



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Mahmoud Swelim

Entwicklung einer Wasserstoff-Transportlösung für den Straßenverkehr mit dem Ziel der Anwendbarkeit im Luftverkehr

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Mahmoud Swelim

**Entwicklung einer Wasserstoff-Transportlösung für
den Straßenverkehr mit dem Ziel der Anwendbarkeit
im Luftverkehr**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Studiengang Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Werner Granzeier
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Benedikt Plaumann

Abgabedatum: 21.03.2023

Kurzreferat

Mahmoud Swelim

Thema der Masterthesis

Entwicklung einer Wasserstoff-Transportlösung für den Straßenverkehr mit dem Ziel der Anwendbarkeit im Luftverkehr.

Stichworte

Wasserstoff, Wasserstofftank, Systems Modeling System (SysML), Luftfahrt, Permeation, Klimaschutz

Kurzzusammenfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Wasserstofftanks, der sowohl für den Bodentransport geeignet ist als im Idealfall auch als lufttüchtig erklärt werden kann. Dafür adressiert die Arbeit die größten Herausforderungen bei der Entwicklung eines solchen Tanks. Zur Erarbeitung des Wasserstofftanks wird hierbei auf die Methodik Systems Modeling Language (SysML) zurückgegriffen.

Mahmoud Swelim

Title of the paper

Development of a hydrogen transport solution for road transport with the objective of applicability in air transport.

Keywords

Hydrogen, hydrogen tank, Systems Modeling System (SysML), aviation, permeation, climate protection

Abstract

The main objective of this work is to develop a hydrogen tank that is both suitable for ground transportation and, ideally, can be declared airworthy. For this purpose, the work addresses the main challenges in the development of such a tank. For the development of the hydrogen tank, the Systems Modeling Language (SysML) methodology is used.

Aufgabenstellung Masterarbeit

In der Luftfahrtindustrie gewinnt Wasserstoff zunehmend an Bedeutung. Um Wasserstoff im Flugzeugbau anwenden zu können, ist ein geeigneter Wasserstofftank von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund soll die Möglichkeit eines mobilen Anhängers für den Transport von Wasserstoff für die Luftfahrt untersucht werden. Der Anhänger soll als Wasserstofftank für Flugzeuge dienen und daher lufttuchtig sein. Hierbei müssen wichtige Faktoren wie Permeation, Materialauswahl, Isolationstyp und allgemeine Designkonfiguration berücksichtigt werden. Zusätzlich sind Wartung, Instandhaltung und Pflege wichtige Designmerkmale. Zur Erstellung des Wasserstofftanks soll zunächst eine Benchmark-Analyse durchgeführt werden, um eine geeignete Methodik zu entwickeln.

I. Inhaltsangabe

I.	Abbildungsverzeichnis	1
II.	Tabellenverzeichnis	3
1	Einleitung	4
2	Charakteristika des Wasserstoffs.....	6
2.1	Einleitung	6
2.2	Eigenschaften des Wasserstoffs	6
2.3	Rohstoffe	6
2.4	Wasserstoffarten.....	7
2.5	Zusammenfassung des aktuellen Kapitels	10
3	Wasserstoff im Flugzeugbau.....	11
3.1	Einleitung	11
3.2	Motivation der Anwendung	11
3.3	Antriebssysteme mit Wasserstoff	12
3.4	Speicherungsarten des Wasserstoffs	16
3.5	Form des Wasserstofftanks	23
3.6	Zusammenfassung des aktuellen Kapitels	23
4	Aktuelle Flugzeugkonzepte	25
4.1	Einleitung	25
4.2	Wasserstoff-Infrastruktur	25
4.3	Airbus aktuellen Konzepte	26
4.4	Zusammenfassung der aktuellen Kapitel.....	32
5	Systems Engineering nach SysML	33
5.1	Einleitung	33
5.2	Methodik der SysML	33
5.3	Systemidee	34

5.4	Benchmark-Analyse mit der QFD	34
5.5	Kontextdiagramm.....	38
5.6	Kostenanalyse	40
5.7	Sicherheitsanalyse.....	41
6	Designentwurf	45
6.1	Einleitung	45
6.2	Designkonfigurationen	45
6.2.1	Externer austauschbarer Tank	48
6.2.2	Interne austauschbare Behälter	50
6.2.3	Auswahl der am besten geeigneten Konfiguration	52
6.3	Analyse der erlangten Erkenntnisse	53
6.4	Materialauswahl.....	57
6.5	Isolationsauswahl	64
6.6	Finales Design	68
7	Fazit	71
8	Literaturverzeichnis	73

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herstellungsprozesse für grünen Wasserstoff [5]	8
Abbildung 2: Wasserelektrolyse mittels eines PEM_Elektrolyseurs [9]	9
Abbildung 3: Ausstoß von CO_2 Emissionen in Abhängigkeit des Antriebs [3]	12
Abbildung 4: Funktionsweise der Wasserstoff-Verbrennung [3]	13
Abbildung 5: Funktionsweise der Wasserstoff-Brennzelle [3]	15
Abbildung 6: Dichte des Wasserstoffs abhängig vom Druck und der Temperatur [20]	16
Abbildung 7: Darstellung eines Drucktanks	17
Abbildung 8: Darstellung eines Flüssigwasserstofftanks [18]	18
Abbildung 9: Vergleich von Wasserstoff und Kerosin bei $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24]	20
Abbildung 10: Transport von flüssigem Wasserstoff mittels eines LKW-Trailers	21
Abbildung 11: Doppelwandiger Wasserstofftank [28]	22
Abbildung 12: Möglichkeiten zur Unterbringung der Wasserstofftanks [32]	24
Abbildung 13: Konzept einer Infrastruktur der Flughäfen [25]	26
Abbildung 14: Das Konzept des BWB [17]	27
Abbildung 15: Unterbringung der Wasserstofftanks im BWB-Konzept	28
Abbildung 16: Das Konzept des Turboprop-Flugzeuges mit zwei Propellern [36]	29
Abbildung 17: Das Konzept des Turbofan-Flugzeuges mit zwei Triebwerken [36]	29
Abbildung 18: Zusätzliche Gasturbine am Airbus A380 [35]	30
Abbildung 19: Unterbringung von vier Wasserstofftanks [38]	31
Abbildung 20: Eine weitere Möglichkeit zur Unterbringung von Wasserstofftanks [18]	31
Abbildung 21: Ablauf des Systems Engineering [39]	33
Abbildung 22: Struktur eines QFD [41]	35

Abbildung 23: Quality Function Deployment.....	36
Abbildung 24: Kontextdiagramm.....	39
Abbildung 25: Sicherheitsanalyse.....	44
Abbildung 26: Darstellung von integralen und nicht integralen Tanks [29].....	47
Abbildung 27: Das Innenleben eines austauschbaren externen Tanks von Airbus [48]....	49
Abbildung 28: Geschätzten Kosten für die Speicherung von Wasserstoff	54
Abbildung 29: Vergleich der Standzeiten unterschiedlicher Tanks.....	55
Abbildung 30: Mehrschichtige Aluminiumummantelung eines Behälters [51]	56
Abbildung 31: Festigkeit über die Dichte [46]	60
Abbildung 32: Spezifischer Modul im Verhältnis zur spezifischen Festigkeit [46]	61
Abbildung 33: E-Modul dargestellt über die Dichte für verschiedene Materialien	62
Abbildung 34: Streckgrenze und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur	63
Abbildung 35: Einfluss der Dicke der Isolierung auf die Verdampfungsrate [47]	64
Abbildung 36: Wärmeleitfähigkeit über die Dichte [46]	65
Abbildung 37: Wärmeleitfähigkeit über die Wärmedurchlässigkeit [46]	65
Abbildung 38: Wärmeausdehnungskoeffizient über die Wärmeleitfähigkeit [48]	67
Abbildung 39: Interne austauschbare Behälter [55].....	69
Abbildung 40: Beladen der Tankbehälter in das Flugzeug [55]	69

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>CO2</i> -Auswirkungen der unterschiedlichen Prozesse.....	7
Tabelle 2: Speicherdichten der unterschiedlichen Aggregatzustände.....	17
Tabelle 3: Wichtige Parameter für die Tankauslegung	46
Tabelle 4: Designparameter der unterschiedlichen Tanks	52
Tabelle 5: Materialeigenschaften verschiedener Werkstoffe	62
Tabelle 6: Auswahl des Tankkonfiguration	68

1 Einleitung

Aktuell macht die Luftfahrtindustrie 2,5-3 % der durch Menschen verursachten CO_2 -Emissionen aus [1]. Mit Hinblick auf ein jährliches Wachstum des Luftfahrtsektors um 4,3 %, würde dieser Wert in der Zukunft immer größer werden und bis 2050 einen Anteil von 24 % der globalen CO_2 -Emissionen annehmen [2]–[4]. Es geht nun nicht mehr um lediglich die Reduzierung des bisherigen Treibstoffverbrauchs der Flugzeuge, sondern darum „Zero Emission“ Flugzeuge zu entwickeln. „Zero Emission“ Flugzeuge emittieren weder im Boden- noch im Flugbetrieb Schadstoffe [1]. Die vielversprechendste Möglichkeit das „Zero Emission“ Flugzeug zu erreichen, ist mit der Verwendung von Wasserstoff. Um den Umstieg auf Wasserstoff realisieren zu können, bedarf es grundlegender Veränderungen in der Infrastruktur. Die Anwendung von Wasserstoff im Flugzeugbau hängt maßgeblich von geeigneten Transport- und Speichermöglichkeiten für den Wasserstoff ab.

Das Ziel dieser Arbeit ist es daher einen mobilen Transportbehälter für Wasserstoff auszulegen. Der Wasserstoff, der von den Airlines bestellt wird, soll in einem mobilen Anhänger kommen. Dieser mobile Anhänger soll auch als lufttüchtig erklärt werden. Die Erarbeitung der Designkriterien und des Konzepts, erfolgen mit den Methodiken nach Systems Engineering mit der SysML.

Bevor es zur Erarbeitung des Transportbehälters kommt, muss aber erst ein Verständnis über die Motivation und die Herausforderungen erlangt werden, mit denen sich die Luftfahrtbranche beim Umstieg auf Wasserstoff konfrontiert sieht. Hierfür wird zunächst ein Überblick über die Charakteristika des Wasserstoffs und seiner Arten und Besonderheiten gegeben. Dann wird genauer auf die Beweggründe für die Anwendung speziell in Flugzeugen eingegangen, bevor es mit der Vorstellung von geeigneter Wasserstoff-Antriebssysteme in Flugzeugen weitergeht. Daraufhin werden wichtige Themen behandelt, welche für die Konzeptionierung eines Transportbehälters essenziell sind und die größten Herausforderungen darstellen. Darunter fallen geeignete Speicher- und Transportmöglichkeiten des Wasserstoffs und Kriterien bei der Auslegung der Form eines Wasserstofftanks. Anschließend werden die aktuellen Konzepte der Wasserstoffflugzeuge vorgestellt. In Kapitel 5 geht es mit der Vorstellung der in dieser Arbeit verwendeten SysML-Methodik weiter, die zur Entwicklung des Systems verwendet wurde. Dann wird die Systemidee kurz vorgestellt, bevor es mit den zur SysML gehörenden Analysen, wie der QFD-Analyse, dem Kontextdiagramm, der Kostenanalyse und der Sicherheitsanalyse weitergeht. Außerdem werden noch verschiedene Designkonfigurationen vorgestellt, welche potenzielle Kandidaten für den Wasserstofftank sein könnten. Abschließend wird in Kapitel 6

mit den erlangten Erkenntnissen ein Designentwurf vorgenommen. Für das ausgewählte Design wird dann ein geeignetes Material und eine geeignete Isolation ausgewählt. Abschließend wird ein finales Design präsentiert, welches den Wasserstofftank darstellen soll.

2 Charakteristika des Wasserstoffs

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Eigenschaften des Wasserstoffs vorgestellt. Darunter fallen wichtige Kennzahlen, Rohstoffe aus denen Wasserstoff gewonnen werden kann, verschiedene Wasserstoffarten und dessen Herstellungsverfahren.

2.2 Eigenschaften des Wasserstoffs

Wasserstoff ist das leichteste Element des Periodensystems mit der geringsten Dichte von ca. $0.089 \frac{kg}{m^3}$. Es ist zudem das am häufigsten vorkommende Element im Universum und eines der häufigsten auf der Erde. Im Universum repräsentiert der Wasserstoff etwa 90 % aller Atome und etwa drei Viertel der Gesamtmasse [5]. Wasserstoff verfügt über eine ausgezeichnete gravimetrische Energiedichte von ca. $120 \frac{MJ}{kg}$. Als Vergleichswert dient die gravimetrische Energiedichte von Kerosin von ca. $44 \frac{MJ}{kg}$. Jedoch wird diese ausgezeichnete Eigenschaft des Wasserstoffs durch die sehr niedrige volumetrische Energiedichte von ca. $8.495 \frac{MJ}{l}$ in den Schatten gestellt. Als Vergleichswert dient auch hierbei die volumetrische Dichte von Kerosin, welche bei ca. $34.8 \frac{MJ}{l}$ liegt [6].

Zur Erhöhung dieser geringen volumetrischen Dichte des Wasserstoffs, gibt es nun zwei etablierte Möglichkeiten. Zum einen den Wasserstoff unter hohem Druck in Druckbehältern zu speichern und zum anderen die Verflüssigung des Wasserstoffs durch Kühlung. Diese beiden Möglichkeiten werden im Rahmen dieser Arbeit noch genauer untersucht.

2.3 Rohstoffe

Auf der Erde gibt es keine natürlichen Wasserstoffvorkommen. Wasserstoff ist nur in gebundener Form vorhanden, wie in Kohlenwasserstoffstrukturen und in Wasser. Zur Gewinnung des reinen Wasserstoffs, müssen diese Strukturen aufgebrochen und die entstehenden Wasserstoffmoleküle abgetrennt werden. [7]

Vorteilhaft am Wasserstoff ist, dass sich dieser überall mit verschiedenen erneuerbaren Energiequellen herstellen und ohne nennenswerte Verluste verteilen lässt. Zur Gewinnung des Wasserstoffs gibt es nun unterschiedliche Verfahren, welche mehr oder weniger nachhaltig sind. Je nach Gewinnung unterscheidet man hierbei unterschiedliche Wasserstoffarten.

2.4 Wasserstoffarten

Jährlich werden weltweit etwa 700 Mrd. m³ Wasserstoff hergestellt. Davon werden 98 % aus fossilen Energieträgern gewonnen, welche als grauer Wasserstoff bezeichnet werden [5]. Je nach Herstellung und der dabei freisetzenden CO₂-Emissionen wird Wasserstoff generell in drei unterschiedliche Kategorien unterteilt: dem grauen-, blauen- und grünem Wasserstoff. Als grau wird Wasserstoff eingestuft, wenn bei der Herstellung CO₂-Emissionen freigesetzt werden, als blau, wenn diese Emissionen auf irgendeine Art und Weise neutralisiert werden und als grün, wenn es bei der Erzeugung des Wasserstoffs, zu keiner Erzeugung von CO₂-Emissionen kommt. [3] Im Folgenden werden der grüne und der blaue Wasserstoff sowie deren Herstellungsverfahren vorgestellt.

Tabelle 1: CO₂-Auswirkungen der unterschiedlichen Prozesse

Prozesse	Treibstoffart	Wirkungsgrad	CO ₂ -Auswirkungen
Thermische Reformierung	CH ₄ (Methan)	< 80 %	große Wirkung
Partielle Oxidation	fossile	< 80 %	große Wirkung
Kvaerner Prozess	fossile	< 95 %	kleine Wirkung
Elektrolyse fossil	fossile	< 70 %	große Wirkung
Dampfreformierung	Biomasse	< 80 %	CO ₂ -neutral
Elektrolyse EEQ	PV/Wind/Wasserkraft	< 80 %	keine Auswirkungen

Grüner Wasserstoff

Der grüne Wasserstoff wird in der Zukunft eine wichtige Rolle in der nachhaltigen Energieversorgung spielen, sei es zur Erzeugung von Wärme, Strom oder auch im Transportsektor [5]. Wasserstoff, bei dessen Herstellung es durch die Verwendung von erneuerbaren Energien zu geringfügigen bis keinen CO₂ Emissionen kommt, wird als grüner Wasserstoff bezeichnet.

Herstellung des grünen Wasserstoffs

Es gibt sehr viele unterschiedliche Prozesse zur Herstellung des grünen Wasserstoffs. Einige der verfügbaren Herstellungsprozesse sind in Abbildung 1 illustriert.

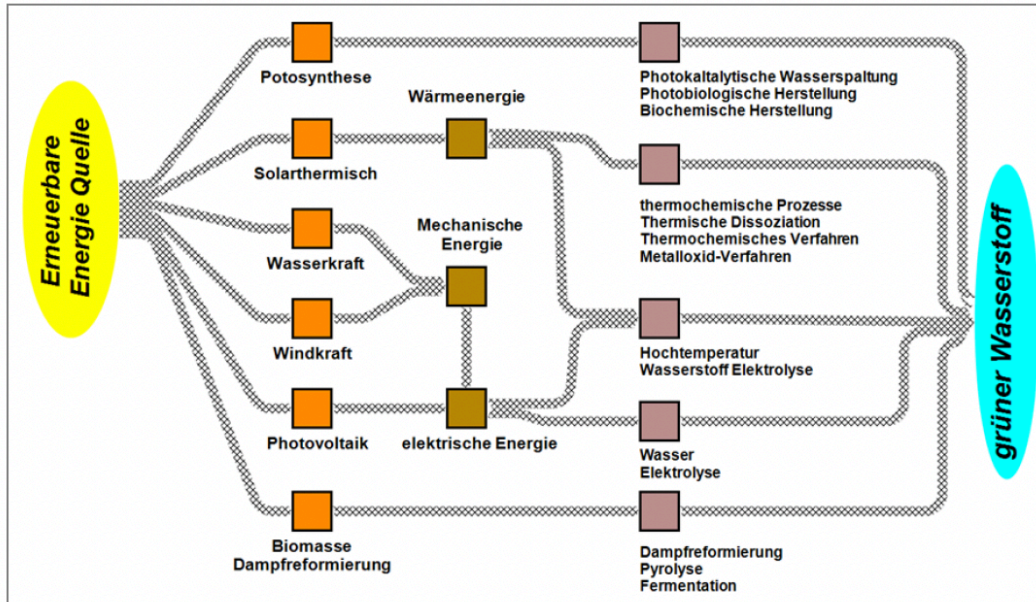
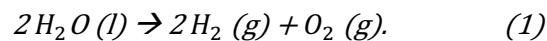


Abbildung 1: Herstellungsprozesse für grünen Wasserstoff [5]

Vor allem hat sich die Wasserelektrolyse als äußerst nachhaltig bewährt, dennoch ist diese Wasserelektrolyse noch nicht weit verbreitet. Bei der Wasserelektrolyse erfolgt die Gewinnung des Wasserstoffs, in dem Wasser durch den Einsatz von elektrischem Strom, in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten wird [8]. Dies kann durch Gleichung 1 beschrieben werden.



Die Elektrolyse wird mit einem Elektrolyseur durchgeführt. Die drei relevantesten Technologien des Elektrolyseurs sind der alkalische Elektrolyseur, der Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseur (PEM) und die Festoxid-Elektrolyseurzelle. Meist erfolgt die Elektrolyse aber mit der Protonen-Austausch-Membran (PEM) [8]. Eine Darstellung des PEM ist in Abbildung 2 gegeben.

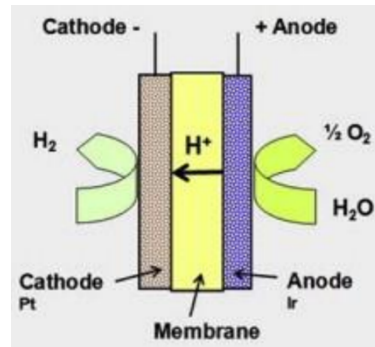


Abbildung 2: Wasserelektrolyse mittels eines PEM_Elektrolyseurs [9]

Die PEM liegt hierbei in Wasser. An die Elektroden wird eine elektrische Spannung angelegt, wodurch das Wasser in Sauerstoff, Protonen (H^+) und freie Elektronen gespalten wird. Die Protonen wandern durch die Membran, wo sie sich mit den Elektronen an der Kathode verbinden und Wasserstoff bilden [9]. Bei diesem Verfahren werden keine Emissionen freigesetzt.

Blauer Wasserstoff

Bei der Herstellung des blauen Wasserstoffs, werden die entstehenden CO_2 -Emissionen auf unterschiedliche Art und Weise eingefangen. Inwiefern dieser Wasserstoff die CO_2 Emissionen verringert, wird somit von der Art und Weise auf, welche dieser hergestellt wird, beeinflusst. [8] Der blaue Wasserstoff lässt sich mit bereits vorhandenen Anlagen, mit kleinen Anpassungen, im Gegensatz zum grünen Wasserstoff herstellen. Deswegen wird dieser gerne als Übergangslösung zur Wasserstoffinfrastruktur gesehen [10].

Herstellung des blauen Wasserstoffs

Die Herstellung des blauen Wasserstoffs, kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Zum einen kann die Produktion mit Hilfe der carbon dioxide capture and storage (CCS) Methode und zum anderen mit Hilfe der carbon dioxide capture and utilisation (CCU) Methode erfolgen. Bei der CCS-Methode wird ein Großteil des entstehenden CO_2 abgeschnitten und dauerhaft gelagert. Die CCU-Methode hingegen, strebt die Weiterverwendung des CO_2 in anderen chemischen Prozessen an. [11]

Die Produkte dieser Prozesse speichern das CO_2 nur bis zu ihrer jeweiligen Verwendung. Am Ende entweicht das CO_2 in die Atmosphäre. Die Weiterverwendung des CO_2 als Rohstoff führt allerdings dazu, dass weniger fossile Brennstoffe verwendet werden. Bei Prozessen wie der

Herstellung von synthetischem Treibstoff, führt die Methode des CCU insgesamt zu einer Halbierung der CO_2 -Emissionen. [12]

2.5 Zusammenfassung des aktuellen Kapitels

1. Je nach Herstellung und der dabei freisetzenden CO_2 -Emissionen, wird Wasserstoff generell in drei unterschiedliche Kategorien unterteilt: dem grauen-, blauen- und grünem Wasserstoff.
2. Lediglich der grüne Wasserstoff kann zur endgültigen Klimaneutralität und zum Zero-Emission-Flugzeug beitragen.
3. Der Fokus aktuell und in der Zukunft, wird auf dessen Produktion gelegt. Es gibt bereits unterschiedliche Herstellungsverfahren des grünen Wasserstoffs. Als besonders grün scheint die Anwendung des Herstellungsverfahrens der Wasser-Elektrolyse.

3 Wasserstoff im Flugzeugbau

3.1 Einleitung

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Motivation der Anwendung des Wasserstoffs im Flugzeugbau geben. Dann werden die wichtigsten Antriebssysteme, deren Vor- und Nachteile sowie die dabei freigesetzten Schadstoffe präsentiert. Anschließend geht es mit den Speicherungsarten des Wasserstoffs weiter, bevor die entscheidenden Parameter bei der Auswahl der Form des Tanks präsentiert werden.

3.2 Motivation der Anwendung

Für den weltweiten Flugverkehr wird ein jährliches Wachstum von 4,3 % vorhergesagt [2], [3]. Mit steigendem Flugverkehr steigt der Treibstoffausstoß und damit die Verantwortung der Luftfahrt gegenüber den Menschen. Um der Umweltverschmutzung entgegenzuwirken und damit diesem jährlichen Wachstum nichts im Weg steht, erklärte sich die Flugzeugindustrie Europas bereit, gewisse Anforderungen bezüglich des Klimawandels zu erfüllen. Diese Anforderungen sind in dem Handbuch „Flightpath 2050“ dokumentiert, welches von der EU veröffentlicht wurde.

Zu diesen Anforderungen gehören:

- eine Verringerung der CO_2 -Emissionen um 75 % pro Passagierkilometer
- eine Verringerung der Stickstoff-Emissionen um 90 % pro Passagierkilometer
- eine Verringerung der Lärmemissionen um 65 %
- Flugzeuge sollen beim Rollen emissionsfrei sein

[4]

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, müssen radikale Änderungen her. Es bedarf neuer Antriebssysteme, neuer Speichermöglichkeiten des Kraftstoffs und neuer Infrastrukturen am Flughafen. Im Folgenden werden die Antriebssysteme und die Speichermöglichkeiten vorgestellt.

3.3 Antriebssysteme mit Wasserstoff

Es gibt vor allem zwei geeignete Wasserstoff-Antriebssysteme in der Flugzeugbranche. Zum einen das Flugzeug, welches mit Wasserstoff-Brennzellen betrieben wird und zum anderen das Flugzeug, welches mit der Wasserstoff-Verbrennung betrieben wird. In Abbildung 3 ist der Ausstoß der CO_2 -Emissionen und der „Non- CO_2 -Emissionen“ der beiden Antriebssysteme dargestellt.

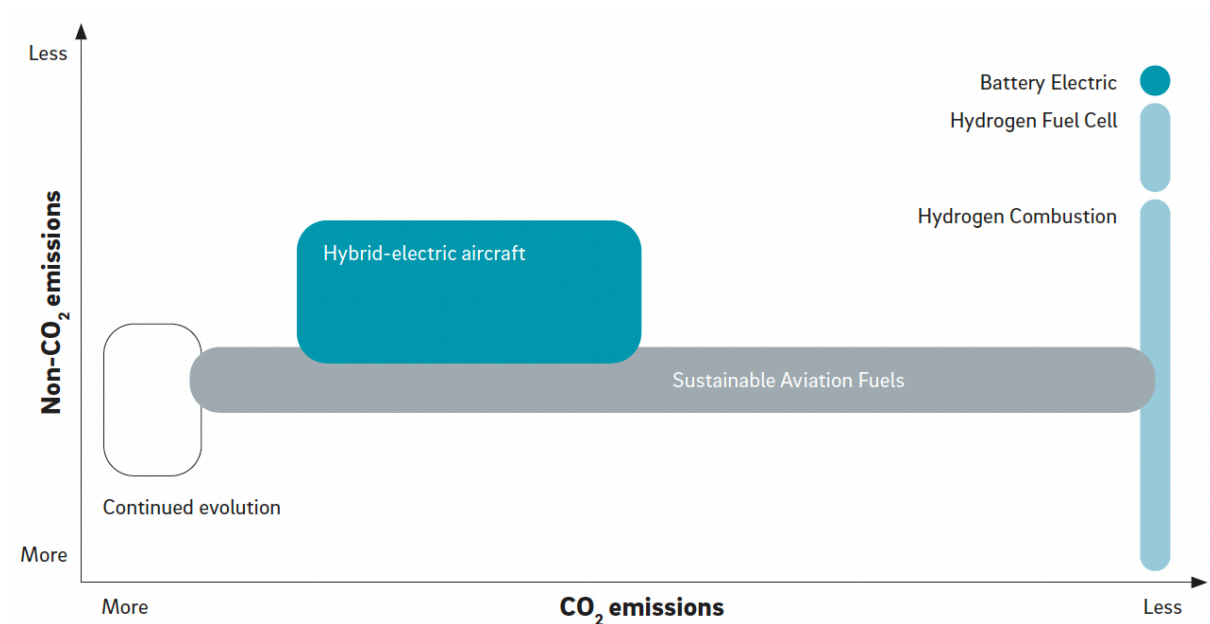


Abbildung 3: Ausstoß von CO_2 Emissionen in Abhängigkeit des Antriebs [3]

Auffällig ist hierbei, dass bei Wasserstoff-Brennzellen deutlich weniger CO_2 - und auch Non- CO_2 -Emissionen freigesetzt werden als bei der Wasserstoff-Verbrennung.

Wasserstoff -Verbrennung

Funktionsweise der Wasserstoff-Verbrennung

Eine Verbrennung in generell beruht auf chemischen Prozessen, bei denen Energie aus einem Gemisch aus Brennstoff und Luft freigesetzt wird [13]. Im Falle der Wasserstoff-Verbrennung wird also flüssiger oder gasförmiger Wasserstoff verbrannt. Dann wird durch die Verbrennung

Es könnte jedoch sein, dass Wasserdampf, welcher durch Wasserstoffverbrennung freigesetzt wird, besser ist als jener, welcher durch die bislang verwendeten Kerosin Turbinen freigesetzt wird, denn der Wasserdampf reagiert mit den Rußpartikeln und führt somit zu länger anhaltenden Kondensstreifen. Bei den Wasserstoff-Verbrennungen gibt es nun keine Rußpartikel, so dass die Auswirkungen begrenzt werden, der entstehenden Kondensstreifen [14], [15]. Um dies herauszufinden und Daten sammeln zu können, bedarf es realer Tests.

Vor und Nachteile der Wasserstoff-Verbrennung

Die Umstellung von Kerosin auf Wasserstoff, bringt in jedem Fall ein großes Prozedere mit sich. Denn bei der Verwendung der Wasserstoff-Verbrennung bedarf es viele Erneuerungen in der Funktionsweise des Antriebssystems, wie beispielsweise im Triebwerk selbst, in der Speicherung des Wasserstoffs und weiterem. Auch ist der Aspekt der Zertifizierung nicht zu vernachlässigen, welcher sehr zeitaufwändig wäre.

Dennoch würde es sich bei der Verwendung der Wasserstoff-Verbrennung um einen viel geschmeidigeren Übergang von bislang bestehenden Antriebssystemen zu der Wasserstoff-Verbrennung, als zu elektrischen Antrieben oder Wasserstoff-Brennzellen handeln. Dies liegt an den vielen Schnittstellen zu den bisherigen Triebwerken, wie schon in Abbildung 4 dargestellt wurde. [3]

Wasserstoff-Brennstoffzellen

Funktionsweise der Wasserstoff-Brennzellen

Die Brennstoffzelle in Verbindung mit grünem Wasserstoff, hat auf lange Sicht gesehen das größte Potenzial [16]. Bei diesem Antriebssystem werden Wasserstoff und Sauerstoff aus der Umgebung durch eine Brennstoffzelle in Strom umgewandelt, welcher einen Motor antreibt und welcher wiederum ein Gebläse antreibt, wodurch es zur Entstehung von Schub kommt. Als Nebenerzeugnis wird Wasser aus der Brennstoffzelle abgelassen. Diese Funktionsweise ist in Abbildung 5 dargestellt.

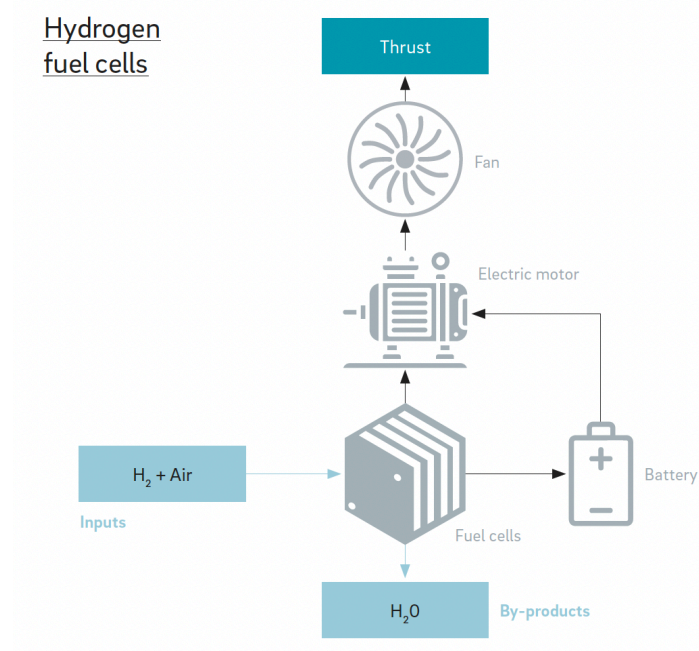


Abbildung 5: Funktionsweise der Wasserstoff-Brennzelle [3]

Schadstoffe der Wasserstoff-Brennzellen

Die Abläufe in der Wasserstoff-Brennzelle erfolgen bei wesentlich niedrigeren Temperaturen als bei der Wasserstoffverbrennung. Dies hat zur Folge, dass es nicht zur Entstehung von NO_x kommt [17]. Außerdem werden mit Wasserstoff-Brennzellen weder CO_2 , SO_x , CO noch HC produziert. Die einzige Emission der Brennstoffzelle bei der Verwendung von Wasserstoff ist Wasser- (dampf).

Vor und Nachteile der Wasserstoff-Brennzellen

Die wie bereits erwähnte niedrige Betriebstemperatur verhindert die Entstehung unerwünschter Emissionen wie NO_x , welche bei der Wasserstoff-Verbrennung nicht oder nur begrenzt verhindert werden können (siehe auch Abbildung 3).

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Wasserstoff-Brennzellen ist außerdem eine erhöhte Effizienz des Kraftstoffs bei den Wasserstoff-Brennzellen, gegenüber dem Kraftstoff bei der Wasserstoff-Verbrennung [17]. Bei den Wasserstoff-Brennzellen verfügt der Kraftstoff eine Effizienz von 45-50% und bei der Wasserstoff-Verbrennung eine Effizienz von 40% [3].

Doch im Gegensatz zu der Wasserstoff-Verbrennung, würde es sich hierbei um eine drastische Umgestaltung der Antriebssysteme der Flugzeuge von heute handeln.

3.4 Speicherungsarten des Wasserstoffs

Die schon angesprochene sehr geringe volumenbezogene Energiedichte des Wasserstoffs, bringt auch seine Nachteile mit sich. Denn eine geringe Dichte von $0.089 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ heißt gleichzeitig ein großes damit einhergehendes hohes Volumen zur Speicherung von ausreichend Wasserstoff. Unter normalem Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur bräuchte man rund 3.000 Liter gasförmigen Wasserstoff, damit man die gleiche Energiemenge wie ein Liter Kerosin erhält [18], [19]. Es bedarf also Strategien, um die Dichte des Wasserstoffs zu erhöhen und dessen Speicherung effizienter zu gestalten. Dafür kann entweder der Druck erhöht werden, sodass der Wasserstoff gasförmig wird oder es kann eine Kühlung des Wasserstoffs erfolgen, sodass dieser verflüssigt. Dieses Phänomen ist in Abbildung 6 dargestellt.

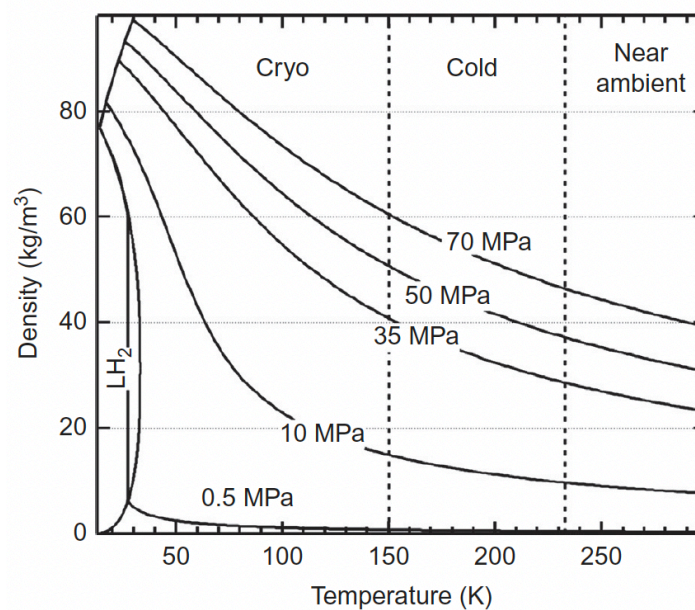


Abbildung 6: Dichte des Wasserstoffs abhängig vom Druck und der Temperatur [20]

Wie dem Graphen zu entnehmen ist, ist eine der am besten geeigneten Möglichkeiten Wasserstoff zu speichern bei Temperaturen von ca. 22 K (-253°C) und einem geringen Druck.

In Tabelle 2 sind zudem die Speicherdichten von Kraftstoffen und Wasserstoffen unterschiedlicher Aggregatzustände hinterlegt.

Tabelle 2: Speicherdichten der unterschiedlichen Aggregatzustände

Kraftstoff	$\varepsilon_{V,Kraftstoff} \left(\frac{MJ}{l} \right)$	$\varepsilon_{m,Kraftstoff} \left(\frac{MJ}{kg} \right)$
<i>Benzin</i>	32,2	43,2
<i>Kerosin</i>	34,9	43,2
<i>Wasserstoff (flüssig)</i>	7	120
<i>Wasserstoff (gas)</i>	5	120

Im Folgenden wird auf die beiden wichtigsten für den Flugzeugbau wichtigere Speicherung durch Kühlung.

Druckspeicherung - Gasförmiger Wasserstoff

Bei der Druckerhöhung wird der Wasserstoff in Druckbehältern gespeichert. Im Fahrzeugbau beispielsweise, wird diese Speicherung häufig eingesetzt. Die dabei entstehenden Drücke starten bei ca. 200 bar und erreichen im Fahrzeug- und Flugzeugbau bis zu 700 bar. [19] [21]. Um dem hohen Druck standhalten zu können, sind die Druckbehälter durch hohe Festigkeiten gekennzeichnet. Mit diesen hohen Festigkeiten geht auch eine hohe Masse der Druckbehälter einher, weshalb die Effizienz dieser Speicherung als eher niedrig bemessen wird. [21]

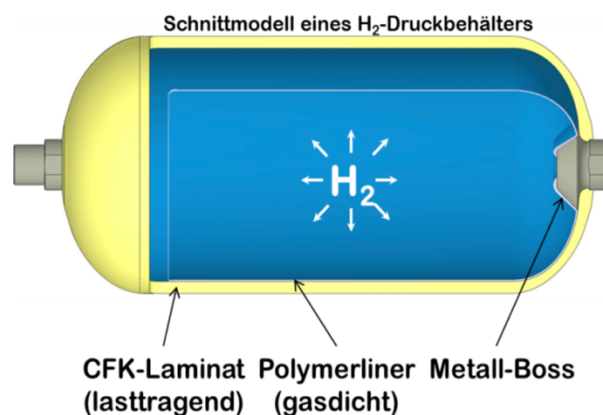


Abbildung 7: Darstellung eines Drucktanks

Außerdem ist die volumetrische Dichte im Vergleich zur flüssigen Dichte geringer [3]. Wendet man diese Methode der Druckspeicherung an, würden die in der Einleitung angesprochenen 3.000 Liter auf 6 Liter reduziert werden [18].

Transport des gasförmigen Wasserstoffs

Bei dem Transport des gasförmigen Wasserstoffs, kann auf bereits existierende Infrastrukturen zurückgegriffen werden. Denn wie auch Erdgas, kann dieser über Erdgas-Leitungen auch über längere Strecken transportiert werden. Das Gas sollte hierbei in geeigneten Druckbehältern gelagert werden. Bereits vorhandene Verteilernetze weisen Verluste von kleiner als 1 % auf. [22] Das Thema des Transports des gasförmigen Wasserstoffs wird ab Kapitel 7 noch ausgiebiger untersucht.

Speicherung durch Kühlung - Flüssiger Wasserstoff

Aufgrund der hohen gravimetrischen Energiedichte ist verflüssigter Wasserstoff ein guter Anwarter für die Energiespeicherung in der Luftfahrt [23]. Diese Speicherung erfolgt, in dem das Gas vor der Befüllung des Tanks bei einer Temperatur von -253°C verflüssigt wird [19], [21]. Diese Wasserstoffverflüssigung ist ein energieintensiver Prozess, und die Speicherung von flüssigem Wasserstoff ist eine fortschrittliche Technologie. Denn bei dieser Lagerung herrscht ein großer Temperaturunterschied innerhalb und außerhalb des Tanks.

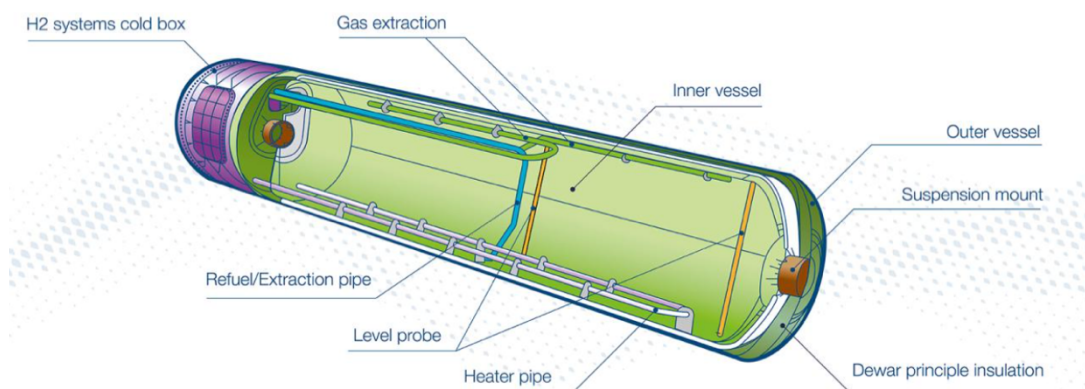


Abbildung 8: Darstellung eines Flüssigwasserstofftanks [18]

Wegen des hohen Temperaturunterschiedes innerhalb und außerhalb des Tanks, würde von außen Wärme in den Tank fließen. Die von außen in den Tank einfließende Wärme, würde dazu führen, dass der Wasserstoff erwärmt und anschließend siedet und gasförmig wird, woraufhin auch der Druck im Behälter steigen würde. Dementsprechend muss dieser Druckerhöhung entgegengesteuert werden. Dies kann auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen. Zum einen durch die Verwendung einer sehr guten dicken Isolierung des Tanks. Durch diese Methode würde aber auch das Gewicht stark ansteigen und somit würde sich die Anwendung im Flugzeugbau als relativ unrealistisch gestalten. Zum anderen könnte ein Gleichgewicht im Tank hergestellt werden durch das Ablassen des abgekochten Wasserstoffs. Durch diese Methode geht aber viel Wasserstoff verloren, da der abgekochte Wasserstoff nicht mehr verwendet werden kann.

Eine Lösung dieses Problems könnte ein gleichmäßiger Verbrauch des Wasserstoffs aus dem Tank sein, um der Druckerhöhung im Tank entgegenzusteuern. Denn wenn der Wasserstoffverbrauch viel größer ist als die Abdampftrate wird Gleichgewicht hergestellt und somit wäre auch keine große Isolierung erforderlich. Dieses Phänomen lässt sich beispielsweise bei Raketen beobachten, weshalb die Speicherung durch Kühlung bei der Space Shuttle Anwendung gefunden hat. [21] [23] Diese Methode würde allerdings die Standzeit des Tanks auf ein Minimum reduzieren. Ein weiterer Nachteil der flüssigen Wasserstoffspeicherung ist der erhebliche Strombedarf für die Verflüssigung des Wasserstoffs (bis zu 40 % des unteren Heizwertes). Außerdem dehnt sich LH2 bei der Erwärmung zwischen 20 K und dem kritischen Punkt (33 K) erheblich aus. Aus diesem Grund werden die LH2-Tanks nur zu 85-95 % gefüllt, um ein Auslaufen von flüssigem Wasserstoff zu verhindern. Das heißt aber auch, dass 5-15 % des möglichen Tankvolumens leer verbleiben.

Flüssigwasserstofftanks erfordern auch ein sehr hohes Volumen. Eine Unterbringung in den Flügeln des konventionellen Passagierflugzeuges oder Frachtflugzeuges wäre nicht mehr möglich.

Wendet man nun diese Methode der Speicherung durch Kühlung an, würden die in der Einleitung angesprochenen 3000 Liter, welche durch die Druckspeicherung auf 6 Liter reduziert wurden, sogar noch weiter auf 4 Liter reduziert werden. [18] Dieser Vergleich ist in Abbildung 9 bildlich veranschaulicht.

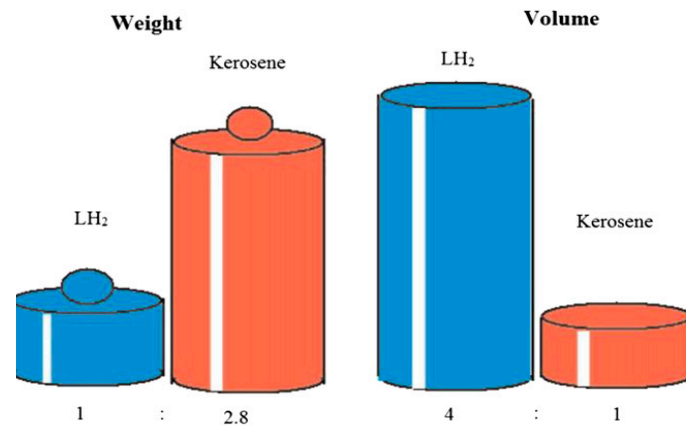


Abbildung 9: Vergleich von Wasserstoff und Kerosin bei -253 °C [24]

Um der angesprochenen Verdampfungsrate des flüssigen Wasserstoffs entgegenzuwirken, bedarf es einer optimalen Isolierung. Im Folgenden wird auf das Thema Transport von flüssigem Wasserstoff und anschließend auf die Isolierungen kryogener Tanks genauer eingegangen. Als kryogen werden Temperaturen unter -150 °C bezeichnet [20].

Transport von flüssigem Wasserstoff

In zentralen Anlagen werden relativ große Mengen an Wasserstoff verflüssigt, über kryogene LKWs oder sogar Zugwaggons und Pipelines verteilt und in vakuumisolierten Behältern an den Standorten der Endverbraucher gespeichert [20]. Durch die angesprochenen Eigenschaften des flüssigen Wasserstoffs, muss dieser bei all diesen Transportmöglichkeiten unter besonderen Bedingungen transportiert werden, wie beispielsweise unter Verwendung kryogener doppelwandiger Tankwagen.



Abbildung 10: Transport von flüssigem Wasserstoff mittels eines LKW-Trailers

Die sich bereits in Anwendung befindenden Tankwagen weisen Verluste kleiner als 0.25 % auf. [22]

Die Verflüssigung des Wasserstoffs ist eine gute Lösung für die Speicherung und den Transport großer Wasserstoffmengen und stellt die beste Lösung für den Transport von kommerziellem Wasserstoff über mittlere bis lange Strecken dar [20].

Auf den Transport von flüssigem Wasserstoff wird ab Kapitel 7 noch weiter eingegangen.

Isolierung eines kryogenen Tanks und die Verdampfungsrate

Die Isolierung des kryogenen Tanks spielt also eine entscheidende Rolle. Denn die Verdampfungsrate des Wasserstoffs ist vor allem abhängig von der Dicke- und der Art der Isolierung. [21] Die Verdampfungsrate gibt das Verhältnis zwischen dem verdampften Gas und der Größe des Tanks an [25]. Bei Tanks, welche über einen längeren Zeitraum auf dem Boden stehen, bzw. transportiert werden, ist dies von entscheidender Bedeutung. Denn es findet kein Verbrauch des Wasserstoffs statt. Somit könnte eine vorhandene Verdampfungsrate zu einem zu hohen Druckanstieg führen, ohne dass Wasserstoff gleichzeitig verbraucht wird. Es gilt zu beachten, dass eine dicke Isolierung eines kryogenen Tanks automatisch einen Anstieg des Gewichts bedeutet, welches im Flugzeugbau eine kritische Rolle spielt.

Doch auch bei einer guten Isolierung kann die Verdampfungsrate nicht eliminiert werden. Der Wärmestrom in den Tank beträgt immer noch abhängig von weiteren Faktoren ca. 2-3 W [26]. Dies führt wiederum zu einer Verdampfung des im Tank gespeicherten Wasserstoffs, was einen Druckanstieg zur Folge hat. Ab einem erreichten Druck von ca. 1 MPa Wasserstoff wird mit Hilfe eines Ventils Wasserstoff abgelassen. Ab diesem Zeitpunkt, welcher in der Regel nach einigen Tagen eintritt, geht permanent Wasserstoff an die Umwelt verloren. [26] Es gibt verschiedene Arten von Isolierungen. Im Folgenden wird die Perlit-Isolierung kurz vorgestellt.

Perlit-Isolierung

Eine der bekanntesten und renommiertesten Isolierungen für Wasserstofftanks ist die Perlit-Isolierung. Perlit ist ein kieselartiges Vulkangestein und auch ein nachhaltiges Material. Bei Temperaturen von ca. 900 °C expandiert es stark, was Perlit zu einem ausgezeichnetem Isolierungsmaterial bei geringem Gewicht macht [27].

Ein mit Perlit-Isolierung versehener Tank ist in Abbildung 11 dargestellt.

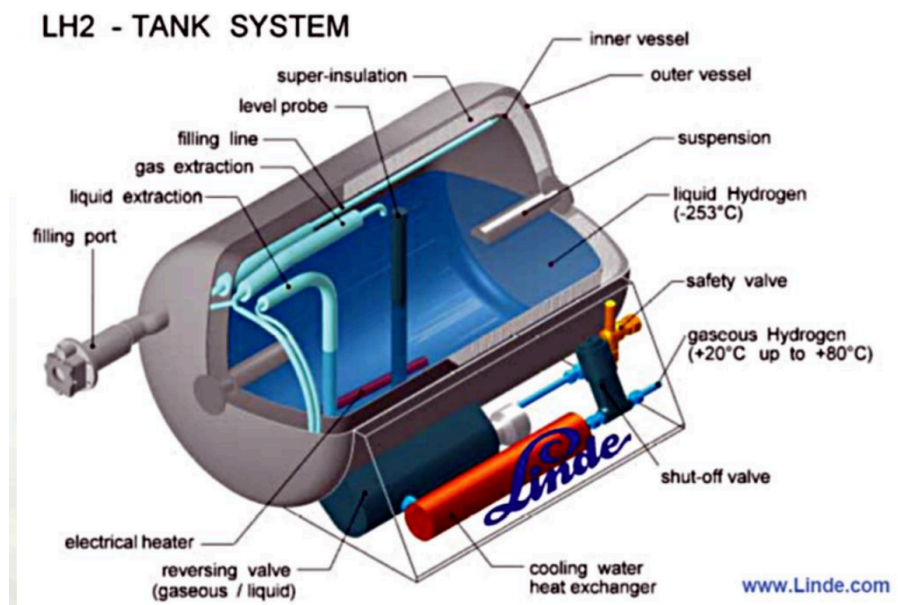


Abbildung 11: Doppelwandiger Wasserstofftank [28]

Dieser Tankbehälter setzt sich aus einem kalten inneren Behälter für die Flüssigkeit, einem warmen äußeren Behälter und einem vakuumierten Ringraum, der mit einer pulverförmigen Isolierung, in der Regel Perlit, gefüllt ist zusammen. [29] Die Anwendung von Perlit Isolierungen führt zu einer Minimierung der Verdampfungsrate auf ca. 0.3 % pro Tag [20].

3.5 Form des Wasserstofftanks

Wie schon in den vorherigen Kapiteln über flüssigen Wasserstoff für die Luftfahrt betont wurde, besteht einer der Schlüsselfaktoren und größten Herausforderungen für die Nutzung von Wasserstoff als Flugzeugtreibstoff, in der Konstruktion geeigneter Wasserstofftanks. Bei der Gestaltung und Auslegung des Wasserstofftanks spielt die Form eine entscheidende Rolle. Denn Wasserstofftanks nehmen das ca. Vier- bis Fünffache Volumen der bislang verwendeten Kerosintanks ein. Somit passen diese Tanks nicht mehr wie bislang in die Tragflächen des Flugzeugs. Es gilt nun einen Tank auszulegen, welcher zum einen in den Rumpf der Wasserstoffflugzeuge untergebracht werden kann und welcher optimale mechanische und chemische Eigenschaften aufweist. Die Größe des Tanks wird von dem Rumpfdurchmesser limitiert, während die Länge des Tanks von dem Antriebssystem abhängt und somit von der zu speichernden Menge des Wasserstoffs. [30]

Wegen der angesprochenen Verdampfungsrate, soll ein Tank entwickelt werden, welcher bei einem gegebenen Volumen, die geringste Oberfläche aufweist und damit eingehend die geringste Menge an Isolierung benötigt, um diese Verdampfungsrate zu erreichen [20], [21].

Kugeln haben die geringste Oberfläche bei einem gegebenen Volumen. Dadurch wird auch die in den Tank einfließende Wärme und das Verdampfen des Wasserstoffs minimiert. Auf Grund der schlechten Unterbringung der kugelförmigen Tanks in den Flugzeugen und der relativ teuren Herstellung dieser, eignen sich diese allerdings nicht für den Flugzeugbau. Zylindrische Tanks haben nur geringfügig schlechtere Eigenschaften bezüglich des Verhältnisses von Volumen zu benötigter Isolierung, aber verfügen über deutlich bessere Integrationsmöglichkeiten in den Rumpf und auch geringere Herstellungskosten, weshalb Wasserstoff in Form eines zylindrischen Tanks im Rumpf gespeichert wird [21], [30]. Die größten Herausforderungen liegen bei der Integration der deutlich größeren Wasserstofftanks in die Flugzeuge mit der Anwesenheit der Passagiere im Rumpf. Mit den Passagieren neben den Wasserstofftanks entsteht nämlich ein Sicherheitsproblem. [31]

3.6 Zusammenfassung des aktuellen Kapitels

1. Die zwei etablierten Antriebssysteme für mit Wasserstoff betriebene Flugzeuge, sind zum einen die Wasserstoff-Verbrennung und die Wasserstoff-Brennzelle. Sowohl bei der Wasserstoff-Verbrennung als auch bei der Wasserstoff-Brennzelle, können alte

ein Kryogen welches bei -253°C gelagert wird, weshalb ein geeignetes Wärmemanagement von entscheidender Bedeutung ist [17].

7. Dennoch hat sich der flüssige Wasserstoff auf Grund der hohen gravimetrischen Energiedichte als der Wasserstoff für die Zukunft etabliert. Auch seine Speicherung erfolgt einfacher als die des gasförmigen Wasserstoffs. Dieser eignet sich nicht für die Luftfahrt, da dessen Lagerung in schweren Drucktanks erfolgen würde.
8. Der Transport von gasförmigem Wasserstoff kann durch leichte Modifikationen in bereits vorhandenen Erdgas-Leitungen erfolgen, wobei der Transport des flüssigen Wasserstoffs in kryogenen Transportbehältern erfolgt. Hierzu mehr ab Kapitel 7.

4 Aktuelle Flugzeugkonzepte

4.1 Einleitung

Der weltweit größte Flugzeughersteller Airbus, hat im Jahre 2020 drei Konzepte für das „Zero Emission“ Flugzeug vorgestellt. Das Blended-Wing-Concept, das Turbofan-Concept und das Turboprop-Concept. Dieses Kapitel soll eine Idee über die anstehenden Infrastrukturen und Flugzeugkonfigurationen geben, welche mit Wasserstoff betrieben werden sollen.

4.2 Wasserstoff-Infrastruktur

Das Zero Emission Flugzeug emittiert sowohl im Boden- als auch im Flugbetrieb keine Emissionen. Dies umfasst auch alle Fahrzeuge und Geräte, welche sich am Boden befinden und das Flugzeug betanken oder versorgen.

Das bislang erlernte und gesammelte Wissen über Wasserstoff muss zum Ausbau einer funktionierenden Infrastruktur beitragen. Diese neue Infrastruktur am Flughafen selbst umfasst viele Themen, einschließlich der Wasserstoffproduktion, der Verflüssigung des Wasserstoffs, der Lagerung und des Transports.

Der flüssige Wasserstoff kann nicht über einen längeren Zeitraum im Tank eines Flugzeugs verbleiben, welches sich auf dem Boden befindet. Wie bereits angesprochen, könnte es ohne Druckausgleich, durch eine erhöhte Abdampftrate, zu einem Druckanstieg im Tank kommen. Somit dürfen Flugzeuge erst kurz vor dem Start betankt werden.

Um dies zu ermöglichen, würde es komplett neuer Infrastrukturen an den Flughäfen bedürfen, um eine Betankung unmittelbar vor jedem Abflug realisieren zu können. Airbus präsentierte hierzu ein Konzept, welches sich „Hydrogen Hub at Airports“ nennt [33]. Dieses Konzept ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 13: Konzept einer Infrastruktur der Flughäfen [25]

Dieses Konzept ist eines der ersten, welches eine Realisierung der direkten Versorgung von Flughäfen mit Wasserstoff vorsieht. Hierfür müssen am Flughafen große Tanks erbaut werden, welche die Wasserstoffspeicherung am Boden ermöglichen. Außerdem bedarf es vor Ort Techniken, um den Wasserstoff zu verflüssigen. Auch die Transportmöglichkeiten des Wasserstoffs dürfen nicht vernachlässigt werden. Es wird sofort deutlich, dass ohne eine geeignete Infrastruktur am Flughafen, eine Klimaneutralität momentan nicht erreicht werden kann. In dieser Arbeit geht es nun darum diesen Prozess zu vereinfachen und austauschbare Behälter zu entwickeln.

4.3 Airbus aktuellen Konzepte

Die bislang bekannten Flugzeugkonfigurationen, welche als Passagier- und Frachtflugzeuge Anwendung finden, sind sich allesamt ziemlich ähnlich. Sie bestehen aus einem Rumpf, Leitwerken und zwei Flügeln. Der Rumpf und die Flügel übernehmen hierbei unterschiedliche Funktionen. Die Flügel generieren Auftrieb und nehmen den größten Teil des Treibstoffs auf, wohingegen der Rumpf hauptsächlich zur Aufnahme der Nutzlast ausgelegt ist.

Durch die in den vorherigen Kapiteln angesprochenen Herausforderungen, denen sich der Flugzeugbau stellen muss, wird nun unter anderem an neuen Designs gearbeitet, bei denen diese Aufgaben fließender ineinander übergehen. Denn für die Reduktion der CO_2 -Emissionen im Flugverkehr, sind verschiedene Lösungen erforderlich. Einige der Designs, werden tiefgreifende Veränderungen mit sich bringen, wohingegen andere eher schrittweise Verbesserungen bieten [34].

Bei allen drei Zero Emission Konzepten handelt es sich um Hybrid-Wasserstoff-Flugzeuge. Die beiden in Kapitel 3.3 vorgestellten Antriebssysteme finden in Kombination Anwendung. Die Zero Emission Konzepte werden mittels der Wasserstoffverbrennung über modifizierte Gasturbinentriebwerke angetrieben. Dabei wird flüssiger Wasserstoff als Brennstoff für die Verbrennung mit Sauerstoff verwendet. Zusätzlich erzeugen Wasserstoff-Brennstoffzellen elektrischen Strom, der die Gasturbine ergänzt [35]. Somit findet der Wasserstoff auf zwei Wegen Anwendung. Zum einen für Brennstoffzellen als Brennstoff, wenn dieser mit Sauerstoff reagiert, um Strom zu erzeugen und zum anderen in modifizierten Triebwerken, um Schub zu erzeugen.

Blended-Wing-Body Konzept

Das Blended-Wing-Body (BWB) Konzept ist ein seit bereits vielen Jahren erforschtes Konzept. Es unterscheidet sich stark von den bislang bekannten Passagierflugzeugen. Konstruktionen wie der Blended-Wing-Body, ermöglichen die flexiblere Gestaltung und Integration von neuen Speichertechnologien, wie den kryogenen Wasserstofftanks. Das von Airbus vorgestellte Konzept des Blended-Wing-Body, ist in Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 14: Das Konzept des BWB [17]

Ein Design wie das Konzept des Blended-Wing-Bodys, bedarf fundamentaler Veränderungen sowohl bezüglich des Antriebs als auch bezüglich der Aerodynamik. Auch die Analysen des BWB werden nicht mehr stringent nach Rumpf, Triebwerken, Leitwerken und Flügeln unterteilt. Denn wie in Abbildung 14 zu sehen ist, existiert diese klare Abgrenzung nicht mehr. Die Komponenten wie Rumpf und Flügel beispielsweise, gehen ineinander über.

Auffällig am Design des BWB ist auch die Verteilung des Antriebs über eine große Fläche hinweg. [17]

Ein weiterer Vorteil dieses Designs ist die geringe Anzahl an Einzelteilen, die das Flugzeug benötigt. Denn weniger Einzelteile bedeutet auch weniger Kosten und einen geringeren Logistikaufwand, um diese Flugzeuge zu bauen.

Speichermöglichkeiten des Wasserstoffs in Flugzeugen

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln diskutiert, kommt für die Verwendung des Wasserstoffs, nur flüssiger Wasserstoff in Frage. Auch die Form des Tanks spielt eine entscheidende Rolle. Es eignen sich lediglich kugelförmige oder zylinderförmige Tanks. Auf Grund von besseren Integrationsmöglichkeiten, wird der Wasserstoff in zylindrischen Tanks gespeichert. Eine Möglichkeit zur Speicherung des flüssigen Treibstoffes im Blended-Wing Konzept ist in Abbildung 15 dargestellt.

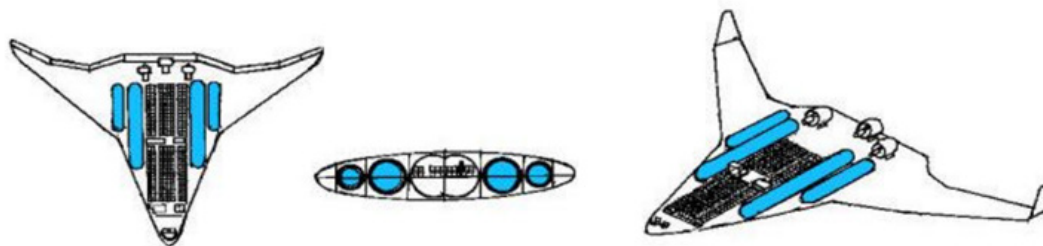


Abbildung 15: Unterbringung der Wasserstofftanks im BWB-Konzept

Durch die Neugestaltung des Flugzeugs lassen sich diese Tanks besser in das Flugzeug integrieren. Das neuartige BWB-Design bietet 200 Passagieren Platz bei einer Reichweite von mehr als 2000 Nautischen Meilen.

Turboprop und Turbofan

Der Turboprop, der bis zu 100 Passagieren Platz bietet, bei einer Reichweite von mehr als 1000 Nautischen Meilen, ist mit Triebwerken ausgestattet, welche für die direkte Verbrennung von flüssigem Wasserstoff modifiziert sind. Dieser verfügt über austauschbare Triebwerke, welche den Tank mit in sich beinhalten. Auf diese Konfiguration wird in Kapitel 6.2.1 nochmal eingegangen. Das Turboprop Konzept ist in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16: Das Konzept des Turboprop-Flugzeuges mit zwei Propellern [36]

Der 120-200-sitzige Turbofan ist mit wasserstoffverbrennenden Gasturbinen ausgestattet bei einer ähnlichen Reichweite wie des BWB von mehr als 2000 Nautischen Meilen. Das Turbofan Konzept ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Das Konzept des Turbofan-Flugzeuges mit zwei Triebwerken [36]

A380-Testflugzeug-Turbofan Konzept

Bei dem in Abbildung 18 und Abbildung 19 gezeigtem Design, handelt es sich um eine Konfiguration des Airbus A380. Die beiden wesentlichen Unterschiede zu dem gewöhnlichen Airbus A380, sind zum einen die vier Flüssigwasserstofftanks, welche sich im hinteren Teil des Rumpfes im Hauptdeck des Flugzeuges befinden und zum anderen die zusätzliche modifizierte Gasturbine, welche sich zwischen den beiden hinteren Türen des Flugzeuges außerhalb des Flugzeuges befindet. Von den Wasserstofftanks aus wird der Wasserstoff mit Hilfe von einem geeigneten Verteilungssystem dieser modifizierten Gasturbine verabreicht. Die Gasturbine ist in Abbildung 18 abgebildet.



Abbildung 18: Zusätzliche Gasturbine am Airbus A380 [35]

Antriebssystem

Dieses Flugzeugdesign arbeitet mit der in den bereits vorherigen Kapiteln vorgestellten Wasserstoff-Verbrennung. Die Vorteile dieser Anwendung liegen wie bereits erwähnt, vor allem in der starken Ähnlichkeit zu den bislang bekannten Antriebssystemen. Somit müssen diese lediglich modifiziert werden, um eine Anwendung des Wasserstoffs, an Stelle von Kerosin zu ermöglichen. Das Verteilungssystem des Kraftstoffes, der Verbrenner und die Steuerungen müssen angepasst werden. Hinzu kommt, dass der flüssige Wasserstoff, bevor er in den Verbrenner gelangt in Gas umgewandelt werden muss, um eine Vermischung mit dem Sauerstoff zu vereinfachen. Auch hierfür bedarf es neue Technologien, wie beispielsweise einen Wärmewandler.

Bei diesem Design gilt zu beachten, dass es sich lediglich um ein Testflugzeug zur Bestimmung von Daten handelt. Damit lässt sich auch die eigenartige Wahl der Positionierung der Gasturbine erklären. Diese wurde fern der eigentlichen Triebwerke installiert, sodass die hinter

der Gasturbine installierten Sensoren zur Messung der Emissionen, nicht durch die Triebwerke beeinflusst werden [37].

Wasserstoffspeicherung

Wie nun in Abbildung 19 verdeutlicht, dargestellt ist, nehmen die vier Wasserstofftanks einen beachtlichen Teil des hinteren Bereiches des Rumpfes ein. Der Bereich, welcher eigentlich zur Aufnahme von Nutzlast ausgelegt ist, verkleinert sich somit durch diese Art von Speicherung der Wasserstofftanks.



Abbildung 19: Unterbringung von vier Wasserstofftanks [38]

Eine weitere Möglichkeit zur Unterbringung der Wasserstofftanks, ist in Abbildung 20 dargestellt. Auch bei diesem einem großen Wasserstofftank, geht ein beträchtlicher Teil des Rumpfes zur eigentlichen Aufnahme von Nutzlast verloren.



Abbildung 20: Eine weitere Möglichkeit zur Unterbringung von Wasserstofftanks [18]

4.4 Zusammenfassung der aktuellen Kapitel

Die bisherigen Kapitel haben sich mit den theoretischen Grundlagen und dem aktuellen Stand des Wasserstoffs im Flugzeugbau beschäftigt. Es wurden wichtige Informationen zum Thema Wasserstoff im Allgemeinen diskutiert. Die größten Herausforderungen, mit denen sich die Luftfahrtindustrie beschäftigen muss, wurden vorgestellt. Darunter fallen beispielsweise die Speicherung und Unterbringung des Wasserstoffs, sowie der Transport. Es wurde klar verdeutlicht, dass es noch einer Menge Forschung und Tests bedarf, um die optimalen Komponenten für die Wasserstoffflugzeuge auszulegen.

Zusätzlich wurde in diesem Kapitel der aktuelle Stand im Flugzeugbau mit den bereits vorhandenen Konzepten vorgestellt. Bei Airbus konzentriert man sich aktuell nicht auf lediglich ein Design, sondern es werden drei unterschiedliche Designs und Konfigurationen untersucht. Der leitende Zero Emission Architekt von Airbus sagte hierzu:

“The only way to determine which hydrogen technology is best placed to fuel our ZEROe concept aircraft is to test, test, test.” [Matthieu Thomas, 2020] Diese Aussage lässt auf den aktuellen Forschungsstand zurückschließen, welcher sich noch relativ am Anfang befindet.

5 Systems Engineering nach SysML

5.1 Einleitung

In diesem Kapitel soll ein Transportbehälter für Wasserstoff ausgearbeitet werden. Es wird zuerst die Methodik der Systems Modeling Language (kurz SysML) vorgestellt. Dann wird erstmal die Systemidee präsentiert. Anschließend geht es mit der angesprochenen SysML weiter, welche unter anderem die QFD-Analyse und die damit verknüpfte Benchmark-Analyse beinhaltet. Daraufhin werden das Kontextdiagramm, die Kostenanalyse und schlussendlich die Sicherheitsanalyse vorgestellt.

5.2 Methodik der SysML

Die SysML ist eine bewährte Vorgehensweise zur Auslegung neuer Konzepte. Sie bietet den Vorteil, dass durch eine Betrachtung des Systems aus unterschiedlichen Blickwinkeln, wichtige Erkenntnisse geliefert werden. Es ist ein interdisziplinärer Ansatz für das erfolgreiche Realisieren komplexer Systeme, wobei sowohl die technischen als auch die wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt werden. [39]

Dadurch wird unter anderem verhindert, dass keine Zeit in die Erarbeitung eines nicht realisierbaren Features verschwendet wird. Der Ablauf der SysML ist in Abbildung 21 dargestellt.

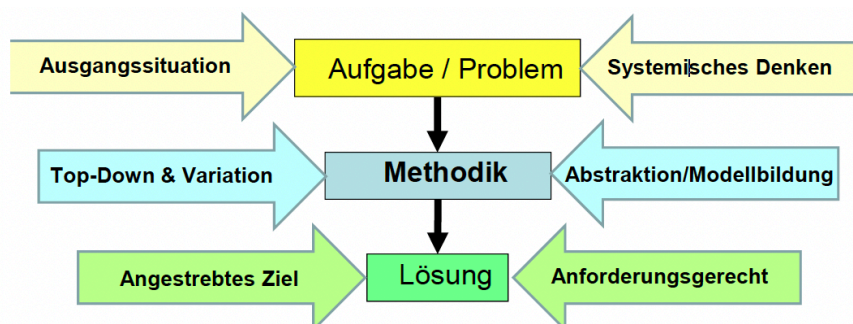


Abbildung 21: Ablauf des Systems Engineering [39]

Die SysML setzt sich aus unterschiedlichen Analysen zusammen. Doch nicht alle Analysen sind für jedes System sinnvoll. In den Analysen werden wesentliche Aspekte geklärt. Beispielsweise geht es darum die Hauptfunktionen und Vorteile des Systems, die potenziellen Kunden und Benutzer des Systems, die geplante Betriebsumgebung und die Wirtschaftlichkeit zu definieren. Außerdem dient die SysML zur Erarbeitung von zu erwartender Herausforderungen und Problematiken. Einige Beispiele für in Frage kommende Analysen sind das Quality Function Deployment (QFD), die Kostenanalyse und die Sicherheitsanalyse

5.3 Systemidee

Der auszulegende Tankbehälter für flüssigen Wasserstoff soll sowohl für den Boden- als auch den Luftbetrieb geeignet sein. Die hier am sinnvollsten und im Rahmen zu verfolgende Idee, ist die Kombination bereits bestehender Technologien eines lufttüchtigen Tanks und eines für den Bodenbetrieb geeigneten Tank, zu einem welcher für beide Möglichkeiten verwendet werden kann. Ein wichtiges Thema bei LH2-Systemen sind Wärmeverluste, die zu einem vollständigen Verlust des gespeicherten Wasserstoffs nach 10-15 Tagen Inaktivität führen können.

Bei der Umfunktionierung eines Flugzeugtanks zu einem für den Bodentransport geeigneten Tanks, besteht eine der größten Herausforderungen darin, dieser Verdampfungsrate entgegenzuwirken und diese auf ein Minimum zu reduzieren. Dies wurde in den vorherigen Kapiteln ausführlich diskutiert. Nichtsdestotrotz müssen auch reguläre Wasserstofftanks für Flugzeuge in der Lage sein das Volumen des Treibstoffs über längere Zeiträume für die Zwischenlandung am Boden und für die gesamte Flugdauer aufrechtzuerhalten.

5.4 Benchmark-Analyse mit der QFD

In diesem Kapitel werden aktuelle Konzepte des Transports für flüssigen Wasserstoffs vorgestellt. Bereits entwickelte Arten und Weisen für den Transport verschiedener Formen des Wasserstoffs werden untersucht, sodass darauffolgend ein eigenes Konzept des Transportbehälters entwickelt werden kann.

Um bestehende Designeinschränkungen und Kundenprioritäten zu ermitteln, wurde die Quality Function Deployment (QFD) eingesetzt. Die QFD wird zur Qualitätssicherung verwendet. Ziel ist es, die Kundenbedürfnisse in technische Produkthanforderungen zu übersetzen. Denn ein Höchstmaß an Kundenzufriedenheit ist das eigentliche Maß für Qualität. Hierzu werden

die Kundenanforderungen in Beziehung gesetzt mit den eigenen technischen Spezifikationen. Außerdem wird mit Hilfe der QFD ein Benchmarking durchgeführt. Bereits bestehende Konzepte werden Anhand der definierten Kundenanforderungen bewertet.

Um diese Analyse durchzuführen, müssen im ersten Schritt die Kundenanforderungen eingeholt werden, welche dann in Designkriterien umgewandelt werden, sodass diese Anforderungen erfüllt werden können [40]. Die Kundenanforderungen werden aus der Stakeholder-Analyse abgeleitet. In dieser QFD-Analyse wurden 17 Kundenanforderungen in Betracht gezogen und gewichtet. Die Struktur eines QFD ist in Abbildung 22 dargestellt.

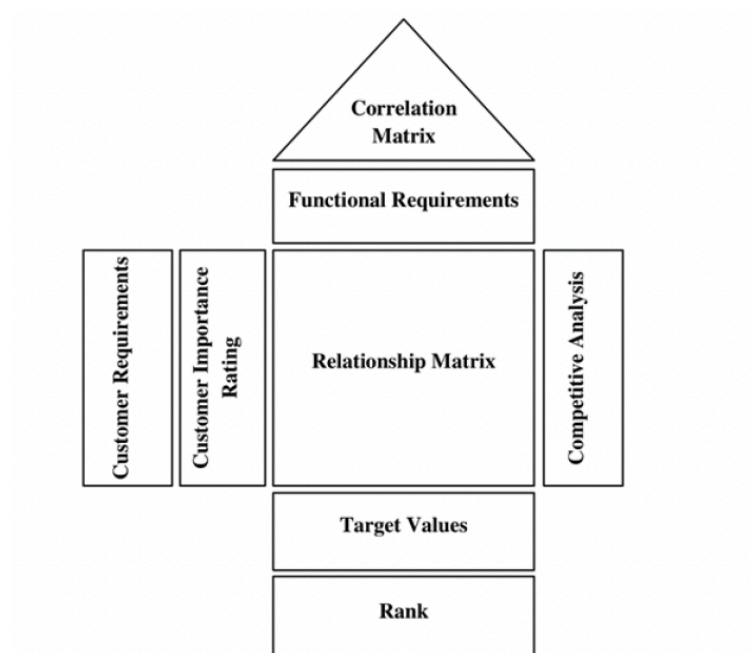


Abbildung 22: Struktur eines QFD [41]

Den Kundenanforderungen stehen technische Merkmale an das Produkt gegenüber. Jedem technischen Produktmerkmal ist eine Optimierungsrichtung zugeordnet.

Im linken Teil der QFD werden die Anforderungen des Kunden an den Tankbehälter angegeben und im oberen Teil der QFD werden die relevanten und erforderlichen technischen Spezifikationen des Tankbehälters zur Erfüllung der Kundenanforderungen dargestellt. Im rechten Teil werden Konkurrenzprodukte bzw. bereits vorhandene Produkte vorgestellt, sodass dann ein Benchmarking durchgeführt wird. In Abbildung 23 ist die QFD-Analyse dargestellt.

Die Korrelation zwischen den Kundenanforderungen und den technischen Produktmerkmalen gibt die technische Wichtigkeit wieder. Aus der QFD-Analyse geht hervor, dass folgende technische Produktmerkmale die größten Wichtigkeiten einnehmen:

- Widersteht Fluglasten
- Verkehrstauglich
- Isolierung (geringe Wärmeleitfähigkeit und Verdampfung)
- Sicherheit

Diese vier Produktmerkmale mit der größten technischen Wichtigkeit, besitzen zu fast allen Kundenanforderungen eine Beziehung.

Damit ein technisches Produktmerkmal eine große technische Wichtigkeit erhält, spielt neben der Anzahl der Beziehungen, auch die Stärke der einzelnen Beziehungen zwischen Kundenanforderungen und den Produktmerkmalen eine ausschlaggebende Rolle.

Die beiden technischen Produktmerkmale – widersteht Fluglasten und verkehrstauglich – nehmen dabei die größten Werte an. Dieses Ergebnis ist auch nicht verwunderlich, denn um die Vereinbarung dieser beiden technischen Merkmale, geht es bei diesem Projekt primär.

Die QFD-Analyse kann auf diese Weise verwendet werden, um die Beziehungen von Produktmerkmalen zueinander zu bestimmen und die Prioritäten offen zu legen. Es ist Vorteilhaft, Merkmale voranzustellen, die sich gegenseitig positiv beeinflussen, damit die Arbeit an diesen Merkmalen zu besseren Ergebnissen führt. Mit den erlangten Erkenntnissen aus der QFD, geht es in den folgenden Kapiteln mit der Auslegung des Tanks weiter.

5.5 Kontextdiagramm

Die Kontextanalyse ist ein Mittel der SysML, um alle mit dem System interagierenden Akteure bzw. Umfeldelemente zu ermitteln. Unter den Akteuren und den Umfeldelementen fallen beispielsweise die menschlichen Akteure, technische Systeme oder Komponenten und Umwelteinflüsse. Zwischen dem System und diesen Akteuren und Umfeldelementen, gibt es Wechselwirkungen, welche es zu identifizieren gilt. Der Aufbau des Kontextdiagramms ist durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet, wobei die menschlichen Akteure als Strichmännchen und die technischen Akteure, sowie die Umwelteinflüsse, als Rechtecke dargestellt sind. Das Kontextdiagramm ist in Abbildung 24 dargestellt. [39]

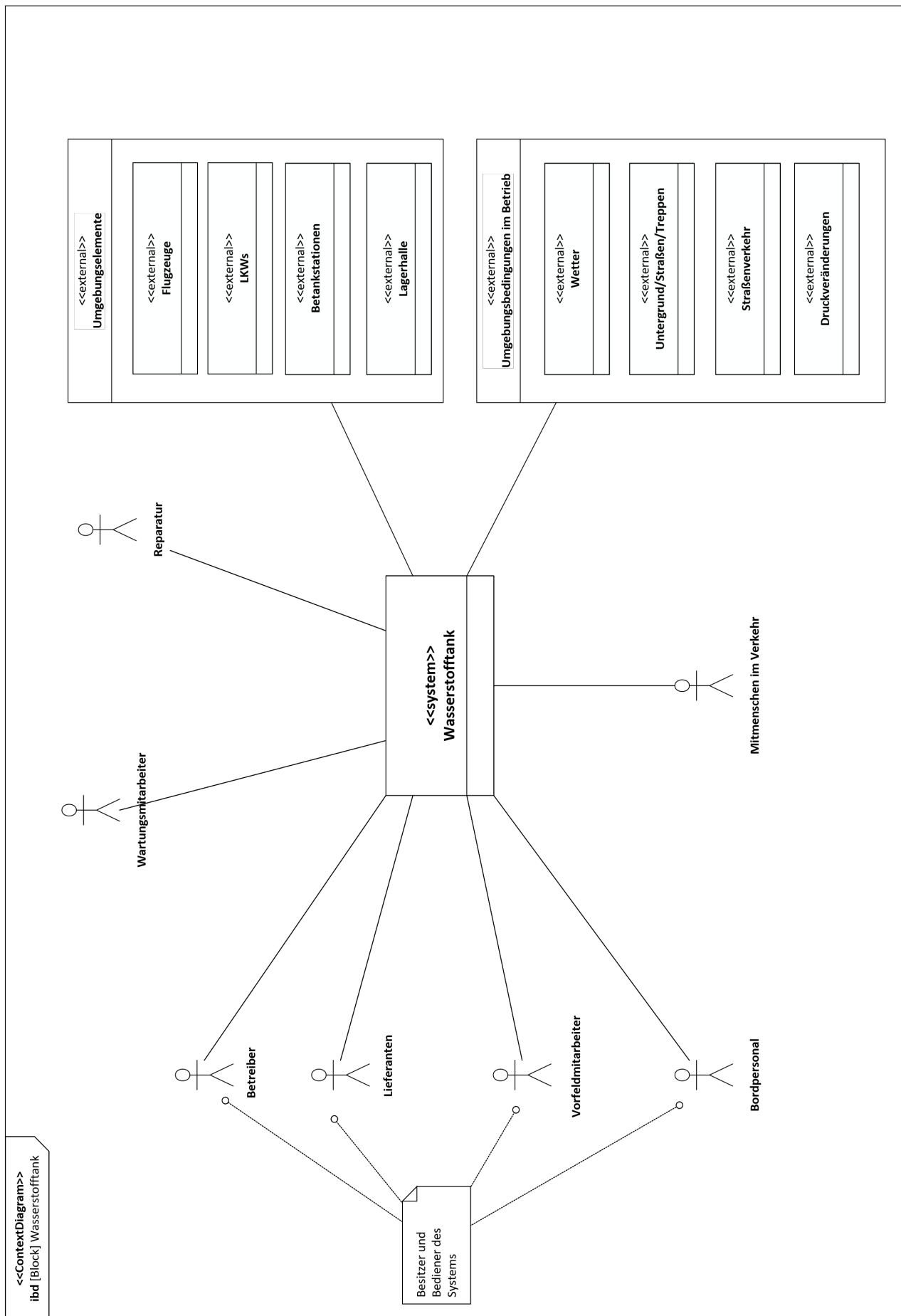


Abbildung 24: Kontextdiagramm

5.6 Kostenanalyse

Die Kostenanalyse bildet die Grundlage der Kostenplanung. Die Kostenanalyse verfolgt das Ziel, die Kostenarten, deren Struktur und Entwicklung zu untersuchen, sodass Gründe für eventuelle Kostenabweichungen im Vergleich zu anderen Zeiträumen identifiziert werden können. Somit handelt es sich bei der Kostenanalyse um eine Möglichkeit der Kostenreduzierung und einem Entgegenwirken von negativen Kostenentwicklungen.

Die konkreten Kosten für einen Wasserstofftank für Flugzeuge hängen von einer Vielzahl von Faktoren abhängen, wie z. B. der Größe des Tanks, den für seine Herstellung verwendeten Materialien und dem Herstellungsverfahren ab. Außerdem sind Wasserstofftanks für Flugzeuge derzeit noch nicht im Handel erhältlich, so dass es schwierig ist, die Kosten zu schätzen.

Es ist jedoch allgemein anerkannt, dass Wasserstofftanks in der Herstellung teurer sind als Tanks für andere Kraftstoffe wie Benzin oder Flugzeugtreibstoff. Dies ist zum Teil auf die Materialien und Verfahren zurückzuführen, die erforderlich sind, um die Tanks sicher und haltbar zu machen, sowie auf die zusätzlichen Herausforderungen, die mit der Lagerung und Handhabung von flüssigem Wasserstoff verbunden sind.

In der Zukunft, wenn sich der Wasserstoff als Treibstoff für Flugzeuge durchsetzen sollte, würden die Kosten für Wasserstofftanks sinken, da die Technologie und die Herstellungsverfahren immer fortschrittlicher und effizienter werden und es zu einer erhöhten Anzahl an Stückkosten kommen würde. Es ist jedoch schwierig, genau vorherzusagen, wie stark die Kosten sinken würden und wann dies geschehen würde.

Eine Kostenabschätzung ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich, da es hier noch keine auf dem Markt erwerblichen Produkte gibt, an denen man sich orientieren könnte.

Vergleichsweise dient der Wert der Investitionskosten in einen LKW-Trailer, welcher einen Preis von ca. 678000 Euro durchschnittlich, bei einem Fassungsvermögen von 4 Tonnen Wasserstoff aufweist. [42]

Verflüssigung und Transportkosten

Die Verflüssigung und der Transport von Wasserstoff bringen hohe Kosten mit sich. Es wird ein hoher Energiebedarf für den Prozess der Verflüssigung benötigt. Darunter fallen auch die Kosten für die Investitionen in die Verflüssigungsanlage.

Momentan liegen die Kosten des Energiebedarf für die Verflüssigung bei ca. 13 kWh/kg. Diese könnten in naher Zukunft allerdings deutlich sinken und Werte von ca. 5.9 kWh/kg annehmen.

5.7 Sicherheitsanalyse

Im Folgenden wird eine Sicherheitsanalyse durchgeführt. Erstmal wird diese diskutiert, bevor sie in Abbildung 25 dargestellt ist

Eine der wichtigsten Kriterien für die Akzeptanz von Wasserstoff im öffentlichen Gebrauch, sowohl im Flugverkehr als auch im Straßenverkehr während des Transports, ist die Sicherheit der Wasserstofftanks. Unfälle bei der Anwendung von Wasserstoff wie in der Vergangenheit bei der Hindenburg-Katastrophe im Jahre 1937, gilt es zu vermeiden. Die Gefahren, die vom Wasserstoff ausgehen, kann man kategorisieren.

Es ist die physiologische Gefahr gegeben. Das heißt es kann zu Erfrierungen oder auch Ersticken kommen. Dann gibt es noch die physikalische Gefahr, wozu die Versprödung und das Versagen von den Bauteilen zählt. Zuallerletzt birgt sich noch eine chemische Gefahr. Hierbei kann es zu Verbrennungen, schweren Bränden oder auch Explosionen kommen. Generell lässt sich sagen, dass die Hauptursachen für ein katastrophales Ereignis in mechanischem-, materiellen Versagen, Korrosion, Übersteigen des zulässigen Drucks im Behälter oder auch durch Explosionen durch das unbemerkte Austreten des entflammbaren Wasserstoffs liegen. Diese Gefahren werden im Folgenden noch weiter analysiert und erläutert.

Um einen sicheren Transport von Wasserstoff zu gewährleisten, muss dieser einige Sicherheitsvorkehrungen erfüllen. Die dabei wichtigste Anforderung ist, dass der Wasserstoff in einem Vakuum isolierten System transportiert wird, um nicht nur den Verlust durch die Verdampfung zu minimieren, sondern auch die Bildung von flüssiger Luft mit anschließender Anreicherung von Sauerstoff zu vermeiden. Denn die Kombination von flüssigem Wasserstoff als Gemisch mit Luft bildet eine entflammbare, explosive Atmosphäre. Bei einer Konstruktion bei denen die Treibstofftanks innerhalb eines Flugzeugs angebracht, bzw. angeordnet werden, besteht die Gefahr, dass sich gasförmiger Wasserstoff in einem engen Raum sammelt, was wiederum ein Sicherheitsrisiko darstellen würde. Hierfür müsste also ein Lüftungssystem vorgesehen werden, das ein Inertgas oder große Mengen an Luft verwendet. Als Inertgas werden Gase bezeichnet, welche sehr reaktionsträge sind. Es gilt also speziell bei der Verwendung von flüssigem Wasserstoff darum Risiken wie Überdruck, Überfüllung und aber auch Überhitzung mitzuberücksichtigen und bestmöglich diesen Risiken entgegenzuwirken. Jeder Behälter beziehungsweise jedes System sollte in der Lage sein über Wasserstoffsensoren potenzielle Wasserstofflecks zu erkennen und darauf aufmerksam machen. Der Überdruck beispielsweise kann durch verschiedene Reize verursacht werden. Der Behälter darf nicht hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt sein, da ansonsten die Gefahr eines Druckanstiegs innerhalb des Behälters gegeben ist.

Somit ist es für den sicheren Transport im alltäglichen Verkehr unausweichlich diesen Ansprüchen gerecht zu werden. Besonders der flüssige Wasserstoff, der eine niedrige Temperatur von wie bereits angesprochen, -253° Celsius aufweist, birgt besondere Gefahren im direkten Umgang, bezüglich der physiologischen Gefahr. Denn der direkte Kontakt mit flüssigem Wasserstoff, führt zu schweren Verbrennungen, sowie zu Erfrierungen und Unterkühlung. Des weiteren birgt es die Gefahr von schweren Atemwegserkrankung und Erstickung. Davon sind die Gewebe des menschlichen Körpers sehr stark betroffen. Durch das Einatmen von flüssigem Wasserstoff kann das Gewebe stark geschädigt werden. Außerdem kann es bei der Haut bei direktem Kontakt zu starken Verklebungen der menschlichen Haut kommen und damit einhergehend zu schweren Verletzungen.

Bezüglich der Installation des Wasserstofftanks im Flugzeug muss dieser den Voraussetzungen – die von der EASA definiert wurden – gerecht werden. Darunter gehört beispielsweise, dass die Wasserstofftanks so fern von den Triebwerken installiert werden müssen wie möglich. [44] Denn so kann es beim Austreten von Wasserstoff in Notfallsituationen zu keinen kritischen Situationen in Form von schweren Bränden kommen. Außerdem ist es wichtig, dass bei der eventuellen Anwendung von austauschbaren Wasserstofftanks jederzeit Wartungs- und Reparatur-Möglichkeiten durchführbar sind. Um auch den Kriterien an den Überdruck gerecht zu werden, sind auch hierbei die von der EASA definierten Sicherheitsvorschriften nicht zu missachten. Jeder Tank muss eine Kapazität von mindestens 2% der Tankkapazität aufweisen, die nur zur Expandierung des Treibstoffs gedacht ist. [44] Dabei darf das Einhalten dieser 2 % nicht von der Qualität des Befüllens abhängig sein, sondern das Befüllen des Tankinneren muss zu 100% aus rein technischer Sicht unmöglich sein.

Zusätzlich zu den Anforderungen des Wasserstofftanks an die Luftfahrt und den damit verbundenen Regularien der EASA, darf dieser auch im Straßenbetrieb keine Gefährdung dritter Personen gegenüber in Kauf nehmen. Dafür muss dieser unter verschiedenen Szenarien, teilweise auch ähnlichen wie in der Luftfahrt, stets als sicher eingestuft werden, auch wenn es zu Verkehrsunfallszenarien kommt. Erhöhte Vibrationen, Beschleunigungen, aber auch mögliche Deformationen müssen berücksichtigt werden.

Es lässt sich also festhalten dass Wasserstoff aufgrund von unterschiedlichen Faktoren große Herausforderungen mit sich bringt. Darunter fällt ein leichtes Entweichen des Gases und die damit verbundenen angesprochenen Konsequenzen, die Gefahr des Druckanstiegs innerhalb des Behälters und die Fähigkeit Materialien beziehungsweise Metalle zu verspröden.

Wasserstoff hat den größten Explosionsbereich aller Gase mit Luft. Generell lässt sich aber bezüglich des Ausweichen des Gases im Straßentransport im Freien sagen, dass Wasserstoff hierbei keine große beziehungsweise nennenswerte Gefahr darstellt. Denn durch die höhere Dichte steigt Wasserstoff schnell auf und breitet sich vor einer potenziellen Zündung aus.[44], [45]. In Abbildung 25 sind die wichtigsten Anforderungen, die soeben diskutiert wurden, in einer Sicherheitsanalyse nach der SysML dargestellt.

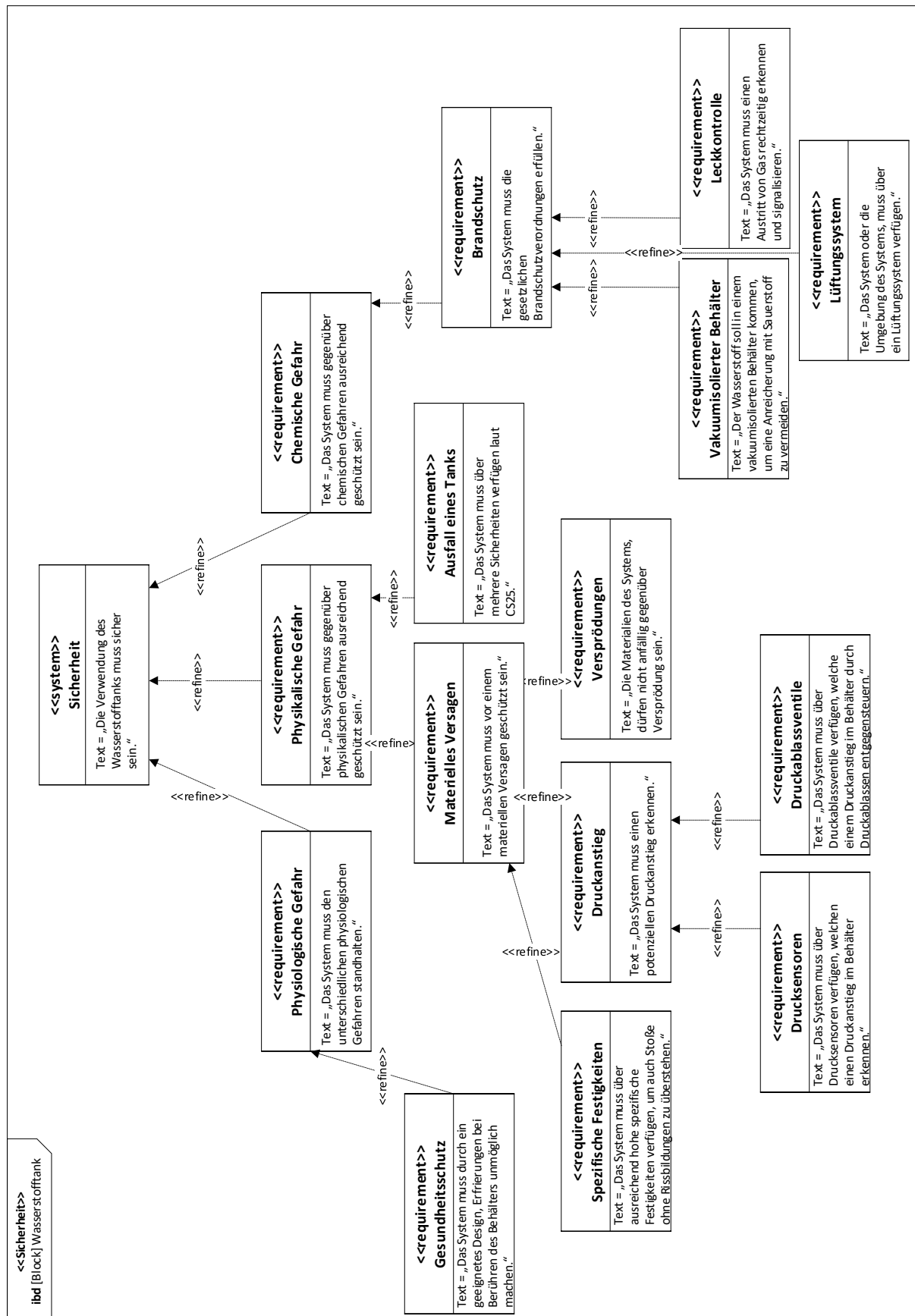


Abbildung 25: Sicherheitsanalyse

6 Designentwurf

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die zuvor erlangten Erkenntnisse genutzt, um den Tank final auszu-legen. Dafür werden die unterschiedlichen Designkonfigurationen vorgestellt bevor ein geeig-netes Material, eine geeignete Isolation und eine geeignete Konfiguration ausgewählt werden, welche dann den finalen Tank bilden soll.

6.2 Designkonfigurationen

Verglichen mit gewöhnlichem Kerosin, würde das Verwenden von flüssigem Wasserstoff eine signifikante Gewichtseinsparung bedeuten. Für dieselbe Mission (1500nmi) mit 130 Passagie-ren, wäre ein Gewicht von 8900 kg Kerosin, aber nur von ca. 3900 kg Wasserstoff notwendig. Dies macht einen Faktor von ca. 2.28 aus. [46] Nun gilt es also noch dem Problemen des erhöhten Volumens entgegenzuwirken.

Wie bereits angesprochen werden für die Anwendung des Behälters in der Luft und am Boden, unterschiedlich wichtig ausgeprägte Parameter des Behälters gefordert. Doch auch für den Betrieb in der Luft können diese geforderten Parameter unterteilt werden. Zum einen in die SR-Mission, zum anderen in die LR-Mission. Denn für beide Missionen sind unterschiedliche Rahmenbedingungen von Priorität. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Rahmenbedin-gungen für die LR-Mission ähnlicher zu den Rahmenbedingungen am Boden sind und somit für die LR-Mission eine Konfiguration, als auch für die SR-Mission eine Konfiguration gewählt werden soll. In Tabelle 3 sind die Parameter für die jeweiligen Missionen in absteigender Rei-henfolge nach Relevanz aufgelistet. [46]

Tabelle 3: Wichtige Parameter für die Tankauslegung

Missionstyp	Parameter
SR-Mission und Boden-transport	Gewicht bzw. Dichte Festigkeit Wärmeausdehnungskoeffizient Wärmedurchlässigkeit Wärmeleitfähigkeit
LR-Mission und Boden-transport	Gewicht bzw. Dichte Wärmeleitfähigkeit Festigkeit Wärmeausdehnungskoeffizient Wärmedurchlässigkeit

Integrale- und nicht integrale Behälter

Beim Einbau von Wasserstofftanks gibt es verschiedene Designkonfiguration. Bezüglich der Flugzeugstruktur lassen sich diese grob in integrale und nicht integrale Behälter einteilen. Als Integrale Behälter bezeichnet man hierbei Tanks, welche tragende Funktionen der Flugzeuglasten aufnehmen. Nicht integrale Tanks hingegen sind darauf ausgelegt, lediglich lasten aufzunehmen, welche direkt vom Treibstoff resultieren. Im Gegensatz zu integralen Tanks, sind nichtintegrale Tanks keine direkten Bestandteile der Flugzeugstruktur, sondern im Flugzeug stehende Tanks, welche durch weitere Komponenten im Flugzeug gestützt werden. Integrale Tanks nehmen, neben der durch den Treibstoff verursachten Lasten, auch Axial- Biege- und Scherspannungen auf und müssen diesen standhalten. Integraltanks müssen somit wesentliche strukturelle Merkmale aufweisen, um diesen Lasten standhalten zu können. Dazu gehören Längsversteifungen sowie Verbindungen zum vorderen und hinteren Rumpf, um strukturelle Lasten übertragen und aufnehmen zu können, welche in die Flugzeugstruktur eingeleitet werden. Der nichtintegrale Tank ist länger auf Grund des vorgeschriebenen kleineren Durchmessers, den dieser aufweisen muss. Die Designparameter von den beiden Tanks sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Bei den nichtintegralen Tanks muss beachtet werden, dass wenn es um Inspektionen und Wartungsarbeiten geht, dieser komplett aus dem Flugzeug entfernt werden muss, um War-

tungsarbeiten und vor allem Reparaturen zu ermöglichen. Dies ist unter anderem ein entscheidender Nachteil, wenn es um die Frage integrale oder nichtintegrale Tanks geht. Beide Tanks müssen außerdem die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Inspektion bieten. Des Weiteren hat der integrale Tank einen zusätzlichen entscheidenden Vorteil. Das Verhältnis von verfügbares Volumen für flüssigen Wasserstoff im Verhältnis zum Volumen des Flugzeugrumpfs beträgt 0,93, während das Verhältnis beim nichtintegralen Tank 0,86 beträgt [29]. Auch schneidet das Verhältnis von Gewicht des Tanks zum Gewicht des nutzbaren flüssigen Wasserstoffs beim integralen Tank besser ab. Beim Integralen Tank liegt dieser Wert bei ca.0.20, während er beim nicht integralen Tank bei 0,1 liegt. [29] Es ist also eine effizientere Ausnutzung des Tankvolumens möglich und eine damit verbundene Einsparung von Gewicht.

In Abbildung 26 sind die Strukturen, bzw. Aufbauweisen des integralen und des nichtintegralen Tanks dargestellt. Anhand dessen lässt sich auch der vorgeschriebene kleinere Durchmesser für nicht integrale Tanks erklären. Denn dieser wird durch externe Stützelemente gestützt, wie im rechten Bild in Abbildung 26 dargestellt. Beim integralen Tank sind diese Stützelemente Teil des Tankinneren, was somit zu einer Optimierung bzw. Vergrößerung des Durchmessers führt.

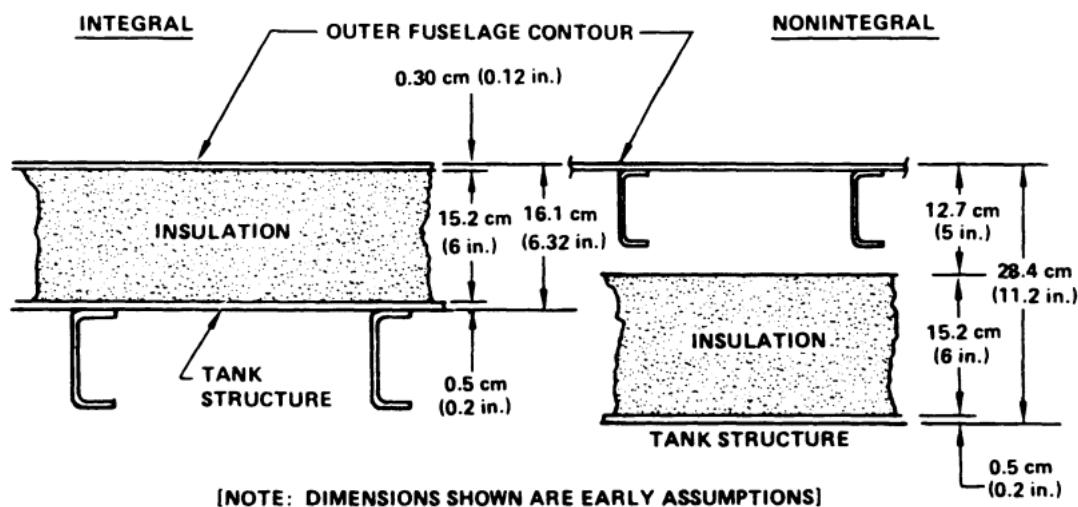


Abbildung 26: Darstellung von integralen und nicht integralen Tanks [29]

Systemkomponenten

Der Wasserstofftank muss mit elektrischen Pumpen ausgestattet sein. Jeder Tank muss mindestens 3 voneinander unabhängig funktionierende elektrische Pumpen haben, sodass es beim Ausfall von einer dieser Pumpen, zu keiner Gefährdung der sicheren Flugzeugsicherheit

kommt. Hinzu kommt, dass beispielsweise die in den USA geltende Flugrichtlinien es vorschreiben, mindestens zwei Tanks zu haben, sodass jedes Triebwerk von einem separaten Tank betrieben wird. Abhängig von der Anzahl der Triebwerke ist somit die Anzahl der Tanks.

Hinzu ist noch ein Absperrventil essenziell, um eine Übersteigung des maximalen Druck und das Überfüllen eines Tanks zu verhindern. Durch die Kombination eines solchen Absperrventils und einer Füllstandkontrolle, beispielsweise in Form eines Sensors, werden optimale Sicherheiten geschaffen. Eine weitere wichtige Komponente, die der Tank enthalten muss, ist das Druckentlastungsventil.

Um das Volumen eines Tanks zu beschreiben kann folgende Formel verwendet werden:

$$V_t = M_H * (1 + V_i) / \rho_{LH}$$

Wobei V_t das gesuchte Tankvolumen, M_H die Masse des Wasserstoffs, V_i das vorgesehene Volumen für den verdampften Wasserstoff in Folge von Verdampfung und ρ_{LH} die Dichte des flüssigen Wasserstoffs ist. [47]

Nun soll die Idee eines austauschbaren Tanks im Flugzeug erörtert werden. Hierbei geht es um einen bzw. mehrere vollgetankte Tanks, die von den LKWs geliefert werden und durch die sich in- oder außerhalb des Flugzeugs befindlichen leeren Tanks ausgetauscht werden. Anschließend geht es mit den Vor- und Nachteilen dieser Anwendungen weiter.

6.2.1 Externer austauschbarer Tank

Die externen austauschbaren Behälter befinden sich beispielsweise unter den Flügeln des Flugzeugs. Eine von Airbus vorgestellte Idee eines Flugzeugs mit externen austauschbaren Tanks, wurde in Kapitel 4.3 vorgestellt. Diese Tanks sind Teil des jeweiligen Triebwerks, wodurch auch die von der EASA vorgeschriebenen Richtlinien in der CS25, hinsichtlich eines separaten Tanks pro Triebwerk [44], erfüllt werden.

Diese Art von Kombination aus Tank und Triebwerk in einem Bauteil ist in Abbildung 27 dargestellt.

Da der externe Tank außerhalb des Flugzeugs angebracht wird und somit keine tragenden Funktionen übernimmt, handelt es sich bei diesen Tanks immer um die angesprochenen nicht-integralen Tanks.

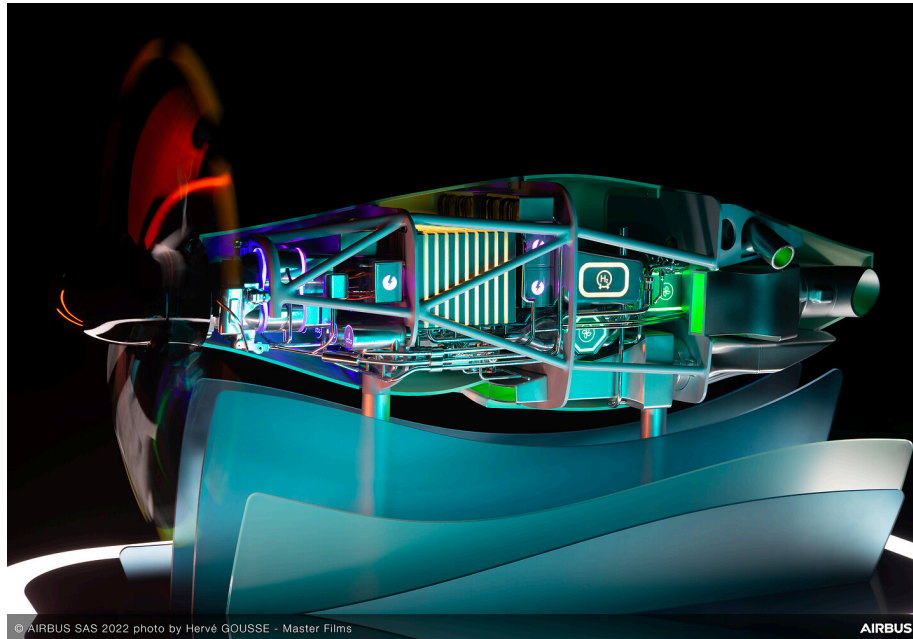


Abbildung 27: Das Innenleben eines austauschbaren externen Tanks von Airbus [48]

Die Vor- und Nachteile werden im Folgenden diskutiert, bevor es mit der nächsten Systemidee weitergeht.

Vorteile

Ein entscheidender Vorteil dieses Designs, wäre die einfache Wartung der Tanks. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Tanks, welche schwierig zu erreichen und zu inspizieren sind, wären die austauschbaren Tanks genau das Gegenteil. Wartungsarbeiten könnten ohne Zeitdruck und ohne Beschränkung der Zugänglichkeit einfach durchgeführt werden. Unterschiedlichste Wartungsmethoden könnten einfach eingesetzt werden. Ein Konzept mit austauschbaren Wasserstofftanks, wurde auch bereits von Airbus vorgestellt. [49] Hinzu kommt, dass die angesprochenen Verdampfungsraten effektiv verringert werden können. Dadurch, dass kein direktes Betanken durch LKWs mehr stattfindet und somit die extremen Temperaturunterschiede zwischen Betankungsschläuchen etc. vermieden werden, kommt es zu weniger Verdampfen des Wasserstoffs. Bei externen austauschbaren Tanks würde die Komplexität der Wasserstoffzufuhr zu den Triebwerken auf ein Einfaches reduziert werden. Hinzu kommt, dass die bereits angesprochenen Richtlinien der EASA hinsichtlich eines eigenen Tanks pro Triebwerk erfüllt wird. Auch wird die Zeit der Flugzeuge am Boden des jeweiligen Flughafens, durch den schnellen Umtausch der Tanks wesentlich reduziert. Denn das Betanken nimmt ausschlaggebend Zeit in Anspruch und würde durch dieses Design wegfallen.

Nachteile

Rein aus logistischer Sicht würde die angesprochene Wartung einen hohen Aufwand mit sich bringen. Jedes Bauteil in einem Flugzeug, muss nach gewissen Flightcycles bzw. Flighthours gewartet werden. Die Wartungs- und Inspektionsaufgaben werden für jedes Flugzeug und dessen Bauteil schriftlich festgehalten. Wenn nun diese Tanks andauernd in unterschiedlichen Flugzeugen Anwendung finden, wird die Nachverfolgung von dessen Anzahl an Flighthours und Flightcycles deutlich erschwert.

Da sich der Tank in dem jeweiligen Antriebsmodul befindet, lässt sich erschließen, dass keine großen Mengen an Wasserstoff in diesen Antriebsmodulen gespeichert werden kann. Dies lässt sich damit erklären, dass dieses Konzept kein rein von Wasserstoff betriebenes Konzept ist. Denn bei dieser Konfiguration wird zusätzlich eine Batterie eingesetzt, um die Flüge zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit soll es allerdings um rein von Wasserstoff angetriebene Flugzeuge gehen.

Ein weiterer Nachteil, welchen es zu beachten gibt, ist der des Accidental Damages. Unter Accidental Damage ist Schaden, der bei Wartungsarbeiten o.ä. durch Mitarbeiter verursacht werden kann zu verstehen. Denn durch das häufige Austauschen dieser Tanks, sind menschliche Fehler nicht auszuschließen. Es kann zum Accidental Damage kommen, in Form von Stößen durch Werkzeuge, Stöße durch Flughafenfahrzeuge oder auch einfach zu Stößen durch nicht richtiges Anbringen der Tanks an den jeweiligen Vorrichtungen. Dies wiederum kann zu Rissbildungen und somit zum Versagen, bzw. zur Ermüdung des Materials führen. Diese auftretenden Risse, würden einen sofortigen Einsatz des jeweiligen Tanks ausschließen. Der Tank müsste durch einen komplett neuen Tank ausgetauscht werden und an dem beschädigten Tank müssten neue Reparaturmaßnahmen beziehungsweise zusätzliche Inspektionen und Auslegungen durch Ingenieure durchgeführt werden.

6.2.2 Interne austauschbare Behälter

Unter interne austauschbare Behälter versteht man jene, welche ähnliche Konfigurationen, wie fest angebrachte Tanks aufweisen, mit dem entscheidenden Vorteil, dass sich diese jederzeit auswechseln und durch bereits vollgetankte Tanks ersetzen lassen. Interne austauschbare Behälter dürfen laut der CS25 jedoch lediglich nicht integrale Tanks sein. Bauteile, welche eine wesentliche tragbare Last, neben der Lasten, welche vom Treibstoff resultieren aufnehmen, dürfen nicht so angebracht sein, dass diese jederzeit ausgetauscht werden können. Auch wäre es aus rein designtechnischer Sicht schwieriger, da integrale Tanks mit dem vorderen und hinteren Teil des Rumpfes verbunden sind, um Lasten aufzunehmen, aber auch an die Struktur des Flugzeugs abzugeben.

Es gilt zu beachten, dass die austauschbaren internen Behälter nur in dafür vorgesehene Flugzeuge, wie Frachtflugzeuge beispielsweise, einsetzbar sind. Denn sie haben einen deutlich größeren Umfang und eine wesentlich größere Länge, sodass das Be- und Entladen dieser Tanks, nur durch Hauptfrachttüre erfolgen kann.

Mit diesen Tankkonfigurationen würden die besten Voraussetzungen zur Erzielung eines Behälters, welcher für den Boden, als auch die Luft geeignet ist, geschaffen werden. Die Lieferung und auch das Beladen erfolgt über einen LKW mit hydraulisch höhenverstellbarer Beladungsfläche.

Auch die Vor- und Nachteile dieser Behälter werden im Folgenden diskutiert, wobei jedoch gesagt werden kann, dass viele Parallelen zu den bereits erläuterten Vor- und Nachteilen des externen austauschbaren Behälters gezogen werden können.

Vorteile

Die entscheidenden Vorteile bei diesen Tanks sind ähnlich wie zu den bereits vorgestellten externen Tanks. Auch hier liegt der Hauptvorteil in den Wartungsarbeiten und Reparaturarbeiten, welche durch das aus und einbauen der Tanks wesentlich vereinfacht werden würde. Auch wie bereits angesprochen die Verdampfungsrate, welche durch das Betanken essenziell beeinflusst wird, wird durch das Einbauen bereits vollgetankter Tanks effektiv reduziert. Diese Art von Behälter sind für den Transport bestmöglich geeignet. Ein weiterer entscheidender Vorteil dieser austauschbaren und bereits bei Lieferung befüllten Tanks ist, dass die ursprünglich anfallenden hohen Investitionskosten in die Infrastruktur des Flughafens wegfallen würden. zum Verflüssigen und zum Betanken der Flugzeuge mit Wasserstoff, wie beispielsweise im Konzept von Airbus, Ein solches Konzept einer Infrastruktur, welches von Airbus vorgestellt wurde, wurde in Kapitel 4.2 vorgestellt. Solch eine Infrastruktur beinhaltet dafür vorgesehene neu entwickelte- oder modifizierte Flughafenautos zum Transport des Wasserstoffs, sowie Anlagen zur Speicherung und zur Verflüssigung des Wasserstoffs am Flughafen. Diese Anschaffungen und das Schaffen der Voraussetzungen an jedem Flughafen ist nicht nur kostenintensiv, sondern auch äußerst zeitintensiv. Durch das Beliefern Ohne die Notwendigkeit einer solchen Infrastruktur, könnten Wasserstoffflugzeuge schon deutlich zeitnäher ihre erste Anwendung finden.

Nachteile

Auch die Nachteile sind ähnlich wie die von bereits vorgestellten externen austauschbaren Tanks. Ein entscheidender Nachteil, welcher noch hinzukommt, ist der des eingeschränkten Anwendungsbereichs. Durch die größeren Tanks und den Bedarf diese im Flugzeug zu installieren, sind entsprechende Zugänglichkeiten gefordert. Diese sind nur bei Frachtflugzeugen in

Form von Frachttüren gegeben. Die Anwendung dieser Tanks wäre also nur bei Frachtflugzeugen möglich. Tabelle 4 zeigt einen Vergleich wesentlicher Designparameter der unterschiedlichen Konfigurationen.

Tabelle 4: Designparameter der unterschiedlichen Tanks

Design Parameter	Integraltank	Nichtintegraltank	interner austauschbarer Tank
Temperatur Tankinnere	-253 °C	-253 °C	-253 °C
Länge	12.2 m	13.20 m	3.7 m
Größter Durchmesser	6 m	5.8 m	3.2 m
Kleiner Durchmesser	3.9 m	3.1 m	3.2 m
Anzahl der Behälter	1 pro Triebwerk	1 pro Triebwerk	2-3 pro Triebwerk
Material	Al6061-T6 2219 (Brewer)	2219	5085 (AL-Mg)
Verdampfungsrate	<3%	<3%	<2.5%

6.2.3 Auswahl der am besten geeigneten Konfiguration

Auf Grund der angesprochenen Vor- und Nachteile, soll ein interner austauschbarer Behälter gewählt werden für diese Arbeit. Der externe austauschbare Behälter in Kombination mit Batterien ist zwar gut umsetzbar, jedoch soll es hier primär um die Umsetzung eines rein Wasserstoff betriebenen Flugzeugstanks gehen.

6.3 Analyse der erlangten Erkenntnisse

Es gilt nun die in der Benchmark Analyse angeführten Punkte mit höchster Wichtung umzusetzen. Dafür müssen unter anderem die verschiedenen Konfigurationen, Materialien, die Isolationen sowie der Aspekt der Sicherheit genauer untersucht werden.

Reduzierung der Verdampfungsrate

Der Durchbruch von der Anwendung des flüssigen Wasserstoffs, ist teilweise von der Reduzierung der Verdampfungsrate abhängig. Die Verdampfungsrate kann auf verschiedene Arten reduziert werden, zum Beispiel durch hervorragende Isolierungen der Behälter zur Verringerung der Wärmeübertragung, durch eine Reduzierung des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses des Behälters oder auch durch die Verwendung kryogener Druckbehälter. Die Verwendung von kryogenen Druckbehältern wird im Folgenden genauer vorgestellt.

Kryogene Druckbehälter

Die Kombination des bereits verfügbaren vorgestellten Tanks mit der Technik des kryogenen Druckbehälters wird nun genauer untersucht. Bei der kryogenen Speicherung, wird flüssiger Wasserstoff in Behältern gespeichert. Diese Behälter können unter Druck gesetzt werden. Der kryogene Druckbehälter ist eine neue Technologie, welche bislang noch nicht stark erforscht ist.

Bei diesem Konzept wird der große Vorteil des flüssigen Wasserstoffs, welcher in der hohen Dichte liegt, teilweise ausgenutzt, bei einer geringeren Verdampfungsrate. Das heißt in diesen Tanks können große Mengen an flüssigem Wasserstoff gespeichert werden, bei geringeren Verlusten. Denn die Wärmeaufnahmekapazität dieser Tanks ist größer durch einen höher zulässigen Druck. Dadurch steigt der im Behälter zulässige Druck, was zur Folge hat, dass Wasserstoff erst später entlüftet werden muss, wodurch die Standzeit eines dieser Tanks verlängert wird. Bei einem Druck von 240 bar und einer Temperatur von -253 °C , nimmt die Dichte einen Wert von 81 g/l an, wobei die Dichte bei einem Druck von 1 bar einer Dichte von 70 g/l annimmt.

Der Vorteil der kryogenen Druckbehälter ist, dass sie den Wasserstoff bei einer wesentlich höheren Dichte speichern, als es bei gasförmigem Wasserstoff in Druckbehältern der Fall ist. Es könnte sogar sein, dass die Speicherdichte eine höhere ist, als jene des flüssigen Wasserstoffs. [50] Somit würde sich auch die Größe des Tanks reduzieren. Denn kryogene Druckbehälter sind in der Regel schwerer als beispielsweise Druckbehälter für flüssigen Wasserstoff. Durch die erhöhte Speicherdichte würde sich aber die Größe des Tanks effektiv verringern lassen, was eine Material- sowie eine Gewichtseinsparung mit sich bringt.

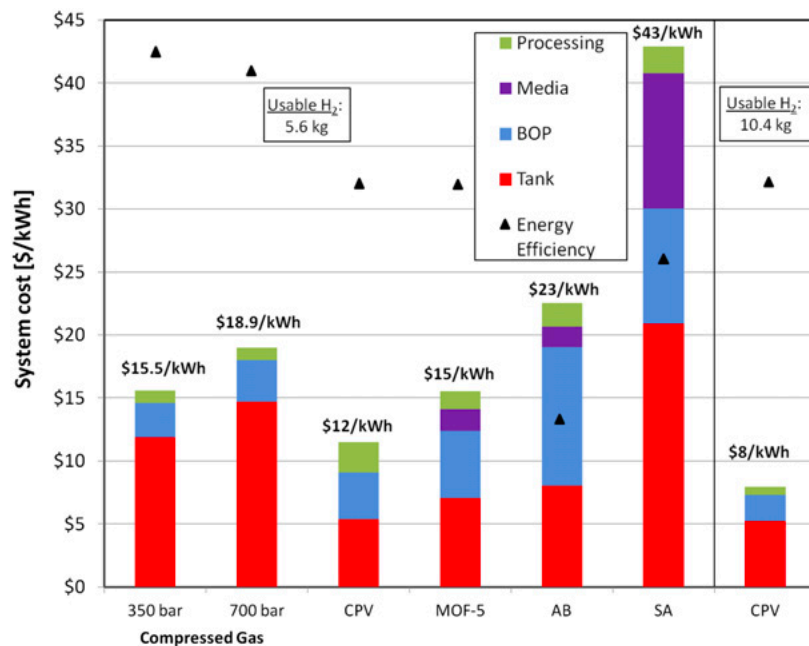


Abbildung 28: Geschätzten Kosten für die Speicherung von Wasserstoff

Dieser Effekt lässt sich auch in Abbildung 28 erkennen, wo CPV für kryogene Druckbehälter steht. An dieser Darstellung lässt sich erkennen, dass der Preis der Speicherung von Wasserstoff in kryogenen Druckbehältern bei einer Zunahme des verwendeten Wasserstoffs von 5.6 kg auf 10.4 kg um ca. 25 Prozent sinkt.

Durch den beschriebenen Druck von 350 bar, werden durch vorteilhafte Thermodynamik Verdampfungsverluste vermieden. Denn der höhere Druck des Tanks, wirkt den Verlusten bei einem Druckanstieg und einer Erwärmung des Wasserstoffs entgegen. [50]

Ein Parameter, welcher die Speicherung mitbewertet, ist die Standzeit eines Tanks. Diese gibt an, wie lange ein inaktiver Tank ohne Wasserstoffverluste am Boden stehen bleiben kann. Hierbei gilt der erste Hauptsatz der Thermodynamik. Mit Hilfe des in Abbildung 29 dargestellten Diagramms, lässt sich anhand eines Beispiels die Standzeit eines kryogenen Druckbehälters mit der eines gewöhnlichen Tanks für flüssigen Wasserstoff vergleichen.

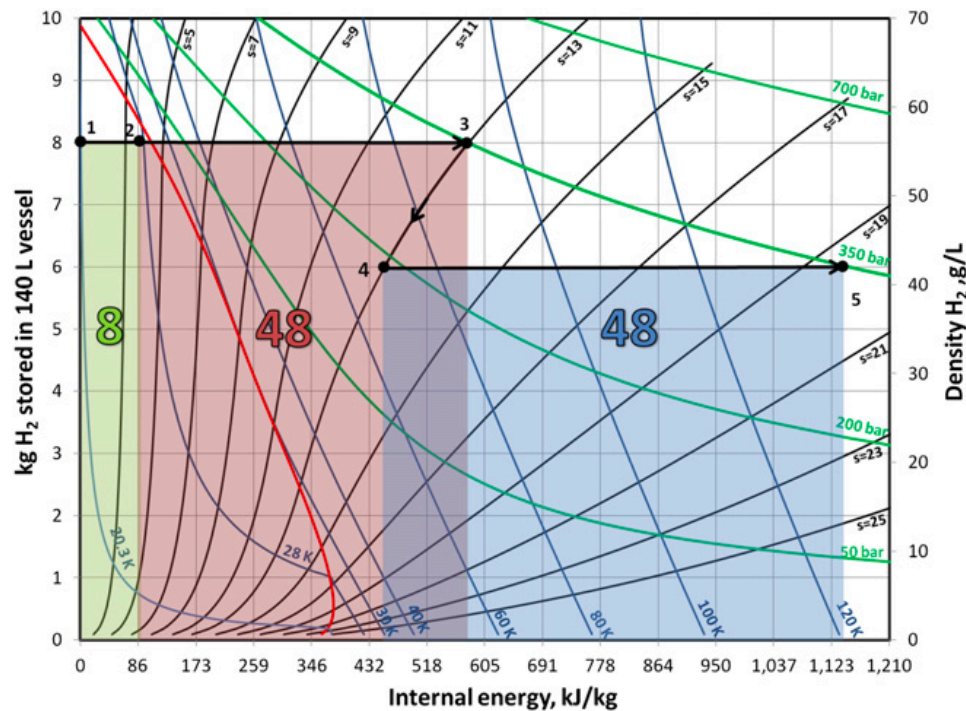


Abbildung 29: Vergleich der Standzeiten unterschiedlicher Tanks

Die Standzeit eines Tanks für flüssigen Wasserstoff mit etwa 140 l Innenvolumen, der mit 8 kg flüssigen Wasserstoff gefüllt ist und einen zulässigen Druck von 6 bar aufweist, beläuft sich auf etwa 8 Watt-Tage. Dieser Wert lässt sich von dem grün markierten Bereich ablesen. Dazu zählt man die grünen Kästchen zusammen, welche jeweils für einen Watt-Tag ($86.400 \text{ s} = 86 \text{ kJ/kg}$) stehen. Der grüne Bereich endet dann, wenn Wasserstoff abgelassen werden muss. Dies geschieht bei Erreichen des zulässigen Drucks von 6 bar. Um dann die tatsächliche Anzahl an Tagen zu erhalten, die der Tank stillstehen kann, teilt man diese 8 Watt-Tage durch die Wärmeübertragungsrate. Bei einer Wärmeübertragungsrate von 4 Watt beispielsweise, beträgt die Standzeit dann 2 Tage. Bei der Speicherung mit flüssigem Wasserstoff im Drucktank, steigt der zulässige Druck auf 350 bar und somit verlängert sich die Standzeit auf das sechsfache bei dieser Tankkonfiguration, wie in Abbildung 29 zu sehen ist. Dabei handelt es sich um die Summe aus dem roten und dem grünen Bereich.

Ein solcher mit Aluminium ausgekleideter Verbundwerkstoff-Behälter mit einer Vakuumschale der Drücke von bis zu 350 bar standhalten kann, erlaubt ein geringes Gewicht. Dabei wird eine reflektierende mehrschichtige Aluminiumummantelung verwendet, um Wärmeverluste zu reduzieren. Dieser Tank ist in Abbildung 30 abgebildet. [51]

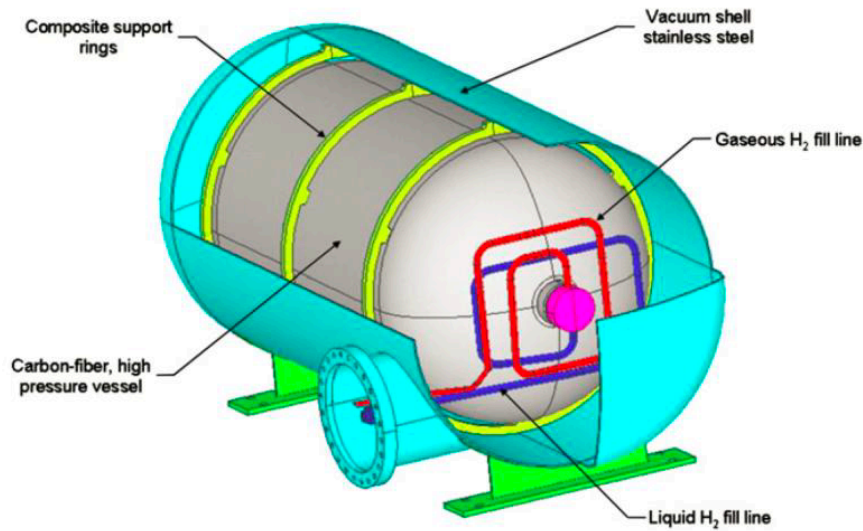


Abbildung 30: Mehrschichtige Aluminiumummantelung eines Behälters [51]

6.4 Materialauswahl

In den folgenden Kapiteln wird ein Material ausgesucht, welches zur Konstruktion und Anwendung des kryogenen Druckbehälters am besten geeignet ist. Die Werkstoffauswahl spielt eine entscheidende Rolle bei der Auslegung des Tanks. Der Werkstoff muss hohe Anforderungen erfüllen um als Material für den Transportbehälter in Frage zu kommen. In diesem Kapitel werden unterschiedliche Materialien vorgestellt und untersucht. Dazu gehören unter anderem Stahl, CFK-Werkstoffe und Titan- und Aluminiumlegierungen.

Die in der QFD-Analyse gesammelten Anforderungen müssen bei der Auswahl mitberücksichtigt werden. Die Anforderungen „widersteht Fluglasten“ und „geringe Verdampfungsrate“, nehmen mit die höchsten Wichtigkeiten an. Diese Anforderungen können nur mit einem geeigneten Werkstoff erfüllt werden. Zur Auswahl des einzusetzenden Werkstoffs werden in diesem Kapitel wesentliche Aspekte untersucht.

Festigkeit

Ein hohe spezifische Festigkeit ist von entscheidender Bedeutung bei der Wahl des Tankmaterials.

Duktilität

Das Material sollte auf Grund der kryogenen Temperaturen im Tank eine gute Duktilität aufweisen. Denn viele Werkstoffe neigen dazu bei niedrigen Temperaturen ihre Duktilität zu verlieren und spröde zu werden. Duktilität ist die Eigenschaft eines Werkstoffs sich unter Belastung plastisch zu verformen, bevor er versagt [52].

Kryogene Temperaturen

Im Transportbehälter werden Temperaturen unter -253°C vorliegen. Diese kryogenen Temperaturen, dürfen generell keine negativen Auswirkungen auf das Material haben. Das Material sollte außerdem dazu beitragen, diese Temperaturen längst möglich beizubehalten. Hinzu kommt der hohe Temperaturunterschied, welcher inner- und außerhalb des Tanks herrscht. Hierbei werden Temperaturunterschiede von $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$ [29] erreicht.

Wärmeleitfähigkeit

Ein weiterer ausschlaggebender Punkt ist eine geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials. Die Wärmeleitfähigkeit eines Materials ist temperatur- und materialabhängig. Wie bereits mehrfach erwähnt, besteht eines der größten Probleme bei der Wasserstoffspeicherung in der hohen

Verdampfungsrate des Wasserstoffs durch eindringende Wärme in den Tank. Dem Verdampfen kann durch Dicke Wände des Tanks und durch eine dicke Isolationsschicht entgegengewirkt werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss aber mehr Gewicht und mehr Kosten. Weist das Material nun aber eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf, können sowohl die Isolationsschicht als auch die Dicke der Wände dünner ausgelegt werden.

Permeation

Unter Permeation versteht man das Durchdringen eines Stoffs durch einen Festkörper. Bei Wasserstoff hat man dieses Problem auch. Die Permeation stellt sogar einen der kritischsten Aspekte bei der Auslegung eines Tanks dar, da Wasserstoffmoleküle sehr klein sind. [46] Um diesem Problem entgegenzuwirken sollte man metallische Tankwände wählen, da Wasserstoff metallische Materialien deutlich langsamer durchdringt als nichtmetallische Werkstoffe. Jedoch gibt es auch Ausnahmen, Theoretisch wären PMC-Materialien (Polymermatrix-Verbundwerkstoffe) für die Materialauswahl sehr vorteilhaft vor allem bezüglich des Gewichts und der daraus resultierenden Nutzlast und der Kosten. Jedoch spielt die Temperatur auch wieder hier einen wesentlichen Aspekt. Bei den kryogenen Temperaturen dehnt sich die Polymermatrix anders aus als die Kohlenstofffasern, was auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzuführen ist. Diese Ungleichheit in der Ausdehnung führt zu Spannungen im Material, was wiederum zu Rissen im Material führt. Diese Mikrorisse ermöglichen es dem Wasserstoff zu entweichen. [46], [53]

Wasserstoffversprödung

Zahlreiche Materialien haben mit der Wasserstoffversprödung zu kämpfen, sobald sie Wasserstoff in großen Konzentrationen ausgesetzt sind. Die Versprödung bringt viele Nachteile mit sich, denn die positiven Materialeigenschaften nehmen deutlich ab. Die bereits angesprochene Duktilität nimmt ab. Außerdem ist, auf Grund der Sprödigkeit, die Belastbarkeit deutlich geringer als zuvor. Spröde Materialien sind außerdem deutlich anfälliger für Rissbildungen und somit für plötzliches Versagen deutlich unterhalb der Streckgrenze. Die Anfälligkeiten für Wasserstoffversprödung der unterschiedlichen Materialien ist in Tabelle 5 festgehalten.

Durch eine geeignete Wärmebehandlung kann die Wasserstoffversprödung wieder rückgängig gemacht werden. Somit handelt es sich um einen reversiblen Prozess. Nichtsdestotrotz bringt so ein Prozess unnötige Wartungsarbeiten und -kosten mit sich.

Vergleich der Materialien

Unter Beachtung der zuvor diskutierten Eigenschaften, ist es wünschenswert ein Material zu verwenden, welches eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, eine geringe Dichte, eine geringe

Permeation, eine geringe Wärmeleitfähigkeit und keine Wasserstoffversprödung aufweist. Eines der wichtigsten Kenngrößen bei der Materialauswahl ist das Verhältnis von der Festigkeit zur Dichte. Das Verhältnis von Festigkeit zur Dichte, gibt die angesprochene spezifische Festigkeit an. Die Formel hierfür lautet:

$$\frac{\sigma_f}{\rho} \quad (2)$$

Dabei steht σ_f für die Festigkeit und ρ für die Dichte des Materials. Je größer diese dabei erhaltene spezifische Festigkeit ist, desto besser ist das Material für die Anwendung im Transportbehälter geeignet.

Dieses Verhältnis von Festigkeit zur Dichte ist in Abbildung 31 dargestellt. In Abbildung 31 werden unterschiedliche Materialien, wie Metalle, Keramiken, Schäume, Polymere und Verbundwerkstoffe untersucht. Je weiter sich ein Material in der linken oberen Ecke befindet, desto besser sind dessen Eigenschaften bezogen auf die spezifische Festigkeit. Wenn man nun die in Formel (2) vorgestellte Rechnung für die verschiedenen Materialien durchführt, erhält man Werte, die zum Vergleich der spezifischen Festigkeit dienen. Für endlosfaserverstärkte Polymerwerkstoffe (im Abbildung 31 CFRP) erhält man die höchste spezifische Festigkeit von ca. 66,66. Für Aluminiumlegierungen erhält man eine spezifische Festigkeit von ca. 25. Für Titanlegierungen liegt der Wert bei ca. 40. Auf Grund der angesprochenen Wasserstoffversprödung von Titan, sind Titanlegierungen allerdings nicht für diesen Fall geeignet. Die spezifische Festigkeit von Stahl ist gering auf Grund des hohen Gewichts. Sie beläuft sich auf ca. 11,11.

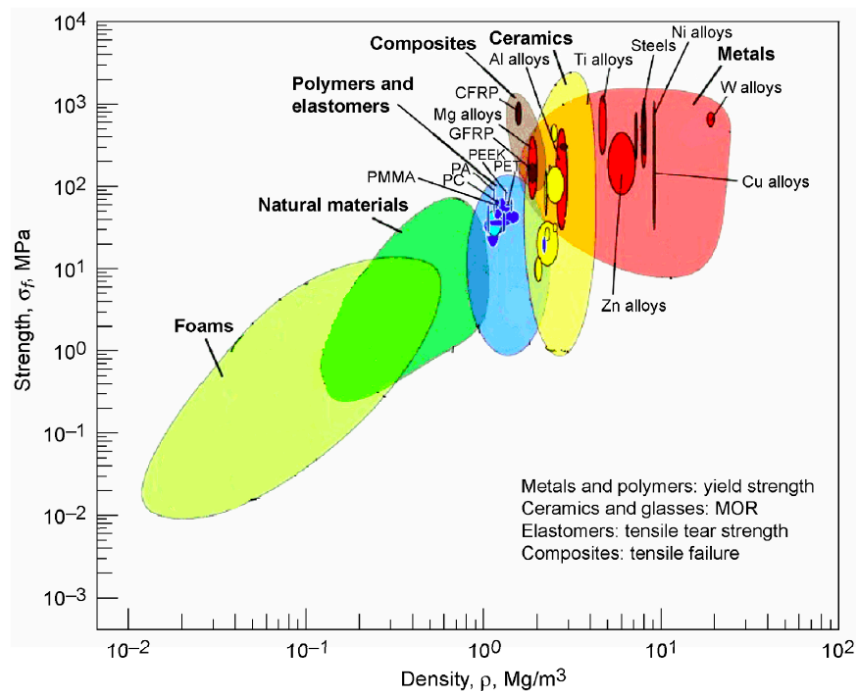


Abbildung 31: Festigkeit über die Dichte [46]

Es gilt zu beachten, dass es sich bei den berechneten Werten der spezifischen Festigkeit jeweils, um die maximale spezifische Festigkeit handelt. Die berechneten Werte sind in Tabelle 5 zur besseren Übersicht aufgelistet.

Nachdem diese Analyse mit Hilfe der Formel (2) und der Abbildung 31 durchgeführt wurde, geht hervor, dass Verbundwerkstoffe die höchste Festigkeit bei geringstem Gewicht aufweisen, gefolgt von Titanlegierungen, welche allerdings nicht geeignet sind auf Grund der Wasserstoffversprödung der Titan ausgesetzt ist. Der klare Nachteil der endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffe, liegt in den hohen Herstellungskosten und in der vorhandenen Permeation. [47].

Ein weiterer in Frage kommender Verbundwerkstoff ist das isotrope diskontinuierliche verstärkte Aluminium (in Abbildung 32 DRA). Sie sind wesentlich günstiger als die endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffe, auf Grund von kostengünstigeren Herstellungsverfahren (Gießen). Außerdem ist die Wasserstoffdurchlässigkeit dieses Materials sehr gering, im Gegensatz zu den Polymeren Verbundwerkstoffen. [47]

Um eine weitere Einschätzung der Eigenschaften der Materialien vornehmen zu können, ist in Abbildung 32 der spezifische Modul über die spezifische Festigkeit dargestellt.

Der spezifische Modul setzt sich zusammen wie in Formel (3) angegeben, wobei sich die spezifische Festigkeit, wie in Formel (2) zusammensetzt.

$$\frac{E}{\rho} \quad (3)$$

Ein größtmöglicher spezifischer Modul bei einer größtmöglichen spezifischen Festigkeit ist für die Auswahl des Materials vorteilhaft. Denn hiermit geht auch ein geringes Gewicht einher. Somit ist es sinnvoll ein Material zu wählen, welches sich in der oberen rechten Ecke der Abbildung 32 befindet.

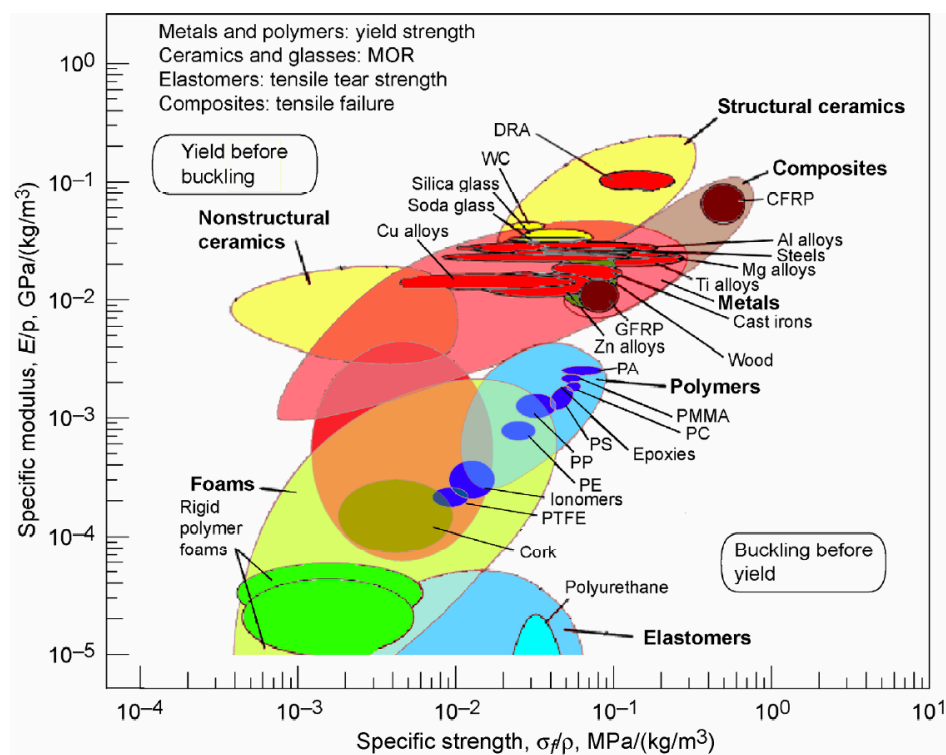


Abbildung 32: Spezifischer Modul im Verhältnis zur spezifischen Festigkeit [46]

Es wird also ersichtlich, dass sich die Verbundwerkstoffe und das diskontinuierlich verstärkte Aluminium (DRA in Abbildung 32) von den anderen Werkstoffen absetzt.

In Abbildung 33 ist zudem der Elastizitätsmodul über die Dichte dargestellt. Es ist wichtig, ein Material mit hoher Steifigkeit und geringer Masse zu wählen, um die Verformung unter Last zu minimieren. Verbundwerkstoffe und metallische Werkstoffe eignen sich besonders gut für diese Anwendung, denn sie weisen eine hohe spezifische Steifigkeit auf.

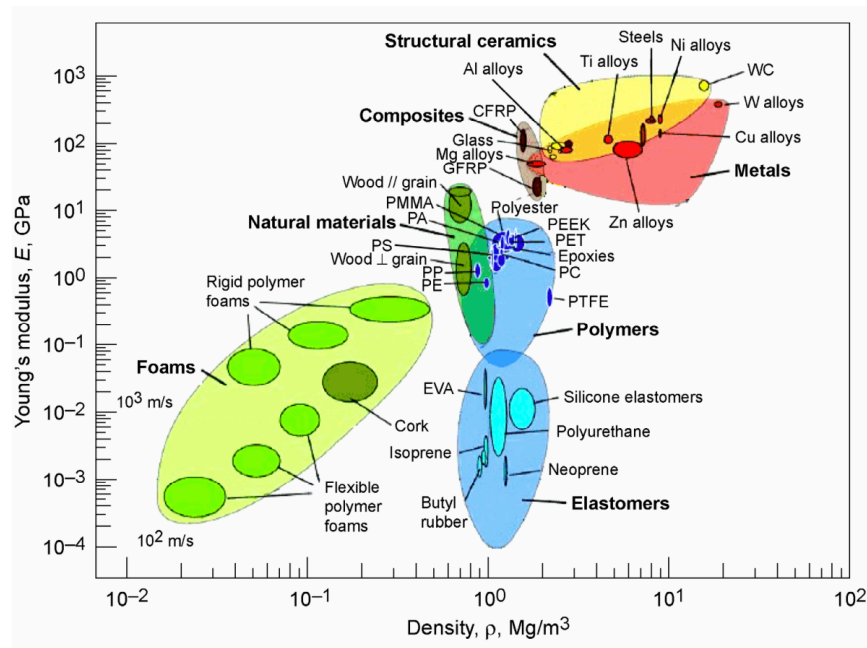


Abbildung 33: E-Modul dargestellt über die Dichte für verschiedene Materialien

Zur übersichtlicheren Werkstoffauswahl wird im Folgenden eine Tabelle präsentiert, welche wichtige Kennzahlen der interessanten Materialien beinhaltet. Einige der in der Tabelle 5 aufgeführten Materialien werden bereits in Transport- bzw. Speicherbehältern für Wasserstoff verwendet.

Tabelle 5: Materialeigenschaften verschiedener Werkstoffe

	Al6061T6	CFK	2021	2219	Stahl	5086 (Al-Mg)
<i>Gewicht</i>	Leicht	Sehr leicht	Leicht	Leicht	Schwer	Leicht
<i>Wärmeleitfähigkeit</i>	Hoch	Sehr gering	Mittel	Hoch	Gering	Mittel
<i>Spezifische Festigkeit (maximal Wert)</i>	25	66.66	25	25	11.11	25
<i>Wasserstoffversprödung</i>	Keine	Keine	Keine	Keine	Hoch	Keine
<i>Duktilität bei kryogenen Temp.</i>	-	Gut	Ausgezeichnet	Sehr gut	Gut	Ausgezeichnet
<i>Permeation</i>	Mittel	Hoch	Gering	Gering	Gering	Gering

Bei der Aluminiumlegierung 2021, welche in Tabelle 5 aufgeführt ist, handelt es sich um eine neuere Legierung. Sie wurde im Jahre 1967 von der Aluminium Company of America (ALCOA) im Auftrag der NASA Marshall Space Flight Center entwickelt. Diese Legierung ist speziell für kryogene Anwendungen entwickelt wurden. Der Werkstoff ist ein schweißbarer und hochfester Werkstoff mit einer hohen Festigkeit und somit ein sehr interessanter Kandidat. Seine hohe Festigkeit hängt im Gegensatz zu den 2219 Legierungen, nicht von der Kaltverformung ab. [29], [54] Das in Tabelle 5 aufgelistete Material 5086 (Al-Mg) weist bei kryogenen Temperaturen eine ausgezeichnete Duktilität auf. Dies lässt sich durch das Verhältnis zwischen der Streckgrenze und der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nachweisen. In der Regel nehmen beide Eigenschaften mit sinkender Temperatur zu. Wie bereits angedeutet, gibt das Verhältnis zwischen dieser beiden Parameter Aufschluss über die Duktilität des Materials. Bei sinkender Temperatur steigt die Zugfestigkeit deutlich stärker an als die Streckgrenze. Aus dem Abstand zwischen den beiden Kurven lässt sich somit die Duktilität ableiten. Für diesen Werkstoff lässt sich erkennen, dass die Duktilität zunimmt mit sinkender Temperatur und der Werkstoff somit duktil bleibt.

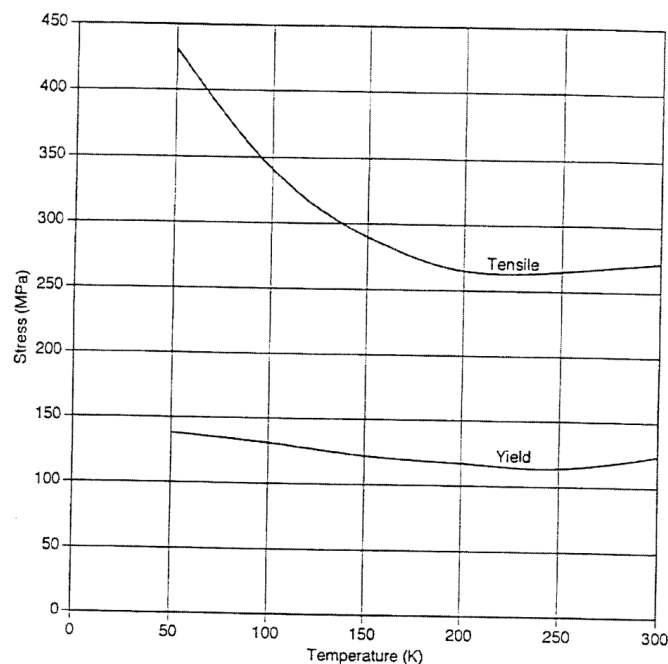


Abbildung 34: Streckgrenze und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Auswahl des Materials

Mit den zuvor erlangten Erkenntnissen wurde sich für das Material 5086 entschieden. Es zeichnet sich vor allem durch seine ausgezeichnete Duktilität bei kryogenen Temperaturen aus.

6.5 Isolationsauswahl

Eine geeignete Isolierung ist bei der Auslegung des Behälters von entscheidender Bedeutung für einen erfolgreichen Wasserstofftank. Die Isolierung sollte einen optimalen Schutz vor hohen Verdampfungsraten bieten, gleichzeitig aber auch ein minimales Gewicht aufweisen. Dafür sollte die Isolierung eine niedrige Wärmedurchlässigkeit, sowie eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Auch die Dicke kann hierbei entscheidend sein, wie in Abbildung 35 dargestellt. Die y-Achse zeigt hierbei die Verdampfungsmasse in kg und und die x-Achse zeigt die Dicke der Isolierung in Meter an. Je höher die Masse des Wasserstofftanks ist, desto größer wird der Verlust des Wasserstoffs bei geringen Isolierungsdicken. [47] [46]

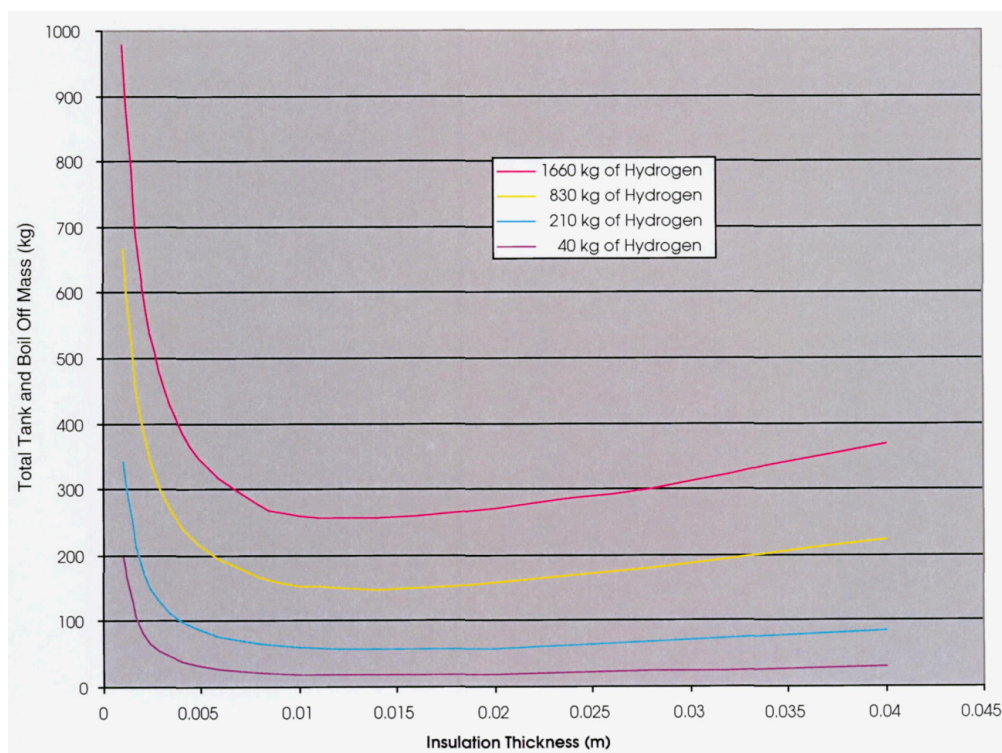


Abbildung 35: Einfluss der Dicke der Isolierung auf die Verdampfungsrate [47]

Auch für die Auswahl der Isolierung werden verschiedene Diagramme vorgestellt. [46]

Um die soeben genannten zwei wichtigsten Eigenschaften gegenüberzustellen, werden in Abbildung 36 verschiedene Isolationsmaterialien miteinander verglichen. In Abbildung 36 ist die Wärmeleitfähigkeit über die Dichte dargestellt. Es gilt zu beachten, dass je geringer die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien sind, desto besser sind diese Materialien für eine Anwendung als Isolation im Wasserstofftank geeignet. Dasselbe gilt für die Dichte, denn je geringer diese ist, desto geringer ist das Gewicht des jeweiligen Materials.

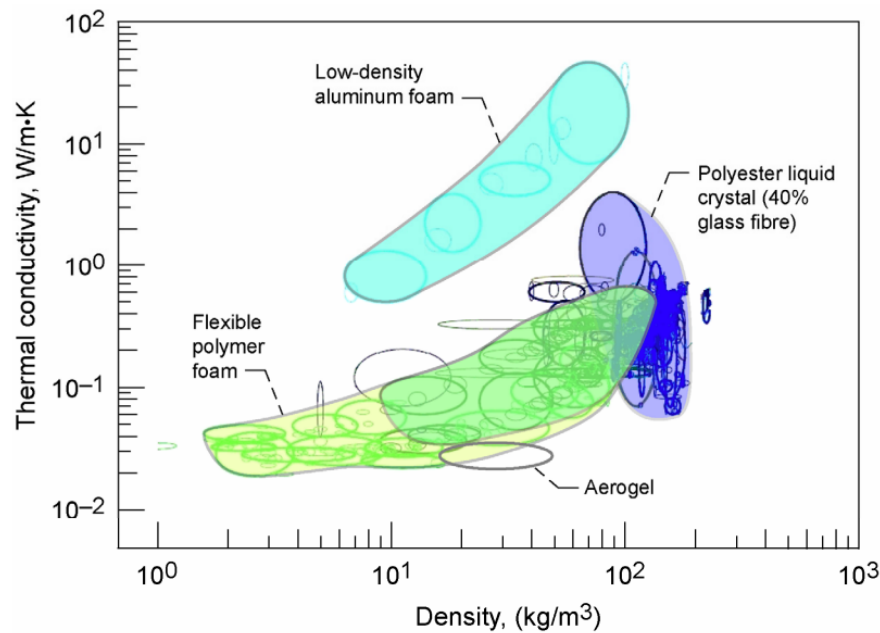


Abbildung 36: Wärmeleitfähigkeit über die Dichte [46]

Wie Abbildung 36 zu entnehmen ist, weisen die Aluminiumschäume die höchsten Wärmeleitfähigkeiten auf. Die geringsten weisen sowohl die Aerogele als auch die flexiblen Polymer Schäume auf. Für eine Anwendung im Bereich Wasserstoff, wären vor allem die Aerogele gut geeignet, wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit der geringen Dichte.

Eine weitere wichtige Gegenüberstellung von Materialeigenschaften ist die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit zur Wärmedurchlässigkeit. Diese ist in Abbildung 37 dargestellt.

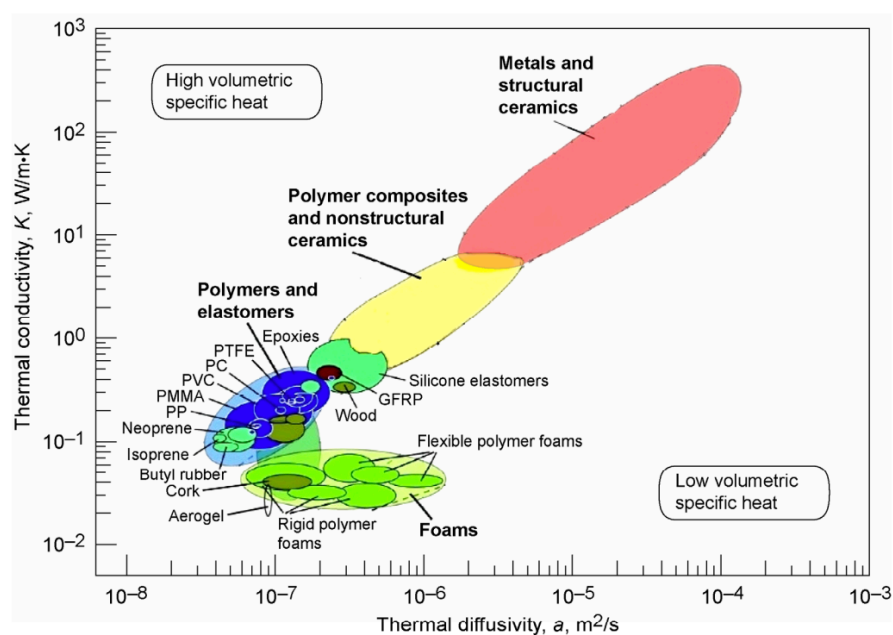


Abbildung 37: Wärmeleitfähigkeit über die Wärmedurchlässigkeit [46]

Die Qualität der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmedurchlässigkeit variiert stark zwischen den verschiedenen Materialien. Wie bereits zuvor angesprochen, sind diese beiden Eigenschaften von unterschiedlicher Bedeutung für die jeweilige Mission. Speziell auch für den Gebrauch am Boden, wo längere Standzeiten Voraussetzung sind ohne Verbrauch aus dem Tank, müssen bestmögliche Werte der Wärmeleitfähigkeit her. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials Wärme durch das Material zu leiten.

Die Wärmeleitfähigkeit wird als die Fähigkeit eines Materials verstanden, Wärme im Verhältnis zur gespeicherten Wärme pro Volumeneinheit zu leiten. Die Wärmedurchlässigkeit ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit. Je kleiner diese wird, desto kleiner wird auch die Durchlässigkeit. Allerdings ist sie noch abhängig von der und der spezifischen Wärmekapazität. Das heißt also, dass ein Material mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit gewählt werden soll und mit einer hohen spezifischen Wärmekapazität, um eine möglichst kleine Wärmeleitfähigkeit und eine möglichst kleine Wärmedurchlässigkeit zu erhalten. [46]

Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, bieten beispielsweise Aerogele sowohl niedrige Wärmeleitfähigkeiten als auch niedrige Wärmedurchlässigkeiten.

Ein weiter wichtiger Vergleich ist in Abbildung 38 dargestellt. Der bereits erwähnte Wärmeausdehnungskoeffizient ist der Wärmeleitfähigkeit gegenübergestellt. Die geringsten Wärmeausdehnungskoeffizienten weisen die Verbundwerkstoffe auf. Je geringer der Wärmeausdehnungskoeffizient ist, desto geringer sind die thermische Deformation des Materials und die damit einhergehenden Spannungen im Material. Es geht jedoch nicht nur um die Erzielung eines geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten, sondern auch um die Erreichung einer geringen Wärmeleitfähigkeit.

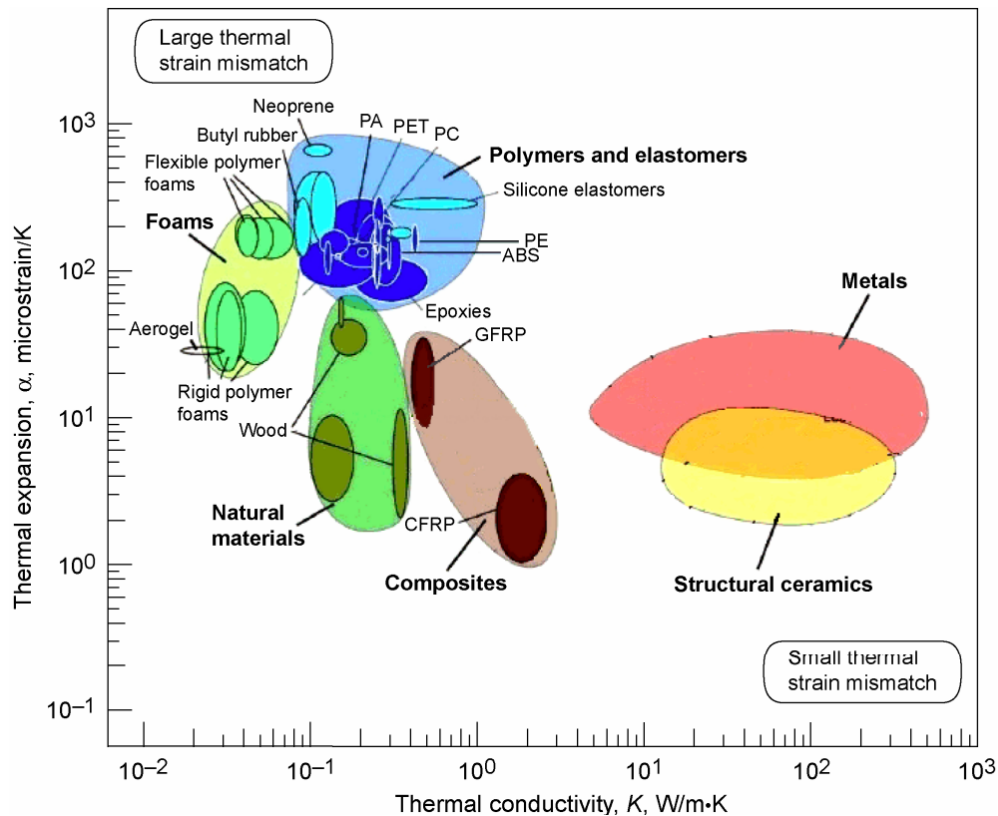


Abbildung 38: Wärmeausdehnungskoeffizient über die Wärmeleitfähigkeit [48]

Die Analyse der vorgestellten Abbildungen und die damit vorgestellten Informationen lassen zu dem Schluss kommen, dass Materialien mit geringen Wärmeleitfähigkeiten von großer Bedeutung sind, aber abhängig von der Mission auch die Wärmedurchlässigkeit eine wichtige Rolle spielen kann. Wenn man sich nun die Ergebnisse aus Abbildung 38 anschaut, fallen die Aerogele und die steifen Polymer Schaume auf, welche die geringsten Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, bei akzeptablen Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Auswahl der Isolation

Nachdem die verschiedenen Isolationsmaterialien und deren Vor- und Nachteile vorgestellt wurden, wird auf Grund der erlangten Erkenntnisse aus Abbildung 36 bis Abbildung 38, der Isolationstyp Aerogel gewählt.

6.6 Finales Design

In diesem Kapitel wird das finale Design des Wasserstofftanks vorgestellt. Auf Grund seiner vielen Vorteile wurde das Konzept der internen austauschbaren Behälter gewählt. Diese internen austauschbaren Behälter sollen aus dem zuvor ausgewählten 5086 Material hergestellt werden mit dem Isolationstypen Aerogel. Hierdurch wird eine optimierte Anwendung ermöglicht. Der Material- und der Isolationstyp sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Auswahl des Tankkonfiguration

	Interner austauschbarer Tank
Isolationstyp	Aerogel
Materialtyp	5086 (Al-Mg)
Temperatur Tank- innere	-253 °C
Länge	3.7 m
Größter Durch- messer	3.2 m
Kleiner Durch- messer	3.2 m
Anzahl der Behäl- ter	2-3 pro Triebwerk
Material	5085 (AL-Mg)
Verdampfungs- rate	Mind. 96h keine Verdampfung da- nach <2.5%

Die internen, austauschbaren Wasserstofftanks werden bereits vollgetankt geliefert und benötigen keine zusätzliche Betankungsvorrichtung am Flughafen. Der Tank muss für den Bodentransport geeignet sein und über eine geeignete Transportmöglichkeit verfügen. Um dies ermöglichen zu können, muss der Wasserstofftank fest in einer dafür vorgesehenen Vorrichtung fixiert werden. Das finale Design des Tanks und die Fixierung sind in Abbildung 39 und in Abbildung 40 dargestellt.



Abbildung 39: Interne austauschbare Behälter [55]

Zusätzlich ist das Be- bzw. Entladen in Abbildung 40 dargestellt. Diese Be- und Entladen erfolgt mit Hilfe eines LKWs. Die Wasserstofftanks werden in der dafür vorgesehenen Fixierung in die Position des Flugzeugs gefahren.

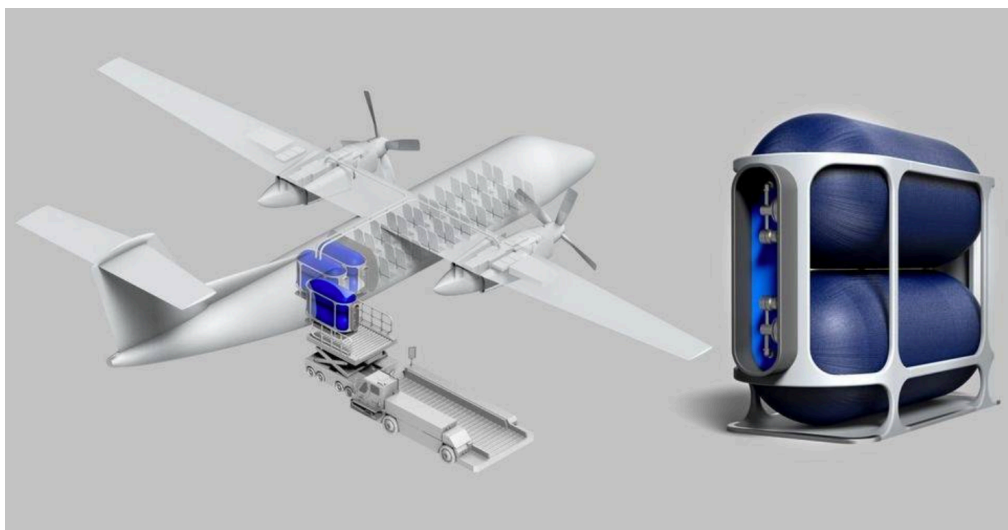


Abbildung 40: Beladen der Tankbehälter in das Flugzeug [55]

Durch die Auswahl des Materials und des Isolationstyps sind optimale Rahmenbedingungen für die Anwendung des Wasserstofftanks mit flüssigem Wasserstoff geschaffen. Durch die Vorrichtung, in welcher die Tanks im Flugzeug installiert werden, ist auch zu jeder Zeit ein sicherer Transport der Tanks gewährleistet.

7 Fazit

Das Ziel der vorliegenden Studie war es mit Hilfe der SysML einen mobilen Wasserstofftank zu entwickeln, der sowohl für den Transport am Boden als auch für die Anwendung im Flugzeug geeignet ist. Im Vorfeld sind verschiedene bereits bestehende Konzepte von Wasserstofftanks erörtert worden. Basierend auf den Vor- und Nachteilen der jeweiligen Konfiguration konnte somit ein finales Design konzipiert werden.

Das in der Studie entwickelte Konzept sieht die Verwendung mehrerer austauschbarer interner Wasserstofftanks vor, die vollgetankt an den Kunden geliefert werden. Die wesentlichen Vorteile dieses Designs ist das Minimieren von infrastrukturellen Voraussetzungen sowie das Vermeiden von Wasserstoff-Verdampfung beim Betanken des Flugzeugs. Für den Wasserstofftank gilt es einen geeigneten Material- und Isolationstypen zu wählen. Wichtige Parameter für das Isoliersystem und den Materialtypen sind die spezifische Festigkeit bei kryogenen Temperaturen, die Dichte, Wärmeleitfähigkeit sowie Wärmedurchlässigkeit und der Wärmeausdehnungskoeffizient. Die Rangfolge der Parameter der Material- und Isolationstypeneigenschaften wird von der jeweiligen Anwendung vorgegeben.

In der Studie soll der Wasserstofftank aus dem Material 5086 bestehen. Das Material 5086 zeichnet sich durch seine ausgezeichnete spezifische Festigkeit bei kryogenen Temperaturen sowie durch seine Duktilität bei kryogenen Temperaturen aus. Als Isolationstyp wurde Aerogel gewählt. Aerogel verfügt über eine geringe Wärmeleitfähigkeit, eine geringe Wärmedurchlässigkeit und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Durch die Auswahl dieses Materials und dieses Isolationstypen wurde die Verdampfungsrate erfolgreich reduziert. Es ist zu beachten, dass es nach gegenwärtigem Kenntnisstand allerdings nicht möglich ist die Verdampfung vollständig zu unterbinden.

Dennoch müssen noch viele weitere Herausforderungen bewältigt werden, bevor es zu einer Umstellung auf Wasserstoff kommen kann. Flugzeuge müssen umgestaltet werden, da die internen austauschbaren Behälter mehr Platz benötigen. Sie müssen zudem in das Flugzeug geladen werden - aktuell nur bei Frachtflugzeugen durch die Frachttüren möglich. Somit sind neue Flugzeugkonfigurationen für Passagierflugzeuge notwendig.

Zusätzlich ist der Aspekt der Sicherheit nicht zu vernachlässigen. Ingenieure müssen Kenntnisse in Bezug auf die sichere und effiziente Handhabung von Wasserstoff als Treibstoff für Flugzeuge erwerben. Dies umfasst die Entwicklung von Technologien zur Ladung, Lagerung, Verwendung im Flugbetrieb und Skalierung für den Einsatz in großem Umfang. Wichtig ist auch die Entwicklung von hochsensiblen Sensoren zum Schutz von Systemen, die Wasserstoff verwenden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Erreichen besagter Ziele und die Implementierung von Wasserstoff im Flugzeugbau mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen wird. Die Erkenntnisse, die in dieser Arbeit abgeleitet und beschrieben wurden, können als Basis zur weiteren Optimierung des Wasserstofftanks dienen. Denn der interne austauschbare Behälter weist das größte Potenzial als Wasserstofftank auf. Die modularen Kapseln ermöglichen den Transport von Wasserstoff als reguläre Fracht, ohne dass neue Infrastruktur benötigt wird. Durch die Nutzung des bestehenden intermodalen Frachtnetzes und der vorhandenen Frachtabfertigungsanlagen ist jeder Flughafen wasserstofftauglich.

8 Literaturverzeichnis

- [1] DLR; BDLI, „Zero Emission Aviation - Emissionfreie Luftfahrt“.
- [2] „Global Market Forecast | Airbus“, 16. Juni 2021. <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast>.
- [3] R. Thomson und U. Weichenhain, „Hydrogen: A future fuel for aviation?“, S. 28.
- [4] European Commission. Directorate General for Research and Innovation. und European Commission. Directorate General for Mobility and Transport., *Flightpath 2050 :Europe's vision for aviation : maintaining global leadership and serving society's needs*. LU: Publications Office, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/50266>
- [5] R. Staiger und A. Tanțău, *Geschäftsmodellkonzepte mit grünem Wasserstoff: Wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen für H2 als nachhaltiger Energieträger*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-30576-5.
- [6] The Linde Group, „Rechnen Sie mit Wasserstoff. Die Datentabelle.“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf
- [7] R. Peters, Hrsg., *Brennstoffzellensysteme in der Luftfahrt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. doi: 10.1007/978-3-662-46798-5.
- [8] „The Future of Hydrogen“, S. 203.
- [9] „Hydrogen production by PEM water electrolysis â€“ A review | Elsevier Enhanced Reader“. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2589299119300035?to-ken=773DB43ABC30667FC462900A2E9F9DCACB966EDEEFD6C7F9F9AA67E814A2BA9E280E1F7FC55561A39AFEB5B4ADC85EE6&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220512182118>.
- [10] C. Bals u. a., „CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen“. 2018.
- [11] S. Bukold, „Greenpeace Energy Kurzstudie - Blauer Wasserstoff. Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades.“ Januar 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://green-planet-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf>
- [12] „Hydrogen: A renewable energy perspective“. IRENA, 2019.
- [13] „Hydrogen combustion, explained | Airbus“, 2. September 2021. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained>.

- [14] *A new era of hydrogen-powered flight #ZEROe*, (22. Februar 2022). Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online Video]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=-VXnz-NA0K4>
- [15] Airbus et al., „Hydrogen-powered aviation. A fact based study of hydrogen technology economics, and climate impact by 2050“. Mai 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf
- [16] D. Dilba, „Neue Antriebe: Mit Wasserstoff in die Zukunft“, *MTU AEROREPORT*. <https://aeroreport.de/de/innovation/neue-antriebe-mit-wasserstoff-in-die-zukunft> (zugegriffen 12. Mai 2022).
- [17] M. D. Guynn, J. E. Freeh, und E. D. Olson, „Evaluation of a Hydrogen Fuel Cell Powered Blended-Wing-Body Aircraft Concept for Reduced Noise and Emissions“, S. 45, 2004.
- [18] „How to store liquid hydrogen for zero-emission flight“, 9. Dezember 2021. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight> (zugegriffen 12. Mai 2022).
- [19] R. Matías Juan, „Untersuchungen zu Wasserstoffspeicherung in ausgewählten anorganischen Materialien“, ETH Zurich, 2005. doi: 10.3929/ETHZ-A-004945659.
- [20] R. K. Gupta, A. Basile, und T. N. Veziroglu, *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure*. Woodhead Publishing, 2016.
- [21] G. Vonhoff, „Conceptual Design of Hydrogen Fuel Cell Aircraft: Flying on hydrogen for a more sustainable future“, 2021, Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://repository.tu-delft.nl/islandora/object/uuid%3A8bd63dec-b67b-496b-92bc-3d5c07ff859f>
- [22] K. J. Hartig, G. Kittel, G. A. Peschek, und S. Solar, *Wasserstoff als Energieträger Herstellung, Lagerung, Transport*. Springer-Verlag/Wien, 1977.
- [23] C. Winnefeld, T. Kadyk, B. Bensmann, U. Krewer, und R. Hanke-Rauschenbach, „Modelling and Designing Cryogenic Hydrogen Tanks for Future Aircraft Applications“, *Energies*, Bd. 11, Nr. 1, S. 105, Jan. 2018, doi: 10.3390/en11010105.
- [24] Scholz, Dieter, „Design of Hydrogen Passenger Aircraft – How much ‚Zero-Emission‘ is Possible?“, Nov. 2020, doi: 10.5281/ZENODO.4301103.
- [25] D. Kang, S. Yun, und B. Kim, „Review of the Liquid Hydrogen Storage Tank and Insulation System for the High-Power Locomotive“, *Energies*, Bd. 15, Nr. 12, Art. Nr. 12, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15124357.

- [26] „Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies - 1st Edition“. <https://www.elsevier.com/books/gaseous-hydrogen-embrittlement-of-materials-in-energy-technologies/gangloff/978-0-85709-536-7>.
- [27] M. Singh und M. Garg, „Perlite-based building materials — a review of current applications“, *Construction and Building Materials*, Bd. 5, Nr. 2, S. 75–81, Juni 1991, doi: 10.1016/0950-0618(91)90004-5.
- [28] L. Decker, „Liquid Hydrogen Distribution Technology“, . *Linde*, S. 27.
- [29] G. D. Brewer, *Hydrogen Aircraft Technology*. CRC Press, 1991.
- [30] D. Verstraete, „CRANFIELD UNIVERSITY“, S. 266.
- [31] A. G. Rao, F. Yin, und H. Werij, „Energy Transition in Aviation: The Role of Cryogenic Fuels“, *Aerospace*, Bd. 7, Nr. 12, S. 181, Dez. 2020, doi: 10.3390/aerospace7120181.
- [32] D. Scholz und K. Seeckt, „Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen ‚Otto von Guericke‘ e.V. (AiF) 1710X06 1. Sept. 2006 – 30. Apr. 2010“, *Otto von Guericke*, S. 90.
- [33] „Zukunft des Fliegens | Airbus“, 23. August 2021. <https://www.airbus.com/de/who-we-are/our-worldwide-presence/germany/willkommen-im-airbus-hubberlin/zukunft-des-fliegens>.
- [34] „Micro-hybridisation: the next frontier to electrify flight? | Airbus“, 28. Oktober 2021. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-09-micro-hybridisation-the-next-frontier-to-electrify-flight>.
- [35] „ZEROe - Zero emission - Airbus“, 24. Juni 2021. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>.
- [36] „Airbus“. <https://www.airbus.com/en/asset-preview/1181>.
- [37] „A380-Prototyp wird Wasserstoff-Tester“, *Fliegerrevue - Magazin*. <https://www.fliegerrevue.aero/news-aktuelles/forschung-und-technik/a380-prototyp-wird-wasserstoff-tester>.
- [38] „The ZEROe demonstrator has arrived | Airbus“. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>.
- [39] Prof. Dr. J. Abulawi, „Systems Engineering“.
- [40] C. P. M. Govers, „What and how about quality function deployment (QFD)“, *International Journal of Production Economics*, Bd. 46–47, Nr. 1, S. 575–585, 1996.

- [41] „The House of Quality“. <https://hbr.org/1988/05/the-house-of-quality>.
- [42] M. Graf, „Costs and energy efficiency of long-distance hydrogen transport options“.
- [43] „The Future of Hydrogen: Seizing today’s opportunities | READ online“, *oecd-ilibrary.org*. https://read.oecd-ilibrary.org/energy/the-future-of-hydrogen_1e0514c4-en.
- [44] „CS-25 Large Aeroplanes“, *EASA*. <https://www.easa.europa.eu/en/certification-specifications/cs-25-large-aeroplanes>.
- [45] „Hydrogen safety: The road toward green technology | Elsevier Enhanced Reader“. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S036031991301358X?to-ken=287513D30932CE904EA7BF28AA61A4580897F55621E93F763113C47E309B75BA4AA1E0AF53B3E7ADAF038F0DDDA6BEC&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221210200426>.
- [46] S. K. Mital *u. a.*, „Review of Current State of the Art and Key Design Issues With Potential Solutions for Liquid Hydrogen Cryogenic Storage Tank Structures for Aircraft Applications“, S. 50, 2006.
- [47] A. J. Colozza, A. Corporation, und B. Park, „Hydrogen Storage for Aircraft Applications Overview“, 2002.
- [48] „Airbus reveals hydrogen-powered zero-emission engine | Airbus“, 29. November 2022. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-reveals-hydrogen-powered-zero-emission-engine>.
- [49] „These pods could provide a blueprint for future hydrogen aircraft | Airbus“, 1. September 2021. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-12-these-pods-could-provide-a-blueprint-for-future-hydrogen-aircraft>.
- [50] S. Aceves, G. Berry, J. Martinezfrias, und F. Espinosaloza, „Vehicular storage of hydrogen in insulated pressure vessels“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 31, Nr. 15, S. 2274–2283, Dez. 2006, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.02.019.
- [51] C. Ucler, „LNG AS AN ALTERNATIVE AVIATION FUEL: INCORPORATING MEMBRANE TYPE CRYOGENIC WING TANKS WITH A CENTRAL CRYOGENIC PRESSURE VESSEL FOR AIRBORNE LNG STORAGE AND FUELLING“, S. 14.
- [52] „Duktil“, *Bundesverband Geothermie*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/d/duktil.html>.
- [53] D. Verstraete, „The Potential of Liquid Hydrogen for long range aircraft propulsion“, Apr. 2009,

Zugegriffen: 24. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/4089>

[54] W. Berger und E. Willner, „Development of 2021 aluminum alloy propellant tanks“, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Bd. 8, Nr. 1, S. 69–71, Jan. 1971, doi: 10.2514/3.30219.

[55] A. Menn, „Nachhaltige Energien: Wasserstoff-Speicher: Wie Nespresso zum Fliegen“. <https://www.wiwo.de/my/technologie/umwelt/nachhaltige-energien-wasserstoff-speicher-wie-nespresso-zum-fliegen/28411358.html>.



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Swelim

Vorname: Mahmoud

dass ich die vorliegende Masterarbeit ☒ bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung einer Wasserstoff-Transportlösung für den Straßenverkehr mit dem Ziel der Anwendbarkeit im Luftverkehr

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Dresden

20.03.2023

Ort

Datum

Unterschrift im Original