiteren wurden in dem genannten Zeitraum drei weitere Teilhypothesen (1b, 2b, 3b) in einem gemeinsamen Dialog entwickelt, sowie zwei weitere Szenarien (1.3, 2.3) für die Sensitivitätsanalyse beschlossen. Zusammenfassend ergab sich somit eine umfangreiche inhaltliche Betreuung durch Herrn Florian Franke.

## Hinweise zur QFD-Bewertung:

Anmerkungen QFD	LH <sub>2</sub> -Systeme		
	Betankungsfahrzeug	Pipeline	Hybrid
<b>Kosten-effizienz</b>	Betankungsfahrzeug < Pipeline, auf mittleren Sektor beschränkt	Pipeline > Hybrid, potenziell auch mittlerer Sektor	Hybrid < Pipeline, dennoch nicht auszuschließen
<b>Sicherheit</b>	Unfälle möglich	unterirdisch verbaut, damit geschützt und weniger anfällig	Unfälle möglich, weniger Verkehr als bei reiner Fahrzeugverteilung
<b>Integrations-möglichkeiten</b>	Betankungsfahrzeuge bereits im Einsatz	beinahe nur bei Neubau des Flughafens integrierbar	beinahe nur bei Neubau des Flughafens integrierbar aber geringerer Umfang
<b>Leistung</b>	sehr flexibles System aber Einschränkungen bei hohem Fahrzeugaufkommen	hohe Fördermenge mögl.	hohe Fördermenge und Flexibilität
<b>BOG-Einsatz-möglichkeiten</b>	viele GH <sub>2</sub> -Verbraucher möglich, BOG-Menge übersteigt möglw. den Bedarf	Rückführung der Verluste in LH <sub>2</sub> -Tanks und damit dem eigentlichen Zweck	viele GH <sub>2</sub> -Verbraucher möglich und auch Rückführung zu LH <sub>2</sub>
<b>Klima-freundlichkeit</b>	Fahrzeuge benötigen Energie/Kraftstoffe	Energie der Pumpen für Verteilung	Kompromiss
<b>Bedienungs-freundlichkeit</b>	Fahrer notwendig, ggf. mehrere Fahrzeuge pro Flugzeug	Dockingfahrzeug zum Flugzeug	Kompromiss

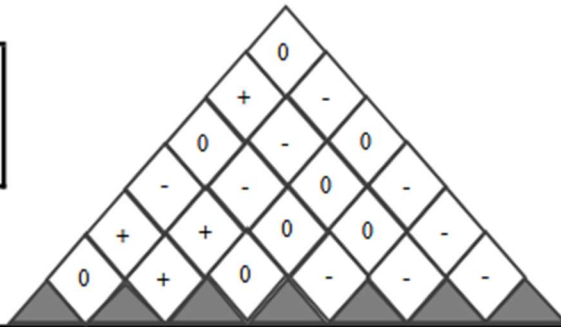
Anmerkungen QFD	BOG-Recyclingverfahren			
	Wiederverflüssigung	Kompression	MH-Kartuschen	Venting
<b>Kosten-effizienz</b>	sowohl im Pipeline- und Hybridsystem wirtschaftlich	Kompression < MH-Kartuschen, zeitliche Ventingkosten	MH-Kartuschen > Kompression, geringere Ventingkosten	permanente Langzeitkosten
<b>Sicherheit</b>	sicher, komplexe, stationäre Anlage	hoher Druck, bewegliche Anlagen	MHs sind inhärent sicher, BOG kann an jeder Position aufgefangen werden	Ventinggas muss kontrolliert verbrannt werden
<b>Integrations-möglichkeiten</b>	sehr große Anlage, hoher Platzbedarf	lokale Anlagen möglich, weniger kompakt als MH und Kompressor nötig	sehr flexibel, kompakt, Abwärme nötig	Einschränkung bei Positionierung der Fackeln
<b>Leistung</b>	hohe Rückgewinnung möglich, Massestrom abhängig von Dimensionierung	hohe Rückgewinnung möglich, Massestrom abhängig von Dimensionierung	hohe Rückgewinnung möglich, möglw. Witterungsabhängigkeit	hoher H <sub>2</sub> -Verlust
<b>BOG-Einsatz-möglichkeiten</b>	Rückführung der Verluste in LH <sub>2</sub> -Tanks und damit dem eigentlichen Zweck	viele GH <sub>2</sub> -Verbraucher möglich, BOG-Menge übersteigt möglw. den Bedarf	viele GH <sub>2</sub> -Verbraucher möglich, BOG-Menge übersteigt möglw. den Bedarf	Verlust
<b>Klima-freundlichkeit</b>	hoher Energiebedarf der Verflüssigung aber Nutzung von kaltem Gas sinnvoll	hoher Energiebedarf der Kompression, CFK-Tanks schwer recyclebar	Nutzung von Abwärme, recyclingfähig	Verlust
<b>Bedienungs-freundlichkeit</b>	automatisierte Großanlage	dezentrale Kleinanlage	schwer, Hebevorrichtungen nötig	keine Bedienung, wenig Wartung

[blau = Anmerkungen Herr Stein, orange = Anmerkungen Herr Franke]

# Anhang 16 House of Quality BER

## Quality-Function-Deployment Flughafen: BER

Wechselwirkung	
positiv	+
neutral	0
negativ	-



technische Komponente n	1 = nicht erforderlich 2 = vernachlässigbar 3 = neutral 4 = bedeutend 5 = sehr bedeutend	Betankungsfahrzeug	Pipe line	Hybrid	Wiederverflüssigung	Kompression	MH-Kartuschen	Venting	Ges.-punkte	rel. Anteil
		LH <sub>2</sub> -Betankungssysteme			BOG-Recyclingverfahren					
Systemanforderung Stakeholder	Qualitätsattribut-Ranking									
Kosten-effizienz	5	4	5	2	5	3	4	1	120	0.17
Sicherheit	5	3	5	4	4	3	5	1	125	0.17
Integrations-möglichkeiten	4	5	1	2	1	3	4	2	72	0.10
Leistung	3	4	5	5	5	5	4	1	87	0.12
BOG-Einsatz-möglichkeiten	2	4	5	5	5	3	3	1	52	0.07
Klima-freundlichkeit	5	3	5	4	5	3	5	1	130	0.18
Bedienungs-freundlichkeit	5	4	5	4	5	3	2	5	140	0.19
<b>Gesamt-punkte</b>		110	129	103	124	93	114	53		
<b>relativer Anteil</b>		0.15	0.18	0.14	0.17	0.13	0.16	0.07		

	Bewertung durch Stakeholder
	Bewertung auf Basis der Arbeitsergebnisse
	Bewertung durch Experten-Interview mit Florian Franke (DLR)

Das selbst erstellte Auswertungstool zum „House of Quality“ steht unter dem angegebenen Link oder auf dem beiliegenden physischen Datenträger zur Verfügung.

Link: <https://www.b-tu.de/owncloud/s/TwZCoC9wb6ZLiQs>

## Erklärung

Der Verfasser erklärt, dass die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als die angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassenden

Cottbus, 10.01.2026

S. 8'

## Hilfsmittel

Innerhalb der Literaturrecherche wurde zur Übersetzung von spezifischen Fachbegriffen folgendes Hilfsmittel verwendet:

DeepL Translate - <https://www.deepl.com/de/translator>

Für die Verwaltung der Literaturreferenzen wurde folgendes Hilfsmittel verwendet:

Zotero - <https://www.zotero.org/>

Zur abschließenden Überprüfung der Rechtschreibung wurde folgendes Hilfsmittel verwendet:

LanguageTool - <https://languagetool.org/de>