HAW HAMBURG

BACHELORARBEIT

Konstruktion eines skalierten Teststandes für hybridelektrische Luftfahrtantriebe

vorgelegt am 22. November 2024

Daniel Hanke

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Kay Kochan
2. Prüfer: Prof. Dr. Thomas Netzel

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG
Fachbereich Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

Daniel Hanke

Konstruktion eines skalierten Teststandes für hybridelektrische Luftfahrtantriebe

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau B.Eng
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Kay Kochan
Zweitprüfer: Prof. Dr. Thomas Netzel

Abgabedatum: 22.11.2024

Übersicht

Daniel Hanke

Thema der Bachelorthesis

Konstruktion eines skalierten Teststandes für hybridelektrische Luftfahrtantriebe

Stichworte

Konstruktion, CAD-Modell, PEM-Brennstoffzellen, Wasserstoff, Wasserstofftechnologie, Teststand, Luftfahrtantrieb, hybridelektrisch, Brennstoffzellen-System, Kostenanalyse, Sicherheitsanforderungen, BeHyPSy

Zusammenfassung

Angesichts der Herausforderung, die CO2-Emissionen in der Luftfahrt zu senken, stellen hybridelektrische Antriebssysteme mit PEM-Brennstoffzellen eine vielversprechende Lösung dar. Im Verbundforschungsprojekt BeHyPSy beschäftigt sich die HAW Hamburg mit der modellbasierten Systementwicklung eines hybridelektrischen Antriebsstrangs für ein Flugzeug der Ultraleichtklasse (MTOW < 600 kg). In dieser Bachelorarbeit wird ein skalierter Teststand entwickelt, um die numerischen Modelle und Methoden des Projektes BeHyPSy zu validieren.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Dimensionierung, den Sicherheitsanforderungen und der Kostenoptimierung. Der entwickelte Teststand soll eine Plattform bieten, um theoretische Annahmen durch praktische Tests zu überprüfen.

Overview

Daniel Hanke

Title of the Paper

Construction of a scaled test rig for hybrid-electric aircraft engines

Keywords

Design, CAD model, PEM fuel cells, hydrogen, hydrogen technology, test stand, aviation propulsion, hybrid-electric, fuel cell system, cost analysis, safety requirements, BeHyPSy

Abstract

In view of the challenge of reducing CO2 emissions in aviation, hybrid-electric drive systems with PEM fuel cells represent a promising solution. In the joint research project BeHyPSy, HAW Hamburg is working on the model-based system development of a hybrid-electric powertrain for an ultra-light class aircraft (MTOW < 600 kg). In this bachelor thesis, a scaled test rig is being developed to validate the numerical models and methods of the BeHyPSy project.

The focus of the work is on dimensioning, safety requirements and cost. The test rig developed is intended to provide a platform for verifying theoretical assumptions through practical tests.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis VII
Symbolverzeichnis VIII
Abbildungsverzeichnis IX
Tabellenverzeichnis XI
1 Einleitung 1
1.1 Motivation und Hintergrund 1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung 2
1.3 Methodisches Vorgehen 3
2 Theoretische Grundlagen 4
2.1 Wasserstofftechnologie in der Luftfahrt 4
2.2 Hybridelektrischer Antrieb 5
2.2.1 Aufbau und Funktionsweise 5
2.2.2 PEM-Brennstoffzelle 6
2.2.3 Luft- und Wassergekühlte Systeme 7
2.2.4 Brennstoffversorgungssystem 8
2.2.5 Stromversorgung und Energiespeicherung 9
2.2.6 Steuer- und Leistungselektronik 10
2.2.7 Gas- und Wasserentsorgungssystem 11
2.2.8 Elektrischer Motor und Last 11
2.3 Analyse Vergleichbarer Modelle 12
2.3.1 Erkenntnisse aus der Analyse vergleichbarer Teststände 17
3 Konzeptioneller Entwurf des Teststandes 19
3.1 Detaillierte Anforderungsanalyse 19
3.2 Funktionsanalyse 23
3.3 Morphologischer Kasten 26
3.4 Beschreibung und Auswahl der Komponenten 32
3.5 Kabelmanagement 37
3.6 Sicherheitskonzept 39

3.7 Konzeptdefinition 40
3.7.1 Konzept 1 (Sicherheit und Übersichtlichkeit) 43
3.7.2 Konzept 2 (Wirtschaftlichkeit und Zugänglichkeit) 44
3.7.3 Konzept 3 (Ausgewogen) 45
3.8 Konzeptbewertung und Konzeptauswahl 47
4 Detaillierte Konstruktion des Teststandes 50
4.1 Allgemeine Konstruktionsbeschreibung 50
4.2 Detaillierte Konstruktionsbeschreibung 53
4.2.1 Aufbau der Tragstruktur 53
4.2.2 Integration der Komponenten 54
4.2.3 Erweiterungsmöglichkeiten 57
4.3 Kostenanalyse 59
4.4 Erfüllung der Anforderungen 59
5 Diskussion und Ausblick 61
5.1 Zusammenfassung und Ausblick 61
6 Literaturverzeichnis 62
7 Anhang 64
7.1 Genaue Aufgabenstellung 64
7.2 Anforderungsanalyse des Teststands 66
7.3 Datenblatt zum Item 8 40x40 Profil 68
7.4 Berechnung der Durchbiegung und Biegespannung 70
7.5 Senkkopfschrauben Tabellenbuch 72
7.6 Technische Zeichnungen der Tragstruktur 73
7.7 Kostenanalyse und Stückliste des Teststands 74
7.8 Erfüllung der Anforderungen 76
8 Eidesstaatliche Erklärung 78

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
PEM-Brennstoffzelle	Proton-Exchange-Membrane
BeHyPSy	B4 hydrogen propulsion system
HAW Hamburg	Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
EML	Electric motor and load
PM	Power management
MI	Media input
MCS	Monitoring control system
BSZ	Brennstoffzelle
CAD	Computer Aided Design
ZeroE	Zero Emission
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
BALIS	Brennstoffzellenbasierter Antriebsstrang für Luftfahrtzeige 1,5+ Megawatt
EBZ-Dresden	Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft Brennstoffzelle mbH
SOFC-Zellen	Solid Oxide Fuel Cell
CO_2	Kohlenstoffdioxid

Symbolverzeichnis

Indizes	**Bedeutung**
$( )_g$	Gewichtskraft
$( )_F$	Einwirkende Kraft

Physikalische Symbole

Symbol	**Bedeutung**	**Einheit**
σ	Spannung	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
⌀	Durchmesser	[mm]
d	Durchbiegung	[mm]
F	Kraft	[N]
g	Erdbeschleunigung	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
l	Länge	[mm]
m	Masse	[kg]
W	Widerstandsmoment	[cm^3]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grobkonzept des Versuchsstandes aus dem Projektantrag BeHyPSy [10] 2

Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines vollelektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle und Batterie [8] 6

Abbildung 3: Funktion und Aufbau einer Brennstoffzelle [23] 7

Abbildung 4: Schema des BALIS-Teststands [7] 14

Abbildung 5: ZeroE Fuel-Cell-Engine Aufbau [3] 15

Abbildung 6: Superstack [25] 16

Abbildung 7: Teststand mit anhebbarer Haube der EBZ.Dresden [9] 17

Abbildung 8: Aluminiumprofile Standard (links), leicht (mitte), economy (rechts) [15] 33

Abbildung 9: Darstellung der Winkelsätze [14] 35

Abbildung 10: Darstellung der Nutensteine die für die Fixierung der Tischplatte genutzt werden [13] 36

Abbildung 11: Polypropylen Flächen von Item [16] 36

Abbildung 12: Aluminiumblech von Item [11] 37

Abbildung 13: Konzeptentwurf 44

Abbildung 14: Konzeptentwurf 2 45

Abbildung 15: Konzeptentwurf 3 47

Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Teststandes von vorne und hinten 50

Abbildung 17: Teststand Seitenansicht (Rechts) 51

Abbildung 18: Vertikales Profil mit Wasserstoffkonzentrationssensor 51

Abbildung 19: Möglicher Aufbau des Arbeitsplatzes 52

Abbildung 20: Verstellbares Monitorgelenk 52

Abbildung 21: Schematischer Aufbau der Tragstruktur (links) Seitenansicht (rechts) 53

Abbildung 22: Verbindung mit parallel fasteners [12] 53

Abbildung 23: Verschraubung der Tischplatte 54

Abbildung 24: Komponentenanordnung "MI" und "BSZ" 55

Abbildung 25: Komponentenanordnung "EML" und "PM" 56

Abbildung 26: Komponentenanordnung "MCS" 56

Abbildung 27: Notausschalter Positionen 57

Abbildung 28: Erweiterungsmöglichkeit 1 – Mehrere Netzteile 57

Abbildung 29: Detailansicht der Erweiterungsmöglichkeit 1 58

Abbildung 30: Erweiterungsmöglichkeit 2 58

Abbildung 31: Berechnung der Durchbiegung bei einer Länge von 1340mm und einer Last von 500N 70

Abbildung 32: Berechnung der Biegespannung bei einer Länge von 1340mm und einer Last von 500N 70

Abbildung 33: Berechnung der Durchbiegung bei einer Länge von 780mm und einer Last von 500N 71

Abbildung 34: Berechnung der Biegespannung bei einer Länge von 780mm und einer Last von 500N 71

Abbildung 35: Dimensionierung der Senkkopfschraube aus dem Tabellenbuch [20] 72

Abbildung 36: Technische Zeichnung der Tragstruktur 73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Funktionsanalyse Teststand 24

Tabelle 2: Morphologischer Kasten 27

Tabelle 3: Funktionsübersicht Konzept 1 (Orange), Konzept 2 (Lila), Konzept 3 (Grün) 42

Tabelle 4: Konzeptbewertung 48

Tabelle 5: Anforderungsanalyse des Teststands 66

Tabelle 6: Kostenanalyse und Stückliste des Teststandes 74

Tabelle 7: Erfüllung der Anforderungen 76

1 Einleitung

1.1 Motivation und Hintergrund

Angesichts des steigenden globalen Bedarfs an Mobilität und der gleichzeitig wachsenden Dringlichkeit, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren [5], ist die Entwicklung neuer, umweltfreundlicher Antriebstechnologien von großer Bedeutung. Traditionelle Antriebe, die auf fossilen Brennstoffen basieren, sind nicht länger tragfähig, wenn die Klimaziele erreicht und die Umweltbelastungen minimiert werden sollen [21]. In diesem Kontext gewinnen hybridelektrische Antriebssysteme zunehmend an Bedeutung, wie zum Beispiel solche, die Wasserstoff als saubere Energiequelle nutzen.

Hybridelektrische Antriebssysteme kombinieren die Effizienz elektrischer Antriebe mit den Vorteilen alternativer Energiequellen wie Wasserstoff, der in Brennstoffzellen in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle) hat sich als eine vielversprechende Technologie erwiesen [4], da sie eine hohe Energieeffizienz und niedrige Emissionen bietet. Diese Technologie könnte insbesondere in der Luftfahrt eine wichtige Rolle einnehmen, um die CO_2-Emissionen zu senken und nachhaltige Mobilitätslösungen zu ermöglichen [1].

Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts BeHyPSy widmet sich die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) der Entwicklung eines hybriden Antriebsstrangs für Ultraleichtflugzeuge [10]. Ein zentraler Bestandteil dieses Projekts ist die Entwicklung und Validierung numerischer Modelle, die das Verhalten und die Effizienz solcher Antriebssysteme unter realen Bedingungen simulieren. Hierfür ist ein skalierter Teststand erforderlich, der die notwendigen Experimente und Tests ermöglicht.

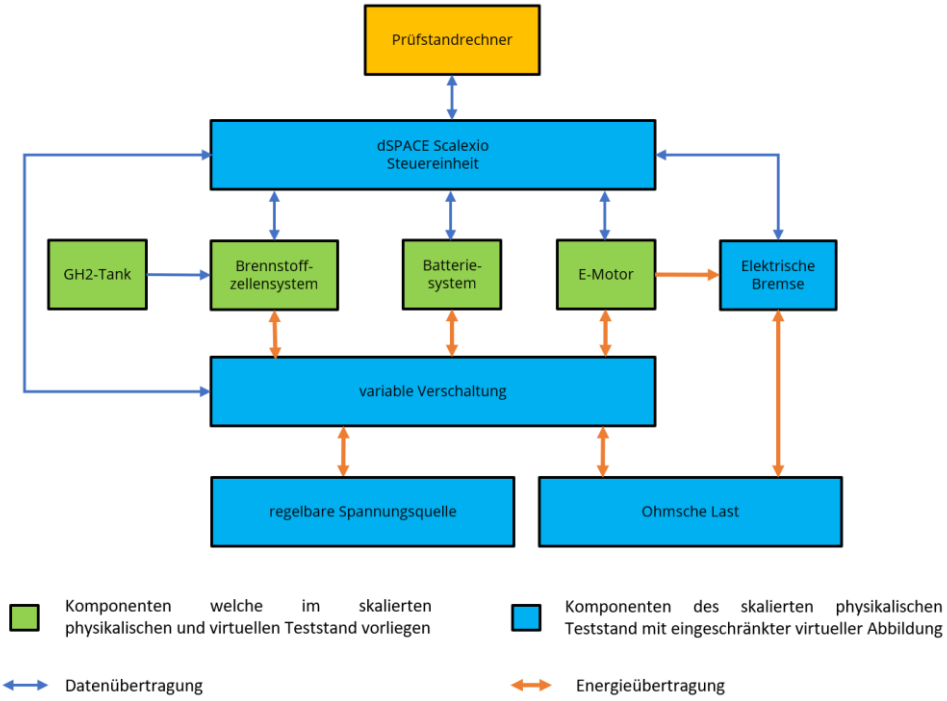


Abbildung 1: Grobkonzept des Versuchsstandes aus dem Projektantrag BeHyPSy [10]

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die zunehmenden Anforderungen an die Reduktion von CO_2-Emissionen in der Luftfahrt erfordern die Entwicklung innovativer Antriebstechnologien [6]. Hybridelektrische Antriebssysteme, die Wasserstoff als Energieträger nutzen, bieten ein großes Potenzial, um den Treibstoffverbrauch zu senken und gleichzeitig die Umweltauswirkungen der Luftfahrt zu minimieren [5]. Allerdings sind diese Technologien noch nicht ausreichend erprobt, um ihren Einsatz in der Praxis zu optimieren. Insbesondere fehlt es an validierten Modellen und realen Testumgebungen, um die Leistung und Sicherheit hybridelektrischer Systeme unter verschiedenen Bedingungen zu überprüfen.

Ein zentrales Problem besteht darin, dass die theoretisch entwickelten Modelle solcher hybriden Antriebssysteme oft nicht in ausreichendem Maße durch experimentelle Daten gestützt werden. Die fehlende Möglichkeit, diese Systeme in einer skalierbaren, kontrollierten Umgebung zu testen, erschwert die Validierung der numerischen Modelle und die Weiterentwicklung dieser Technologie.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen skalierbaren Teststand für hybridelektrische Luftfahrtantriebe zu entwickeln, der es ermöglicht, die in der Theorie erstellten Modelle zu validieren und praktische Erkenntnisse über die Systemleistung zu gewinnen. Der Teststand soll so konzipiert werden, dass er die Dimensionierung und Integration aller relevanten Komponenten, einschließlich Brennstoffzelle, Motor, Leistungselektronik und Sensorik, abbilden kann. Darüber hinaus sollen Sicherheitsanforderungen und wirtschaftliche Aspekte wie Kostenoptimierung berücksichtigt werden.

Die Konstruktion des Teststands stellt eine Plattform bereit, auf der verschiedene Konfigurationen hybride Antriebssysteme unter realitätsnahen Bedingungen getestet werden können. Somit soll diese Arbeit einen Beitrag zur Validierung und Weiterentwicklung hybridelektrischer Antriebssysteme für die Luftfahrt leisten. Der genaue Wortlaut der Aufgabenstellung ist in Anhang 7.1 (Genaue Aufgabenstellung) zu finden.

1.3 Methodisches Vorgehen

Zu Beginn erfolgt die Auseinandersetzung mit der Funktionsweise von Brennstoffzellen und hybridelektrischen Antrieben, um ein solides Verständnis über die Prozesse und Bauweisen zu erhalten. Des weiteren erfolgt eine umfassende Literaturrecherche zu existierenden hybridelektrischen Antriebssystemen und vergleichbaren Teststänlden. Diese Recherche dient dazu, bestehende Lösungen zu analysieren, deren Anforderungen zu verstehen und mögliche Herangehensweisen abzuleiten. Zudem werden die geltenden Sicherheitsvorschriften und relevanten Standards für den Laborbetrieb analysiert.

Basierend auf der Konzeptphase werden die detaillierten Anforderungen an den Teststand definiert. Dazu gehören die Dimensionierung des Teststands, die Auswahl der geeigneten Komponenten für die Tragstruktur, sowie die Berücksichtigung von sicherheitsrelevanten Aspekten und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Daraufhin folgt die Funktionsanalyse, die alle nötigen Funktionen des Teststands betrachtet. Das Ergebnis der Anforderungs- und der Funktionsanalyse ist der morphologische Kasten, in dem Lösungen für die analysierten Anforderungen und Funktionen vorgestellt werden. Im nächsten Schritt wird ein Konzept erstellt, das die funktionalen Anforderungen und die technische Umsetzung detailliert beschreibt. Auch die Modularität und Flexibilität des Teststands wird dabei in Betracht gezogen, um unterschiedliche Systemkonfigurationen testen zu können.

Das nächste Kapitel umfasst die detaillierte Konstruktion des Teststands mithilfe von CAD-Software. Hierbei werden die geometrische Anordnung der Komponenten sowie mechanische, und elektrische Schnittstellen modelliert. Ziel ist es, einen skalierbaren und kosteneffizienten Aufbau zu realisieren, der den Anforderungen der hybriden Antriebstechnologie entspricht. Die CAD-Modelle dienen als Grundlage für die Fertigung und Montage des Teststands.

Im Rahmen der Kostenoptimierung wird eine detaillierte Kostenanalyse durchgeführt, um sicherzustellen, dass das vorgegebene Budget eingehalten wird. Dieser Schritt umfasst die Kostenaufstellung für Materialien, Komponenten und die Konstruktion des Teststands. Die Optimierung konzentriert sich darauf, kostengünstige Lösungen zu finden, ohne dabei die Leistungsfähigkeit oder Sicherheit des Teststands zu beeinträchtigen. Durch diesen methodischen Ansatz wird eine fundierte und praxisnahe Lösung entwickelt.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die für das Verständnis hybridelektrischer Antriebssysteme und deren Anwendung in der Luftfahrt erforderlich sind. Zunächst wird die Wasserstofftechnologie und ihre Rolle als Energieträger in der Luftfahrt untersucht. Anschließend erfolgt eine detaillierte Betrachtung des hybridelektrischen Antriebsstrangs, einschließlich dessen Aufbaus und Funktionsweise. Darüber hinaus wird auf die Unterschiede zwischen luft- und wassergekühlten Systemen sowie auf deren spezifische Vor- und Nachteile eingegangen. Abschließend wird eine Analyse vergleichbarer Teststände durchgeführt, um bestehende Lösungen zu bewerten und daraus Erkenntnisse für die Entwicklung des eigenen Teststands abzuleiten.

2.1 Wasserstofftechnologie in der Luftfahrt

Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Reduzierung von CO_2-Emissionen und zur Förderung des klimaneutralen Reisens dar [19, 22]. Es gibt viele Vorteile Wasserstoff als Energiequelle in der Luftfahrt zu verwenden, beispielsweise zeichnet sich Wasserstoff durch seine hohe Energiedichte pro Kilogramm und seine Emissionsfreiheit aus, da bei seiner Verbrennung oder bei der Umwandlung in einer Brennstoffzelle lediglich Wasser, ohne CO_2 entsteht. Wasserstoff hat eine dreimal höhere Energiedichte pro Masseneinheit als Kerosin und ist zudem auch leichter im Vergleich zu anderen Flugkraftstoffen [18].

Es gibt zwei Hauptansätze, Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt einzusetzen: die direkte Verbrennung in modifizierten Gasturbinen oder die Umwandlung in elektrische Energie durch Brennstoffzellen.

Bei der direkten Verbrennung wird Wasserstoff in modifizierten Gasturbinen verbrannt, ähnlich wie konventionelles Kerosin. Dies erfordert Anpassungen an den Triebwerken, um die Verbrennung von Wasserstoff zu ermöglichen. Während die direkte Verbrennung von Wasserstoff keine CO2-Emissionen verursacht, entstehen dennoch Stickoxide, die zur Luftverschmutzung beitragen. Zudem stellt die Speicherung und Bereitstellung von Wasserstoff, insbesondere in flüssiger oder hochkomprimierter Form, eine große technische Herausforderung dar.

Eine vielversprechendere Alternative ist die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen, um elektrische Energie zu erzeugen. Bei diesem Ansatz wird Wasserstoff in einer elektrochemischen Reaktion in einer Brennstoffzelle mit Sauerstoff aus der Luft kombiniert, um Strom zu erzeugen, der dann einen Elektromotor antreibt. Diese Methode hat den Vorteil, dass keine schädlichen Emissionen entstehen, da Wasser als einziges Nebenprodukt anfällt. Besonders die PEM-

Brennstoffzellen haben sich als effektiv und zuverlässig erwiesen und finden bereits in der Automobil- und Raumfahrtindustrie Anwendung [24].

Die Herausforderungen bei der Verwendung von Wasserstoff in der Luftfahrt betreffen vor allem die Speicherung und den Transport des Brennstoffs. Da Wasserstoff eine viermal geringere volumetrische Energiedichte als Kerosin aufweist, muss er entweder stark komprimiert oder verflüssigt werden, was wiederum spezielle Tanks und Systeme zur Aufrechterhaltung des Drucks oder der niedrigen Temperaturen von -253°C erfordert. Diese zusätzlichen Systeme erhöhen das Gewicht und die Komplexität des Flugzeugs, was insbesondere bei Ultraleichtflugzeugen, wie sie im Projekt BeHyPSy untersucht werden sollen, eine große Rolle spielt.

2.2 Hybridelektrischer Antrieb

In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Funktionsweise hybridelektrischer Antriebsstränge detailliert beschrieben. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den Hauptkomponenten wie der PEM-Brennstoffzelle und der zugehörigen Strom- und Steuerungselektronik. Zudem werden die verschiedenen Kühlstrategien betrachtet, sowie die Brennstoffversorgung und das Belüftungsmanagement erläutert.

2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Ein hybridelektrischer Antriebsstrang kombiniert verschiedene Energiequellen und vereint die Vorteile elektrischer und herkömmlicher Antriebssysteme. Der Aufbau eines solchen Antriebsstrangs umfasst mehrere zentrale Komponenten, die zusammenarbeiten, um eine hohe Effizienz, Flexibilität und geringere Emissionen zu erzielen [5]. Hauptkomponenten sind die Brennstoffzelle, die Batterie, die Leistungselektronik und der Elektromotor, die für die Bereitstellung der erforderlichen Leistung sorgen. In der Abbildung 2 ist die schematische Darstellung eines vollelektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzellen und Batterie nach dem Prinzip von Power-Split-Systemen zu sehen.

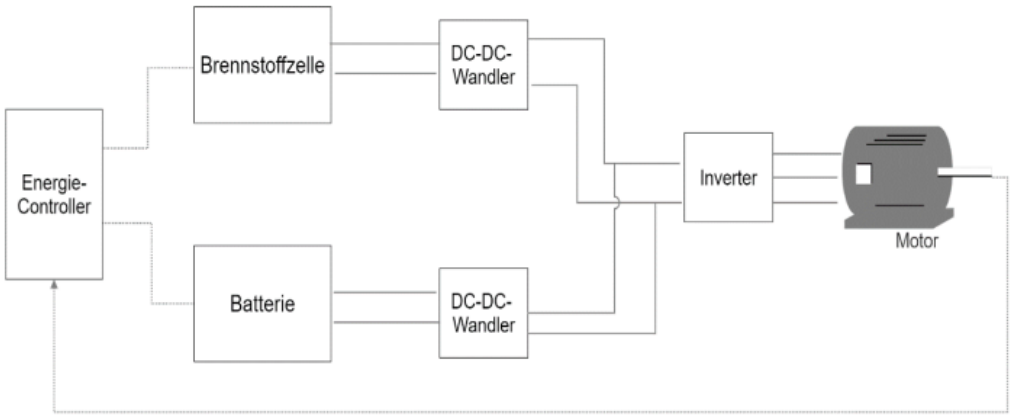


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines vollelektrischen Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle und Batterie [8]

Die Funktionsweise des hybriden Antriebsstrangs basiert auf einem Energiemanagementsystem, das die verschiedenen Komponenten optimal steuern soll. In Phasen niedriger Last, etwa im Leerlauf, kann der Antrieb rein durch die Brennstoffzelle erfolgen. Bei höherem Leistungsbedarf wird die Batterie zugeschaltet und unterstützt die Brennstoffzelle, um den Elektromotor mit ausreichender Leistung zu versorgen. Ein weiteres Merkmal der Funktionsweise ist die regenerative Energierückgewinnung, bei der überschüssige Energie, etwa bei bestimmten Flugphasen, die Batterie geladen wird. Diese Betriebsweise maximiert die Effizienz und sorgt dafür, dass Energieverluste im System minimiert werden.

2.2.2 PEM-Brennstoffzelle

Die PEM-Brennstoffzelle ist eine zentrale Komponente im hybridelektrischen Antriebsstrang. Sie wandelt chemische Energie, die aus Wasserstoff gewonnen wird, in elektrische Energie um und liefert diese direkt an den Elektromotor oder speist sie in die Batterie ein. PEM-Brennstoffzellen bieten eine hohe Effizienz und arbeiten je nach Brennstoffzelle bei relativ niedrigen Temperaturen [17].

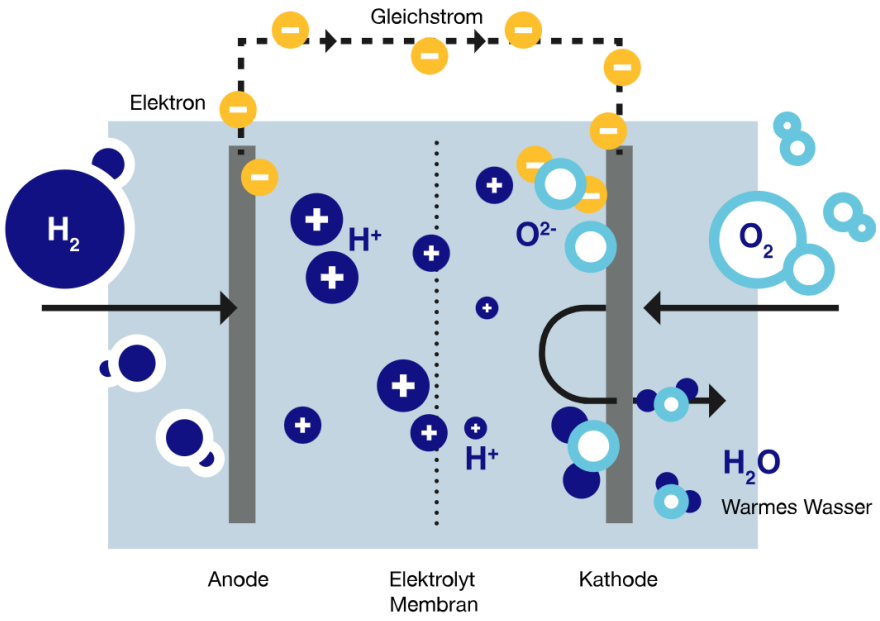


Abbildung 3: Funktion und Aufbau einer Brennstoffzelle [23]

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, besteht der Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle aus mehreren Teilen, darunter eine Anode, eine Kathode und eine Protonenaustauschmembran. Wasserstoff wird an der Anode in Protonen und Elektronen aufgespalten. Die Protonen passieren die Membran, während die Elektronen einen äußeren Stromkreis durchlaufen und dabei elektrische Energie erzeugen. An der Kathode reagieren die Protonen mit Sauerstoff aus der Luft zu Wasser, dem einzigen Abfallprodukt des Prozesses.

Ein großer Vorteil der PEM-Brennstoffzelle ist, dass sie im Vergleich zu herkömmlichen Energiequellen keine CO_2-Emissionen erzeugt. In Kombination mit Batterien oder anderen Energiespeichern kann die PEM-Brennstoffzelle als primäre Energiequelle in hybridelektrischen Antriebssträngen eingesetzt werden, um eine emissionsfreie und effiziente Energieversorgung zu gewährleisten [17].

2.2.3 Luft- und Wassergekühlte Systeme

In hybriden Antriebssystemen, die mit Brennstoffzellen arbeiten, spielt das Kühlmanagement eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit und Langlebigkeit des Systems. Es gibt zwei Hauptarten der Kühlung: luft- und wassergekühlte Systeme.

In luftgekühlten Brennstoffzellensystemen wird die erzeugte Wärme durch Luftströme abgeführt. Diese Art der Kühlung ist einfacher und weniger aufwendig in der Konstruktion, da keine komplexen Wasserkreisläufe erforderlich sind. Luftgekühlte Systeme sind zudem leichter und benötigen weniger Platz, was besonders in der Luftfahrt von Vorteil ist. Der Nachteil ist, dass die Kühlung weniger effizient ist, besonders bei hohen Leistungsanforderungen oder in Umgebungen mit

geringem Luftstrom, wie in großen Höhen. Um die Effizienz der Kühlung zu steigern, wird ein Luftkanal an den Lüfter der Brennstoffzelle angebracht, um eine laminare Strömung zu erzeugen. Eine laminare Strömung sorgt, im Gegensatz zu turbulenten Strömungen, sorgt für eine gleichmäßige und effiziente Wärmeabfuhr, da die Luft in parallelen Schichten entlang der Kühlrippen der Brennstoffzelle strömt [24]. Dies verbessert den Wärmetransport und verhindert Hotspots, die zu einer ungleichmäßigen Kühlung und potenzieller Überhitzung der Brennstoffzelle führen könnten.

Bei wassergekühlten Brennstoffzellensystemen wird die erzeugte Wärme durch einen geschlossenen Wasserkreislauf abtransportiert. Diese Art der Kühlung ist effizienter und eignet sich besonders für Anwendungen mit hohen Leistungsanforderungen, da Wasser eine höhere Wärmekapazität als Luft hat. Der Nachteil ist jedoch die zusätzliche Komplexität, da Pumpen, Wärmetauscher und Tanks für das Kühlwasser benötigt werden. Dies erhöht das Gewicht und den Platzbedarf, was in der Luftfahrt problematisch sein kann.

Die Entscheidung zwischen luft- und wassergekühlten Systemen hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Leistungsanforderungen, die Einsatzumgebung und die Platz- und Gewichtsrestriktionen des Flugzeugs. In Ultraleichtflugzeugen, wie sie im Projekt BeHyPSy verwendet werden soll, bietet sich die luftgekühlte Variante an, da sie einfacher und leichter ist, während wassergekühlte Systeme für leistungsstärkere Anwendungen in Betracht gezogen werden könnten. In dem Projekt BeHyPSy werden ausschließlich luftgekühlte Systeme erforscht.

2.2.4 Brennstoffversorgungssystem

Das Brennstoffversorgungssystem sorgt dafür, dass der benötigte Wasserstoff in ausreichender Menge und mit dem richtigen Druck zur Verfügung steht, um den Betrieb der Brennstoffzelle aufrechtzuerhalten. Die Hauptkomponenten eines Brennstoffversorgungssystems umfassen den Wasserstofftank, die Druckregler, Ventile und die Versorgungseinrichtungen, die den Wasserstoff in das System einspeisen [1].

Die Speicherung von Wasserstoff erfolgt in der Regel in gasförmiger oder flüssiger Form. Für den Einsatz in dem Teststand wird in der Regel gasförmiger Wasserstoff verwendet, da die Lagerung von flüssigem Wasserstoff aufgrund der niedrigen Temperaturen von -253°C sehr aufwendig ist. Wasserstofftanks, die für den Teststand verwendet werden, sind in der Lage, den Wasserstoff bei hohen Drücken (bis zu 200 bar) zu speichern.

Da Wasserstoff unter sehr hohem Druck gespeichert wird, muss das Brennstoffversorgungssystem über Druckregler verfügen, um den Druck vor der Einspeisung in die Brennstoffzelle auf ein sicheres und funktionsgerechtes Niveau zu reduzieren. Nachfolgende Feineinstellungen werden durch sekundäre Druckregler vorgenommen, um einen konstanten Druck an der Anode der Brennstoffzelle sicherzustellen.

Ventile spielen eine wichtige Rolle bei der Steuerung des Wasserstoffflusses. Sie regulieren nicht nur die Menge an Wasserstoff, die zur Brennstoffzelle fließt, sondern dienen auch der Sicherheit. Bei Fehlfunktionen oder in Notfällen können Sicherheitsventile sofort den Wasserstoffluss unterbrechen, um die Anlage zu schützen und Gefahren zu vermeiden. Sobald der Wasserstoff auf den gewünschten Druck reduziert wurde, wird er zur Anode der Brennstoffzelle geleitet, wo die elektrochemische Reaktion stattfindet. Die gleichmäßige und kontinuierliche Zuführung von Wasserstoff ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle. Eine Unterbrechung oder Schwankung im Wasserstoffluss könnte die Leistung des gesamten Antriebssystems beeinträchtigen oder zu Schäden an der Brennstoffzelle führen.

Das Brennstoffversorgungssystem muss auch die Möglichkeit bieten, die Zuführung des Wasserstoffs je nach Lastanforderung zu regulieren. Wenn die Brennstoffzelle mehr Energie benötigt, beispielsweise während des Steigflugs oder bei höheren Lasten, muss der Wasserstoffluss entsprechend erhöht werden. Bei geringeren Leistungsanforderungen kann der Wasserstoffluss reduziert werden, um den Kraftstoffverbrauch zu optimieren.

2.2.5 Stromversorgung und Energiespeicherung

Die Stromversorgung eines hybriden Luftfahrtantriebs umfasst verschiedene Komponenten, die elektrische Energie erzeugen, umwandeln und verteilen. Eine der primären Energiequellen ist die PEM-Brennstoffzelle, die durch die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie erzeugt. Diese Energie wird genutzt, um den Elektromotor anzutreiben und die Leistungsanforderungen des Systems zu decken [18].

Netzteile spielen dabei eine wichtige Rolle, da sie die Umwandlung von elektrischer Energie ermöglichen und eine konstante Stromversorgung sicherstellen. Diese Netzteile müssen auf die Anforderungen des Antriebsstrangs abgestimmt sein und dafür sorgen, dass elektrische Energie mit der erforderlichen Spannung und Frequenz zur Verfügung steht. Zudem unterstützen sie die Stromversorgung von Nebenaggregaten und der Steuerungselektronik, um die Funktionstüchtigkeit des gesamten Systems zu gewährleisten.

Die Verteilung und Steuerung des Stromflusses erfolgt durch die Leistungselektronik. Diese steuert auch die Energieflüsse zwischen Brennstoffzelle, Batterie und Motor. Sie sorgt für eine dynamische Anpassung an unterschiedliche Betriebszustände wie Start, Steigflug und Landung, bei denen der Energiebedarf variiert.

Neben der direkten Stromerzeugung durch die Brennstoffzelle ist die Energiespeicherung durch Batterien ein weiterer wesentlicher Bestandteil des hybriden Antriebsstrangs. Batterien fungieren als Puffer, die Energie speichern und bei Bedarf schnell abrufen können. Dies ist wichtig, um plötzliche Leistungsspitzen auszugleichen, die bei Startvorgängen oder schnellen Lastwechseln

auftreten. Die Kombination von Brennstoffzellen und Batterien ermöglicht eine flexible und stabile Energieversorgung, da die Batterie die Lastanforderungen übernimmt, wenn die Brennstoffzelle eine Zeitverzögerung in der Leistungsanpassung aufweist. Batterien sind auch für die Überbrückung von Phasen geeignet, in denen die Brennstoffzelle eine geringere Leistung liefert, z. B. beim Umschalten der Betriebsmodi. Moderne Energiespeichertechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien bieten eine hohe Energiedichte und eine schnelle Lade- und Entladefähigkeit, was sie besonders effizient für den Einsatz in der Luftfahrt macht.

Die Wahl der Batterien und deren Kapazität hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter das Gewicht, die Energiedichte und die benötigte Leistung. Ein gut dimensionierter Batteriespeicher trägt zur Gesamtleistung des Systems bei und verbessert dessen Redundanz und Zuverlässigkeit.

2.2.6 Steuer- und Leistungselektronik

Die Steuer- und Leistungselektronik übernimmt die wesentliche Aufgabe, den Energiefluss zwischen den verschiedenen Systemteilen wie Brennstoffzelle, Batterie und Elektromotor zu regeln und zu optimieren. Durch die präzise Steuerung des Energieflusses sorgt sie dafür, dass der Antriebsstrang je nach Leistungsanforderung und Betriebsmodus flexibel auf unterschiedliche Bedingungen reagieren kann. Diese Elektronik gewährleistet somit nicht nur die Funktionalität des Gesamtsystems, sondern ist auch für dessen Effizienz und Langlebigkeit zuständig.

Der DC/DC-Wandler passt die Spannungen im System an und sorgt dafür, dass die Batterie und die Brennstoffzelle auf die jeweils benötigten Spannungsniveaus eingestellt werden.

Die Steuerungselektronik überwacht und regelt die Zusammenarbeit der verschiedenen Energiequellen und passt die Energieabgabe je nach Betriebsmodus an. Beispielsweise sorgt sie dafür, dass in Phasen mit hohem Leistungsbedarf, die Batterie zusätzlich zur Brennstoffzelle aktiviert wird, um die benötigte Leistung bereitzustellen. Bei Modis wie dem Leerlauf, kann die Steuerungselektronik den Elektromotor hingegen ausschließlich über die Brennstoffzelle betreiben. Neben der Energieflusssteuerung übernimmt die Steuer- und Leistungselektronik auch wichtige Sicherheitsfunktionen. Sie überwacht kontinuierlich sicherheitskritische Parameter wie Spannung, Strom und Temperatur und kann das System bei einer Abweichung automatisch abschalten oder in einen sicheren Zustand versetzen. Dadurch schützt sie die Komponenten vor Überlastung und sorgt für eine stabile und sichere Systemleistung.

2.2.7 Gas- und Wasserentsorgungssystem

Im Betrieb der Brennstoffzelle wird Wasserstoff an der Anode zugeführt und mit Sauerstoff an der Kathode zu Wasser reagiert, wobei elektrische Energie freigesetzt wird. Das entstehende Wasser wird kontinuierlich über die Lüfter abgeleitet, um eine Anhäufung von Feuchtigkeit zu verhindern, die die Funktionsweise der Brennstoffzelle beeinträchtigen könnte. Eine kontrollierte Wasserabfuhr ist zudem notwendig, um die Leistungskontinuität sicherzustellen, da überschüssige Feuchtigkeit die Sauerstoffzufuhr blockieren und somit die Reaktion an der Kathode verlangsamen könnte.

Das Wasserentsorgungssystem übernimmt bei Hochleistungsbrennstoffzellen diese Aufgabe, indem es das Wasser über spezifische Abläufe und Ventile ableitet. Dieses System ist so konstruiert, dass es die Feuchtigkeit aus dem Brennstoffzellenmodul entfernt und in einem Sammelbehälter oder über eine Abflussleitung nach außen abführt. Hierbei wird sichergestellt, dass kein Wasser zurück in die Zelle fließt. Das Belüftungssystem sorgt im Falle einer Leckage dafür, dass die Konzentration des Wasserstoffs nicht das vorgesehene Maximum überschreitet und es nicht zu gefährlichen Situationen kommen kann. Bei der PEM-Brennstoffzelle wie sie bei BeHyPSy verwendet wird, kann auf ein Wasserentsorgungssystem verzichtet werden, da die wenigen Mengen an Wasser über die Lüftung in die Laborumgebung abgegeben werden.

Bei der Brennstoffzellenreaktion wird ein Teil des eingespeisten Wasserstoffs nicht vollständig umgewandelt und verbleibt als überschüssiges Gas. Um eine Ansammlung des Gases durch den Überschuss verhindern, leitet das Belüftungssystem überschüssigen Wasserstoff sicher ab. Dafür sind Abluftanlagen notwendig, die eine kontrollierte Ableitung des Wasserstoffs ermöglichen. Hierbei ist besonders auf Dichtheit und die Vermeidung von Leckagen zu achten, da Wasserstoffmoleküle aufgrund ihrer geringen Größe leicht durch viele Materialien diffundieren können.

2.2.8 Elektrischer Motor und Last

Der elektrische Motor ist das Element, das elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt und so den Antrieb des Systems ermöglicht. Im Kontext eines hybridelektrischen Antriebs sind spezifische Anforderungen an den Motor zu stellen, um die Leistungsziele zu erreichen. Dazu zählen ein hoher Wirkungsgrad, eine schnelle Reaktionszeit auf Lastwechsel und eine stabile Leistung über den gesamten Betriebsbereich hinweg. Diese Anforderungen sind besonders in der Luftfahrt wichtig, wo das Gewicht und die Effizienz des Motors direkt die Reichweite und Leistungsfähigkeit des Flugzeugs beeinflussen. Ein leistungsstarker Motor muss nicht nur die Fähigkeit besitzen, ein hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen zu liefern, sondern auch bei hohen Drehzahlen stabil zu arbeiten, um die Anforderungen in verschiedenen Flugphasen zu erfüllen.

Die Bremse dient der Simulation mechanischer Lasten, um den elektrischen Motor auf seine Leistungsfähigkeit und Stabilität unter realen Belastungen zu prüfen. In einem hybriden Antriebsstrang ermöglicht die Bremse die Nachbildung der Belastung, die der Motor in einem realen Flugzeug erfahren würde. Mechanische oder elektrische Bremsen können verwendet werden, um gezielt Widerstand zu erzeugen und das Verhalten des Motors zu untersuchen, wenn er gegen eine simulierte Last arbeitet. Eine geregelte Bremse kann Lastveränderungen simulieren oder auch überschüssige Energie aufnehmen. Die dadurch erzeugte mechanische Belastung erzeugt auch Wärme, wodurch die thermische Stabilität des Motors und die Wirksamkeit des Kühlmanagements analysiert werden können. Die Bremse ermöglicht nicht nur die Simulation von Leistungsanforderungen, sondern auch die Beurteilung des Temperaturverhaltens des Antriebs.

Die elektronische Last stellt eine variable, präzise steuerbare elektrische Belastung dar, die speziell für die flexible Simulation von Lastprofilen im Teststand verwendet wird. Im Unterschied zur mechanischen Bremse ermöglicht die elektronische Last eine detaillierte Steuerung von Strom- und Spannungswerten, um spezifische Szenarien zu simulieren, die im Flugzeug auftreten könnten. Durch diese Komponente kann die Leistungsaufnahme des Motors unter verschiedenen elektrischen Lastbedingungen getestet werden, wodurch sich eine Analyse der Energieeffizienz und des Verhaltens des gesamten Antriebssystems ergibt. Die elektronische Last ist so konzipiert, dass sie nahtlos mit der Leistungselektronik des Teststands interagiert. Dies ermöglicht es, verschiedene Betriebszustände wie Vollbelastung, Teillastbetrieb oder kurzzeitige Lastspitzen zu simulieren, ohne dass physische Anpassungen am System notwendig sind. Die elektronische Last kann außerdem zur Überprüfung der Batterie- und Brennstoffzellenleistung verwendet werden, indem sie variable Belastungen erzeugt, die den Lade- und Entladezyklus dieser Energiespeicher simulieren. Dadurch trägt sie zur Bewertung des gesamten Energiemanagementsystems bei.

2.3 Analyse Vergleichbarer Modelle

Im Folgenden werden verschiedene Teststände vorgestellt, die für die Entwicklung hybrider oder wasserstoffbasierter Antriebstechnologien in der Luftfahrt entwickelt wurden. Die Analyse dieser bestehenden Projekte dient dazu, wertvolle Anforderungen und Designansätze für den eigenen Teststand abzuleiten und weiter zu entwickeln.

Ein sinnvoller Vergleich unterschiedlicher Teststände kann anhand spezifischer technischer und funktionaler Kriterien erfolgen:

1. Skalierung und Modularität: Die Anpassungsfähigkeit der Teststände an verschiedene Leistungs- und Skalierungsbedarfe spielt eine zentrale Rolle.

2. Kühlkonzepte (luft- oder wassergekühlt): Abhängig vom Einsatzbereich und den spezifischen Anforderungen der Brennstoffzelle kommen unterschiedliche Kühlkonzepte zum Einsatz.
3. Antriebs- und Regelkonzept: Für den Teststand muss eine geeignete Regelung der Brennstoffzelle, des Elektromotors und der Pufferbatterie gewährleistet werden.
4. Kosten- und Ressourcenanforderungen: Die Kosten der Teststandkonstruktion sind ebenfalls ein zentraler Aspekt. Jedoch wird der finanzielle Aspekt selten von Unternehmen bekannt gegeben. Aus diesem Grund wird dieses Kriterium weniger berücksichtigt

DLR BALIS-Projekt

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt im Rahmen des BALIS-Projekts einen Teststand für wasserstoffbetriebene PEM-Brennstoffzellensysteme [7]. Dieser Teststand ist für Multi-Megawatt-Brennstoffzellen ausgelegt. Er simuliert reale Flugbedingungen und erlaubt die Prüfung und Optimierung der Brennstoffzellenarchitektur unter verschiedenen Lastprofilen. Dieser Teststand zeigt auf, wie sich skalierbare und leistungsstarke Brennstoffzellen für große, emissionsfreie Flugzeuge in der Praxis validieren lassen. Die BALIS-Testumgebung ermöglicht es, die Hauptkomponenten eines Antriebsstrangs, der auf Brennstoffzellen oder Batterien basiert, unter realitätsnahen Bedingungen zu testen und ihre Wirkung auf das gesamte Antriebssystem zu analysieren. Durch diese Erprobung können Entwicklungsprozesse beschleunigt und die Marktreife brennstoffzellen- oder batteriebasierter Luftfahrtsysteme schneller erreicht werden. Die Abbildung 4 zeigt das Schema der Testumgebung.

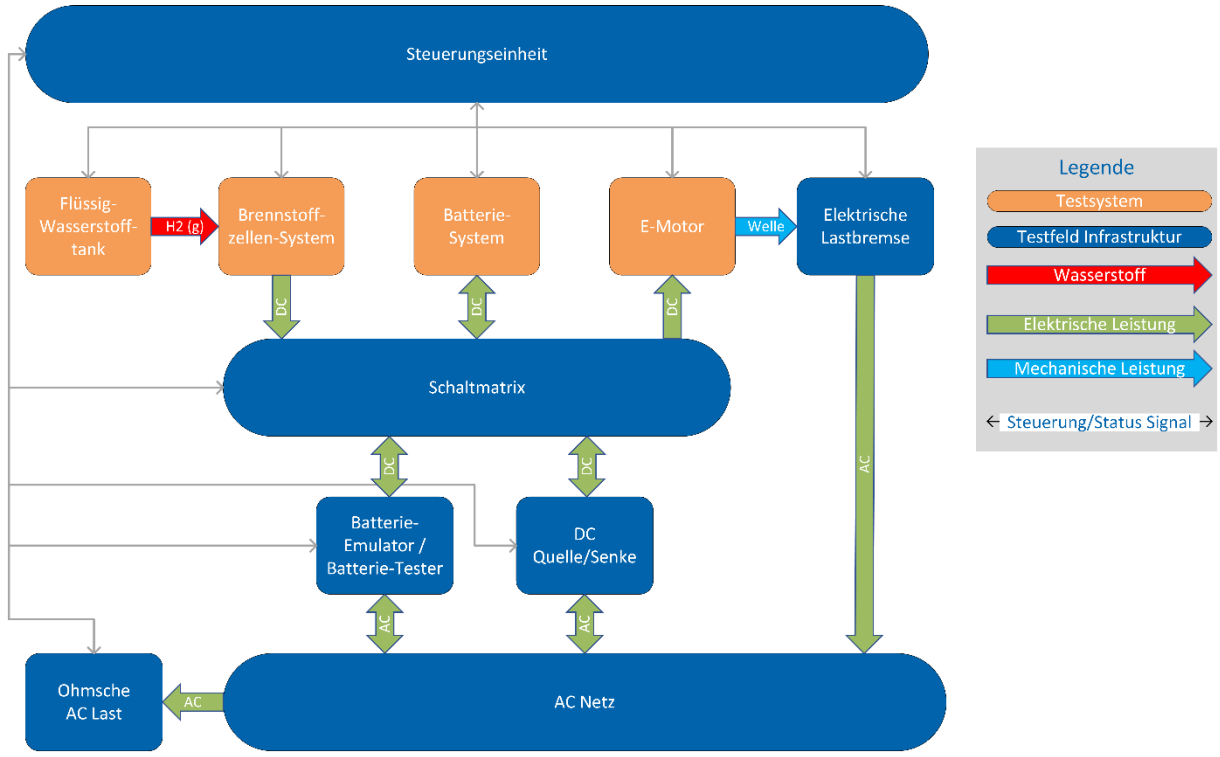


Abbildung 4: Schema des BALIS-Teststands [7]

Airbus E-Aircraft System House und ZeroE Fuell Cell

Airbus hat in dem E-Aircraft System House in Ottobrunn eine Testumgebung für hybride und elektrische Luftfahrtantriebe aufgebaut [2]. Die Teststände dort wurden speziell entwickelt, um Elektromotoren und Brennstoffzellen in realitätsnahen Umgebungen zu testen. Dies ermöglicht Airbus, die Systemintegration und die Leistungsfähigkeit hybrider Antriebslösungen zu bewerten. Ein besonderer Fokus liegt auf der Sicherstellung der Lufttüchtigkeit und der Energieeffizienz der Komponenten.

Im Rahmen seiner ZeroE-Initiative hat Airbus eine wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenantriebseinheit vorgestellt, die so genannte ZeroE-Fuel-Cell-Engine [3]. Diese Antriebseinheit basiert auf dem Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen, die elektrische Energie erzeugen, um die Propeller eines Flugzeugs anzutreiben. Airbus hat Testumgebungen entwickelt, um die Funktionsweise und Effizienz dieses Antriebskonzepts zu untersuchen. Der Teststand ermöglicht eine realitätsnahe Simulation des Betriebs und eine Bewertung der Leistungsparameter, einschließlich der Energieeffizienz und der Kompatibilität mit anderen Komponenten des Antriebssystems. Mit dieser Technologie strebt Airbus an, die Umstellung auf nachhaltige Luftfahrtlösungen zu beschleunigen und die emissionsfreie Nutzung von Wasserstoff als primäre Energiequelle zu etablieren. In Abbildung 5 ist der Aufbau der ZeroE-Fuel-Cell-Engine zu sehen.

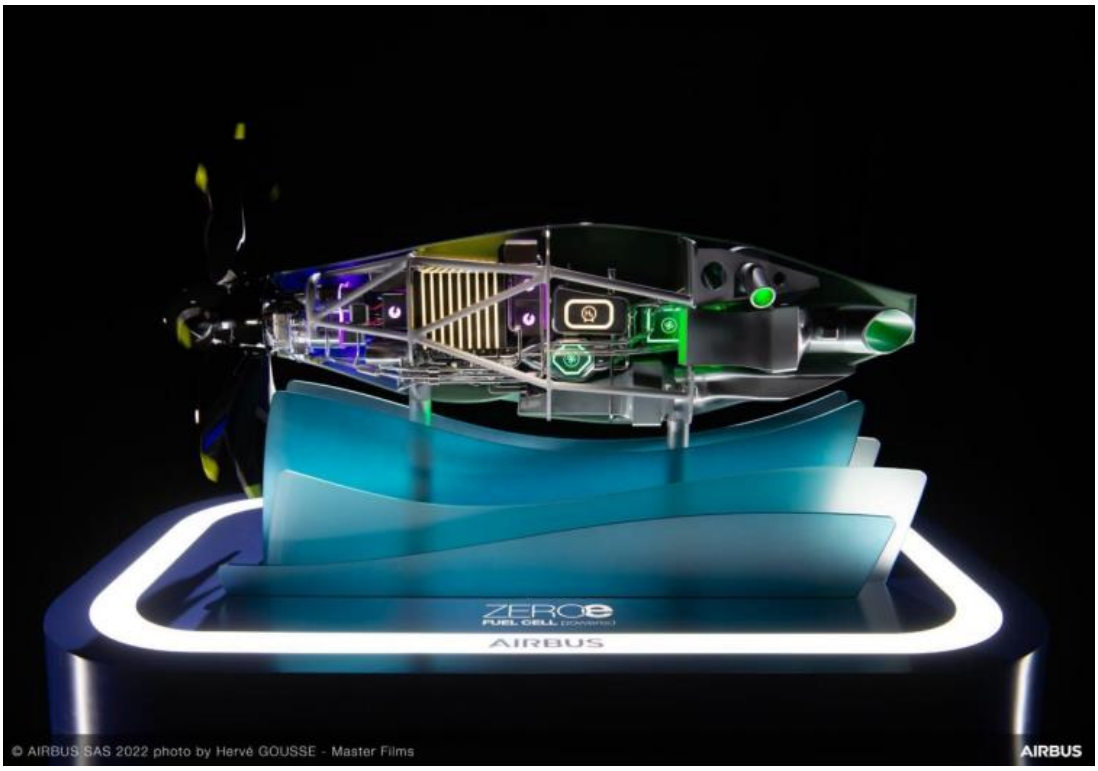


Abbildung 5: ZeroE Fuel-Cell-Engine Aufbau [3]

ZeroAvia und PowerCell - ZA600

ZeroAvia hat mit dem Partner PowerCell, das Projekt „Superstack ZA600“ entwickelt [25]. Eine fortschrittliche Wasserstoff-Brennstoffzellenarchitektur, die eine leistungsfähige und skalierbare Lösung für die Luftfahrt bietet. Der ZA600 kombiniert mehrere Brennstoffzellen in einer integrierten Einheit, um die Energieanforderungen größerer Flugzeuge zu erfüllen. Das System ist aufgeteilt in 4 Bereiche: Das Wasserstoffmanagement, die Energiegewinnung, Energieverteilung und den elektrischen Antrieb. Es sollen damit die Turboprops von Flugzeugen von 9 und bis zu 19 Sitzen angetrieben werden. Angestrebt wird eine Distanz von 300 NM plus Reserven. Die zugehörigen Teststände sind darauf ausgelegt, die Brennstoffzellenmodule unter verschiedenen Last- und Betriebsbedingungen zu prüfen und deren Effizienz und Ausfallsicherheit zu bewerten. Dieser Ansatz unterstützt eine schnellere Entwicklung und Optimierung von wasserstoffbasierten Antrieben für die Luftfahrt und trägt dazu bei, die Leistungsfähigkeit dieser Systeme für den praktischen Einsatz zu validieren.

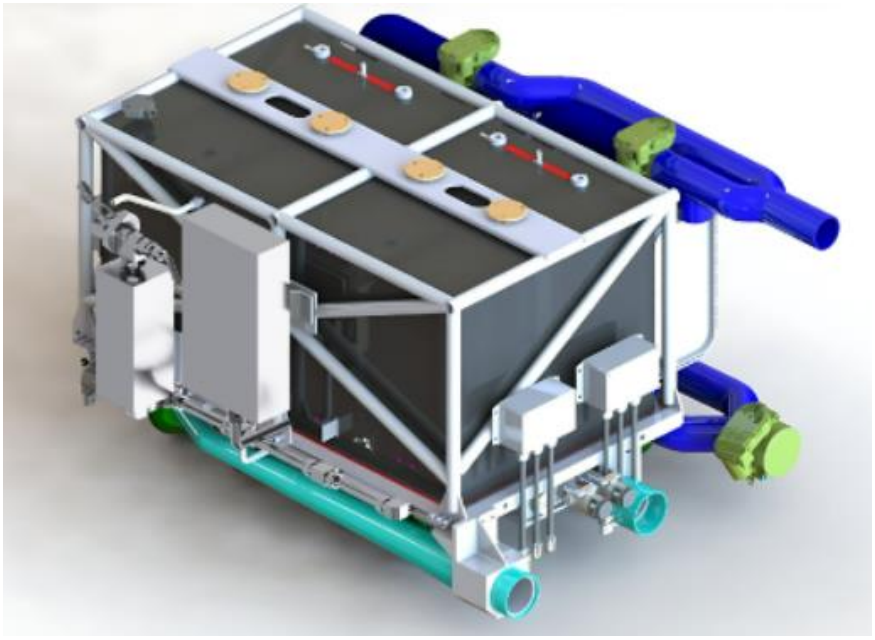


Abbildung 6: Superstack [25]

EBZ-Dresden

EBZ-Dresden (Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft Brennstoffzelle mbH Dresden) bietet spezialisierte Teststände für Brennstoffzellen, die nach individuellen Wünschen aufgebaut und angepasst werden können [9]. Diese Teststände sind modular und flexibel, wodurch sie für verschiedene Arten von Brennstoffzellen, wie PEM- und SOFC-Zellen, geeignet sind. Die Teststände können für unterschiedliche Testszenarien konfiguriert werden und bieten Lösungen für Einzelzellen, Stapel, Stapelmodule und vollständige Brennstoffzellensysteme. Die Systeme ermöglichen eine präzise Steuerung und Überwachung zentraler Betriebsparameter wie Temperatur, Druck, Gasfluss und Feuchtigkeit, um eine genaue Analyse des Verhaltens und der Leistung der Brennstoffzellen unter verschiedenen Bedingungen ermöglicht. Die Teststände sind mit verschiedenen optionalen Funktionen ausgestattet, wie zum Beispiel der Gasaufbereitung, Entschwefelung, Reformierung von Kraftstoffen (Dampfreformierung, autotherme Reformierung), Abgas- und Abwärmenutzung durch Wärmetauscher sowie eine Vielzahl von Luft- und Gasbefeuchtungseinheiten. Die Teststände sind mit einem sechsstufigen Sicherheitsmanagementsystem ausgestattet, das Schutz für das Personal und die Hardware bieten soll. Dazu gehören unter anderem Notabschaltstufen für kritische Situationen, die Steuerung gefährlicher Gasemissionen und die ständige Überwachung der Betriebsparameter. Das System beinhaltet eine Sicherheits-PLC gemäß EN 954-1, Kategorie 2, und bietet eine klare Struktur mit verschiedenen Sicherheitsstufen – von normalen Alarmen bis hin zu automatischen Notabschaltungen. Die Teststände werden auch mit einer anhebbaren Haube angeboten, wie man auf dem Abbildung 7 sehen kann.

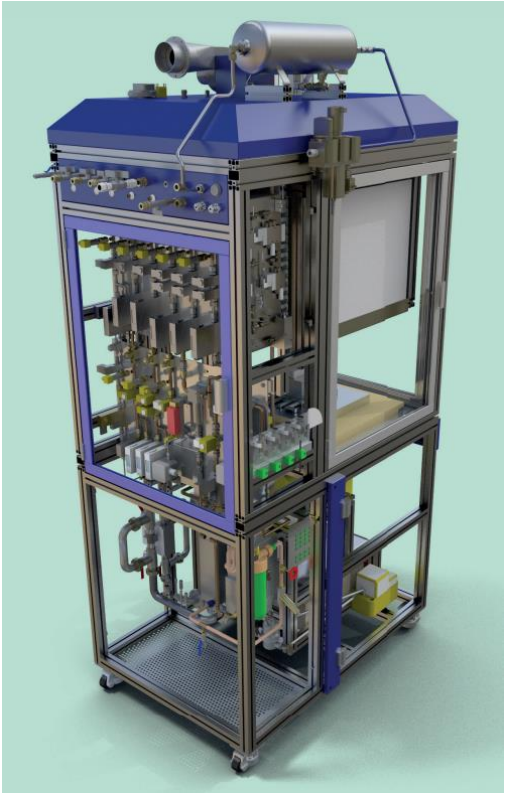


Abbildung 7: Teststand mit anhebbarer Haube der EBZ.Dresden [9]

2.3.1 Erkenntnisse aus der Analyse vergleichbarer Teststände

Die Analyse vergleichbarer Teststände liefert wertvolle Erkenntnisse, die für die Entwicklung des skalierten Teststandes im Projekt BeHyPSy herangezogen werden können.

Ein zentraler Aspekt ist die Modularität und Skalierbarkeit der Teststände. Projekte wie BALIS oder das der EBZ-Dresden zeigen, dass modulare Systeme eine flexible Anpassung an verschiedene Leistungsanforderungen ermöglichen. Diese Eigenschaft ist entscheidend, um den Teststand für zukünftige Forschungsvorhaben anzupassen, wie den parallelen Betrieb mehrerer Brennstoffzellen.

Darüber hinaus zeigt die Analyse, dass eine präzise Steuerung und Überwachung der Betriebsparameter essenziell sind. Dies umfasst die Integration fortschrittlicher Sensorik zur Echtzeitüberwachung von Temperatur, Druck und Gasflüssen. Besonders ist bei den Projekten die Nutzung automatisierter Sicherheitssysteme, wie redundante Notausschalter und Leckagedetektoren, um die Betriebssicherheit unter allen Umständen zu gewährleisten.

Ein weiterer bedeutender Aspekt ist die Integration der Datenanalyse in den Testbetrieb. Projekte wie das ZeroE Fuel-Cell-Engine-Konzept von Airbus verdeutlichen die Notwendigkeit des Datenmanagements zur Verknüpfung von numerischen Simulationen und experimentellen Ergebnissen.

Abschließend zeigen die untersuchten Teststände, dass wirtschaftliche Überlegungen eine zentrale Rolle spielen. Effiziente Ressourcennutzung durch modulare Bauweise, standardisierte Komponenten und kostensparende Designs wie leichte Profiltechniken können die Umsetzung im vorgegebenen Budgetrahmen gewährleisten.

3 Konzeptioneller Entwurf des Teststandes

Nach der Analyse der theoretischen Grundlagen und der Ermittlung der Anforderungen folgt der nächste Schritt in der Entwicklung des Teststands. In diesem Kapitel wird der Entwurfsprozess des Teststands detailliert beschrieben. Der Fokus liegt auf der Umsetzung der zuvor definierten Anforderungen, die eine modulare und flexible Struktur ermöglichen, um verschiedene Testbedingungen zu simulieren.

Zu Beginn wird eine detaillierte Anforderungsanalyse durchgeführt, die als Basis für die Entwicklung der Funktionsanalyse dient. Darauf aufbauend werden anhand des morphologischen Kastens verschiedene Konzepte entwickelt. Die Auswahl der Komponenten sowie Sicherheitsaspekte werden aufgeführt, da diese für die Dimensionierung und Anforderungen nötig sind. Das Kapitel schließt mit der Bewertung und Auswahl des optimalen Konzepts, das den funktionalen, sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Anforderungen entspricht.

3.1 Detaillierte Anforderungsanalyse

Für die Entwicklung und Konstruktion eines Teststands für hybridelektrische Luftfahrtantriebe wird eine detaillierte Anforderungsanalyse erstellt. Diese Analyse bildet die Grundlage für die nachfolgende Konzeption und gewährleistet, dass alle relevanten Aspekte, von der Funktionalität bis zur Sicherheit, berücksichtigt werden. Der Teststand muss nicht nur die technischen Spezifikationen und betrieblichen Anforderungen erfüllen, sondern auch wirtschaftliche und sicherheitsrelevante Faktoren berücksichtigen. Im Folgenden werden die Anforderungen an den Teststand detailliert beschrieben und in verschiedenen Kategorien ausgearbeitet. Alle Anforderungen sind nochmal in Tabellenform im Anhang 7.2 (Anforderungsanalyse des Teststands) zu finden.

Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen an den Teststand beziehen sich auf die Leistung, die Flexibilität sowie die Qualität der Tests, die mit dem Teststand durchgeführt werden können. Wie dem Punkt 1.1 der Anforderungsanalyse zu entnehmen ist, ist ein zentrales Element der Anforderungen die Fähigkeit des Teststands, eine maximale Leistung von bis zu 3,6 kW bereitzustellen. Die Leistung muss stabil und ohne signifikante Schwankungen bereitgestellt werden, um aussagekräftige Testergebnisse zu gewährleisten. Dafür muss der Teststand nach Anforderung 1.9 mit Komponenten ausgestattet sein, die an solche Lasten angepasst sind.

Nach der Anforderung 1.2 und 1.3, ist ein wesentlicher Bestandteil des Projektes BeHyPSy und des Teststands, die Fähigkeit zur Validierung numerischer Modelle. Das bedeutet, dass der Teststand so ausgelegt sein muss, dass er theoretische Modelle und Simulationen durch reale Tests

überprüfen kann. Dies erfordert eine gute Abstimmung der einzelnen Komponenten, um sicherzustellen, dass die Bedingungen der Simulationen im realen Betrieb reproduziert werden können. Darüber hinaus muss der Teststand modular aufgebaut sein. Diese Anforderung gewährleistet die Flexibilität des Teststands und ermöglicht zukünftige Anpassungen und Erweiterungen mit geringerem Aufwand. Ein modularer Aufbau stellt sicher, dass Komponenten leicht ausgetauscht und auf unterschiedliche Testbedingungen abgestimmt werden können. Dies reduziert den Aufwand bei der Wartung und Instandhaltung und sorgt dafür, dass der Teststand für eine Vielzahl von Testszenarien geeignet ist. Des Weiteren wird in dieser Arbeit nur eine Brennstoffzelle vorgesehen. In zukünftigen Tests sollen bis zu 6 Brennstoffzelle parallel angeordnet werden können. Diese Modularität und Flexibilität muss der Teststand erfüllen.

Ein weiterer funktionaler Aspekt ist das Energiemanagement des Teststands, wie man der Anforderung 1.4 entnehmen kann. Es ist notwendig, dass der Teststand verschiedene Energiequellen wie Brennstoffzellen, Batterien und Netzteile effizient integrieren und verwalten kann. Das Energiemanagementsystem muss in der Lage sein, die Energieflüsse zwischen diesen Quellen zu steuern und eine reibungslose Verteilung der Energie zu gewährleisten. Eine besondere Herausforderung besteht darin, Lade- und Entladeszenarien der Batterie und der Brennstoffzelle simulieren zu können (Anforderung 1.5). Diese Simulationen analysieren das Verhalten des Antriebsstrangs unter wechselnden Lastbedingungen und können so die Effizienz des Gesamtsystems optimieren.

Für die optimale Funktionsweise der Brennstoffzellen und anderer Komponenten ist ein effizientes Kühlungs- und Wärmemanagement essenziell (Anforderung 1.6). Der Teststand muss über ein integriertes Kühlsystem verfügen, das die entstehende Wärme zuverlässig abführt und die Betriebstemperaturen der einzelnen Komponenten stabil hält. Hierbei ist besonders die Kühlung der Brennstoffzelle wichtig, da Überhitzungen zu Leistungseinbußen und einer Verkürzung der Lebensdauer führen können. Neben dem allgemeinen Wärmemanagement muss der Teststand spezifische Kühlkanäle für die Brennstoffzelle besitzen, wie in Anforderung 1.7 zu sehen, um eine gezielte Belüftung zu gewährleisten [24]. Diese Kanäle sollten so konstruiert sein, dass die Kühlung die Brennstoffzelle gleichmäßig erreicht und Hotspots vermieden werden und eine laminare Strömung erreicht werden kann.

Der Teststand muss laut Anforderung 1.8 in der Lage sein, dynamische Lastszenarien zu simulieren. Dazu kann beispielsweise die Nachbildung unterschiedlicher Flugphasen wie Taxi, Start und Reiseflug gehören. Diese Lastszenarien sind notwendig, um die Leistung des Antriebsstrangs in verschiedenen Betriebszuständen zu testen und sicherzustellen, dass das System unter allen Bedingungen stabil und zuverlässig arbeitet. Das Regelungssystem muss die verschiedenen Betriebszustände flexibel anpassen können und in der Lage sein, schnelle Lastwechsel zu bewältigen, ohne die Stabilität des Systems zu beeinträchtigen.

Die Auswahl der verbauten Komponenten muss sicherstellen, dass alle spezifischen Anforderungen des Teststands erfüllt werden (Anforderung 1.9). Jede Komponente, von der Brennstoffzelle bis hin zur Steuer- und Leistungselektronik, muss so ausgewählt werden, dass sie den funktionalen und sicherheitstechnischen Anforderungen des Systems gerecht wird. Das bedeutet, dass alle Komponenten leistungsfähig und zuverlässig sein müssen. Zudem sollten sie eine Kompatibilität mit der Systemarchitektur des Teststands gewährleisten und für die Integration in das modulare Design geeignet sein.

Für die Messung und Überwachung der Betriebsparameter ist ein Mess- und Auswertungssystem erforderlich (Anforderung 1.10). Der Teststand muss in der Lage sein, elektrische Parameter wie Spannung, Stromstärke und Leistung sowie thermische Daten wie die Temperatur von Brennstoffzellen und Batterien in Echtzeit zu erfassen. Eine effiziente Datenverwaltung ist ebenfalls notwendig (Anforderung 1.17), um die gesammelten Informationen zu speichern und später für die Analyse bereitzustellen. Ein gut konzipiertes Datenmanagementsystem ermöglicht die Versionierung der Testergebnisse, sodass Änderungen in den Testabläufen und deren Auswirkungen nachvollzogen werden können.

Ein weiterer funktionaler Aspekt ist die Mobilität und Zugänglichkeit des Teststands, wie den Anforderungen 1.11 und 1.12 zu entnehmen ist. Im Forschungsumfeld ist es oft notwendig, den Teststand an verschiedene Orte zu transportieren oder neu zu positionieren. Daher sollte der Teststand so konstruiert sein, dass er transportierbar ist. Die Zugänglichkeit der einzelnen Komponenten spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Alle wichtigen Bauteile sollten leicht erreichbar sein, um Wartungsarbeiten, Reparaturen oder den Austausch von Komponenten ohne großen Aufwand durchführen zu können.

Wie in der Anforderung 1.13 zu sehen ist, soll der Teststand in die bestehende Systemarchitektur integriert werden, wozu auch der Einsatz des System Composer und der Requirements Toolbox gehört. Diese Anforderung stellt sicher, dass alle Design-, Test- und Betriebsdaten systematisch erfasst und verwaltet werden können. Ein leicht zugängliches und gut organisiertes Kabelmanagement ist wichtig für den reibungslosen Betrieb des Teststands, daher muss der Teststand dies auf gewährleisten (Anforderung 1.14). Dies umfasst die geordnete Verlegung und sichere Befestigung aller Strom- und Datenkabel, um Unordnung zu vermeiden und die Wartung zu erleichtern.

Die Konstruktion des Teststands muss so ausgelegt sein, dass sie mechanischen Belastungen standhält und alle Bauteile sicher und stabil befestigt sind (Anforderung 1.5). Besonders bei dynamischen Tests mit hohen Belastungen ist es wichtig, dass sich keine Teile lockern und die Struktur jederzeit standfest bleibt. Der Teststand muss einfach zu montieren sein (Anforderung 1.16), wobei die Konstruktionszeichnungen klar und verständlich sein sollen. Dies erleichtert nicht nur den Erstaufbau, sondern auch spätere Anpassungen und Erweiterungen.

Geometrische Anforderungen

Der Teststand muss so konstruiert sein, dass er die festgelegten maximalen Abmessungen von 3000 mm x 1020 mm x 2100 mm nicht überschreitet (Anforderung 2.1). Diese Maßvorgaben werden durch die geometrischen Einschränkungen des Labors vorgegeben und stellen sicher, dass der Teststand in das Labor passt und in den vorgesehenen Arbeitsbereich integriert werden kann.

Sicherheitsanforderungen

Ein sehr wichtiger Bestandteil der Anforderungsanalyse ist die Sicherheit des Teststands. Der Teststand muss über nötigen Sicherheitsmaßnahmen verfügen, da der Umgang mit Wasserstoff lebensgefährlich werden kann. Der Teststand muss über Systeme verfügen, die eine kontinuierliche Überwachung des Wasserstoffdrucks, der Temperatur und möglicher Leckagen gewährleisten (Anforderung 3.1). Diese Überwachung ist notwendig, um sicherzustellen, dass der Betrieb des Teststands unter sicheren Bedingungen erfolgt und potenzielle Gefahren frühzeitig erkannt werden.

Nach Anforderung 3.2 muss der Teststand mit einem Notabschaltungssystem ausgestattet sein, um im Falle eines Problems alle relevanten Systeme sofort stillzulegen und so die Sicherheit der Mitarbeiter und der Umgebung zu gewährleisten. Darüber hinaus sind Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen erforderlich (Anforderung 3.3). Dazu gehören geeignete Entlüftungssysteme, die eine sichere Abführung von Wasserstoff gewährleisten und das Risiko einer Ansammlung explosiver Gase minimieren. Sensoren zur Erkennung der Wasserstoffkonzentration und zur Temperaturüberwachung sind essenziell und den Anforderungen 3.4 zu entnehmen, um potenzielle Gefahren zu identifizieren und rechtzeitig Maßnahmen ergreifen zu können.

Die Mitarbeiter müssen vor mechanischen und elektrischen Gefahren geschützt werden (Anforderungen 3.5 und 3.6). Der Teststand muss daher so konstruiert sein, dass keine Verletzungsgefahr durch rotierende Teile, scharfe Kanten oder freiliegende elektrische Leitungen besteht. Das Wärmemanagement ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Sicherheitsanforderungen. Die Komponenten des Teststands, insbesondere die Brennstoffzellen und die Batterien, müssen effizient gekühlt werden, um eine Überhitzung zu verhindern (Anforderungen 1.6, 1.7 und 3.7). Ein effektives Kühlsystem stellt sicher, dass die Temperatur innerhalb sicherer Betriebsgrenzen bleibt und der Teststand auch unter hoher Belastung zuverlässig arbeitet. Sollte während des Betriebs Wasser entstehen, muss nach Anforderung 3.8 ein Abwassersystem integriert sein, das eine sichere Ableitung gewährleistet und verhindert, dass sich Flüssigkeit in unerwünschten Bereichen ansammelt.

Wirtschaftliche Anforderungen

Neben den technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen ist auch der wirtschaftliche Aspekt ein wichtiger Faktor, bei der Entwicklung des Teststands. Das vorgegebene Budget von 2.800 Euro wird dabei als Grenze angenommen und soll demnach nicht überschritten werden, wie in der Anforderung 4.1 nachgelesen werden kann. Eine genaue Kostenanalyse und die Auswahl der richtigen Profile sind notwendig, um die wirtschaftliche Machbarkeit des Projekts zu gewährleisten, ohne die Qualität oder Funktionalität des Teststands zu beeinträchtigen.

Anforderungen an die Datenanalyse

Der Teststand muss in der Lage sein, Daten kontinuierlich und zuverlässig zu erfassen, um eine präzise Bewertung der Tests zu ermöglichen. Dazu ist ein umfassendes Sensorsystem erforderlich, das verschiedene Parameter wie Spannung, Strom, Leistung und Temperatur in Echtzeit überwacht. Die erfassten Daten müssen in einer strukturierten Form gespeichert und für eine spätere Analyse bereitgestellt werden.

3.2 Funktionsanalyse

Aus der Detaillierte Anforderungsanalyse aus dem Kapitel 3.1, lassen sich die Funktionen des Teststands ableiten. Die Funktionsanalyse dient dazu, Anforderungen in konkrete technische Funktionen zu Übersetzen. Die Hauptfunktionen lassen sich dabei in 3 Bereiche aufteilen, die in der folgenden Tabelle 1 beschrieben werden. Die erste Hauptfunktion stellt den reibungslosen Betrieb des Teststands sicher. Die zweite Hauptfunktion soll für die Sicherheit der Mitarbeiter und der Laborumgebung sorgen. Die dritte Hauptfunktion sichert die Modularität des Teststandes ab.

Tabelle 1: Funktionsanalyse Teststand

Nr.	Hauptfunktion	Nr.	Teilfunktion	Nr.	Subfunktion
F1	Reibungslosen Betrieb des Teststandes sicherstellen	F1.1	Kühlung und Wärmemanagement wird sichergestellt	F1.1.1	Kühlung der Brennstoffzelle
				F1.1.2	Gasentsorgung
				F1.1.3	Temperaturüberwachung
		F1.2	Stabilität der Tragstruktur ist gewährleistet	F1.2.1	Tragstruktur ist auf die Belastungen im Betrieb ausgelegt
				F1.2.2	Komponenten können sich nicht lösen
F2	Sicherheit gewährleisten	F2.1	Zügige Reaktion auf Notsituationen muss sichergestellt werden	F2.1.1	Schnelle Abschaltung der Systeme
		F2.2	Sicheren Umgang mit Gasen sicherstellen	F2.2.1	Kontrolle der Gaszufuhr
				F2.2.2	Unterbrechung bei Leckagen
		F2.3	Brandschutz- und Abgassysteme gewährleisten	F2.3.1	Warnung und Löschung bei Bränden
				F2.3.2	Temperaturüberwachung an kritischen Punkten
				F2.3.3	Sichere Ableitung aller Gase aus der Testumgebung
		F2.4	Arbeitsschutz gewährleisten	F2.4.1	Elektrische Gefahren werden verhindert
				F2.4.2	Verletzungen an dem Teststand werden verhindert
F3	Modularität	F3.1	Austauschbarkeit der Komponenten	F3.1.1	Komponenten können schnell ersetzt werden
				F3.1.2	Leicht zugängliche Kabel für schnelle Konfigurationsänderungen
		F3.2	Skalierbarkeit des Teststands	F3.2.1	Erweiterungsmölichkeit für zusätzliche Komponenten
				F3.2.2	Erweiterbare Struktur
		F3.3	Mobilität	F3.3.1	Transportfähigkeit des Teststandes

Die erste Hauptfunktion: Reibungslosen Betrieb des Teststands sicherstellen (F1), umfasst die Teilfunktionen: Kühlung und Wärmemanagement (F1.1) und Stabilität der Tragstruktur (F1.2). Kühlung und Wärmemanagement (F1.1) umfasst demnach Maßnahmen zur effizienten Ableitung und Erkennung der entstehenden Wärme und Gase. Daher gehören die Subfunktionen F1.1.1 – Kühlung der Brennstoffzelle (F1.1.1), Gasentsorgung (F1.1.2) und Temperaturüberwachung (F1.1.3) dazu. F1.1.1 ist besonders wichtig, da Brennstoffzellen während des Betriebs erhebliche Mengen an Wärme abgeben. Eine unzureichende Kühlung kann somit zu einer Überhitzung führen, die zu Schäden an der Brennstoffzelle führen kann. Die Funktion von F1.1.2 ist es dafür zu sorgen, im Falle von austretendem Wasserstoff, die Gase in die Lüftung zu leiten, sodass keine

kritische Wasserstoffkonzentration in der Laborumgebung entsteht. Die Temperaturüberwachung (F1.1.3) stellt sicher, dass die Temperatur des Teststands ständig kontrolliert wird und dieser somit nicht überhitzt, um die Betriebsfähigkeit der Komponenten zu sichern.

Eine weitere Teilfunktion ist Stabilität der Tragstruktur ist gewährleistet (F1.2). Der Teststand muss so konstruiert sein, dass er den mechanischen Belastungen während des Betriebs standhält. Die Subfunktion Tragstruktur ist auf die Belastungen im Betrieb ausgelegt (F1.2.1), bezieht sich auf die Festigkeit der Profile, sodass das System auch bei hohen Belastungen wie beispielsweise durch ein hohes Eigengewicht der Komponenten nicht versagt. Die Subfunktion Komponenten können sich nicht lösen (F1.2.2) stellt sicher, dass alle verbauten Teile festmontiert sind und sich während des Betriebs nicht unbeabsichtigt lösen.

Die zweite Hauptfunktion der Funktionsanalyse ist die Gewährleistung der Sicherheit des Teststands und der Umgebung. Eine wesentliche Teilfunktion ist die zügige Reaktion auf Notsituationen (F2.1) muss sichergestellt werden. Die Subfunktion schnelle Abschaltung der Systeme (F2.1.1) bedeutet, dass der Teststand mit einem Notabschaltungssystem ausgestattet sein muss, dass im Falle eines Fehlers oder einer Gefährdung eine sofortige Unterbrechung des Betriebs ermöglicht. Dies schützt sowohl die Testumgebung als auch die Mitarbeiter vor Schäden.

Der sichere Umgang mit Gasen ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Sicherheit des Teststands. Die Teilfunktion sicheren Umgang mit Gasen sicherstellen (F2.2) umfasst die Subfunktionen Kontrolle der Gaszufuhr (F2.2.1) und Unterbrechung bei Leckagen (F2.2.2). Die Gaszufuhr muss kontinuierlich überwacht und präzise gesteuert werden, um die Versorgung der Brennstoffzelle zu kontrollieren und Risiken zu minimieren. Ein System zur Erkennung und Unterbrechung bei Leckagen ist notwendig, um potenzielle Gefahren durch austretenden Wasserstoff oder andere Gase schnell zu erkennen und den Betrieb sicher abzuschalten.

Der Brandschutz ist ein weiterer wichtiger Bestandteil der Sicherheitsmaßnahmen. Die Teilfunktion Brandschutz- und Abgassysteme gewährleisten (F2.3) beinhaltet die Subfunktion Warnung und Löschung bei Bränden (F2.3.1), die sicherstellt, dass der Teststand mit entsprechenden Systemen ausgestattet ist. Diese Systeme sind entscheidend, um im Falle eines Brandes schnell reagieren zu können. Eine weitere Subfunktion, ist die Temperaturüberwachung an kritischen Punkten (F2.3.2), die eine frühzeitige Erkennung von Überhitzungen ermöglicht. sichere Ableitung aller Gase aus der Testumgebung (F2.3.3.) stellt sicher, dass potenziell gefährliche Abgase effektiv abgeführt werden, um die Sicherheit der Testumgebung zu gewährleisten.

Die letzte Sicherheitsfunktion ist der Arbeitsschutz (F2.4), der Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen umfasst. Die Subfunktion elektrische Gefahren werden verhindert (F2.4.1) beinhaltet Schutzmaßnahmen wie die Isolierung von elektrischen Komponenten und den Einsatz von Sicherungen, um Kurzschlüsse und Überlastungen zu vermeiden. Die Subfunktion Verletzungen

am Teststand werden verhindert (F2.4.2) bezieht sich auf mechanische Schutzvorrichtungen, die dafür sorgen, dass keine Verletzungsgefahr durch bewegliche oder scharfe Teile besteht.

Die dritte Hauptfunktion, Modularität, beschreibt die Flexibilität des Teststands, die es ermöglicht, ihn an unterschiedliche Testanforderungen und zukünftige Entwicklungen anzupassen. Die Teilfunktion Austauschbarkeit der Komponenten (F3.1) bedeutet, dass alle wesentlichen Komponenten des Teststands schnell und unkompliziert ersetzt oder hinzugefügt werden können. Die Subfunktion Komponenten können schnell ersetzt oder hinzugefügt werden (F3.1.1) sorgt dafür, dass der Teststand einfach konfiguriert werden kann, um verschiedenen Testanforderungen gerecht zu werden. Leicht zugängliche Kabel für schnelle Konfigurationsänderungen (F3.1.2) erleichtert die Durchführung von Änderungen am Teststand und minimiert die Zeit, die für Anpassungen benötigt wird.

Skalierbarkeit des Teststands (F3.2) ermöglicht, den Teststand für zusätzliche Profile, Komponenten oder Technologien zu erweitern. Erweiterungsmöglichkeit für zusätzliche Komponenten (F3.2.1) gewährleistet, dass der Teststand flexibel bleibt und neue Testszenarien ermöglicht. Die Subfunktion Erweiterbare Struktur (F3.2.2) stellt sicher, dass die Konstruktion des Teststands so gestaltet ist, dass Erweiterungen ohne grundlegende Änderungen möglich sind, wie beispielsweise der Erweiterung mit Profilen.

Schließlich ist die Mobilität (F3.3) des Teststands ein entscheidender Faktor für seine Flexibilität. Die Subfunktion Transportfähigkeit des Teststands (F3.3.1) stellt sicher, dass der Teststand so konzipiert ist, dass er leicht transportiert werden kann, um an verschiedenen Orten eingesetzt zu werden und durch die Türen der Labore passt.

3.3 Morphologischer Kasten

Aus der Anforderungs- und Funktionsanalyse kann man nun den morphologischen Kasten erstellen. Der morphologische Kasten ist ein Werkszeug, das in der Konzeptphase der Produktentwicklung eingesetzt wird, um eine Vielzahl von möglichen Lösungen zu entwickeln und darzustellen. Im Folgenden wird der morphologische Kasten tabellarisch (siehe Tabelle 2) dargestellt.

Tabelle 2: Morphologischer Kasten

Nummer	Funktion	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
F1.1.1	Kühlung der Brennstoffzelle	Passive Kühlung (natürliche Luftzirkulation)	Aktive Luftkühlung mit Lüftern	Wassergekühlte Systeme	Thermoelektrische Kühlung
F1.1.2	Gasentsorgung	Direkte Ableitung über die Lüftung	Unbenutzten Wasserstoff umleiten und erneut verwenden		
F1.1.3	Temperaturüberwachung	Einfache Thermoelemente	Infrarot Thermosensoren	Kombisensoren für Druck und Temperatur	
F1.2.1	Tragstruktur ist auf die Belastungen im Betrieb ausgelegt	Aluminiumprofilstruktur aus vollen Aluprofilen	Aluminiumstruktur aus leichtbau Aluprofilen mit zusätzlichen verstärkungen	Stahlrahmen mit Vibrationsdämpfung	
F1.2.2	Komponenten können sich nicht lösen	Verschraubung	Stecksystem mit Schnellverschlüssen	Klemmverbindungen	Magnetische Halterungen
F2.1.1	Schnelle Abschaltung der Systeme	Redundantes Notaussystem für direkte Unterbrechung der Gaszufuhr und Spannung	Digitales Notaussystem für ein langsames und sicheres herunterfahren der Komponenten	Einleiten des Notaussystems über die Sensoren, beim erreichen von kritischen Werten	Kombination aus physischen, redunanten Schaltern, einem digitalen Schalter und eines Sensorgesteuerten Notaussystems
F2.1.2	Systemüberwachung	Manuelle Überwachung	Teilautomatisierte Sensorik	Vollautomatisches Monitoring System	Echtzeit-Diagnosesystem
F2.2.1	Kontrolle der Gaszufuhr	Manuelle Kontrolle der Ventile	Automatische Regelventile mit Sensorüberwachung	Drucküberwachungssysteme mit Alarmsensoren	
F2.2.2	Unterbrechung bei Leckagen	Leckagedetektionssensoren lösen Alarm bei der Überschreitung kritischer Werte aus, so dass die Ventile manuell geschlossen werden können	Leckagedetektionssensoren lösen automatische Sperrventile bei Überschreitung von kritischen Werten aus		
F2.3.1	Warnung und Löschung bei Bränden	Feuerlöscher	Stickstoff-Löschanlage		
F2.3.2	Temperatursteuerung an kritischen Punkten	Einzelventilatorsteuerung für jeden Lüfter	Zentral gesteuerte Lüftereinheit	Adaptive, dynamische Lüfterregleung	Flüssigkeitskühlung mit Regelventil
F2.3.3	Sichere Ableitung aller Gase aus der Testumgebung	Abluftanschluss an der oberen Seite des Teststandes	Lüftung der Laborumgebung mit zu und Abluft	Lüftung des gesamten Teststandes in einem geschlossenen System	
F2.4.1	Elektrische Gefahren werden verhindert	Mechanische Sicherungen	Erdungsüberwachung	Automatische Kurzschlussdetektion	
F2.4.2	Verletzungen an dem Teststand werden verhindert	Lichtvorhänge zur Erkennung von Eingriffen	Schutzhauben und Gehäuse	Bewegliche Schutzabdeckungen	
F3.1.1	Komponenten können schnell ersetzt oder hinzugefügt werden	Arbeitsplatte ist ein Lochblech	Arbeitsplatte ist durch Bohrungen schnell anpassbar		
F3.1.2	Leicht zugängliche Kabel für schnelle Konfigurationsänderungen	Kabel sind an der Oberseite angebracht und werden durch Schellen geordnet und geführt	Kabel verlaufen unter der Arbeitsplatte in einer Kabelwanne	Kabel und Leitungen werden an einer Wand langgeführt	Versteckte Kabelkanäle
F3.2.1	Erweiterungsmölichkeit für zusätzliche Komponenten	Standardisierte Schnittstellen für Zusatzgeräte	Flexible Design Anpassungen und neu Ordnung der Komponenten		
F3.2.2	Erweiterbare Struktur	Erweiterbarer Profilrahmen	Klappmechanismen zur Flächenerweiterung		
F3.3.1	Transportfähigkeit des Teststands	Teststand besteht aus Boxen die auseinander genommen werden können	Zerlegbare Struktur	Rollen zum leichten Verschieben	Leichtbauweise für leichtes transportieren

Die erste Funktion, die im Morphologischen Kasten (siehe Tabelle 2) berücksichtigt wird, ist die Kühlung der Brennstoffzelle (F1.1.1). Da die Brennstoffzelle während des Betriebs Wärme entwickelt, ist eine Kühlung erforderlich, um Überhitzungen zu verhindern. Die verschiedenen Optionen umfassen die passive Kühlung durch natürliche Luftzirkulation, die für geringe Wärmemengen geeignet ist. Aufgrund der hohen Wärmeentwicklung und Unkontrollierbarkeit der Temperatur der Brennstoffzelle, ist diese Kühlung nicht ideal. Eine effektivere und kontrolliertere Kühlung, lässt sich über die aktive Luftkühlung mit Lüftern erreichen. Um die Effizienz der Lüftung zu erhöhen, kann man Luftkanäle an den Lüftern vorsehen, um eine laminare Strömung zu erzeugen und somit ein besseres Kühlergebnis zu erreichen []. Alternativ können auch wassergekühlte Systeme zum Einsatz kommen, die hohe Wärmelasten abführen, ähnlich wie in Automotoren. Thermoelektrische Kühlung über Peltier-Elemente bietet eine präzise, kontrollierte Kühlung und sind besonders für kleinere Flächen geeignet.

Die Gasentsorgung (F1.1.2) ist ebenfalls eine entscheidende Funktion des Teststands, da während des Betriebs kritische Mengen an Wasserstoff in die Laborumgebung gelangen kann. Eine einfache Lösung ist die direkte Ableitung über die Lüftung, die in dem Labor vorhanden ist, um Gase sicher ableiten zu können. Alternativ können ungenutzte Wasserstoffreste zurückgeführt und erneut verwendet werden, was die Effizienz steigert. Dafür müsste jedoch ein separates System entwickelt werden. Ein geschlossenes System würde für ausreichend Sicherheit sorgen und es würde im Falle einer Leckage kein Wasserstoff in die Laborumgebung gelangen.

Für die Temperaturüberwachung (F1.1.3) bietet der Teststand verschiedene Optionen, um ein kontrolliertes Vorgehen zu ermöglichen. Einfache Thermoelemente, wie Thermostate, ermöglichen eine kostengünstige Temperaturmessung an festen Punkten und sind ideal für die grundlegende Überwachung. Alternativ können Infrarot-Thermosensoren eingesetzt werden, die berührungslos arbeiten und schwer zugängliche Stellen messen. Im Vergleich zu einfachen Thermoelementen, haben diese den Vorteil, dass die Reaktionszeit der Wärmeerkennung schneller und die Messung generell präziser ist. Kombisensoren für Druck und Temperatur sparen Platz und ermöglichen eine kombinierte Messung, der Vorteil von diesen Sensoren ist, dass hier auch eine höhere Reaktionszeit als bei einfachen Thermoelementen gegeben ist.

Die Tragstruktur des Teststands (F1.2.1) muss so ausgelegt sein, dass sie den Belastungen des Betriebs standhält und anpassbar bleibt. Hierzu können Item Aluprofile verwendet werden, die hohe Stabilität bieten und besonders für dauerhafte Belastungen geeignet sind. Leichtbau-Aluprofile mit Verstärkungen kombinieren geringes Gewicht mit hoher Stabilität und eignen sich für Anwendungen, bei denen Mobilität und Festigkeit gefragt sind, der Vorteil dabei liegt auch in der Transportfähigkeit, da die Masse der Struktur geringer ist. Stahlrahmen mit Vibrationsdämpfung minimieren Vibrationen und sind besonders robust, ideal für Teststände, die unter hoher

Belastung stehen. Das kann für Teststände in Betracht gezogen werden, die nicht transportiert werden müssen.

Die sichere Anbringung der Komponenten (F1.2.2) ist wichtig, damit sich während des Betriebs keine Teile lösen. Verschraubungen bieten eine stabile und dauerhafte Verbindung, ideal für tragende Elemente, mit dem Nachteil, dass das umkonfigurieren der Komponenten Zeit in Anspruch nimmt. Stecksysteme mit Schnellverschlüssen ermöglichen den schnellen Austausch von Komponenten und sind besonders nützlich für Systeme, die regelmäßig umgebaut werden müssen. Klemmverbindungen bieten Flexibilität und eignen sich gut für leichte Komponenten, während magnetische Halterungen eine einfache und wiederverwendbare Befestigung bieten. Bei magnetischen Halterungen muss man jedoch beachten, dass diese eventuell nicht sicher genug befestigt sind.

Für die schnelle Systemabschaltung (F2.1.1) gibt es ein redundantes Notaussystem, wodurch es bei Gefahren die Möglichkeit gibt die Wasserstoff- und Spannungszufuhr direkt zu unterbrechen, dabei ist die Sicherheit der Mitarbeiter höchste Priorität und das sichere herunterfahren der Komponenten wird vernachlässigt. Digitale Notabschaltungen erlauben eine kontrollierte, automatisierte Abschaltung, die bei Gefahr alle Systeme kontrolliert herunterfährt und schonend für die Komponenten ist. Der Vorteil ist, dass man die Komponenten dadurch nicht dauerhaft beschädigt. Der Nachteil ist, dass die Mitarbeiter dadurch länger einer immer gefährlicher werdenden Situation ausgesetzt sein können. Automatische Notabschaltungen basieren auf kritischen Sensorwerten und lösen direkt aus, sobald festgelegte Parameter überschritten werden, der Vorteil ist hierbei, dass menschliche Fehler und Unachtsamkeiten, außer bei der Programmierung, ausgeschlossen werden. Der Nachteil ist, dass beschädigte Komponenten keine Daten empfangen und somit auch nicht auslösen könnten. Die letzte Variante vereint alle Lösungen und somit auch die Vorteile jeder Variante. Dadurch ist die Installation der nötigen Systeme jedoch auch deutlich komplexer und anspruchsvoller.

Eine weitere Funktion ist die Systemüberwachung (F2.1.2), die in verschiedenen Varianten umgesetzt werden kann. Die einfachste Variante ist die manuelle Überwachung, bei der die Projektmitglieder von BeHyPSy die Betriebsparameter regelmäßig kontrollieren. Alternativ kann eine teilautomatisierte Sensorik eingesetzt werden, die kritische Werte erfasst und Warnungen ausgibt, die dann von den Mitarbeitern überprüft werden. Für eine höhere Sicherheit und Effizienz kann ein vollautomatisches Monitoring-System implementiert werden, das alle Parameter eigenständig überwacht und ohne manuelle Eingriffe reagiert. Die fortschrittlichste Option ist ein Echtzeit-Diagnosesystem, das kontinuierlich Daten analysiert und sofort auf Abweichungen reagiert, wodurch die Reaktionszeit auf potenzielle Probleme minimiert wird.

Für die Kontrolle der Gaszufuhr (F2.2.1) stehen verschiedene Steuerungsmethoden zur Verfügung, um die Gasmenge zu regulieren. Eine Lösung ist die manuelle Ventilsteuerung, bei der die

Mitarbeiter die Gaszufuhr direkt über Ventile regeln. Diese Variante bietet eine einfache und kostengünstige Lösung, erfordert jedoch ständige Überwachung durch die Mitarbeiter. Eine automatisierte Steuerung kann durch Regelventile erfolgen, die den Gasfluss in Echtzeit an die Betriebsbedingungen anpassen. Diese Regelventile sind mit Sensoren gekoppelt, die den Gasdruck und -fluss überwachen und bei Bedarf die Ventilöffnung automatisch anpassen, um optimale Betriebsbedingungen zu sichern. Ein Drucküberwachungssystem mit Alarmsensoren stellt eine weitere Kontrollmöglichkeit dar. Hierbei wird der Gasdruck kontinuierlich überwacht, und das System gibt eine Warnung aus, wenn der Druck außerhalb der sicheren Betriebsgrenzen liegt.

Die Unterbrechung bei Leckagen (F2.2.2) ist entscheidend, um die Sicherheit des Teststands zu gewährleisten, insbesondere beim Umgang mit Wasserstoff, der ein hohes Explosionspotenzial besitzt. Eine Option zur Leckageerkennung besteht in der Installation von Leckagedetektionssensoren, die den Austritt von Wasserstoff sofort erfassen und eine Warnung ausgeben. Eine weitergehende Lösung ist der Einsatz automatischer Sperrventile, die bei Erkennung einer Leckage sofort die Gaszufuhr unterbrechen und so eine Ausbreitung des Gases verhindern. Der Vorteil bei dieser Lösung, ist die schnelle Reaktionszeit, die dadurch gegeben ist. Für zusätzliche Sicherheit können regelmäßige Leckagetests eingeplant werden, bei denen das System in festgelegten Intervallen überprüft wird, um mögliche Leckstellen zu identifizieren und rechtzeitig zu beheben.

Zur Brandwarnung und -löschung (F2.3.1) stehen ebenfalls verschiedene Optionen zur Verfügung. Ein klassischer Feuerlöscher bietet eine kostengünstige und manuell einsetzbare Lösung, die jedoch vom schnellen Eingreifen des Personals abhängt. Eine Stickstoff-Löschanlage stellt eine fortschrittlichere Variante dar, die bei einem Brand automatisch Stickstoff einsetzt, um Sauerstoff zu verdrängen und das Feuer zu ersticken – ideal für geschlossene Systeme.

Die Temperaturüberwachung an kritischen Punkten (F2.3.2) vermeidet Überhitzungen. Eine einfache Lösung ist die Einzelventilatorsteuerung, bei der jeder Lüfter separat angesteuert wird, um gezielt an bestimmten Stellen zu kühlen. Eine zentral gesteuerte Lüftereinheit sorgt für eine gleichmäßige Kühlung aller Komponenten und ist energieeffizienter. Die dynamischste Lösung ist eine adaptive Lüfterregelung, die automatisch auf die Temperaturbedingungen reagiert und die Lüfterleistung entsprechend anpasst, was die Effizienz maximiert, jedoch auch die Komplexität.

Die sichere Ableitung aller Gase aus der Testumgebung (F2.3.3) ist wichtig, um eine sichere Arbeitsumgebung zu gewährleisten. Ein einfacher Abluftanschluss am oberen Teil des Teststands sorgt dafür, dass die entstehenden Gase direkt abgeleitet werden, was für kleinere Gasvolumen geeignet ist. In Laboren, in denen größere Gasmengen freigesetzt werden, kann eine Zu- und Abluft-Lüftung für die gesamte Laborumgebung eingesetzt werden. Für einen höheren

Sicherheitsstandard bietet ein geschlossenes Lüftungssystem für den Teststand eine kontrollierte Gasableitung, die die Umgebung und Mitarbeiter schützt.

Um elektrische Gefahren zu vermeiden (F2.4.1), stehen ebenfalls verschiedene Schutzoptionen zur Verfügung. Mechanische Sicherungen bieten einen Basisschutz gegen Überstrom und sind eine zuverlässige und kostengünstige Lösung. Ein Notabschaltungssystem kann den Stromfluss automatisch unterbrechen, sobald eine Überlastung oder ein Kurzschluss erkannt wird. Eine kontinuierliche Erdungsüberwachung stellt sicher, dass die Anlage stets korrekt geerdet ist und somit die elektrische Sicherheit gewährleistet ist. Eine weitere Möglichkeit ist die automatische Kurzschlussdetektion, die Kurzschlüsse sofort erkennt und den Stromfluss unterbricht, um Schäden und Gefährdungen zu verhindern.

Für die Verletzungsverhinderung (F2.4.2) stehen verschiedene Maßnahmen zur Auswahl, darunter Lichtvorhänge, die eine Eingriffserkennung ermöglichen und den Betrieb automatisch stoppen. Der Nachteil ist, das bei einer eingeschränkten Laborumgebung, eine präzise Einstellung der Lichtschranken wäre, damit diese Ordnungsgemäß funktioniert. Mechanische Schutzhauben und Gehäuse verhindern Berührungen gefährlicher Komponenten, die beispielsweise rotieren oder scharfe Kanten haben. Bewegliche Schutzabdeckungen sorgen für einen sicheren Schutz, der bei Unfällen Mitarbeiter und Komponenten schützt und sich leicht öffnen und schließen lässt.

Die Modularität des Teststands (F3.1) ist muss beachtet werden, um ihn an verschiedene Testszenarien anzupassen und Komponenten einfach auszutauschen. Für die Austauschbarkeit der Komponenten (F3.1.1) bieten sich Lochblech-Arbeitsplatten an, die unterschiedliche Montagemöglichkeiten und eine schnelle Konfiguration bieten. Bei Lochblech-Arbeitsplatten ist keine genaue Planung des Layouts notwendig, da Komponenten schnell verstellt werden können. Lochblech-Arbeitsplatten kosten jedoch auch deutlich mehr als einfache Aluminium-Arbeitsplatten. Aluminium-Arbeitsplatten bieten eine kostengünstigere Lösung und diese sind durch Bohrungen anpassbar. Die Kabelverlegung (F3.1.2) kann entweder oberseitig mit Kabelschellen, in Kabelwannen unter der Arbeitsplatte, entlang einer Trennwand oder versteckt in Kabelkanälen erfolgen, wobei eine flexible Anordnung durch magnetisches Kabelmanagement ermöglicht wird.

Schließlich muss der Teststands (F3.2) auch skalierbar sein, um den Teststand an neue Anforderungen anzupassen. Die Erweiterungsmöglichkeit für zusätzliche Komponenten (F3.2.1) ermöglicht die Integration von Zusatzgeräten durch standardisierte Schnittstellen. Das spart Zeit bei dem Komponententausch und lässt den Teststand durch mehrere Komponenten erweitern. Flexible Designanpassungen und neu Ordnungen der Komponenten, ermöglichen eine freie Neuanordnung bestehender und neuer Elemente.

Für die erweiterbare Struktur (F3.2.2) ist ein erweiterbarer Profilrahmen nützlich, da an diesen mehrere Streben angebracht werden können, um die Struktur zu erweitern und die Komponenten neu zu verteilen. Ein Klappmechanismus zur Flächenerweiterung ist auch vorteilhaft, da der

Arbeitsbereich je nach Anforderung erweitert oder vermindert werden kann und der Transport erleichtert wird.

Die Transportfähigkeit der Teststands (F3.3.1) muss auch sichergestellt sein. Dafür kann der Teststand aus Profilboxen zusammengestellt sein, die man beim Transport einfach voneinander lösen muss. Dies erleichtert das Tragen der sonst schweren Struktur und geometrische Einschränkungen wie Türen werden dadurch auch weniger relevant. Man kann auch Rollen vorsehen, die den Transport erleichtern würden, jedoch würde der Teststand beim Betrieb nicht sicher stehen, außer die Rollen würden wieder entfernt werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, auf Leichtbauprofile zu setzen und somit das Gewicht zu reduzieren, was auch das Tragen der Struktur erleichtern würde.

3.4 Beschreibung und Auswahl der Komponenten

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Komponenten der Tragstruktur vorgestellt, die mithilfe eines Item Berechnungstools bestimmt wurden, um die bestmögliche Auswahl zu treffen. Diese Auswahl basiert auf einer detaillierten Anforderungsanalyse und fokussiert sich auf die Kriterien, die den Leistungsanforderungen entsprechen, um die technischen Anforderungen des Teststands optimal zu erfüllen.

Profiltechnik

Item-Profile: Profil 8 40x40

Wie in dem Kapitel 3.3 schon beschrieben, werden für die Tragstruktur Item-Profile verwendet, da diese im Vergleich zu anderen Lieferanten kostengünstiger sind und den Anforderungen ausreichen. Für den Aufbau der tragenden Struktur des Teststands werden hochwertige Aluminiumprofile der Serie „Profil 8 40x40“ von Item verwendet. Diese Profile zeichnen sich durch ihre hohe Stabilität, Vielseitigkeit und einfache Montage aus und sind damit ideal für den Einsatz in modularen Teststänten geeignet.

Das Profil 8 40x40 hat eine quadratische Querschnittsform von 40x40 mm. Das Profil besteht aus Aluminium, das eine natürliche Korrosionsbeständigkeit und Langlebigkeit bietet, was vorteilhaft bei der Arbeit mit Brennstoffzellen ist, da diese Wasser als Beiprodukt erzeugen. Zur Auswahl stehen 3 verschiedene Profilarten:

Economy (siehe Abbildung 8) – ist 45 % leichter als die Standardausführung und somit die leichteste und günstigste Option der Profil 8 40x40 Reihe. Der Nachteil ist jedoch, dass diese auch die niedrigste Festigkeit der 3 Optionen bietet.

Leicht (siehe Abbildung 8) – ist 30 % leichter als die Standardausführung und bietet einen Kompromiss zwischen der Standardausführung und der Economy Ausführung.

Standard (siehe Abbildung 8) – bietet die höchste Festigkeit, jedoch auch zu dem vergleichsweise höchsten Preis von den 3 Varianten.

Abbildung 8: Aluminiumprofile Standard (links), leicht (mitte), economy (rechts) [15]

Diese Profile bieten den Vorteil, dass sie kompatibel mit dem modularen Montagesystem von Item sind, das eine einfache Verbindung und Erweiterung der Struktur ermöglicht. Die Profile verfügen über Nuten entlang jeder Seite, die zur Befestigung von weiteren Komponenten und Zubehörteilen genutzt werden können. Diese Nuten bieten Flexibilität bei der Anordnung und Montage von Bauteilen und erleichtern Anpassungen oder Erweiterungen des Teststands. Zudem ermöglichen sie die Verwendung von unterschiedlichen Verbindern und Zubehörteilen, sodass die Konstruktion je nach Anforderung flexibel gestaltet werden kann.

Für die Konstruktion des Teststandes, wird sich für die Standardausführung entschieden. Kriterium für diese Wahl ist die Modulrarität des Teststandes. Da der Teststand in zukünftigen Forschungen angepasst werden können soll und noch nicht abzusehen ist welche weiteren Änderungen noch folgen, wird die Stabilste und sicherste Konstruktion gewählt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die tragenden Profile als Standardausführung zu wählen und die erweiterten Strukturen als günstige Option zu wählen. Aufgrund des zuvor genannten Grundes wird jedoch in dieser Arbeit davon abgesehen.

Um die Durchbiegung und die Biegespannung zu bestimmen, wird das Item Rechnungstool genutzt [15]. Dabei berechnet das Tool das Biegemoment der Profile und nimmt die Daten für die Parameter aus den Datenblättern, die auch im Anhang 7.3 (Datenblatt zum Item 8 40x40 Profil) zu finden sind. Es wird eine beidseitige Einspannung angenommen und eine Kraft von 2000N, die verteilt auf der Tischplatte aufgebracht wird und insgesamt von vier Profilen aufgenommen

wird. Von der Gesamtlänge jedes Profils werden 160mm abgezogen, da diese die feste Einspannung sind und laut Datenblatt Kräfte bis 2000N pro Winkel aufgenommen werden können. Die Durchbiegung durch das Eigengewicht wird in dem Tool auch berücksichtigt. Für die Berechnung der Biegespannung und der Durchbiegung werden folgende Formeln verwendet:

Gewichtskraft:

$$F_g = m \cdot l \cdot g \tag{1}$$

Durchbiegung durch Eigengewicht:

$$d_g = \frac{F_g \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} \tag{2}$$

Durchbiegung durch die einwirkende Kraft:

$$d_F = \frac{F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} \tag{3}$$

Gesamtdurchbiegung:

$$d = d_g + d_F \tag{4}$$

Biegespannung:

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{12 \cdot W} \tag{5}$$

Für die Berechnung werden Profillängen angenommen, die ungefähr den geometrischen Einschränkungen des Labors entsprechen. Für die kurzen Seiten des Teststandes werden Profillängen von 940mm angenommen. Die Längen der Winkel abgezogen, kommt man auf eine Länge von 780mm die betrachtet werden muss. Nimmt man dazu auch noch ein Viertel der Kraft an (500N), so kommt man auf eine Gesamtdurchbiegung von 0,07mm und einer Biegespannung von 4,66 $\frac{N}{mm^2}$.

Für die langen Profile wird eine Länge von 1500mm angenommen. Zieht man auch hier die Länge der Winkel ab, so kommt man auf eine Länge von 1340mm. Daraus ergibt sich eine Gesamtdurchbiegung von 0,34mm und eine Biegespannung von 8 $\frac{N}{mm^2}$.

Beide Biegespannungen liegen deutlich unter der Fließgrenze von 195 $\frac{N}{mm^2}$ und sind damit für den Gebrauch geeignet. Die hohe Festigkeit der Profile sorgt zu dem für eine Dämpfung der Schwingungen, die beim Betrieb des Teststands entstehen können. Die genaue Berechnung ist im Anhang 7.4 (Berechnung der Durchbiegung und Biegespannung) zu finden.

Winkelsätze

Für den Teststand werden 80x80 Winkelsätze von Item genutzt, die je Winkel eine Belastung von 2000N aushalten [14]. Zu den Winkeln werden jeweils vier Halbrundschrauben ISO 7380-M8x18, mit vier 13,9x13,9x2 Scheiben und vier Nutensteinen 8 mit M8 Gewinde verwendet. Eine Darstellung der Winkelsätze ist in Abbildung 9 zu sehen. Grund für die Auswahl dieser Winkel, ist die Hohe Tragkraft, was sie für den Gebrauch in so einem Teststand ideal macht.

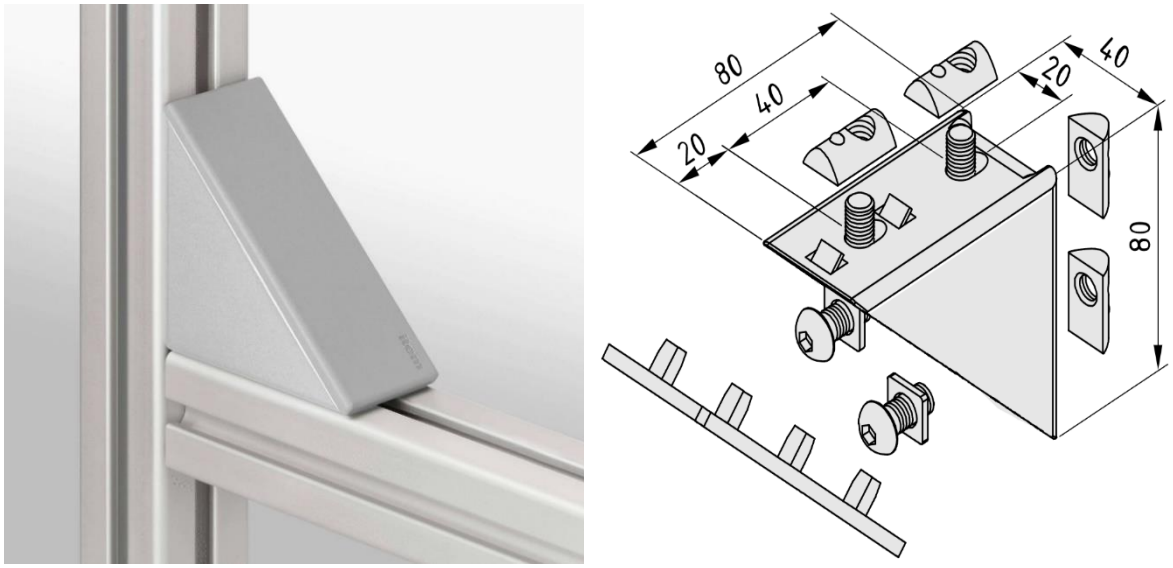


Abbildung 9: Darstellung der Winkelsätze [14]

Nutensteine

Die Winkelsätze werden mit passenden Nutensteinen geliefert. Für den Rest des Aufbaus, wie beispielsweise für die Befestigung der Tischplatten am Tisch, werden keine Nutensteine mit großem Gewinde gebraucht, da die Schrauben keine hohen Kräfte aufnehmen müssen, sondern nur den Tisch sicher befestigen sollen. Des Weiteren werden selten dickere Metallarbeitsplatten als 2mm genutzt oder angeboten. Da mit hoher Wahrscheinlichkeit Senkkopfschrauben genutzt werden, da dadurch das Verletzungsrisiko durch Kanten oder hängen bleiben minimiert wird, muss die Senktiefe beachtet werden. Wie man aus der Abbildung 35 in dem Anhang 7.5 (Senkkopfschrauben Tabellenbuch) entnehmen kann, braucht ein größeres Gewinde eine höhere Senktiefe.

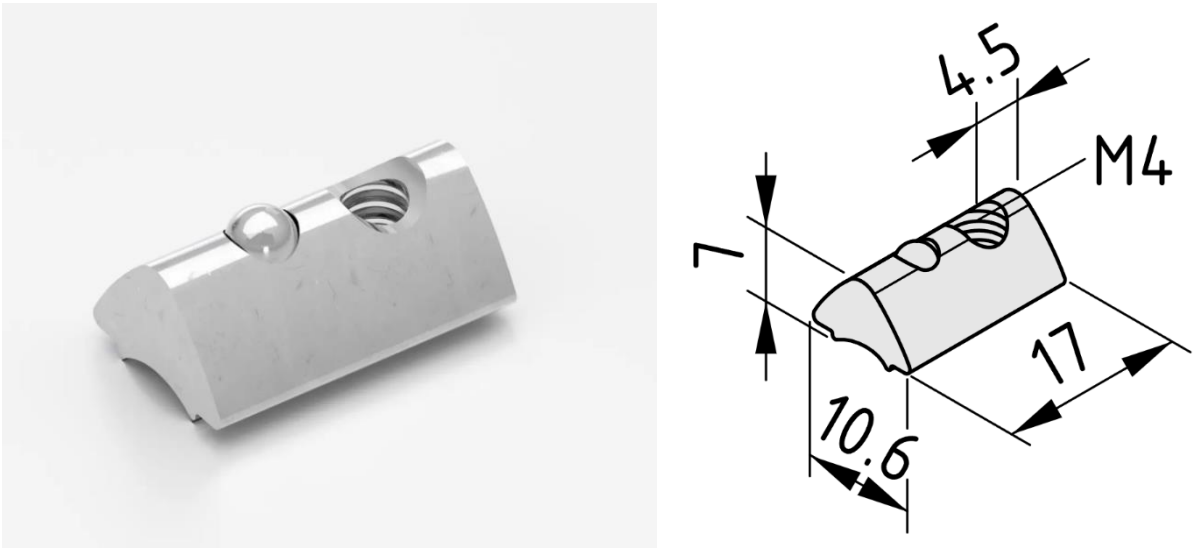


Abbildung 10: Darstellung der Nutensteine die für die Fixierung der Tischplatte genutzt werden [13]

Abdeckungen

Sollten Abdeckungen vorgesehen werden, so bietet Item auch mehrere Lösungen dazu. Als kostengünstigste Option bieten sich Polypropylen (PP) Wabenplatten an, die einfache Schutzwände bieten. Wabenplatten eignen sich gut als Schutzwände für Maschinen, da sie den direkten Zugang verhindern, leichten Stößen standhalten und eine einfache Reinigung ermöglichen. Ihre Konstruktion besteht aus zwei flachen Deckplatten, die durch eine wabenförmige Struktur miteinander verbunden sind. Im Vergleich zu Stegplatten bieten Wabenplatten eine hohe Steifigkeit in alle Biegerichtungen. Gleichzeitig lassen sie sich leicht bearbeiten und schnell montieren.

Abbildung 11: Polypropylen Flächen von Item [16]

Tischplatten

Für die Tischplatte wird eine Aluminium (AlMg1) Platte von Item verwendet, mit einer Blechdicke von 2mm. Diese eignet sich gut, um die Komponenten daran zu befestigen. Die Dicke ist genug, so dass die Platte bei den gegebenen geometrischen Abmaßen Stabil bleibt und sich nicht verbiegt und schwingt und dünn genug, so dass Bohrungen ohne viel Aufwand möglich sind.

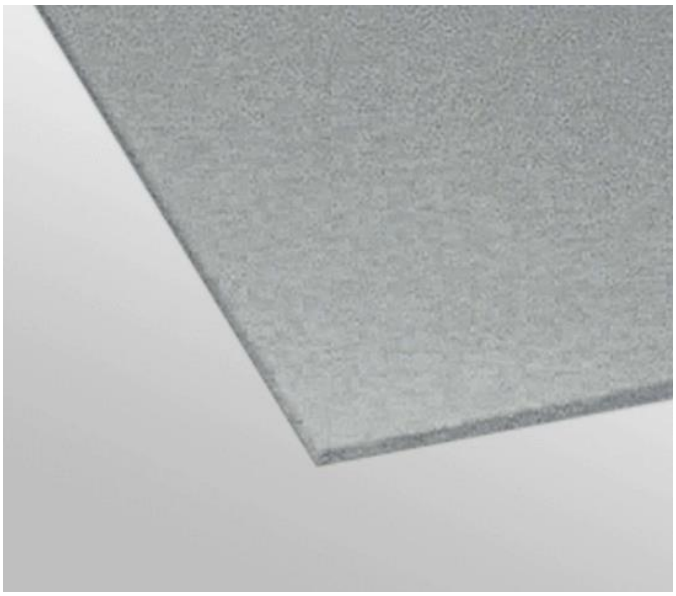


Abbildung 12: Aluminiumblech von Item [11]

3.5 Kabelmanagement

Ein effizientes und durchdachtes Kabelmanagement ist ein wichtiger Bestandteil des hybriden Antriebsteststands, da es nicht nur zur Übersichtlichkeit und einfachen Wartung beiträgt, sondern auch entscheidend für die Betriebssicherheit und Funktionsfähigkeit des gesamten Systems ist. Durch die Vielzahl von Komponenten, wie Steuer- und Leistungselektronik, Sensorik und die verschiedenen Energieversorgungseinheiten, entstehen komplexe Verkabelungen, die sorgfältig geplant und strukturiert werden müssen, um Störungen zu vermeiden und die Zuverlässigkeit des Systems zu gewährleisten.

Strukturierung und Anordnung der Kabel

Das Kabelmanagement beginnt mit einer genauen Planung der Verläufe und Anordnungen aller Kabelstränge. Dabei wird darauf geachtet, dass die Kabel klar gekennzeichnet und in logischen Strukturen verlegt werden. Eine übersichtliche Anordnung ermöglicht es den Mitarbeitern, schnell auf spezifische Kabel zuzugreifen, falls Modifikationen, Reparaturen oder Erweiterungen nötig sind. Es wird empfohlen, die Kabel nach Funktionsgruppen zu ordnen, zum Beispiel nach Stromversorgung, Datenleitungen und Steuerungskabeln. So wird sichergestellt, dass unterschiedliche

Arten von Leitungen getrennt geführt werden, um Interferenzen zu minimieren und die Signalqualität aufrechtzuerhalten.

Vermeidung von Störungen und Interferenzen

In einem Teststand, der viele elektronischer Komponenten und Sensoren enthält, ist die Vermeidung von Störungen und Interferenzen wichtig. Dazu werden für empfindliche Daten- und Kommunikationsleitungen abgeschirmte Kabel verwendet, die elektromagnetische Interferenzen verringern. Zudem erfolgt die Verlegung der Leistungskabel in ausreichendem Abstand zu den Signalleitungen, um die Übertragung von Störsignalen durch elektromagnetische Felder zu minimieren. Wo nötig, kommen auch Trennkanäle oder spezielle Leitungsabschirmungen zum Einsatz, die zusätzliche Sicherheit gegen elektrische Störeinflüsse bieten und so die Signalstabilität gewährleisten.

Flexibilität und Erweiterbarkeit

Ein wichtiges Ziel des Kabelmanagements ist es, die Kabelstrukturen so zu gestalten, dass sie einfach und schnell an veränderte Anforderungen angepasst werden können. Da der Teststand möglicherweise für unterschiedliche Testszenarien oder zusätzliche Komponenten erweitert wird, sind die Kabelwege modular aufgebaut. Dies bedeutet, dass bei späteren Erweiterungen neue Kabel einfach integriert werden können, ohne dass der gesamte Kabelbaum neu verlegt werden muss. Dabei erleichtern Kabelkanäle und -träger die flexible Führung und Anpassung der Leitungen. Zusätzlich sorgt ein 50-poliger Klemmanschluss für eine schnelle Erweiterung und Modifikation des Systems.

Wartungsfreundlichkeit und Dokumentation

Ein gut organisiertes Kabelmanagement trägt zur Übersichtlichkeit und Wartungsfreundlichkeit des Teststands bei. Jedes Kabel und jede Verbindung wird entsprechend ihrer Funktion und ihrer Position im System dokumentiert und gekennzeichnet. Diese Kennzeichnung ermöglicht es, im Falle von Reparaturarbeiten schnell und effizient auf spezifische Leitungen zuzugreifen, ohne das gesamte System zu überprüfen. Eine Verbindung mit dem Systemcomposer ist zur Simulation der Kabelverbindungen dadurch vielleicht auch möglich.

3.6 Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept des hybriden Antriebsteststands stellt den Schutz der BeHyPSy Mitarbeiter und die Minimierung von Betriebsrisiken in den Vordergrund. Da mit Wasserstoff und leistungsstarken elektrischen Komponenten gearbeitet wird, ist eine umfassendes und zuverlässiges Sicherheitskonzept entscheidend, um Gefahren frühzeitig zu erkennen und bei Notfällen angemessen zu reagieren. Im Sicherheitskonzept werden physische und digitale Notabschaltungen, automatische Sicherheitsüberwachungen und eine zentrale Steuerung über eine Scalexio Box integriert, um ein mehrstufiges Sicherheitskonzept zu erstellen.

Physische Notausschalter

Zwei physische Notausschalter können direkt am Teststand auf Augenhöhe installiert werden und sind jederzeit leicht zugänglich. Diese Schalter können im Notfall manuell betätigt werden und führen sofort zu einer vollständigen Unterbrechung der Wasserstoff- und Stromzufuhr. Der Einsatz dieser physischen Notschalter stellt sicher, dass in kritischen Situationen wie Gaslecks oder technischen Defekten schnell gehandelt werden kann, ohne auf die komplexen Systeme der digitalen Steuerung angewiesen zu sein. Die Priorität des physischen Notabschaltens liegt auf der Sicherheit der Mitarbeiter. Eine mögliche Beschädigung der Komponenten wird zugunsten des Schutzes der Anwesenden bewusst in Kauf genommen. Die Schalter sorgen für eine sofortige Trennung der Energieversorgung, was eine schnelle Reaktion auf unvorhersehbare Vorfälle ermöglicht.

Digitaler Notausschalter für ein geregeltes Herunterfahren

Es kann ein digitaler Notausschalter im System integriert werden, der für ein geregeltes Herunterfahren des Teststands sorgt. Im Gegensatz zu den physischen Schaltern erfolgt die Abschaltung hierbei kontrolliert, sodass alle Prozesse in einer geordneten Sequenz heruntergefahren werden. Diese kontrollierte Abschaltung minimiert die Gefahr von Schäden an den Komponenten, da der Betrieb des Systems Schritt für Schritt zurückgefahren und sensible Teile wie die Brennstoffzelle nicht abrupt abgeschaltet werden. Der digitale Notausschalter wird vorzugsweise in Situationen eingesetzt, in denen eine akute Gefahr für die Mitarbeiter ausgeschlossen werden kann, jedoch die Betriebsparameter eine kontrollierte Stilllegung erfordern, um Schäden zu vermeiden.

Sensorüberwachung und automatisches Herunterfahren bei kritischen Werten

Um potenzielle Gefahren frühzeitig zu erkennen, kann der Teststand mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet sein, die kontinuierlich die Betriebsparameter überwachen. Diese Sensoren erfassen unter anderem die Temperatur, den Druck, die Gasdichte und die Stromstärke. Sobald ein kritischer Wert überschritten wird, löst das Sensorsystem automatisch eine Notabschaltung des Teststands aus. Diese automatisierte Abschaltung bietet eine zusätzliche Sicherheitsebene, indem sie auf potenziell gefährliche Zustände reagiert, bevor es zu einer unsicheren Situation kommt.

Zentrale Steuerung über die Scalexio Box

Die zentrale Steuerung des Sicherheitskonzepts erfolgt über eine Scalexio Box, die als Schnittstelle für alle sicherheitsrelevanten Funktionen dient. Die Scalexio Box ist ein flexibles System, das in der Lage ist, die verschiedenen Notabschaltungen, Sensoren und Steuermechanismen zu koordinieren. Durch die zentrale Steuerung über die Scalexio Box können alle Abschaltfunktionen und Überwachungsprozesse konsolidiert werden, was eine klare und übersichtliche Verwaltung der Sicherheitsmaßnahmen ermöglicht. Die Box übernimmt die Priorisierung der verschiedenen Sicherheitsmaßnahmen, sodass das System situationsbedingt entweder eine sofortige oder eine kontrollierte Abschaltung wählt.

Darüber hinaus bietet die Scalexio Box die Möglichkeit, die Sicherheitsdaten in Echtzeit zu erfassen und zu speichern. Dadurch können Betriebs- und Sicherheitsdaten kontinuierlich überwacht und analysiert werden, was zur Optimierung des Sicherheitskonzepts beiträgt. Die Flexibilität der Scalexio Box ermöglicht es zudem, zukünftige Anpassungen oder Erweiterungen des Sicherheitssystems einfach zu integrieren, was die Skalierbarkeit und langfristige Effizienz des Sicherheitskonzepts sicherstellt.

3.7 Konzeptdefinition

Ziel dieses Kapitels ist es, verschiedene Entwurfskonzepte zu erarbeiten, die potenziell alle Anforderungen erfüllen können. Die unterschiedlichen Konzepte werden im Anschluss anhand eines Bewertungssystems analysiert, um das am besten geeignete Design auszuwählen. In diesem Prozess wird sowohl auf technische als auch auf ökonomische Aspekte eingegangen, um eine ausgewogene Entscheidung zu treffen, die sowohl die Funktionalität als auch die Effizienz des Teststands berücksichtigt.

Um die verschiedenen Konzepte systematisch zu bewerten, wird in Kapitel 3.8 ein Scoring-Modell verwendet. In diesem Bewertungssystem werden relevante Kriterien definiert, die jeweils eine unterschiedliche Gewichtung erhalten, basierend auf ihrer Bedeutung für das Gesamtprojekt. Jedes Kriterium wird auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet, wobei 5 die höchste Erfüllung und 1 die niedrigste darstellt. Die Gesamtbewertung ergibt sich aus der Summe der gewichteten Einzelbewertungen.

Die drei Konzepte für den hybriden Antriebsteststand wurden entwickelt, um unterschiedliche Schwerpunkte im Hinblick auf Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Zugänglichkeit und Flexibilität abzudecken. Jedes Konzept basiert auf einer modularen Aluminiumstruktur, die dem Teststand Stabilität und Erweiterungsmöglichkeiten verleiht. Während Konzept 1 besonders auf die Sicherheit und die Übersichtlichkeit der Komponenten fokussiert ist, legt Konzept 2 den Schwerpunkt auf Wirtschaftlichkeit und einfache Zugänglichkeit für Mitarbeiter. Konzept 3 stellt schließlich einen ausgewogenen Ansatz dar, der alle Kriterien in einem ausgeglichenen Verhältnis berücksichtigt. Im Folgenden werden die wesentlichen Merkmale und Funktionen der einzelnen Konzepte detailliert beschrieben.

Tabelle 3: Funktionsübersicht Konzept 1 (Orange), Konzept 2 (Lila), Konzept 3 (Grün)

Nummer	Funktion	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
F1.1.1	Kühlung der Brennstoffzelle	Passive Kühlung (natürliche Luftzirkulation)	Aktive Luftkühlung mit Lüftern	Wassergekühlte Systeme	Thermoelektrische Kühlung
F1.1.2	Gasentsorgung	Direkte Ableitung über die Lüftung	Unbenutzten Wasserstoff umleiten und erneut verwenden		
F1.1.3	Temperaturüberwachung	Einfache Thermoelemente	Infrarot Thermosensoren	Kombisensoren für Druck und Temperatur	
F1.2.1	Tragstruktur ist auf die Belastungen im Betrieb ausgelegt	Aluminiumprofilstruktur aus vollen Aluprofilen	Aluminiumstruktur aus leichtbau Aluprofilen mit zusätzlichen verstärkungen	Stahlrahmen mit Vibrationsdämpfung	
F1.2.2	Komponenten können sich nicht lösen	Verschraubung	Stecksystem mit Schnellverschlüssen	Klemmverbindungen	Magnetische Halterungen
F2.1.1	Schnelle Abschaltung der Systeme	Redundantes Notaussystem für direkte Unterbrechung der Gaszufuhr und Spannung	Digitales Notaussystem für ein langsames und sicheres herunterfahren der Komponenten	Einleiten des Notaussystems über die Sensoren, beim erreichen von kritischen Werten	Kombination aus physischen, redunanten Schaltern, einem digitalen Schalter und eines Sensorgesteuerten Notaussystems
F2.1.2	Systemüberwachung	Manuelle Überwachung	Teilautomatisierte Sensorik	Vollautomatisches Monitoring System	Echtzeit-Diagnosesystem
F2.2.1	Kontrolle der Gaszufuhr	Manuelle Kontrolle der Ventile	Automatische Regelventile mit Sensorüberwachung	Drucküberwachungssysteme mit Alarmsensoren	
F2.2.2	Automatische Unterbrechung bei Leckagen	Leckagedetektionssensoren lösen Alarm bei der Überschreitung kritischer Werte aus, so dass die Ventile manuell geschlossen werden können	Leckagedetektionssensoren lösen automatische Sperrventile bei Überschreitung von kritischen Werten aus		
F2.3.1	Warnung und Löschung bei Bränden	Feuerlöscher	Stickstoff-Löschanlage		
F2.3.2	Temperatursteuerung an kritischen Punkten	Einzelventilatorsteuerung für jeden Lüfter	Zentral gesteuerte Lüftereinheit	Adaptive, dynamische Lüfterregleung	Flüssigkeitskühlung mit Regelventil
F2.3.3	Sichere Ableitung aller Gase aus der Testumgebung	Abluftanschluss an der oberen Seite des Teststandes	Lüftung der Laborumgebung mit zu und Abluft	Lüftung des gesamten Teststandes in einem geschlossenen System	
F2.4.1	Elektrische Gefahren werden verhindert	Mechanische Sicherungen	Erdungsüberwachung	Automatische Kurzschlussdetektion	
F2.4.2	Verletzungen an dem Teststand werden verhindert	Lichtvorhänge zur Erkennung von Eingriffen	Schutzhauben und Gehäuse	Bewegliche Schutzabdeckungen	
F3.1.1	Komponenten können schnell ersetzt oder hinzugefügt werden	Arbeitsplatte ist ein Lochblech	Arbeitsplatte ist durch Bohrungen schnell anpassbar		
F3.1.2	Leicht zugängliche Kabel für schnelle Konfigurationsänderungen	Kabel sind an der Oberseite angebracht und werden durch Schellen geordnet und geführt	Kabel verlaufen unter der Arbeitsplatte in einer Kabelwanne	Kabel und Leitungen werden an einer Wand langgeführt	Versteckte Kabelkanäle
F3.2.1	Erweiterungsmölichkeit für zusätzliche Komponenten	Standardisierte Schnittstellen für Zusatzgeräte	Flexible Design Anpassungen und neu Ordnung der Komponenten		
F3.2.2	Erweiterbare Struktur	Erweiterbarer Profilrahmen	Klappmechanismen zur Flächenerweiterung		
F3.3.1	Transportfähigkeit des Teststands	Teststand besteht aus Boxen die auseinander genommen werden können	Zerlegbare Struktur	Rollen zum leichten Verschieben	Leichtbauweise für leichtes transportieren

3.7.1 Konzept 1 (Sicherheit und Übersichtlichkeit)

Konzept 1 ist so konzipiert, dass die Sicherheit der Mitarbeiter und die Übersichtlichkeit der Komponenten im Vordergrund stehen, daher befindet sich der komplette Teststand in einem geschlossenem System. Die Aluminiumprofilstruktur des Teststands bietet eine hohe Belastbarkeit und ermöglicht eine geordnete Anordnung aller Systemkomponenten, was die Wartung und Anpassung erleichtert. Durch das Nutzen solcher Profile ist eine Erweiterung des Teststands auch leicht möglich, dazu können einfach Streben mit Winkelsätzen an der schon vorhandenen Struktur befestigt werden. Die Modularität wird auch durch die Nutzung einer Lochblechplatte gefördert, an der schnelle Wechsel durch Schnellwechselsysteme und Komponenten neu konfiguriert werden können.

Das Sicherheitskonzept von dem ersten Konzept umfasst ein Einleiten des Notaussystems über die Sensoren, beim Erreichen von kritischen Werten. Das ermöglicht den Mitarbeitern die Versuche in einer sicheren Distanz durchzuführen und im Falle eines Notfalls sich nicht in Gefahr zu den Notausschaltern zu begeben. Nach dem Auslösen des Alarms folgt ein kontrolliertes Herunterfahren des Systems.

Die Temperaturüberwachung erfolgt durch den Einsatz von Kombisensoren, die sowohl Temperatur als auch Druck messen können und die Daten in Echtzeit analysieren, um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten. Durch automatische Regelventile kann das System dann nötige Einstellungen vornehmen. Im Falle eines Brandes wird eine Stickstoff-Löschanlage integriert, die schnell eingreifen kann und verhindert, dass sich die Mitarbeiter selbst in Gefahr begeben müssen. Diese Löschmethode ist besonders schonend für elektronische Komponenten und verhindert die Ausbreitung von Bränden, ohne Rückstände zu hinterlassen.

Die Kühlung an kritischen Punkten erfolgt bei dieser Konstruktion adaptiv und dynamisch. Das bedeutet, dass die Kühlung der Komponenten an die Betriebsmodi und Auslastungen automatisch angepasst werden. Die Kühlung der Brennstoffzelle erfolgt über eine aktive Luftkühlung mit Lüftern, die eine konstante Temperaturkontrolle sicherstellen. Die Effizienz der Kühlung wird durch Kühlkanäle gefördert. Das Kabelmanagement erfolgt über eine übersichtliche Montage an der Trennwand der zwei hinteren Kammern. Die Zugänglichkeit wird dadurch jedoch etwas verringert, da die Mitarbeiter beim Anpassen der Kabel immer die Seite wechseln müssen.

Zur sicheren Entsorgung des Wasserstoffs, der in die Laborumgebung gelangen kann, wird ein direkter Abluftanschluss an der oberen Abdeckung verwendet, der eine potenziell gefährliche Ansammlung von Wasserstoff sofort ableitet und so eine sichere Testumgebung schafft. Da das Konzept ein geschlossenes System darstellt, wird die Zugänglichkeit an die Komponenten durch anhebbare Hauben gewährleistet. Diese Art von Konstruktion, senkt das Verletzungsrisiko der

Mitarbeiter durch scharfe Kanten, austretende Hitze oder rotierende Teile. Die Konzeptentwicklung ist auf Abbildung 13 zu sehen.

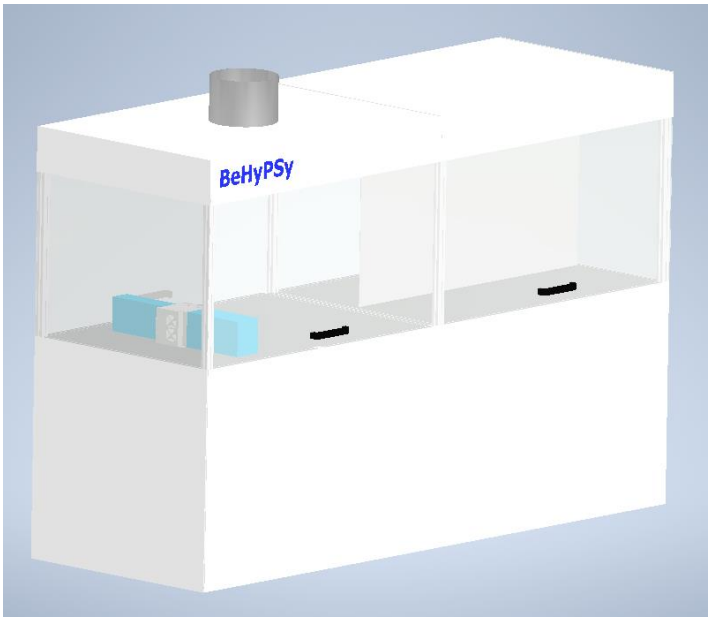


Abbildung 13: Konzeptentwurf

3.7.2 Konzept 2 (Wirtschaftlichkeit und Zugänglichkeit)

Im Gegensatz zu Konzept 1 liegt der Schwerpunkt des Konzeptes 2 auf der Wirtschaftlichkeit und der einfachen Zugänglichkeit der Komponenten für die Mitarbeiter. Die Aluminiumstruktur bietet weiterhin Stabilität, jedoch werden Verschraubungen an einer normalen Aluminium-Arbeitsplatte anstelle von Schnellverschlüssen verwendet, was die Kosten reduziert. Die Komponenten sind so angeordnet, dass das Personal leicht darauf zugreifen kann, was die Wartung und Anpassung erleichtert.

Die Kühlung der Lüfter erfolgt über eine zentral gesteuerte Lüftereinheit. Das verringert die Komplexität des Kühlungsmanagements und dementsprechend die Kosten. Die Kühlung der Brennstoffzelle erfolgt, wie in Konzept 1, durch aktive Lüfter, um die Brennstoffzelle effizient zu kühlen. Auch die Gasentsorgung wird durch eine direkte Ableitung der entstehenden Gase über eine Lüftungsöffnung sichergestellt, wobei bei diesem Ansatz der Lüftungskanal nicht direkt über dem Teststand befestigt wird, sondern die gesamte Laborumgebung durch Zu- und Abluft klimatisiert wird. Bei der Temperaturüberwachung kommen jedoch einfache Thermoelemente zum Einsatz, die eine kostengünstige Alternative zu Kombisensoren darstellen und dennoch eine zuverlässige Überwachung der Betriebsbedingungen gewährleisten.

Das Sicherheitskonzept umfasst mehrere physische Notausschalter, die eine schnelle Reaktion im Notfall ermöglichen. Der Nachteil bei diesem Sicherheitskonzept, ist das eine ständige Aufmerksamkeit der Mitarbeiter gefordert wird. Die Kontrolle der Ventile erfolgt manuell, was weitere Kosten spart und gleichzeitig grundlegende Sicherheitsanforderungen erfüllt. Mechanische Sicherungen bieten die einfachste und zuverlässigste Art vor elektrischen Gefahren zu schützen.

Die Kabel sind auf der Oberseite geordnet durch Schellen, können jedoch auch in der Kabelwanne unter dem Teststand verlegt werden, was eine geordnete und leicht zugängliche Struktur sicherstellt. Die zerlegbare Konstruktion des Teststands ermöglicht zudem eine einfache Demontage und Transportierbarkeit, sodass das Konzept besonders für mobile Testanwendungen geeignet ist. Der Konzeptentwurf ist in Abbildung 14 nochmal dargestellt.

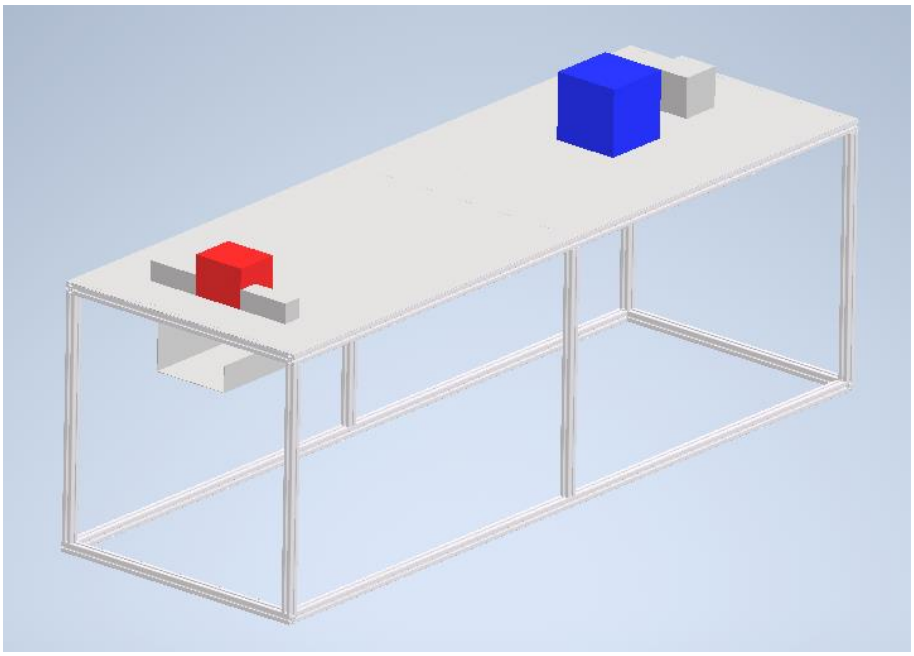


Abbildung 14: Konzeptentwurf 2

3.7.3 Konzept 3 (Ausgewogen)

Konzept 3 verfolgt einen ausgewogenen Ansatz, der alle wichtigen Kriterien – Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Zugänglichkeit und Flexibilität – gleichwertig berücksichtigt. Die Aluminiumstruktur des Teststands bietet Stabilität und ist gleichzeitig erweiterbar, sodass zukünftige Anforderungen problemlos integriert werden können. Die Kühlung an kritischen Punkten erfolgt hier wie bei dem Konzept 2, durch eine zentral gesteuerte Lüftereinheit. Die Brennstoffzelle hat auch hier aktive Lüfter durch die sie gekühlt wird, die eine zuverlässige und konstante Wärmeabfuhr gewährleisten. Die Gasentsorgung erfolgt über ein Abluftsystem an der Oberseite des Teststands. Die Konstruktion besitzt Abdeckungen an der Oberseite, die ein Sammeln und direktes ableiten des

Wasserstoffs ermöglichen. Anders als bei dem ersten Konzept, ist hier ein offenes System vorgesehen, da es dadurch zu keinen Behinderungen der Kühlung kommt.

Die Kontrolle der Wasserstoffzufuhr erfolgt über automatische Regelventile, die kontinuierlich durch Sensoren überwacht werden. Diese Ventile regeln den Gasfluss entsprechend den Betriebsanforderungen und reagieren auf Sensorwerte, um die Gaszufuhr anzupassen oder zu unterbrechen, wenn abnormale Werte auftreten. Dadurch wird ein sicherer und effizienter Betrieb gewährleistet. Zur Verhinderung von Gefahren bei Leckagen sind Leckagedetektionssensoren installiert. Diese Sensoren überwachen die Umgebung auf ausströmendes Gas und lösen im Falle eines Lecks sofort die automatischen Sperrventile des Teststands aus. Die Leckagedetektionssensoren bieten eine zusätzliche Sicherheitsebene, indem sie frühzeitig auf potenzielle Risiken reagieren und so den Teststand und die Mitarbeiter schützen.

Die Überwachung der Betriebsbedingungen wird durch Kombisensoren realisiert, die sowohl Druck als auch Temperatur erfassen und eine präzise Kontrolle und eine schnelle Datenerfassung ermöglichen. Um die Komponenten sicher zu befestigen, werden Verschraubungen verwendet, die eine hohe Stabilität gewährleisten und zusätzlich kostengünstig sind. Das Sicherheitskonzept umfasst ein redundantes Notaussystem, das sowohl die Gaszufuhr als auch die Spannungsversorgung sofort unkontrolliert oder auch kontrolliert unterbricht. Dieses System kann manuell über physische Notausschalter, digital oder automatisch durch das Erreichen kritischer Sensordaten ausgelöst werden. Die Redundanz sorgt dafür, dass der Teststand im Notfall schnell und zuverlässig abgeschaltet werden kann, was die Sicherheit für das Personal maximiert. Mechanische Sicherungen verringern elektrische Gefahren und runden das Sicherheitskonzept ab. Die Komponenten sind so angeordnet, dass sie leicht zugänglich sind, was die Wartung vereinfacht und schnelle Anpassungen ermöglicht.

Eine Besonderheit von Konzept 3 ist die mehrschichtige Plattformstruktur, die eine hohe Flexibilität bietet. Die Struktur ist modular aufgebaut und lässt sich leicht anpassen oder erweitern. Auch die Kabel sind übersichtlich an der Oberseite verlegt und durch Schellen geordnet, sodass sie leicht zugänglich sind. Der Aufbau über Boxen und die zerlegbare Struktur macht den Teststand am einfachsten transportierbar und ermöglicht den Einsatz an verschiedenen Standorten.

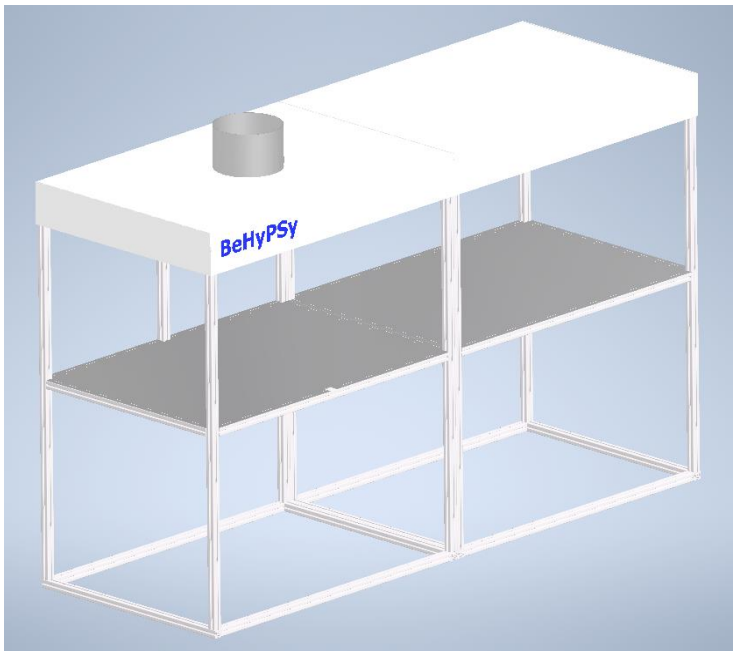


Abbildung 15: Konzeptentwurf 3

3.8 Konzeptbewertung und Konzeptauswahl

Wie in der Einleitung des Kapitels 3.7 schon beschrieben, ist Ziel dieses Kapitels, die Entwürfe anhand eines festgelegten Bewertungssystems objektiv zu vergleichen und das am besten geeignete Konzept für die Umsetzung auszuwählen. Die Bewertung erfolgt auf Basis klar definierter Kriterien, die den spezifischen Anforderungen des Projekts gerecht werden. Die wesentlichen Bewertungskriterien umfassen Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Zugänglichkeit und Modularität.

Zur objektiven Bewertung der drei Konzepte wurden die folgenden Kriterien festgelegt und gewichtet:

1. **Sicherheit (40%)** – Die Sicherheit des Teststands ist von größter Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf den Umgang mit Wasserstoff und elektrischen Komponenten. Ein sicheres Konzept umfasst zuverlässige Sicherheitsmechanismen wie Notabschaltungen, Leckagedetektionen und Schutzvorrichtungen.
2. **Wirtschaftlichkeit (25%)** – Die Kostenstruktur des Konzepts, einschließlich der Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten, ist ein entscheidender Faktor für die Realisierbarkeit des Projekts. Ein wirtschaftliches Konzept bietet eine kosteneffiziente Lösung ohne Kompromisse bei der Funktionsfähigkeit.
3. **Modularität (25%)** – Ein modulares Konzept sollte anpassbar und erweiterbar sein, um zukünftige technologische Anforderungen oder zusätzliche Komponenten integrieren zu können.

4. **Zugänglichkeit (10%)** – Die Zugänglichkeit der Komponenten und Kabel spielt eine wichtige Rolle für die Bedienung und Wartung des Teststands. Ein benutzerfreundliches Design ermöglicht einfachen Zugriff auf alle Komponenten und vereinfacht Konfigurationsänderungen und Reparaturen.

Jedes Konzept wurde anhand der oben genannten Kriterien bewertet, wobei eine Punkteskala von 1 bis 5 verwendet wurde. Die einzelnen Punkte wurden mit der Gewichtung (%) verrechnet und am Ende addiert.

Tabelle 4: Konzeptbewertung

	Gewichtung (%)	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Sicherheit	40	5	2	4
Wirtschaftlichkeit	25	1	5	3
Modularität	25	3	2	5
Zugänglichkeit	10	2	5	4
Gesamtbewertung (gewichtete Punktzahl)		**3,2**	**2**	**4**

Konzept 1 hat in der Kategorie Sicherheit die höchste Bewertung, da es durch das mehrstufige Sicherheitskonzept mit redundanten Notausschaltern, Leckagesensoren, automatischen Sperrventilen und vor allem durch das geschlossene Design. Die hohe Sicherheit und Übersichtlichkeit gehen jedoch auf Kosten der Wirtschaftlichkeit, die in diesem Konzept die niedrigste Bewertung hat. Die Zugänglichkeit sind durch das Stecksystem mit Schnellverschlüssen gut gelöst, was einfache Anpassungen ermöglicht. Durch die Trennwand jedoch verringert sich die Zugänglichkeit wieder, da die Mitarbeiter ständig die Seiten wechseln müssten, um an die Komponenten auf der anderen Seite zu kommen. Sollten die Kabel doch unter dem Teststand verlaufen, so reduzieren die Abdeckungen die Zugänglichkeit noch weiter. Die Tragstruktur ist erweiterbar, jedoch durch die geschlossene Konstruktion eingeschränkt, was zu einer ausreichenden Modularität führt.

Gesamtpunktzahl: 3,2 / 5

Konzept 2 überzeugt in der Kategorie Wirtschaftlichkeit, da es kostengünstige Verschraubungen und einfache Thermoelemente für die Temperaturüberwachung verwendet. Diese kostensparenden Lösungen reduzieren jedoch erheblich die Sicherheit, da komplexere Sicherheits- und

Überwachungssysteme fehlen. Die Zugänglichkeit und Benutzerfreundlichkeit sind gut, da die Komponenten so angeordnet sind, dass das Personal sie leicht erreichen kann. Das Konzept ist daher besonders für Testanwendungen geeignet, bei denen Wirtschaftlichkeit und einfache Bedienung im Vordergrund stehen. Die Modularität ist auch weniger gut, da es keine Aluminium Profile gibt, an denen eine Erweiterung schnell möglich wäre.

Gesamtpunktzahl: 2 / 5

Konzept 3 erzielte ein ausgewogenes Ergebnis in allen Kategorien und konnte insbesondere in dem Bereich Modularität punkten, da die konstruktive Lösung durch Boxen den Transport und die Anpassungsmöglichkeiten sehr erleichtern. Die modulare und erweiterbare Plattformstruktur ermöglicht eine einfache Anpassung an zukünftige Anforderungen. Das Sicherheitskonzept ist ebenfalls umfassend und umfasst manuelle und automatische Sicherheitsfunktionen. Konzept 3 stellt eine kosteneffiziente und sichere Lösung dar, die sich gut für langfristige Anwendungen eignet und auch zukünftige Erweiterungen berücksichtigt. Mit einer guten Punktzahl in allen Kategorien bietet Konzept 3 eine solide Balance zwischen Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Flexibilität.

Gesamtpunktzahl: 4 / 5

Auswahl des optimalen Konzepts

Basierend auf den Bewertungsergebnissen wurde Konzept 3 als das optimale Design für den hybridelektrischen Antriebsteststand ausgewählt. Konzept 3 erfüllt alle wesentlichen Anforderungen in einem ausgewogenen Verhältnis und bietet eine gute Balance zwischen Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Modularität und Flexibilität. Die modulare Struktur ermöglicht zukünftige Anpassungen und Erweiterungen, was das Konzept besonders ansprechend macht. Zudem bietet es ein umfassendes Sicherheitskonzept, das den sicheren Betrieb in einer wasserstoffbasierten Testumgebung gewährleistet.

4 Detaillierte Konstruktion des Teststandes

Kapitel 4 befasst sich mit der detaillierten Konstruktion des Teststandes, der auf den in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten Konzepten basiert. Ziel dieses Kapitels ist es, die Umsetzung des ausgewählten Konzeptes in einer konkreten Konstruktion darzustellen und die Integration aller relevanten Komponenten zu beschreiben. Dabei liegt der Fokus auf der CAD-Modellierung des Teststandes, dem Aufbau der Tragstruktur sowie der Anordnung und Verknüpfung der verschiedenen Systemelemente. Zudem wird auf die Produktstruktur eingegangen, so dass es bei weiterführenden Arbeiten zu keinen Missverständnissen kommt. Abschließend erfolgt eine Kostenanalyse, die den wirtschaftlichen Aspekt des Teststandes berücksichtigt und die Kostenstruktur für die geplanten Bauteile darlegt.

4.1 Allgemeine Konstruktionsbeschreibung

Zunächst wollen wir uns die grundlegende Konstruktion des Teststands anschauen. Ein Großteil davon kann bereits aus der Konzeptbeschreibung von Konzept 3 abgelesen werden. Im Verlauf des Projekts wurden einige Alternativen gefunden, die die ursprüngliche Konzeptidee nur leicht verändert haben und keinen wesentlichen Einfluss auf die Grundidee des Konzepts hatten, auf diese wollen wir hier näher eingehen.

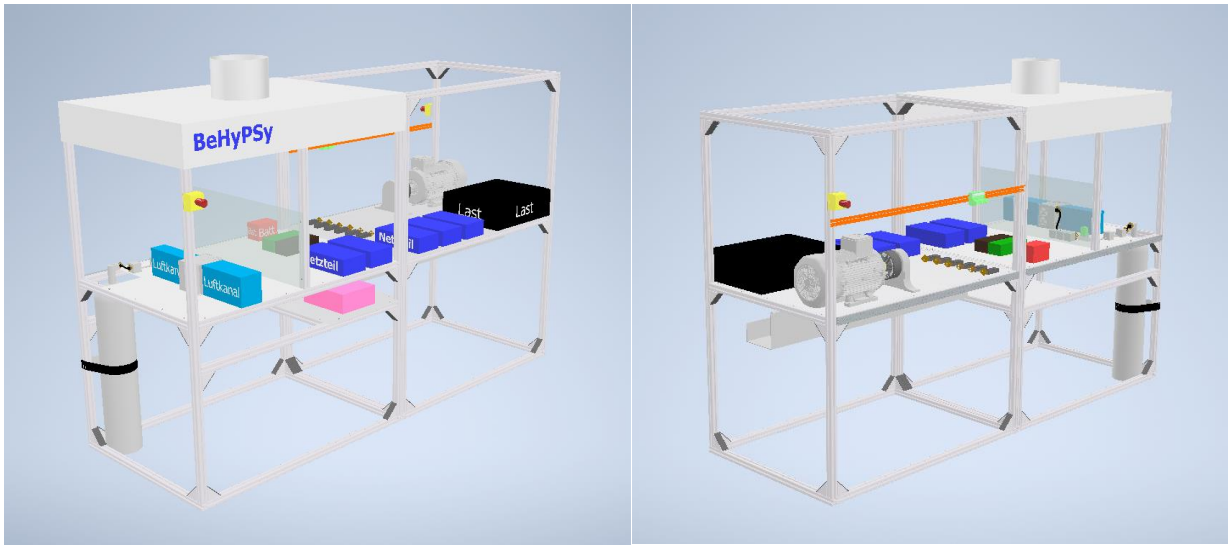


Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Teststandes von vorne und hinten

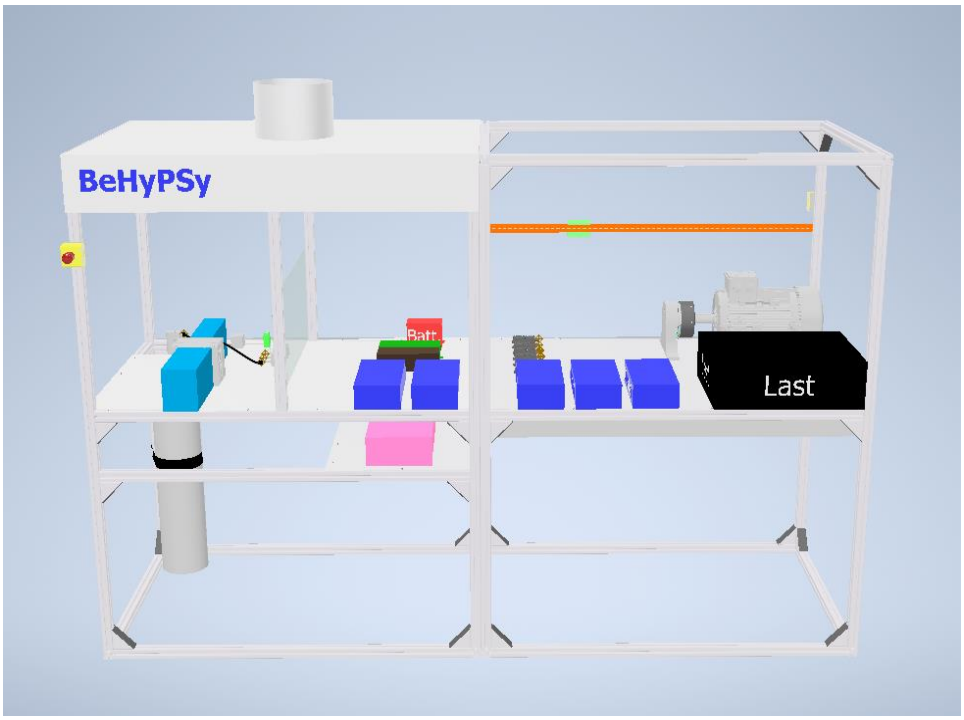


Abbildung 17: Teststand Seitenansicht (Rechts)

Der Teststand ist in 2 Boxen aufgeteilt. In der ersten vorderen Box (siehe Abbildung 16), ist die Brennstoffzelle mit der Gasflasche und den Sensoren. Getrennt wird der erste Bereich durch eine Plexiglasscheibe, damit kein Wasser zur Elektrik gelangt. Gestützt wird die Plexiglasscheibe durch zwei Vertikale 40x40 Aluminiumprofile, die an der oberen Struktur angebracht sind, damit keine Winkel im Weg sind. An diesem vertikalen Profil ist am Ende auch ein Wasserstoffkonzentrationssensor angebracht (siehe Abbildung 18). Es ist vorgesehen, dass die nötigen Kabel des Sensors an dem vertikalen Profil längs laufen, so dass diese bei Arbeiten oder Konfigurationen nicht versehentlicherweise heruntergerissen werden können. Alle Komponenten sind auf einer Aluminiumplatte verschraubt.

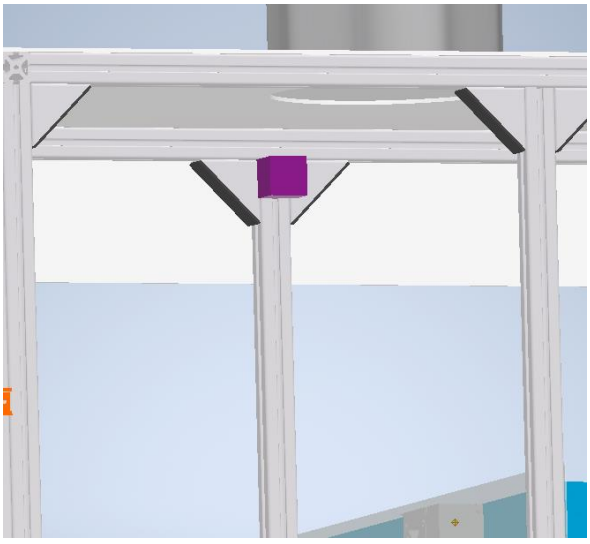


Abbildung 18: Vertikales Profil mit Wasserstoffkonzentrationssensor

Hinter der Plexiglasscheibe, immer noch in der „Brennstoffzellenbox“, fängt dann der elektrische Teil der Komponenten an, dazu gehört alles von dem Powermanagement und ein Teil des EML. In der zweiten Box ist der Rest des EML, dazu gehört auch der Motor, die Bremse und die elektronische Last. An einer DIN-Schiene ist eine 50-polige Klemmleiste angebracht, um die Anbindung an das Scalexio System zu vereinfachen.

Der Teststand bietet flexible Möglichkeiten Versuche durchzuführen, in Abbildung 19 ist eine beispielhafte Anordnung eines möglichen Arbeitsplatzes abgebildet. Es ist möglich einen Monitor an beliebiger Stelle an die Tragstruktur anzubringen, je nach Anforderung. Das Gelenk (siehe Abbildung 20) ist dabei auf die 40x40 Profile abgestimmt.

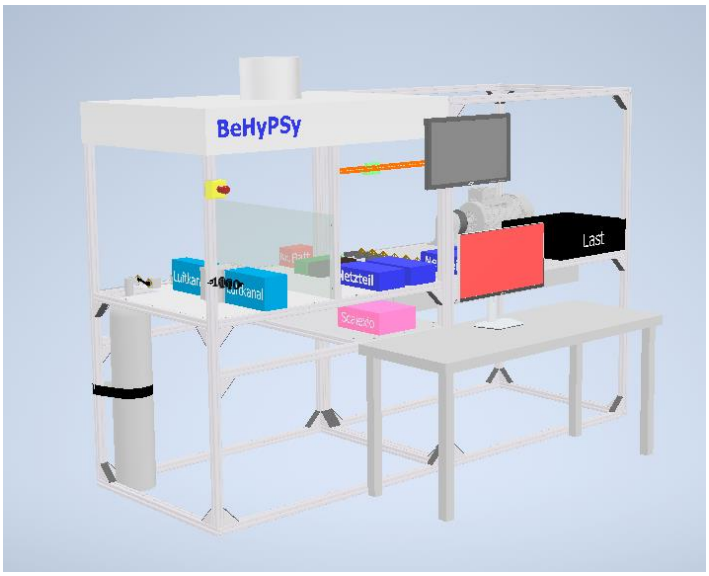


Abbildung 19: Möglicher Aufbau des Arbeitsplatzes

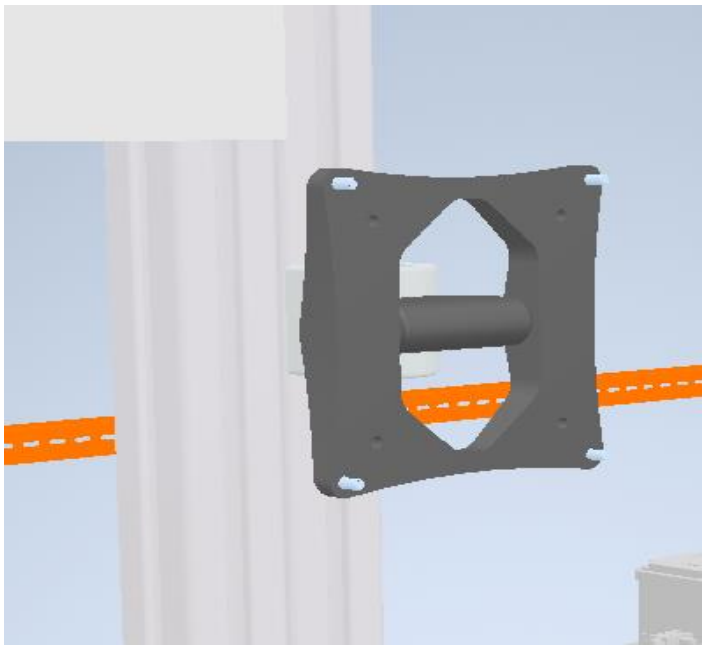


Abbildung 20: Verstellbares Monitorgelenk

4.2 Detaillierte Konstruktionsbeschreibung

4.2.1 Aufbau der Tragstruktur

Die Tragstruktur hat die Aufgabe, die gesamten Kräfte und Lasten der Komponenten aufzunehmen und dabei genügen Platz für die Mitarbeiter zu lassen, damit diese ungestört arbeiten können. Da hauptsächlich vertikale Lasten durch das Eigengewicht der Komponenten aufgebracht wird, wird sich für eine einfache Konstruktionslösung entschieden (siehe Abbildung 21), da so eine Lösung auch am wirtschaftlichen ist und trotzdem die Biegemomente aufnehmen kann.

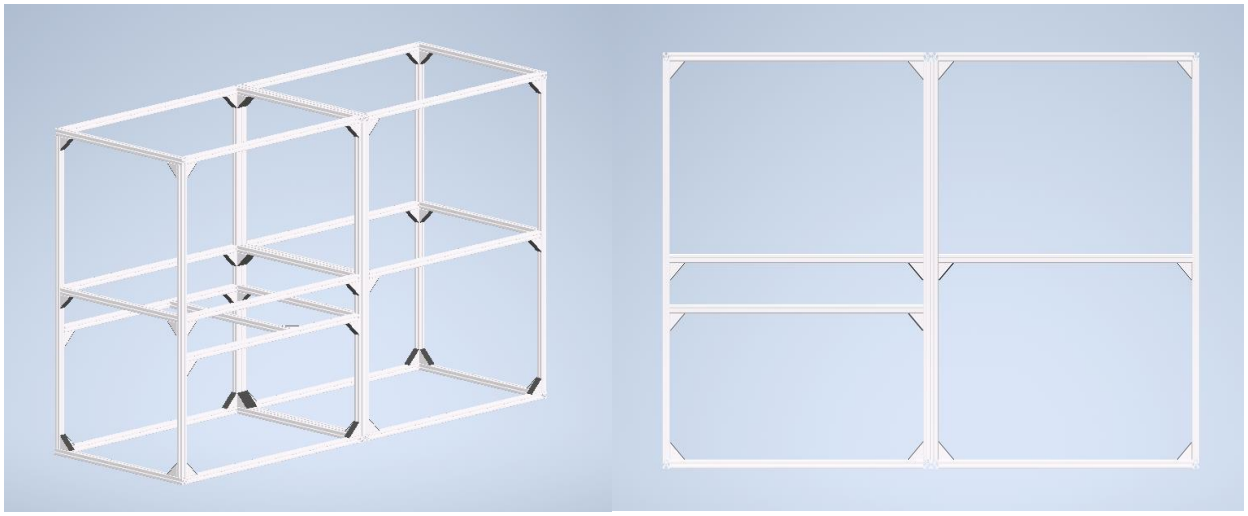


Abbildung 21: Schematischer Aufbau der Tragstruktur (links) Seitenansicht (rechts)

Die Aluminiumprofile werden mit Winkeln miteinander verbunden. Genutzt werden für einen 80x80 Winkel, vier Halbrundschrauben (ISO 7380-M8x18) und dazu vier passende Nutensteine 8 mit einem M8 Gewinde. Abgedeckt sind die Winkel mit Abdeckkappen. Die einzelnen Boxen können miteinander verbunden werden, müssen sie jedoch nicht. Die Boxen werden einzeln mit einem 40x40 Winkel an der Laborstruktur montiert. Alternativ können jedoch auch sogenannte Parallel Fastener genutzt werden, die eine Verbindung von parallelen Profilen erlauben (siehe Abbildung 22). Eine Zeichnung der Tragstruktur ist im Anhang 7.6 (Technische Zeichnungen der Tragstruktur) zu finden.

Abbildung 22: Verbindung mit parallel fasteners [12]

Die Tischplatten sind mit DIN 7991 M4x8 Senkkopfschrauben an den dazu passenden Nutensteinen 8 mit M4 Gewinde verschraubt (siehe Abbildung 23). Dabei wurde darauf geachtet, dass ausreichend Schrauben genutzt werden, dass im Falle von Vibrationen oder Unwuchten die Tischplatte nicht anfängt zu schwingen.

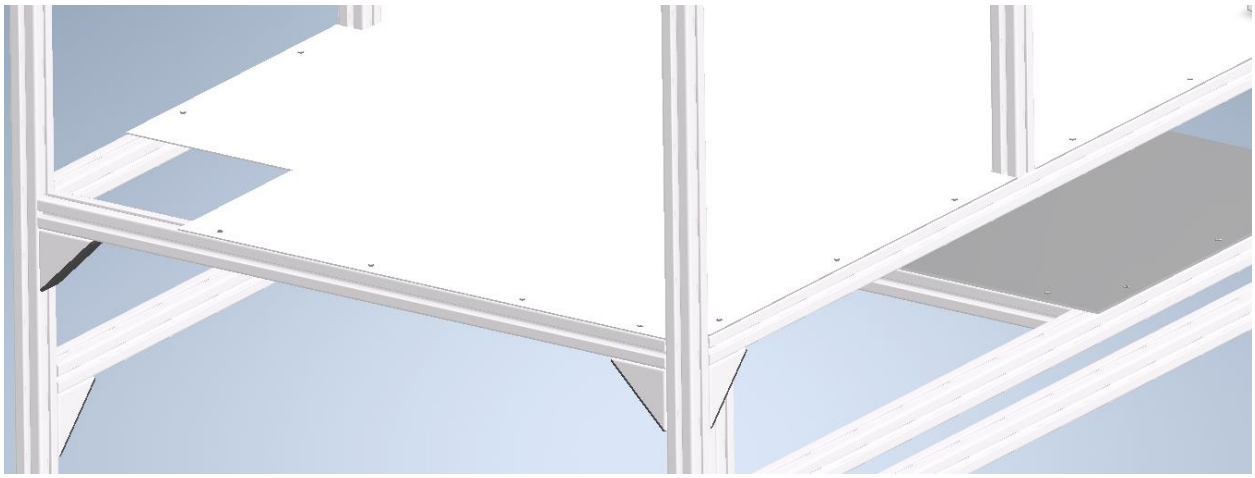


Abbildung 23: Verschraubung der Tischplatte

4.2.2 Integration der Komponenten

Gaseinlass und Brennstoffzelle

In diesem Kapitel geht es um die Verteilung der Komponenten. Dabei wird sich an dem System Composer des Projektes BeHyPSy orientiert, da die Projektmitarbeiter sich schon umfassende Gedanken mit den einzelnen Verbindungen gemacht und diese dargestellt haben.

Angefangen bei der ersten Box in der Abbildung 24, im Bereich der Brennstoffzelle, finden wir eine typische Wasserstoffflasche, mit einem Volumen von 20 Litern. Die Wasserstoffflasche befindet sich in einem Ausschnitt am Blech innerhalb des Versuchsstandes und wird von einem Gurt (10) an der Tragstruktur befestigt. An der Wasserstoffflasche ist ein Druckregulierer (1) für den Wasserstoff angebracht. An dem Druckregulierer ist ein Schlauch angebunden, der zu einem Sicherheitsventil führt (2), der den Druck von dem Gas begrenzt.

Ein Rohr führt den Wasserstoff dann weiter zu dem Kontrollventil (3), der den Durchfluss des Gases reguliert. Der Massestromsensor (4), der nach dem Kontrollventil kommt, gibt den Massestrom pro Zeiteinheit an, um den optimalen Durchfluss einstellen zu können. Ein T-Stück verbindet den Massestromsensor mit einem Ablassventil (5), dass zusätzlich überschüssigen Druck ablassen kann. Das Gas strömt danach weiter und der Druck wird von einem Drucksensor (6) und die Temperatur von einem Temperatursensor (7) aufgenommen und führt danach in die PEM-Brennstoffzelle (8). Gekühlt wird die Brennstoffzelle mit aktiven Luftkühlern, die die Luft durch Luftkanäle (9) leiten, um eine laminare Strömung zu erzeugen. Die Kabel können dann an

dem Kabelkanal (11) zur Klemmleiste oder anderen Komponenten hingeführt werden, ohne dass durch lose Kabel Stolpergefahren oder Unordnung entsteht.

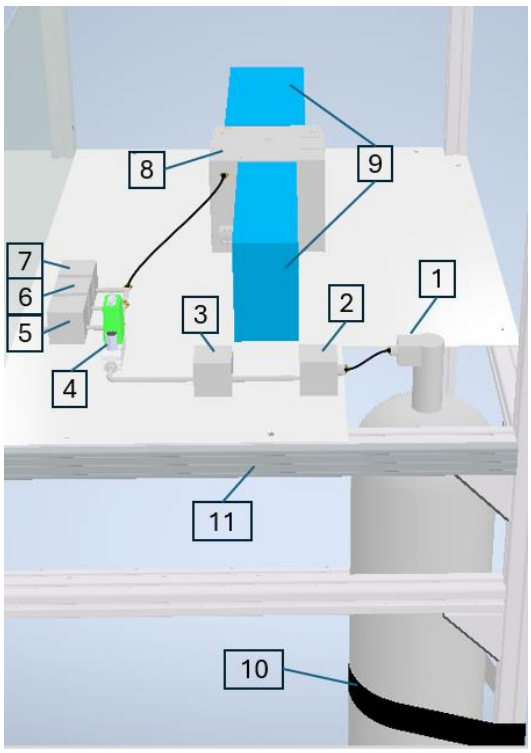


Abbildung 24: Komponentenanordnung "MI" und "BSZ"

Elektrische Komponenten

Der nächste Bereich (Abbildung 25) ist für Komponenten des Energiemanagements und den des elektrischen Motors gedacht. Die Energie wird in die Batterie (1) geleitet und gespeichert. Von der Batterie wird die Energie in den DC/DC Wandler und den Dioden geleitet (10 und 11). Die Netzteile (9) sind längs am Tisch angeordnet, damit die Mitarbeiter da leicht rankommen und nötige Einstellungen vornehmen können. Zwischen den Komponenten wird immer genügen Platz (3) für das Kabelmanagement gelassen, um die Kabel geordnet und übersichtlich anbringen zu können. Die Motorcontroller (2) sind auch in einer Reihe angebracht, da diese an den DC/DC Wandler angeschlossen werden und dementsprechend gegenüber von diesem liegen. Diese führen dann zum elektrischen Motor (5) der an einer Halterung (4) angebracht ist. Die Halterung ist eine provisorische Lösung, da der Motor ohne solche Vorrichtung geliefert wird. Der Motor ist an einer Bremse (6) angebracht, die die Lasten simulieren soll und überschüssige Energie aufnimmt. Gesteuert wird dies von der elektronischen Last (7). Um ein einfaches Kabelmanagement zu ermöglichen, wird in einer angenehmen Arbeitshöhe, an einer DIN Schiene eine 50-polige Klemmleiste (8) angebracht, an denen die Komponenten dann angeschlossen werden können.

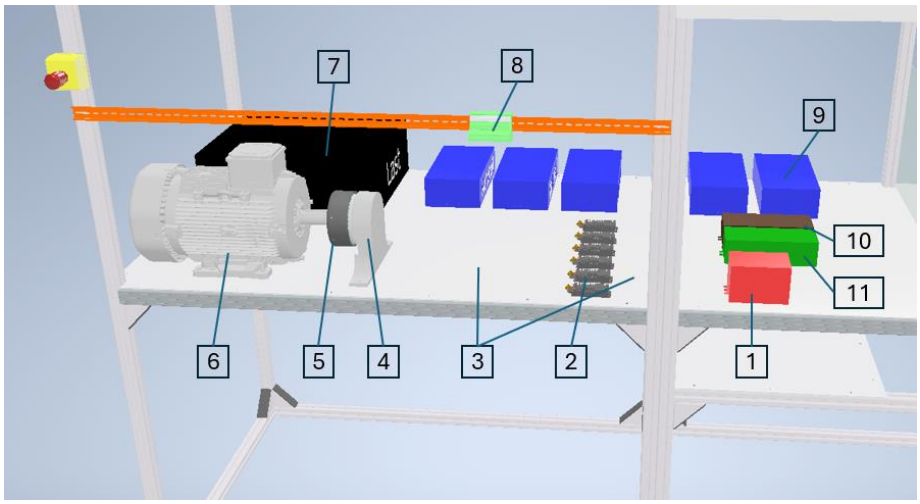


Abbildung 25: Komponentenanordnung "EML" und "PM"

Von dieser 50-poligen Klemmleiste verläuft dann ein Kabel zu der Scalexio dSpace Box (Abbildung 26), die sich unter der Arbeitsplatte befindet. Eine Kabelwanne ermöglicht weiteres Kabelmanagement für den Fall, dass eine andere Konfiguration gewählt werden sollte.

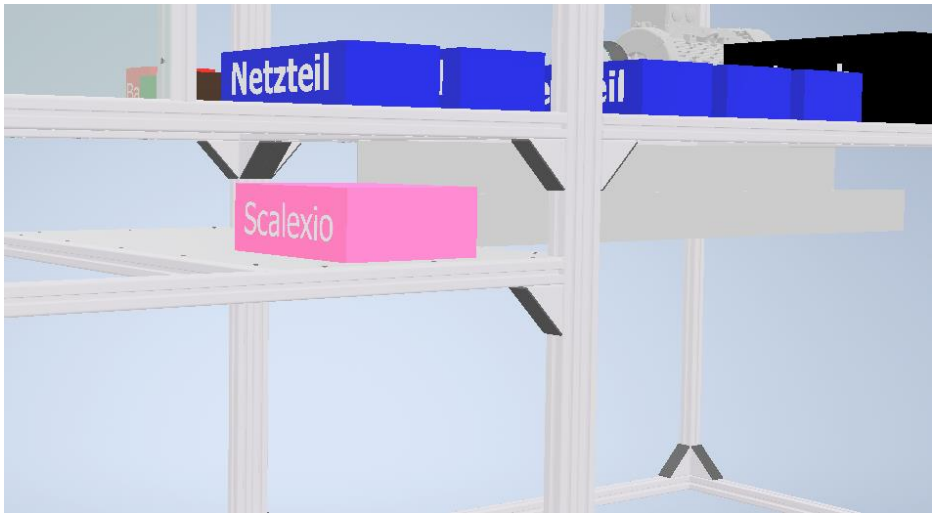


Abbildung 26: Komponentenanordnung "MCS"

Das Sicherheitskonzept sieht zwei Notausschalter vor (Abbildung 27), die sich an dem Teststand befinden müssen. Diese sind auf Augenhöhe bei ca. 1,60m angesetzt, um im Falle eines Notfalls schnell ausgelöst werden zu können. Die Kabel verlaufen wie bei dem Wasserstoffsensor auch an einem Vertikalen Profil entlang und können in den Kabelkanal zur Klemmleiste geführt werden.

Abbildung 27: Notausschalter Positionen

4.2.3 Erweiterungsmöglichkeiten

Da die Konstruktion aus Item Profilen besteht, gibt es nahezu grenzenlose Möglichkeiten, wie man die Struktur auslegen kann. Die Grundstruktur wurde in vorherigen Kapiteln so weit beschrieben, nun soll in diesem Kapitel gezeigt werden, warum diese Konstruktion gewählt wurde und wie diese angepasst werden kann.

Die erste Erweiterungsmöglichkeit, soll eine Erweiterung der Netzteile zeigen (siehe Abbildung 28 und Abbildung 29). Diese Erweiterung schafft mehr Platz für weitere Komponenten und macht das System kompakter. Die Nähe zu den anderen Netzteilen kann eine Erleichterung bei der Verkabelung und Einstellung der Netzteile ermöglichen.

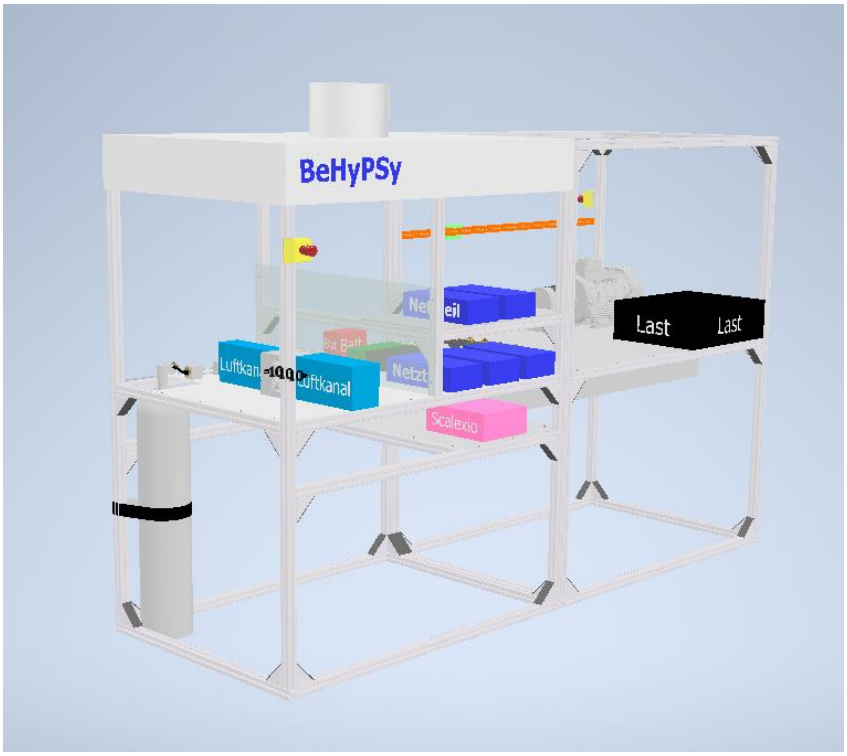


Abbildung 28: Erweiterungsmöglichkeit 1 – Mehrere Netzteile

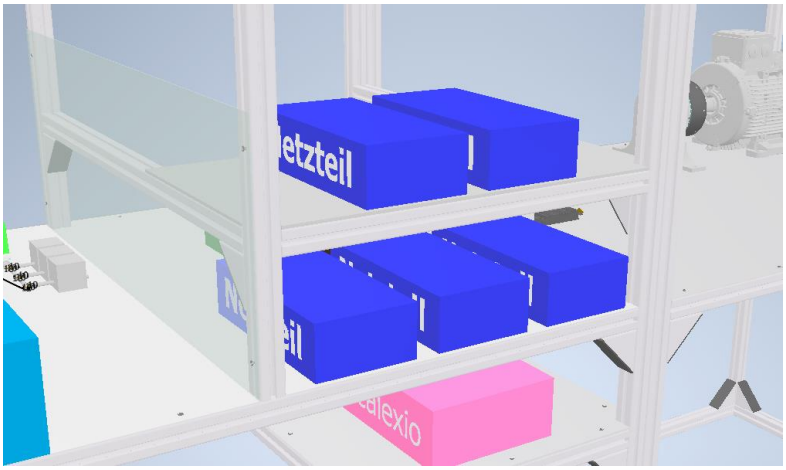


Abbildung 29: Detailansicht der Erweiterungsmöglichkeit 1

Eine weitere Erweiterungsmöglichkeit ist auf der Abbildung 30 zu sehen. Auf der Abbildung ist eine Erweiterung der Struktur zu sehen, mit der 3 weitere Brennstoffzellen und 4 weitere Netzteile in den Versuchsstand integriert werden können. Mit dieser Art der Modularität, erlaubt die Höhe des Teststands eine Integration von bis zu 9 Brennstoffzellen. Das Einzige, was beachtet werden muss ist der Verlauf der dazugehörigen Leitungen und der Anpassung der Struktur mit zusätzlichen vertikalen Streben, da das Gewicht zu hoch werden kann. Auf der Seite der technischen Komponenten bleiben weiterhin viele Möglichkeiten zur Erweiterung offen.

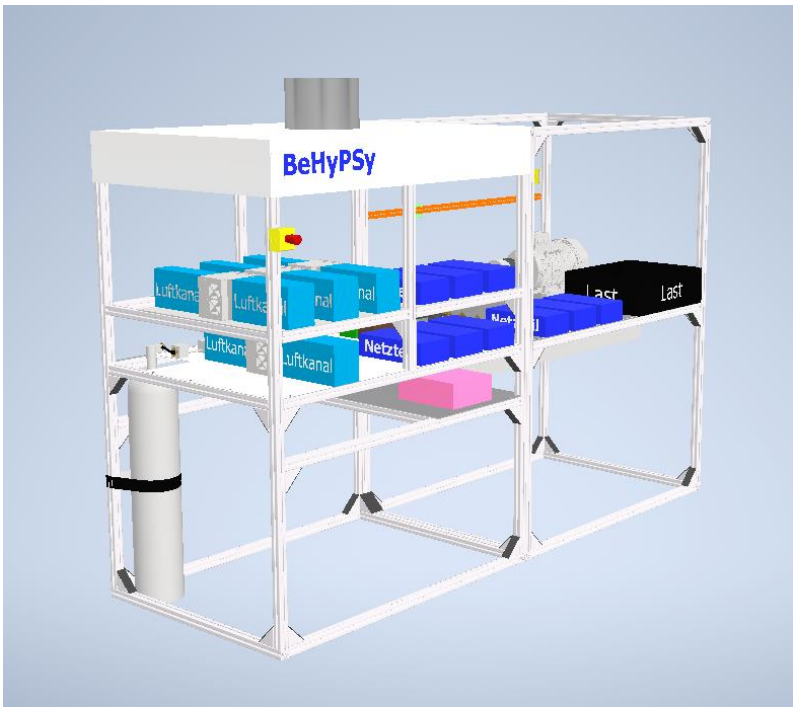


Abbildung 30: Erweiterungsmöglichkeit 2

4.3 Kostenanalyse

In diesem Kapitel wird eine tabellarische Kostenanalyse durchgeführt, die im Anhang 7.7 (Kostenanalyse und Stückliste des Teststands), Tabelle 6 zu finden ist. Dies dient dazu, die finanzielle Machbarkeit des Teststandes zu bewerten, indem die Aufwendungen für die Tragstruktur und weitere Materialien wie Schrauben und Nutensteine detailliert erfasst und mit dem vorgegebenen Budget abgeglichen werden. Die Beschriftung der Komponenten ist dabei die Gleiche wie in der Produktstruktur der Konstruktion, mit dem Unterschied, dass Kopien zusammengefasst sind.

Im vorliegenden Fall belaufen sich die Gesamtkosten auf ca. 2798,51€, während das zur Verfügung stehende Budget 2800€ beträgt. Damit wurde die Budgetäre Obergrenze eingehalten. Da die gesamte Tragstruktur aus

4.4 Erfüllung der Anforderungen

In diesem Kapitel wird untersucht, inwieweit die im Rahmen der detaillierten Anforderungsanalyse definierten Anforderungen durch die Konstruktion und Konzeption des Teststandes erfüllt wurden. Es werden die wichtigsten funktionalen, sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Anforderungen überprüft und bewertet. Ziel ist es, die Umsetzung der Anforderungen tabellarisch darzustellen und mögliche Abweichungen oder Optimierungspotenziale zu identifizieren. Dafür wird eine verkürzte Form der Anforderungsanalyse aus dem Anhang 7.8 (Erfüllung der Anforderungen) verwendet.

In der Spalte Implementierung gibt es drei mögliche Antworten: Ja – die Anforderung wurde im Teststand umgesetzt. In Arbeit – die Anforderung kann im derzeitigen Stand der Entwicklung noch nicht implementiert werden und soll in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden. Nein – die Anforderung konnte nicht in dem Teststand implementiert werden. Es wird sich nur auf die Anforderungen bezogen, die den Status in Arbeit oder Nein haben. Eine Beschreibung der erfüllten Anforderungen, lässt sich in vorherigen Kapiteln finden (siehe Kapitel 3.7.3).

Anforderungen in Arbeit

Leistung (3,6 kW): Der Teststand wird für eine maximale Leistungsauslegung von 3,6 kW konzipiert. Die vollständige Implementierung der entsprechenden Leistungsregelung und Lastsimulation ist noch nicht abgeschlossen.

Validierung numerischer Modelle: Der Teststand soll hybride Antriebssysteme in realitätsnahen Szenarien simulieren, was eine Integration komplexer Prüfverfahren erfordert. Diese Implementierung ist noch in Bearbeitung.

Energiemanagement: Die Verwaltung verschiedener Energiequellen ist ein wesentlicher Bestandteil der Systemfunktionalität. Die Implementierung der Systeme zur Energieverteilung und -steuerung ist aktuell in Arbeit.

Lade- und Entladeszenarien: Zur Analyse der Batterieleistung unter verschiedenen Bedingungen wird die Simulation von Lade- und Entladeszenarien entwickelt. Diese Anforderung ist noch nicht integriert.

Dynamische Lastsimulation: Verschiedene Betriebsmodi wie Taxi, Take-off und Cruise erfordern eine dynamische Anpassung der Lasten. Die Implementierung befindet sich im Fortschritt.

Mess- und Auswertungssysteme: Die Echtzeitüberwachung und -regelung durch Sensorik und Steuerungssysteme ist eine grundlegende Anforderung. Die vollständige Integration dieser Systeme steht noch aus.

Datenmanagement: Die strukturierte Aufnahme und Speicherung von Versuchsdaten sowie deren Versionierung ist eine zentrale Funktion, die aktuell entwickelt wird.

Nicht umgesetzte Anforderungen

Integration in die Systemarchitektur: Die geplante Verknüpfung des Teststandes mit der bestehenden Systemarchitektur (z. B. System Composer und Requirements Toolbox) konnte bislang nicht realisiert werden, da dies den Umfang dieser Arbeit überschritten hätte.

5 Diskussion und Ausblick

Das Kapitel Diskussion und Ausblick analysiert die Ergebnisse der Kapitel und bewertet deren Relevanz und Tragweite im Kontext der Zielsetzung der Arbeit. Es werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst, reflektiert und überprüft. Darüber hinaus werden Verbesserungsmöglichkeiten und die Perspektiven für die Weiterentwicklung gezeigt.

5.1 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn wurden die theoretischen Grundlagen für die Wasserstofftechnologie in der Luftfahrt sowie die spezifischen Anforderungen an einen hybridelektrischen Antrieb erarbeitet. Aufbauend darauf wurde eine detaillierte Anforderungsanalyse durchgeführt, die die Grundlage für die Konzeption des Teststandes bildete. Mithilfe eines morphologischen Kastens wurden mehrere Konzeptvarianten entwickelt, bewertet und schließlich ein optimales Design ausgewählt. Die Konstruktion des Teststandes wurde unter Berücksichtigung funktionaler, sicherheitstechnischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte detailliert ausgearbeitet. Die dabei entstandene CAD-Modellierung und Kostenanalyse bestätigen die Machbarkeit des Projekts innerhalb des gegebenen Budgets von 2800 €.

Die Überprüfung der Anforderungen zeigt, dass die wesentlichen Ziele der Arbeit erreicht wurden. Der Teststand ist modular aufgebaut und erlaubt eine flexible Integration und Anpassung von Komponenten. Durch die robuste Tragstruktur aus Aluminiumprofilen, das umfassende Sicherheitskonzept mit Notausschaltung und Sensorik sowie das Kabel- und Verrohrungsmanagement wird ein sicherer und effizienter Betrieb gewährleistet. Gleichzeitig konnte durch die Planung sichergestellt werden, dass die Kosten innerhalb der Budgetgrenzen bleiben.

Dennoch wurden nicht alle geplanten Funktionen vollständig umgesetzt. Die Integration des Teststandes in die Systemarchitektur, wie beispielsweise den System Composer und die Requirements Toolbox, konnte aufgrund des Umfangs, nicht realisiert werden. Diese Anforderung bietet eine zentrale Grundlage für zukünftige Arbeiten, da sie eine bessere Vernetzung zwischen digitaler Planung und physischer Umsetzung ermöglichen würde. Ebenso besteht Optimierungspotenzial bei der Anordnung der Kabel und Verrohrungen, um die Übersichtlichkeit und Wartungsfreundlichkeit weiter zu verbessern.

Im Ausblick auf zukünftige Arbeiten bieten sich mehrere Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung des Teststandes. Neben der Integration in die Systemarchitektur könnte die Erweiterung der Funktionen, wie die Anordnung mehrerer Brennstoffzellen oder eine etwa die Simulation dynamischer Lastszenarien, den Nutzen des Teststandes erheblich steigern. Darüber hinaus könnten die Optimierung der Sicherheitsmechanismen und die Verfeinerung des Energiemanagements die Effizienz und Zuverlässigkeit des Systems weiter verbessern.

6 Literaturverzeichnis

[1] A. Baroutaji, et al: Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019

[2] Airbus: World class alternative propulsion testing starts here, letzter Zugriff am 22.09.2024, https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-03-world-class-alternative-propulsion-testing-starts-here

[3] Airbus: Airbus reveals hydrogen powered zero emission engine, letzter Zugriff am 22.09.2024, https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-reveals-hydrogen-powered-zero-emission-engine

[4] B. Wang, et al: Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles, Progress in Aerospace Sciences, 2020

[5] C. Acar, I. Dincer: The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming, International Journal of Hydrogen Energy, 2020

[6] C. Grobler, et al: Marginal climate and air quality costs of aviation emissions, IOP Publishing Ltd., 2019

[7] DLR Institut für Thermodynamik: BALIS, letzter Zugriff am 01.09.2024, https://www.dlr.de/de/tt/forschung-transfer/forschungsinfrastruktur/testeinrichtungen/balis

[8] E. Bazldost: Voruntersuchung zur modelbasierten Entwicklung eines hybridelektrischen Versuchstandes, M.Eng, Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, TI, HAW, Hamburg, 2023

[9] EBZ-Dresden: Test rig, letzter Zugriff am 22.09.2024, https://www.ebz-dresden.de/fuel-cells/test-rigs/

[10] HAW Hamburg: BeHyPSy, letzter Zugriff am 02.09.2024, https://www.haw-hamburg.de/forschung/forschungsprojekte-detail/project/project/show/behypsy/

[11] Item: Geschlossene Flächen - Aluminiumbleche, letzter Zugriff am 04.11.2024, https://www.item24.com/de-de/blech-al-2mm-blank-nicht-entfettet-42827?material=AlMg1&category=flaechen%2Fflaechenelemente#configuration-mobile

[12] Item: Parallel Fastener 8, letzter Zugriff am 04.11.2024, https://www.item24.com/en/de/parallel-fastener-8-47658?category=profile-technology%2Ffastening-technology

[13] Item: Nutenstein St, letzter Zugriff am 04.11.2024, https://www.item24.com/en-de/t-slot-nut-v-8-st-m5-bright-zinc-plated-48054?type=BR8&thread=5&category=profile-technology%2Ft-slot-nuts

[14] Item: Winkelsatz, letzter Zugriff am 04.11.2024, https://www.item24.com/de-de/winkelsatz-8-80x80-41132?type=BR8&outerDimensions=8080&category=profiltechnik#technical-data

[15] Item: Profil 8 40x40, letzter Zugriff am 04.11.2024, https://www.item24.com/de-de/profil-8-40x40-natur-45265?supplyUnit=STUECK&model=3&category=profiltechnik%2Fkonstruktionsprofile#description

[16] Item: Geschlossene Flächen - Polypropylen (PP), letzter Zugriff am 04.11.2024, https://www.item24.com/de-de/stegplatte-4-5mm-pp-grau-65839?material=PP&category=flaechen%2Fflaechenelemente

[17] J. Larmine and A. Dicks: Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons, 2003

[18] K. Jiao: Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells, Nature, 2021

[19] L. Baum, C. Cosse, Zukunftsfähige Antriebskonzepte für Luftfahrtzeuge - vom "fossilen" zum "grünen" Fliegen, Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz, 2001

[20] R. Gomeringer, et al: Tabellenbuch Metall, Verlag Europa-Lehrmittel, 2014

[21] S. H. L. Yim, et al: Global, regional and local health impacts of civil avitaion emissions, IOP Publishing Ltd., 2015

[22] S. Sahoo, et al: A Review of Concepts, Benefits, and Challenges for Future Electrical Propulsion-Based Aircraft, Aerospace, 2020

[23] TÜV Nord: Wasserstoff-Brennstoffzelle, letzter Zugriff am 20.09.2024, https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-brennstoff-zelle/#:~:text=Zur%20Verstromung%20von%20Wasserstoff%20(H,eine%20Wasserstoff%2DSauerstoff%2DBrennstoffzelle.

[24] V. Bolat: Entwurf eines Prüfstands zum Betrieb eines Brennstoffzellen-Stacks, B.Eng, Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, TI, HAW, Hamburg, 2024

[25] Y. Xie, et al: Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies, Chinese Journal of Aeronautics, 2021

[26] ZeroAvia: Meet the superstack, letzter Zugriff am 22.09.2024, https://zeroavia.com/blogs/meet-the-superstack/

7 Anhang

7.1 Genaue Aufgabenstellung

Aufgabenstellung

für die Bachelorarbeit von Herr Daniel Hanke (Matrikelnummer: 2361366)

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Kay Kochan
Zweitprüfer: Prof. Dr.-ing. Thomas Netzel

Thema: Konstruktion eines skalierten Teststandes für hybridelektrische Luftfahrtantriebe

Mit dem Einsatz von Wasserstoff als Energieträger in zukünftigen hybridelektrischen Flugzeugen sollen die Ziele der Luftfahrt zur Reduktion der CO_2-Emissionen erreicht werden. Bis zum kommerziellen Erfolg solcher hybridelektrischer Flugzeuge sind jedoch noch erhebliche technologische Fortschritte zu erzielen.

Im Verbundforschungsprojekt BeHyPSy beschäftigt sich die HAW Hamburg mit der modellbasierten Systementwicklung eines hybridelektrischen Antriebstrangs für ein Flugzeug der Ultraleichtklasse (MTOW < 600kg). Das Ziel des Verbundvorhabens ist es dabei der Einsatz luftgekühlter, statt wassergekühlter, PEM – Brennstoffzellen (Proton Exchange Membran) für Leistungen bis 50 kW zu erforschen. Die Brennstoffzellen sollen dabei in einer Multistrangarchitektur mit Batterien, Leistungselektronik und einem Motor kombiniert werden. Neben den modellbasierten Untersuchungen wird die HAW Hamburg im Laufe des Projektes einen skalierten Versuchsstand aufbauen, um die numerischen Modelle und Methoden zu validieren. Ein erstes Grobkonzept wurde im Rahmen des Projektantrages BeHyPSy erstellt (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Bachelorarbeit hat das Ziel, einen skallierten Teststand für hybridelektrische Luftfahrtantriebe an der HAW Hamburg zu entwerfen und zu konstruieren. Der Fokus liegt auf der Dimensionierung, der Berücksichtigung von Sicherheitsanforderungen, der Kostenoptimierung sowie der Integration in die bestehende Systemarchitektur. Dafür sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Dimensionen und geometrsiche Anordnung ist am Besten für den Versuchsstand?
- Wie kann man die Anforderungen aus dem Arbeitsschutz und dem Laborbetrieb erfüllen?
- Wie hält man das vorgegebene Projektbudget ein? Welche Kosten fallen auf die Tragstruktur und weitere Elemente ohne Motor, Brennstoffzelle und Sensorik an?
- Wie kann man das Digital Mockup des Versuchstandes mit den bereits vorhandenen Systemarchitektur (System Composer) und der Anforderungsliste (Requierments Toolbox) verknüpfen? Wo ist eine Verknüpfung sinnvoll? Wie kann dies gelöst werden? Welche Größen können automatisiert aus CAD in den System Composer zurück gespielt werden?

- Wie kann der Versuchstand so konstruiert werden, dass verschiedene Varianten leicht abbildbar sind?

7.2 Anforderungsanalyse des Teststands

Tabelle 5: Anforderungsanalyse des Teststands

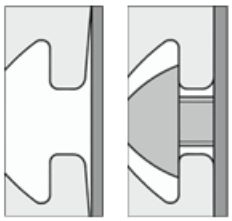
Nummer	Kategorie	Titel	Beschreibung	Zahlenwert	Klassifizierung
1.1	Funktionale Anforderungen	Leistung	Der Teststand muss für Leistungen bis zu 3,6 kW ausgelegt sein	3,6 kW	Muss
1.2	Funktionale Anforderungen	Validierung numerischer Modelle	Der Teststand muss in der Lage sein, hybride Antriebssysteme in realitätsnaher Umgebung zu simuleren und zu testen	N/A	Muss
1.3	Funktionale Anforderungen	Modularität	Der Teststand muss Modular aufgebaut sein, um die flexible Integration und den Austausch von Komponenten zu ermöglichen	N/A	Muss
1.4	Funktionale Anforderungen	Energiemanagement	Der Teststand muss verscheidene Energiequellen effizient verwalten	N/A	Muss
1.5	Funktionale Anforderungen	Lade- und Entladeszenarien	Der Teststand sollte Lade- und Entladeszenarien der Batterie und Brenstoffzelle simulieren, um die Leistung unter verschiedenen Betriebsbediungen zu testen	N/A	Soll
1.6	Funktionale Anforderungen	Kühlungs- und Wärmemanagement	Der Teststand muss entsprechende Systeme für die Kühlung des Systems, besitzen.	N/A	Muss
1.7	Funktionale Anforderungen	Kühlkanäle	Der Teststand muss Kühlkanäle für die Lüftung der Brennstoffzelle haben.	N/A	Muss
1.8	Funktionale Anforderungen	Dynamische Lastsimulation	Der Teststand soll in der Lage sein verschiedene Lastszenarien zu simulieren (Taxi, Take-off, Cruise...), um die Leistungsfähigkeit zu prüfen	N/A	Soll
1.9	Funktionale Anforderungen	Komponentenauswahl	Der Teststand muss mit Komponenten ausgestatten sein, die alle nötgen Anforderungen erfüllen	N/A	Muss
1.10	Funktionale Anforderungen	Mess- und Auswertungssysteme	Der Teststand muss mit Sensorik ausgestattet sein, um wichtige Betriebsparamter in Echtzeit zu erfassen. Regelungssysteme - gezielte Ansteuerung der Komponenten	N/A	Muss
1.11	Funktionale Anforderungen	Mobilität	Der Teststand soll im abgeschraubten Zustand transportierfähig sein	N/A	Should
1.12	Funktionale Anforderungen	Zugänglichkeit	Der Teststand muss so konstruiert sein, dass alle Komponenten leicht zugänglich seind und angepast oder ausgetauscht werden können	N/A	Muss
1.13	Funktionale Anforderungen	Intergration in die Systemarchitektur	Der Teststand soll in die bestehende Systemarchitektur (System Composer, Requirements Toolbox) integriert werden	N/A	Soll

1.14	Funktionale Anforderungen	Kabelmanagement	Der Teststand muss ein leichtes Kabelmanagement ermöglichen	N/A	Muss
1.15	Funktionale Anforderungen	Stabilitöt	Der Teststand muss so konstruiert sein, dass sich keine Teile während des Betriebs lösen und eine Stabile Struktur zu jeder Zeit gegeben ist	N/A	Muss
1.16	Funktionale Anforderungen	Aufbau	Der Teststand muss leicht montierbar sein und die Zeichnungen müssen verständlich sein	N/A	Muss
1.17	Funktionale Anforderungen	Datenmanagement	Der Teststand muss die Versuchsdaten und Versionen systematisch aufnehmen und abspeichern können		Muss
2.1	Geometrische Anforderungen	Maße	Der Teststand muss in seinen Ab-maßen, die Einschränkungen des Labors nicht überschreiten	L x B x H = 3000 mm x 1020 mm x 2100 mm	Muss
3.1	Sicherheitsanforderungen	Wasserstoffmanagement	Der Teststand muss spezielle Anforderungen and Handhabung und Lagerung von Wasserstoff haben	Überwachung des Drucks, Leckagen und Temperatur	Muss
3.2	Sicherheitsanforderungen	Notabschaltung	Der Teststand muss ein Notauschaltungssystem haben, dass alle relevanten Systeme sofort abschaltet.	Ein Not-Aus-Schalter an der Konsole und eins am Teststand	Muss
3.3	Sicherheitsanforderungen	Brand- und Explosionsschutz	Der Teststand muss über Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen verfügen	Entlüftung und Abführung von Wasserstoff	Muss
3.4	Sicherheitsanforderungen	Sicherheitssenorik	Der Teststand muss mit Sensoren ausgestattet sein, um die Wasserstoffkonzentration und Temperatur zu messen	N/A	Muss
3.5	Sicherheitsanforderungen	Arbeitsschutz	Der Teststand muss so konstruiert sein, dass beim Betrieb keine Verletzungen entstehen	Rotierende Teile und Scharfe Kanten	Muss
3.6	Sicherheitsanforderungen	Elektrische Gefahren	Der Teststand muss Schutz vor elektrischen Gefahren gewährleisten	N/A	Muss
3.7	Sicherheitsanforderungen	Überhitzung	Der Teststand muss ausreichende Kühlmöglichkeiten haben, um nicht zu überhitzen	N/A	Muss
4.1	Wirtschaftliche Anforderungen	Kostenoptimierung	Der Teststand muss innerhalb des vorgegebenen Budgets realisiert werden	2.800 €	Muss

7.3 Datenblatt zum Item 8 40x40 Profil

item

Technische Daten zu Profile



Strangpressprofil
Kurzzeichen Al Mg Si 0,5 F 25
Werkstoffnummer 3.3206.72
Zustand: warmausgehärtet

Mechanische Werte (gelten nur in Pressrichtung)

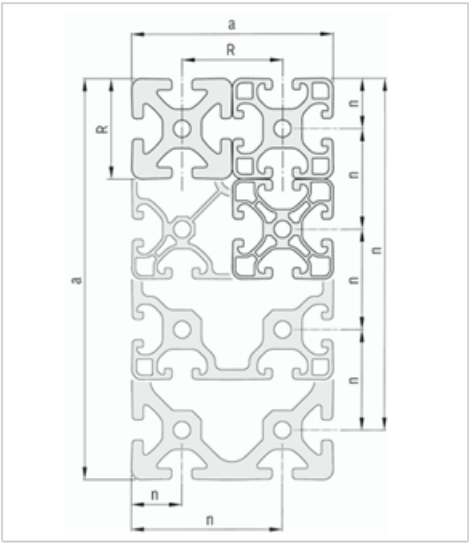
Zugfestigkeit Rm	min. 245 N/mm²
Fließgrenze Rp0,2	min. 195 N/mm²
Dichte	2,7 kg/dm³
Bruchdehnung A_5	min.10 %
Bruchdehnung A_{10}	min. 8 %
Linearer Ausdehnungskoeffizient	23,6x10⁻⁶ 1/K
Elastizitätsmodul E	ca. 70.000 N/mm²
Schubmodul G	ca. 25.000 N/mm²
Härte	ca. 75 HB - 2,5/187,5

Toleranzen
Formabweichungen wie Geradheits- und Ebenheitstoleranz nach DIN EN 12020 Teil 2.
Nicht zugeschnittene Profile weisen fertigungsbedingte Überlängen auf, die bis zu 100 mm betragen können.

Oberfläche
Die Aluminiumprofile sind naturfarben (C0) oder schwarz (C35) eloxiert und damit dauerhaft kratzfest und korrosionsgeschützt. Oberfläche mattgebeizt (E 6), anodisiert und verdichtet. Mindestschichtdicke 10 µm, Schichthärte 250 - 350 HV. Durch die umlaufende harte Eloxalschicht ist der Sägeschnitt besonders gratarm und muss nicht nachbearbeitet werden.

Alle Standardprofile sowie die Profile „leicht" und „E" zeichnen sich durch definierte Auflagepunkte außen am Profil und durch einfallende Nutflanken aus. Diese sorgen für eine eindeutige, kippsichere Anbindung weiterer Komponenten. Durch die Vorspannung der Nutflanken im elastischen Bereich des Materials erzeugt die Befestigungsschraube eine schwingungssichere Verbindung.

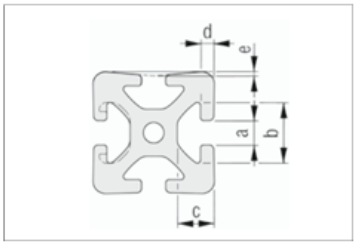
Nutlage, Außen- und Rastermaße



Rastermaß R [mm]				
5	6	8	10	12
20	30	40	50	60

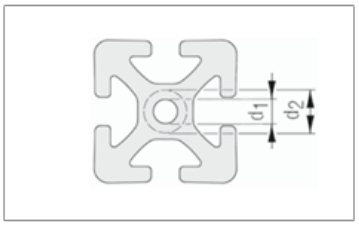
Profilkantenlänge a [mm]		Toleranzen von Außenmaß a bzw. Nutlage n ± [mm]
über	bis	
0	10	0,10
10	20	0,15
20	40	0,20
40	60	0,30
60	80	0,40
80	100	0,45
100	120	0,50
120	160	0,60
160	240	0,80
240	320	1,50

Nutmaße

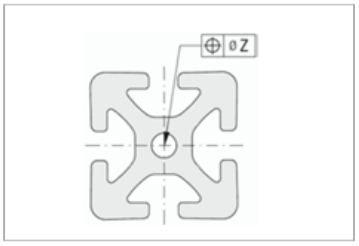


	5	6	8	10	12
a	5,0 $^{+0,3}$	6,2 $^{+0,3}$	8,0 $^{+0,4}$	10,0 $^{+0,4}$	12,0 $^{+0,4}$
b	11,5 $^{+0,3}$	16,3 $^{+0,3}$	20,0 $^{+0,4}$	25 ,0 $^{+0,4}$	30,0 $^{+0,3}$
c	6,35 $^{\pm 0,15}$	9,75 $^{+0,2}$	12,25 $^{+0,3}$	15,5 $^{+0,3}$	18,3 $^{+0,3}$
d	1,8 $^{\pm 0,1}$	3,0 $_{-0,25}$	4,5 $^{+0,3}$	5,3 $^{+0,3}$	6,6 $^{+0,3}$
e	0,15 $^{\pm 0,1}$	0,15 $^{\pm 0,1}$	0,2 $^{\pm 0,1}$	0,25 $^{\pm 0,1}$	0,3 $^{\pm 0,1}$

Kernbohrungen



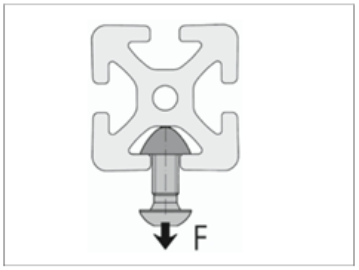
	5	6	8	10	12
Bohrung d_1	Ø 4,3$^{\pm 0,1}$ mm für M5	Ø 5$^{+0,2}$ mm für M6	Ø 6,8$_{0,2}$ mm für M8	Ø 8,5$^{+0,1}_{-0,2}$ mm für M10	Ø 10,2$_{0,2}$ mm für M12
aufbohrbar bis max. d_2	Ø 6 mm bzw. M6	Ø 8 mm bzw. M8	Ø 13 mm bzw. M12 (nicht Profile E)	Ø 16 mm bzw. M16 (nicht Profile E)	Ø 20 mm bzw. M20



Profile mit offenen Nuten		geschlossenen Nuten	
Anzahl der Bohrungen	z [mm]	Anzahl der Bohrungen	z [mm]
1	0,4	1	0,6
2 bis 4	0,6	> 1	0,8
> 4	0,8		

Die Bohrungspositionstoleranz richtet sich nach der Anzahl der Kernbohrungen und der Profilkontur.

Zugbelastung



Nutform	5	6	8	10	12
normal	500 N	1.750 N	5.000 N	7.000 N	10.000 N
leicht		500 N	2.500 N		5.000 N
E			1.750 N	3.500 N	

Angabe der zulässigen Zugkraft F auf die Nutflanken. Diese Nennlasten beinhalten bereits Sicherheitsfaktoren (S > 2) gegen plastische Deformation.

7.4 Berechnung der Durchbiegung und Biegespannung

Durchbiegung d ≈ 0,34 mm

Berechnung der Durchbiegung

Gewichtskraft:

$$F_g = m \cdot l \cdot g = 2,47\,\frac{kg}{m} \cdot 1.340\,mm \cdot 9,81\,\frac{m}{s^2} \approx 32,47\,N$$

Durchbiegung durch Eigengewicht:

$$d_g = \frac{F_g \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} = \frac{32,47\,N \cdot (1.340\,mm)^3}{384 \cdot 70.000\,\frac{N}{mm^2} \cdot 13,96\,cm^4 \cdot 10^4} \approx 0,02\,mm$$

Durchbiegung durch die einwirkende Kraft:

$$d_F = \frac{F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} = \frac{500\,N \cdot (1.340\,mm)^3}{384 \cdot 70.000\,\frac{N}{mm^2} \cdot 13,96\,cm^4 \cdot 10^4} \approx 0,32\,mm$$

Gesamtdurchbiegung:

$$d = d_g + d_F \approx 0,02\,mm + 0,32\,mm$$
$$d \approx 0,34\,mm$$

Abbildung 31: Berechnung der Durchbiegung bei einer Länge von 1340mm und einer Last von 500N

Biegespannung σ ≈ 8 N/mm²

Die resultierende Biegespannung von 8 N/mm² ist kleiner als die Fließgrenze von 195 N/mm² für dieses Profil, so dass es bei dieser Belastung nicht zu einer dauerhaften Verformung kommt.

Berechnung der Biegespannung

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{12 \cdot W} = \frac{500\,N \cdot 1.340\,mm}{12 \cdot 6,98\,cm^3} \approx 8\,N/mm^2$$

Abbildung 32: Berechnung der Biegespannung bei einer Länge von 1340mm und einer Last von 500N

Durchbiegung d ≈ 0,07 mm

Berechnung der Durchbiegung

Gewichtskraft:

$$F_g = m \cdot l \cdot g = 2,47\,\frac{kg}{m} \cdot 780\,mm \cdot 9,81\,\frac{m}{s^2} \approx 18,9\,N$$

Durchbiegung durch Eigengewicht:

$$d_g = \frac{F_g \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} = \frac{18,9\,N \cdot (780\,mm)^3}{384 \cdot 70.000\,\frac{N}{mm^2} \cdot 13,96\,cm^4 \cdot 10^4} \approx 0\,mm$$

Durchbiegung durch die einwirkende Kraft:

$$d_F = \frac{F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} = \frac{500\,N \cdot (780\,mm)^3}{384 \cdot 70.000\,\frac{N}{mm^2} \cdot 13,96\,cm^4 \cdot 10^4} \approx 0,06\,mm$$

Gesamtdurchbiegung:

$$d = d_g + d_F \approx 0\,mm + 0,06\,mm$$
$$d \approx 0,07\,mm$$

Abbildung 33: Berechnung der Durchbiegung bei einer Länge von 780mm und einer Last von 500N

Biegespannung σ ≈ 4,66 N/mm²

✓ Die resultierende Biegespannung von 4,66 N/mm² ist kleiner als die Fließgrenze von 195 N/mm² für dieses Profil, so dass es bei dieser Belastung nicht zu einer dauerhaften Verformung kommt.

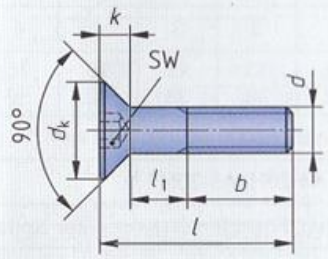
Berechnung der Biegespannung

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{12 \cdot W} = \frac{500\,N \cdot 780\,mm}{12 \cdot 6,98\,cm^3} \approx 4,66\,N/mm^2$$

Abbildung 34: Berechnung der Biegespannung bei einer Länge von 780mm und einer Last von 500N

7.5 Senkkopfschrauben Tabellenbuch

Senkschrauben mit Innensechskant vgl. DIN EN ISO 10642 (2013-04), Ersatz für DIN 7991



Gewinde *d*	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20
SW d_k *k*	2 5,5 1,9	2,5 7,5 2,5	3 9,4 3,1	4 11,3 3,7	5 15,2 5	6 19,2 6,2	8 23,1 7,4	10 29 8,8	12 36 10,2
b für *l*	18 ≥ 30	20 ≥ 30	22 ≥ 35	24 ≥ 40	28 ≥ 50	32 ≥ 55	36 ≥ 65	44 ≥ 80	52 100
l_1 für *l*	1,5 ≤ 25	2,1 ≤ 25	2,4 ≤ 30	3 ≤ 35	3,8 ≤ 45	4,5 ≤ 50	5,3 ≤ 60	6 ≤ 70	7,5 ≤ 90
l von bis	8 30	8 40	8 50	8 60	10 80	12 100	20 100	30 100	35 100
Festigkeitskl.	8.8, 10.9, 12.9								
Nennlängen *l*	8, 10, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 80, 90, 100 mm								
⇒	**Senkschraube ISO 10642 – M5 x 30 – 8.8:** *d* = M5, *l* = 30 mm, Festigkeitsklasse 8.8								

Produktklasse A (Seite 212)

Abbildung 35: Dimensionierung der Senkkopfschraube aus dem Tabellenbuch [20]

7.6 Technische Zeichnungen der Tragstruktur

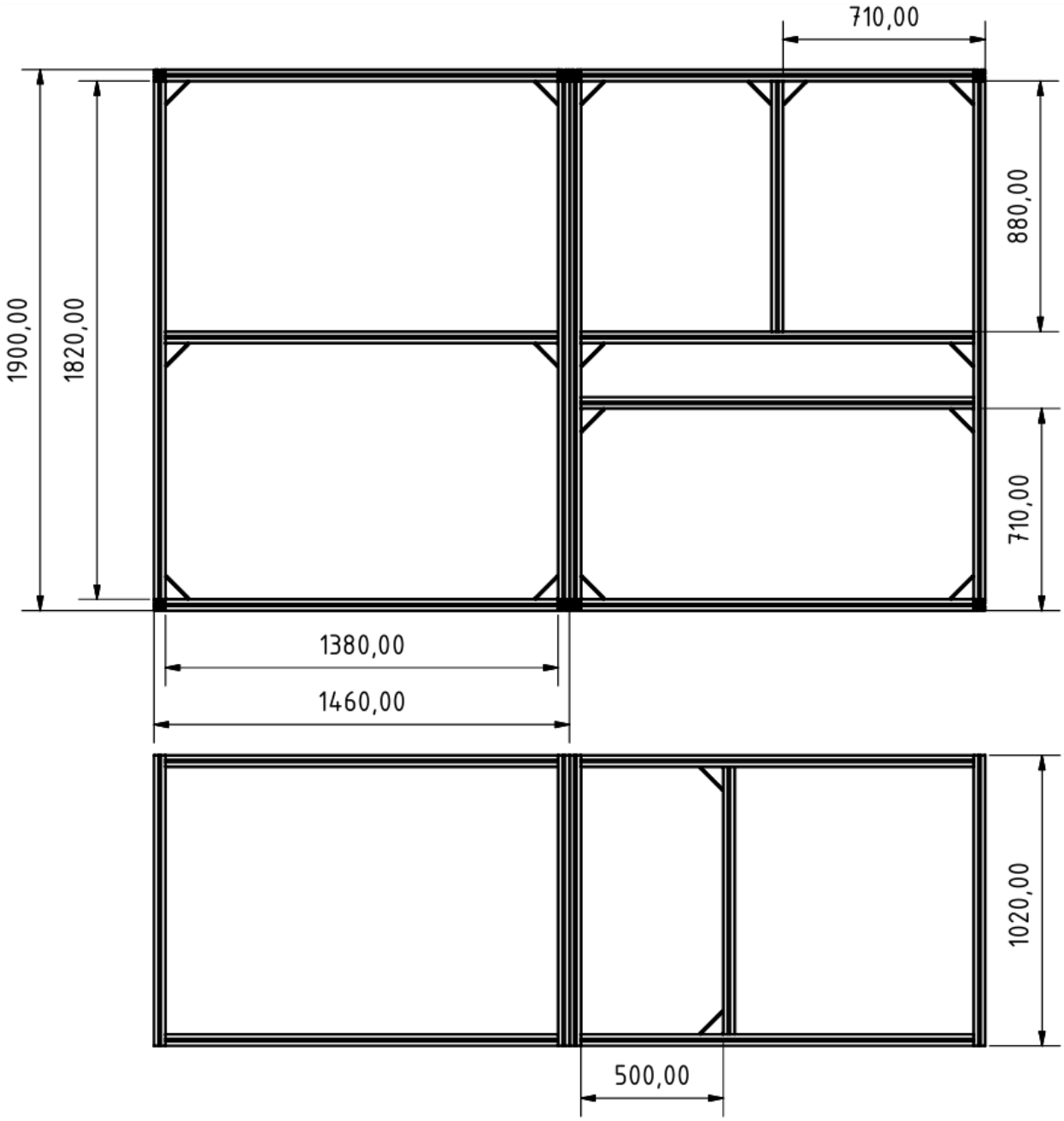


Abbildung 36: Technische Zeichnung der Tragstruktur

7.7 Kostenanalyse und Stückliste des Teststands

Tabelle 6: Kostenanalyse und Stückliste des Teststandes

Produktname	Maße	Stückzahl	Einzelkosten	Gesamtkosten
item_2603_profil-8-40x40-natur-260_1020_high	1020 mm	8	33,04 €	264,32 €
item_2603_profil-8-40x40-natur-260_1380_high	1380 mm	14	43,62 €	610,68 €
item_2603_profil-8-40x40-natur-260_1820_high	1820 mm	8	56,56 €	452,48 €
item_2603_profil-8-40x40-natur-260_780_high	780 mm	2	25,98 €	51,96 €
item_2603_profil-8-40x40-natur-260_940_high	940 mm	6	30,69 €	184,14 €
item_41132_angle-bracket-set-8-80x8__high	80x80 mm	60	9,98 €	598,8 €
item_65445_kabelfuhrungs-profil-8-40_1380_high	1460 mm	2	22,70 €	45,4 €
DIN 7991 - M4x8	M4x8 mm	62	0,03 €	1,612 €
DIN 7991 - M5x8	M5x8 mm	4	0,07 €	0,28 €
Nutenstein 8 M4	M4	62	0,50 €	31 €
Nutenstein 8 M5	M5	4	0,50 €	2 €
Tischplatte_BSZ	1020x1460x2 mm	1	106,51 €	106,51 €
Tischplatte_Elektrik	1020x1460x2 mm	1	106,51 €	106,51 €
Tischplatte_Scalexio	1020x540x2 mm	1	45,97 €	45,97 €
Plexi_Trennwand	1020x400 mm	1	40,11 €	40,11 €
Abdeckung_Front	1028x200x4 mm	1	10,78 €	10,78 €
Abdeckung_Oben_Abluft	1028x1460x4 mm	1	42,40 €	42,4 €

Abdeckung_Seite	1460x200x4 mm	2	12,76 €	25,52 €
Abluft_Rohr	⌀300x50x2 mm	1	N/A	N/A
Befestigung_Notaus	72x80 mm	1	N/A	N/A
Notaus_Eaton	72x80 mm	2	79,02 €	158,04 €
Kabelwanne	1460 mm	1	20 €	20 €
Gesamtkosten				**2798,51 €**

7.8 Erfüllung der Anforderungen

Tabelle 7: Erfüllung der Anforderungen

Nummer	Titel	Beschreibung	Klassifizierung	Implementierung
1.1	Leistung	Der Teststand muss für Leistungen bis zu 3,6 kW ausgelegt sein	Muss	In Arbeit
1.2	Validierung numerischer Modelle	Der Teststand muss in der Lage sein, hybride Antriebssysteme in realitätsnaher Umgebung zu simuleren und zu testen	Muss	In Arbeit
1.3	Modularität	Der Teststand muss Modular aufgebaut sein, um die flexible Integration und den Austausch von Komponenten zu ermöglichen	Muss	Ja
1.4	Energiemanagement	Der Teststand muss verscheidene Energiequellen effizient verwalten	Muss	In Arbeit
1.5	Lade- und Entladeszenarien	Der Teststand sollte Lade- und Entladeszenarien der Batterie und Brenstoffzelle simulieren, um die Leistung unter verschiedenen Betriebsbediungen zu testen	Soll	In Arbeit
1.6	Kühlungs- und Wärmemanagement	Der Teststand muss entsprechende Systeme für die Kühlung des Systems, besitzen.	Muss	Ja
1.7	Kühlkanäle	Der Teststand muss Kühlkanäle für die Lüftung der Brennstoffzelle haben.	Muss	Ja
1.8	Dynamische Lastsimulation	Der Teststand soll in der Lage sein verschiedene Lastszenarien zu simulieren (Taxi, Take-off, Cruise...), um die Leistungsfähigkeit zu prüfen	Soll	In Arbeit
1.9	Komponentenauswahl	Der Teststand muss mit Komponenten ausgestatten sein, die alle nötgen Anforderungen erfüllen	Muss	Ja
1.10	Mess- und Auswertungssysteme	Der Teststand muss mit Sensorik ausgestattet sein, um wichtige Betriebsparamter in Echtzeit zu erfassen. Regelungssysteme - gezielte Ansteuerung der Komponenten	Muss	In Arbeit
1.11	Mobilität	Der Teststand soll im abgeschraubten Zustand transportierfähig sein	Should	Ja
1.12	Zugänglichkeit	Der Teststand muss so konstruiert sein, dass alle Komponenten leicht zugänglich seind und angepast oder ausgetauscht werden können	Muss	Ja
1.13	Intergration in die Systemarchitektur	Der Teststand soll in die bestehende Systemarchitektur (System Composer, Requirements Toolbox) integriert werden	Soll	Nein

1.14	Kabelmanagement	Der Teststand muss ein leichtes Kabelmanagement ermöglichen	Muss	Ja
1.15	Stabilitöt	Der Teststand muss so konstruiert sein, dass sich keine Teile während des Betriebs lösen und eine Stabile Struktur zu jeder Zeit gegeben ist	Muss	Ja
1.16	Aufbau	Der Teststand muss leicht montierbar sein und die Zeichnungen müssen verständlich sein	Muss	Ja
1.17	Datenmanagement	Der Teststand muss die Versuchsdaten und Versionen systematisch aufnehmen und abspeichern können	Muss	In Arbeit
2.1	Maße	Der Teststand muss in seinen Ab-maßen, die Einschränkungen des Labors nicht überschreiten	Muss	Ja
3.1	Wasserstoffmanagement	Der Teststand muss spezielle Anforderungen and Handhabung und Lagerung von Wasserstoff haben	Muss	Ja
3.2	Notabschaltung	Der Teststand muss ein Notauschaltungssystem haben, dass alle relevanten Systeme sofort abschaltet.	Muss	Ja
3.3	Brand- und Explosionsschutz	Der Teststand muss über Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen verfügen	Muss	Ja
3.4	Sicherheitssenorik	Der Teststand muss mit Sensoren ausgestattet sein, um die Wasserstoffkonzentration und Temperatur zu messen	Muss	Ja
3.5	Arbeitsschutz	Der Teststand muss so konstruiert sein, dass beim Betrieb keine Verletzungen entstehen	Muss	Ja
3.6	Elektrische Gefahren	Der Teststand muss Schutz vor elektrischen Gefahren gewährleisten	Muss	Ja
3.7	Überhitzung	Der Teststand muss ausreichende Kühlmöglichkeiten haben, um nicht zu überhitzen	Muss	Ja
4.1	Kostenoptimierung	Der Teststand muss innerhalb des vorgegebenen Budgets realisiert werden	Muss	Ja

8 Eidesstaatliche Erklärung

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

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 selbständig 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: Hanke

Vorname: Daniel

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

Konstruktion eines skalierten Teststandes für hybridelektrische Luftfahrtantriebe

ohne fremde Hilfe selbständig 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:

Hamburg	22.11.2024	
Ort	Datum	Unterschrift im Original