



**INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK
UND THERMODYNAMIK**
Institute of Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Antriebskonzepterstellung für Wasserstoffflugzeuge und Simulation einer Einspritzdüse für Wasserstoffturbinen

unter der Leitung von

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Semlitsch Bernhard, PhD

E302 – Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Eingereicht an der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

der Technischen Universität Wien

zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

von

Maximilian Wieser Bsc,

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich diese Diplomarbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, August 2023



.....
Maximilian Wieser, BSc

Kurzfassung

Wasserstoff ist als Energieträger und -speicher mit einer großen Wahrscheinlichkeit Bestandteil der Bewältigung der im 21ten Jahrhundert vorherrschenden Energiekrise. Er wird nicht die universale Lösung für alle Probleme sein, jedoch kann er uns dabei helfen ein Energiewesen zu schaffen, das die Umwelt nur möglichst gering beeinflusst. Aufgrund seiner guten Verbrennungseigenschaften ist er auch eine attraktive Lösung für den Transportsektor. Sowohl Landfahrzeuge, Marinefahrzeuge aber auch Luftfahrzeuge können Wasserstoff als Treibstoff nutzen. Dadurch sind Antriebe mit nahezu keinen Emissionen möglich.

Die Untersuchung einer **PC-21** von **Pilatus** auf den Betrieb mit Wasserstoff und alternativen Speichermöglichkeiten, sowie die Simulation einer Einspritzdüse in eine Wasserstoffturbine sind Bestandteil dieser Arbeit. Es wird anhand von Informationen der Firma **Pilatus** ein alternatives Antriebskonzept mittels Wasserstoffturbine vorgeschlagen. Weiters kommt es zu einer Überprüfung und einer virtuellen Nachstellung (Simulation) der in [1] genannten Versuche und Ergebnisse.

Die Methodik der Arbeit umfasst sowohl eine Literaturrecherche bezüglich der Integration eines alternativen Antriebkonzeptes für die **PC-21** als auch eine Simulation mit Aufzeichnung der relevanten Daten der Untersuchung einer Einspritzdüse für eine Wasserstoffturbine.

Das alternative Antriebskonzept schlägt eine kombinierte Speicherung mittels Flüssigwasserstoffspeicherung und Materialspeicherung mit dem Trägermedium Magnesium vor. Dadurch lässt sich der mitgeführte Wasserstoff in einem Kleinflugzeug maximieren. Weiters wurde aufgezeigt, dass die Umstellung des Treibstoffes auf Wasserstoff zu Flugdauerverlusten von mehr als 50% führen kann. Jedoch sind diese Aussagen sehr abhängig von dem Betriebspunkt, in dem die Turbine verwendet wird.

In der Simulation wurde ein Betriebspunkt aus [1] gewählt und das Betriebsverhalten um diesen Punkt untersucht. Es wurden sechs Simulationen durchgeführt wovon auf drei näher eingegangen wird. Anhand der Ergebnisse wird gezeigt, dass durch höhere Eintrittstemperaturen auch die Strömungsgeschwindigkeiten und folglich auch die Druckverluste ansteigen. Bei der Simulation wurden auch Betriebsverhalten untersucht, welche in [1] wegen hoher Verbrennungstemperatur vermieden worden sind.

Abstract

Hydrogen, as an energy carrier and storage medium, is very likely to be part of the solution to the energy crisis prevailing in the 21st century. It will not be the universal answer to all problems, but it can help us create an energy entity that has minimal impact on the environment. Due to its good combustion characteristics, it is also an attractive solution for the transportation sector. Land vehicles, marine vehicles but also aircraft can use hydrogen as a fuel. This makes transportation with nearly no emissions possible.

The investigation of a **Pilatus PC-21** for operation with hydrogen and alternative storage possibilities, as well as the simulation of an injection nozzle into a hydrogen turbine are part of this work. Based on information from **Pilatus** an alternative propulsion concept using a hydrogen turbine is proposed. Furthermore, the tests and results mentioned in [1] are verified and virtually simulated.

The methodology of the work includes both literature research concerning the integration of an alternative propulsion concept for the PC-21 and a simulation with recording of the relevant data of the investigation of an injection nozzle for a hydrogen turbine.

The alternative propulsion concept proposes combined storage using liquid hydrogen storage and material storage with magnesium as the carrier medium. This allows the hydrogen carried in a small aircraft to be maximized. Furthermore, it was shown that switching the fuel to hydrogen can lead to flight time losses of more than 50%. However, these statements are very dependent on the operating point at which the turbine is used.

In the simulation, an operating point from [1] was chosen and the operating behavior around this point was investigated. Six simulations were performed, three of which will be discussed in more detail. It was confirmed that higher inlet temperatures also increase flow velocities and consequently pressure losses. The simulation also investigated operating behaviors that were avoided in [1] due to high combustion temperatures.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	iii
Kurzfassung	iv
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Nomenklatur	x
1 Einleitung	1
2 Grundlagen von Wasserstoff	2
2.1 Stoffeigenschaften	2
2.2 Wasserstoff Gewinnung	3
2.2.1 Reformierung	4
2.2.2 Wasserspaltung	5
2.2.2.1 Wasserspaltung durch Wärmeenergie	5
2.2.2.2 Wasseraufspaltung durch elektrische Energie (Elektrolyse)	6
2.2.2.3 Vergasung	7
2.2.2.5 Chemische Spaltung von Wasser	8
2.2.2.6 Chemische Kohlenwasserstoffspaltung	8
2.2.2.7 Biologische Herstellungsverfahren	9
2.2.2.8 Wasserstoff als Nebenprodukt	10
2.2.2.9 Reinigung	11
2.3 Speicherung von Wasserstoff	13
2.3.1 Physikalische Speicher	13
2.3.1.1 Druckwasserstoffspeicher	13
2.3.1.2 Flüssigwasserstoffspeicher (LH₂)	15
2.3.1.3 Transkritische Speicherungen / Kryokomprimierte Flüssigwasserstoffspeicher	15
2.3.1.4 Salzkavernenspeicher	17
2.3.2 Adsorptionsspeicher	17
2.3.2.1 Speicherung mit Kohlenstoff / Aktivkohle	18
2.3.2.2 Carbon-Nanotubes	18
2.3.2.3 Metal Organic Framework	19
2.3.2.4 Zeolithe	20
2.3.2.5 Fullerene	21
2.3.3 Absorptionsspeicher	22
2.3.3.1 Hybridspeicher	22
2.3.3.4 Mikroglaskugeln	24

2.4 Einsatzgebiete von Wasserstoff	25
2.4.1 Stationäre Wasserstoffnutzungen	26
2.4.1.1 Analytische Chemie.....	26
2.4.1.2 Fischer-Tropsch-Verfahren	26
2.4.1.3 Haber-Bosch-Verfahren.....	27
2.4.1.4 Kernfusion.....	27
2.4.2 Mobile Wasserstoffnutzungen	28
2.4.2.1 Wasserstoffantriebe	28
3 Integration des Wasserstoff Antriebes in ein Kleinflugzeug	38
3.1 Die Wahl des Flugzeuges	38
3.2 Beschreibung des ausgewählten Flugzeuges, der PC-21	39
3.2.1 Maße und generelle Informationen	39
3.2.2 Turbine PT6- Pratt & Whitney.....	40
3.2.3 Tanksysteme der PC-21	42
3.3 Alternatives Antriebskonzept für Kleinflugzeuge	43
3.3.1 Wasserstoffturbinen in Flugzeugen	43
3.3.1.1 Wirkungsgrade und Emissionen.....	43
3.3.1.2 Materialeigenschaften.....	45
3.3.2 Tanksysteme des alternativen Antriebes.....	46
3.3.3 Betankung eines Wasserstoffflugzeuges Betankung.....	49
3.3.4 Isolierung von Flüssigwasserstoffspeichern.....	50
3.3.5 Wasserstoffführung	51
3.4 Integration des alternativen Wasserstoffantriebes in die PC-21	51
3.4.1 Retrofit einer PT6 für den Betrieb mit Wasserstoff Turbine.....	52
3.4.1.1 Betriebspunktänderung.....	52
3.4.1.2 Treibstoffvergleich Kerosin vs Wasserstoff	53
3.4.1.2 Emissionen bei der Verwendung von Wasserstoff in Turbinen	54
3.4.2 Integration von Wasserstofftanks in eine PC-21	55
3.4.2.1 Materialspeicher in den Flügeln.....	55
3.4.2.2 Flüssigwasserstoffspeicher für Unterflügelmontage	55
3.4.3 Wasserstoffführung	56
3.4.4 Sicherheitsbedenken bei der Umrüstung der PC-21 auf Wasserstoff.....	56
4 Druckverlustabschätzung bei der Einspritzung laut NASA-Publikation	58
4.1 Die Simulationskonstruktion	58
4.2 Die Simulation	59
4.2.1 Simulationsbaukasten und Vernetzung	60

4.2.2	Allgemeine Randbedingungen.....	62
4.2.3	Variable Randbedingungen	64
4.2.4	Monitoring	65
4.2.5	Durchführung der Simulation.....	66
4.2.6	Ergebnisse der Simulationen	68
4.3	Vergleich mit “Low-Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection” [1]	73
4.3.1	NASA N1 Einspritzdüsen Parameter und Resultate.....	74
4.3.2	Gegenüberstellung der Resultate	75
5	Schlussfolgerungen.....	78
6	Anhang	80
a.	Anhang A Simulationsdiagramme.....	80
6.a.1	600 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintritt	80
6.a.1.1	Druckverlauf	80
6.a.1.2	Massenstrom.....	81
6.a.1.3	Volumenverhältnis	82
6.a.1.4	Residuen.....	83
6.a.2	700 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintritt	84
6.a.2.1	Druckverlauf	84
6.a.2.2	Massenstrom.....	85
6.a.2.3	Volumenverhältnis	86
6.a.2.4	Residuen.....	87
6.a.3	800 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintritt	88
6.a.3.1	Druckverlauf	88
6.a.3.2	Massenstrom.....	89
6.a.3.3	Volumenverhältnis	90
6.a.3.4	Residuen.....	91
7	Literaturverzeichnis	93

Nomenklatur

Abkürzung	Beschreibung
AlO_4	Oxidoperoxy(oxo)alumane
BDC	Benzenedicarboxylate
BTL	Biomasse zu flüssig
CcH_2	Kryokomprimierter Wasserstoff (Kryogene Wasserstoffspeicher)
CGH_2	Komprimierter Wasserstoff
C_2H_2	Acetylen
C_2H_4	Ethylene
C_2H_6	Ethane
CH_4	Methan
CH_{20}	Formaldehyde
CTL	Kohle zu flüssig
CMC	Ceramic Matrix Composite /Keramische Verbundwerkstoffe
CNT	Carbon Nano Tubes
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung
ΔH	Enthalpie Differenz einer Reaktion
I_2	Iod
EU	Europäische Union
Fe	Eisen
f/a-Verhältnis	Luft-Treibstoff-Verhältnis
GTL	Gas zu flüssig
H_2	Wasserstoff
HCN	Hydrogencyanid / Blausäure
HI	Iodwasserstoff
H_2O	Wasser
H_3PO_4	Phosphorsäure

H₂S	Hydrogen Sulfit
H₂SO₄	Schwefelsäure
k	Kaliumhydroxid
KOH	Kaliumhydroxid
LH₂	Flüssigwasserstoff
LiH	Litiumhydride
LiNH₂	Lithiumamide
LVG	Leitschaufeln mit variabler Geometrie
MEA	Monoethanolamin
MDEA	Mythyldiethanolamin
MLI	Multilayer Insulation
MMX	Micromix
MOF	Metall Organic Framework
N₂	Stickstoff
NaOH	Natriumhydroxid
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH₃	Ammoniak
Ni	Nickel
NO_x	Stickstoffoxide
N₂O	Lachgas
O₂	Sauerstoff
OH	Hydroxid
ODS	Oxid Dispersion Strengthened
ÖVGW	Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
Pa	Luft Eintrittsdruck
PH₂	Wasserstoffeintrittsdruck
PEM	Polymerelektrolytmembran
PVC	Polyvinylchlorid
SiC	Siliziumkarbide
SiO₂	Siliziumdioxid

SiO₄	Silicate
SO₂	Schwefeldioxid
T_{H2}	Wasserstoffeintrittstemperatur
TBC	Thermal Barrier Coating (Wärmedämmschicht)
TK	Kritischer Punkt
WIG	Wolfram Inertgas
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure
ZnCl₂	Zin-Chlorid

1 Einleitung

Wasserstoff gilt als das "erstgeborene Element" und soll bereits seit dem Urknall existieren. Mit Blick auf die Klimakrise und die zunehmenden Herausforderungen am Energiemarkt kann er als Alternative zu fossilen Brennstoffen eine emissionsfreie Energiegewinnung ermöglichen und damit Teil der Lösung der im 21ten Jahrhundert vorherrschenden Energiekrise sein. Die zunehmende Veränderung des Öko-Systems der Erde, welche durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen ausgelöst wird, sowie die geopolitische Lage am östlichen Rande der Europäischen Union (EU), stellt uns als Menschheit und als Bürger_innen der EU vor die Herausforderung unser Energiesystem grundlegend zu überdenken. Es müssen Alternativen zu bestehenden Lösungen gefunden werden, welche sich weder negativ auf unsere Umwelt auswirken noch eine zu große Abhängigkeit von anderen Staaten schaffen. Ein vielmals diskutierter Ansatz zur Entspannung dieser Lage, könnte der Wasserstoff sein. Er tritt in unserem Universum in großen Mengen auf und wird von den Sternen mittels Kernverschmelzungsprozesse genutzt, um schwerere chemische Elemente zu erschaffen. Damit ist er für die Erzeugung all unser bekannten Materie unerlässlich. Auf der Erde wäre der ideale Einsatz von Wasserstoff die Speicherung von erneuerbarer Energie sowohl für mobile als auch stationäre Anwendungen. In dieser Diplomarbeit wird der Einsatz von Wasserstoffen bei Flugzeugen näher beleuchtet. Dabei wird als alternatives Antriebskonzept, zu den momentan vorherrschenden Antrieben mit fossilen Brennstoffen, eine Wasserstoffturbine für Kleinflugzeuge analysiert und auf seine Machbarkeit geprüft. [2]

Aufgrund der langen Entwicklungsphase und dem Produktlebenszyklus von Turbinen für Flugzeuge (von bis zu 60 Jahren) sollte mit der Planung solcher Triebwerke so schnell wie möglich begonnen werden. [3] Um den Prozess der Entwicklungsphase zu umgehen wäre es von entscheidendem Vorteil bestehende Systeme mit minimalem Aufwand auf Wasserstoff betriebene Turbinen umzurüsten. Damit könnten bereits etablierte Technologien in der Luftfahrt für eine alternative Energiequelle erschlossen werden.

2 Grundlagen von Wasserstoff

Das folgende Grundlagenkapitel beschreibt die Stoffeigenschaften von Wasserstoff. Weiters wird ein Überblick über den Stand der Technik für die Wasserstoffgewinnung und -speicherung und dessen Einsatzgebiete gegeben.

Wasserstoff tritt auf der Erde kaum in seinem Reinzustand auf, da es in diesem Zustand sehr reaktionsfreudig ist. Es ist daher in molekularer Verbindung mit anderen Elementen anzufinden, im weitaus häufigsten Fall in Verbindung mit Sauerstoff als Wasser (H_2O). Weiters ist Wasserstoff in nahezu allen chemischen Substanzen aus der Biochemie und der organischen Chemie auffindbar. [4]

2.1 Stoffeigenschaften

Wasserstoff hat viele einzigartige Eigenschaften. Nicht nur, dass es das Element mit der geringsten uns bekannten Dichte ist, sondern auch seine thermodynamischen und chemischen Eigenschaften sind für die Forschung und besonders in der Energietechnik überaus interessant.

Die atomaren Eigenschaften sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.[5], [6]

Tabelle 1: Atomare Eigenschaften von Wasserstoff

Atommasse	1,00784-1,00811 u
Atomradius	25 pm (berechnet)
Van-der-Waals Radius	120 pm
Ionisierungsenergie	1.312,05 kJ/mol

Die physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften von Wasserstoff sind in **Tabelle 2** ersichtlich.

Tabelle 2: Physikalische und thermodynamische Eigenschaften von Wasserstoff. [7], [8]

Aggregatzustand	Geruchsloses Gas bei 273 K
Dichte:	0,0899 kg/m ³ bei 273 K
Diamagnetisch	
Schmelzpunkt	14,01 K (-259,14 °C)
Siedepunkt	21,15 K (-252 °C)
Molares Volumen (fest)	11,42*10 ⁻⁶ m ³ /mol
Verdampfungsenthalpie	0,90 kJ/mol
Spezifische Wärmekapazität	14.304 J/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit (k)	0,1805 W/(m*K)
Heizwert	3,00 kWh/m ³

2.2 Wasserstoff Gewinnung

Wasserstoff wird zum schnelleren Verständnis, je nach Energiequelle, die für die Herstellung herangezogen wird, unterschiedlich bezeichnet. Die zwei gängigsten Gewinnungsverfahren sind:

- Reformierung
- Wasserspaltung

Die Wasserspaltung kann durch mehrere Energiequellen sowohl thermische als auch elektrische Energie durchgeführt werden. Die einzelnen Herstellungsverfahren werden in diesem Kapitel beschrieben.

Tabelle 3: Farbcodierung von Wasserstoff. [9]

Farbcodierung:	Gewinnung:	Zusätzliche Informationen:	Co2 Neutral
Grüner Wasserstoff	Elektrolyse	Energie aus erneuerbaren Quellen	Ja
Türkiser Wasserstoff	Methanpyrolyse	Wenn Energie aus erneuerbaren Quellen dann CO ₂ -Neutral	Ja / Nein
Grauer Wasserstoff	Dampfreformierung von Kohle, Erdgas oder Öl		Nein
Blauer Wasserstoff	Dampfreformierung von Kohle, Erdgas oder Öl	Mit Carbon Capture Technology CO ₂ -Neutral	Ja

Wie bereits erwähnt ist die Gewinnung direkt aus Wasser oder Kohlenwasserstoff die häufigste Gewinnungsart. Die Kohlenwasserstoffverbindungen zur Herstellung von Wasserstoff können vor allem aus Biomasse oder fossile Brennstoffe gewonnen werden. Je nachdem welche Energiequelle für die Abspaltung genutzt wird, wird der Wasserstoff nach einer anderen Farbe benannt (siehe **Tabelle 3**). Dabei wird insbesondere zwischen grünen, blauen, türkisen und grauen Wasserstoff unterschieden. [10], [11]

Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse - die Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff - erzeugt. Um diese Bezeichnung zu erhalten, muss der benötigte Strom für diesen Prozess aus erneuerbaren Energiequellen¹ (wie Wind-, Wasserkraft

¹ Erneuerbare Energien sind Energiequellen, welche eine wesentlich schneller erneuern als z.B. fossile Brennstoffe und dementsprechend erschöpfbar verfügbar sind. [86]

oder Sonnenenergie) stammen. Grüner Wasserstoff ist daher Kohlenstoffdioxid-neutral (CO_2). [9] Weiters kann die Abspaltung von Wasser auch durch photobiologische oder photokatalytische Verfahren erreicht werden.[10]

Türkiser Wasserstoff wird durch die Methanpyrolyse erzeugt. Als Wasserstoffquelle dient dabei Methan aus Erdgas, welches aus seiner Kohlenstoffverbindung abgespalten wird. Dadurch wird kein CO_2 freigesetzt, da es zu einer Ablagerung als festes Kohlenstoffgranulat bei der Reaktion kommt. Stammt die Energie, die für diesen Prozess benötigt wird aus erneuerbarer Energie, ist auch diese Wasserstoffgewinnung CO_2 -neutral. [9]

Grauer Wasserstoff ist hingegen nicht klimaneutral. Er wird durch die Dampfreformierung² von Kohle, Erdgas oder Öl erzeugt. Dabei kommt es zu der Freisetzung von CO_2 . [9]

Blauer Wasserstoff wird ebenfalls, wie grauer Wasserstoff durch Dampfreformierung mit fossilen Brennstoffen erzeugt. Eine Klimaneutralität wird durch eine „Carbon Capture Technology“ mit anschließender unterirdischer Lagerung des CO_2 erreicht. [9]

Die Herstellung mit fossilen Energieträgern ist derzeit vorherrschend. Die Bedeutung der Elektrolyse ist untergeordnet und die weiteren CO_2 -neutrale Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff befinden sich noch im Entwicklungsstadium. In diesem Kapitel werden die wichtigsten der Herstellungsoptionen beschrieben. [10]

2.2.1 Reformierung

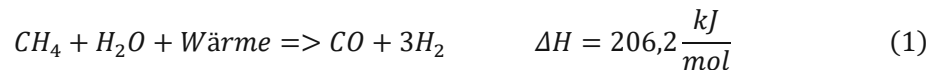
Wie bereits erwähnt ist die Dampfreformierung das momentan am häufigsten genutzte Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff (2010 wurden etwa 96 % mit fossilen Energieträgern hergestellt). Dabei wurde die dafür benötigte Energie zu 48 % aus Erdgas, 30 % aus Schweröl, und 18 % aus Kohle gewonnen. Nur 4 % der für die Wasserstoffherstellung verwendeten Energie war elektrisch. Im Folgenden wird weiter auf die Dampfreformierung mittels Erdgases und die partielle Oxidation eingegangen. [10], [12]

Der Prozess der Dampfreformierung von Erdgas erfolgt in zwei Schritten. Zu Beginn wird bei hohem Druck und hoher Temperatur (12 bis 25 bar und 750 bis 1.000 °C) aus Wasser und Methan, Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff erzeugt. Durch die Zugabe eines Katalysators wird die Geschwindigkeit der Reaktion erhöht. Anschließend wird durch Hinzufügen von Wasser eine Shift-Reaktion³ ausgelöst, welche zur Bildung von

² Dampfreformierung konvertiert Kohlenwasserstoffe bei hohen Temperaturen und in der Präsenz von einem Katalysator, in Wasserstoff und Kohlenstoff. [87]

³ Die Wassergas-Shift-Reaktion ist eine Reaktion, die in einem Synthesegas den Wasserstoffanteil erhöht und den Kohlenstoffmonoxid-Anteil reduziert. [19]

Kohlendioxid und Wasserstoff führt. Die Reaktionen der beiden Stadien lauten wie folgt: [10]



Bei diesem Verfahren wird ein Gesamtwirkungsgrad von 70 % erreicht. Dieser Wert wird aus dem Heizwert von Erdgas (g) (9,4 bis 11,8 kWh/m³ [8]) errechnet. [13]

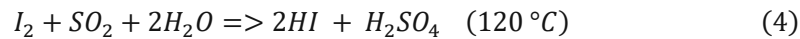
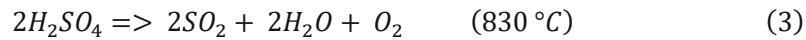
Ein weiteres Verfahren mit den Ausgangsstoffen Kohle, Erdöl oder Erdgas ist die **partielle Oxidation**. Dabei wird dem Ursprungsstoff Sauerstoff und Wärme zugeführt. Durch eine unterstöchiometrische Sauerstoffmenge kommt es jedoch nicht zu einer vollständigen Verbrennung. Dieser Vorgang ersetzt den ersten Schritt bei der Dampfreformierung. Als Produkte entstehen Kohlenmonoxid und Wasserstoff aus der Reaktion. Es kommt ebenso zu einer Shift-Reaktion wodurch Wasserstoff und Kohlendioxid gewonnen wird. [10]

Werden diese beiden genannten Prozesse kombiniert, resultiert daraus die **autotherme Reformierung**. Dabei können beliebige Kohlenwasserstoffe, wie Benzin, Erdgas oder Diesel verwendet werden. Es werden die hohe Wasserstoffausbeute der Dampfreformierung und die Abgabe von Wärmeenergie der partiellen Oxidation kombiniert. Die Wasserdampf- und Luftzufuhr wird dabei so reguliert, dass die exotherme Energie der Oxidationsreaktion den Energiebedarf der endothermen Dampfreformierung deckt. An Katalysatoren zu diesem Prozess werden hohe Anforderungen gestellt, da sie die Dampfreformierung, die partielle Oxidation und die Wassergasreaktion begünstigen müssen. Aufgrund der Stickstoffoxide im Abgas ist eine aufwendige Rauchgasreinigung notwendig. [10]

2.2.2 Wasserspaltung

2.3.2.1 Wasserspaltung durch Wärmeenergie

Für die thermische Spaltung von Wasser sind hohe Temperaturen um die 2.000 °C notwendig. Damit ist der Prozess aufgrund von Materialeigenschaften und Prozessführungssteuerung nicht nur technisch aufwändig, sondern auch kostenintensiv. Jedoch kann durch den Einsatz von Katalysatoren die Prozess Temperatur auf ein durchführbares Niveau abgesenkt werden. Mittels thermochemischer Kreisprozesse, wie dem Schwefelsäure-Iod-Verfahren, lässt sich die Wasserspaltung durchführen. Dabei wird Schwefelsäure erwärmt und in Schwefeldioxid, Wasser und Sauerstoff aufgespalten. Anschließend wird aus Iod, Wasser und Schwefeldioxid unter Wärmezufuhr, Wasserstoffiodid und Schwefelsäure erzeugt. Das Wasserstoffiodid wird wiederum erwärmt, wodurch Iod und Wasserstoff entsteht. Das Iod und die Schwefelsäure werden dann im Prozess wiederverwendet. Die chemischen Reaktionen lauten: [10]



Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Abwärme genutzt werden kann. Dadurch werden hohe Wirkungsgrade erreicht. Ohne Wärmerückgewinnung beträgt der Wirkungsgrad 50 % und liegt somit unter dem der Dampfreformierung oder der Elektrolyse. Dieser Prozess ist durch Hochtemperaturreaktoren umsetzbar und wird im Einsatz mit solarthermischen Anlagen diskutiert. Neben dem Schwefelsäure-Iod-Verfahren gibt es auch noch andere thermochemische Kreisprozesse, mit Hilfe derer eine Wasseraufspaltung möglich ist. Jedoch hat sich bis heute keiner dieser Prozesse bewährt. [10]

2.2.2.2 Wasseraufspaltung durch elektrische Energie (Elektrolyse)

Die elektrische Aufspaltung von Wasser (Elektrolyse) nutzt die spontan auftretenden Reaktionen bei Abläufen mit negativer freier Enthalpie. Die Rahmenbedingungen, bei denen der Prozess abläuft, sind von den reagierenden Elementen bzw. Materialien abhängig. In der chemischen Industrie hat die Elektrolyse einen breiten Anwendungsbereich: Mit ihr kann nicht nur Wasserstoff, sondern auch Aluminium und Natrium gewonnen werden. Im Fall der Wasseraufspaltung wird elektrische Energie genutzt, um Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser abzuspalten. Für diesen Prozess sind folgende Komponenten notwendig: [10]

- Anode – Wasser wird zu Wasserstoff und Hydroxid (OH) reduziert
- Kathode – OH wird zu Wasser und Sauerstoff oxidiert
- Elektrolyt – Transport der OH-Moleküle durch die Fähigkeit Ionen zu leiten
- Separator – Membran welche nur für gewisse Stoffe durchlässig ist

Die verschiedenen Elektrolyseverfahren unterscheiden sich durch die Betriebstemperatur, den Betriebsdruck und durch die verwendeten Elektrolyte (alkalische Lösungen oder Feststoffelektrolyte). Die am häufigsten eingesetzten sind die alkalische Elektrolyse, die alkalische Druckelektrolyse, die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolysen (PEM) und die Hochtemperaturelektrolyse auf Basis von keramischen Feststoffelektrolyten. [10]

Von den genannten Technologien ist die alkalische Elektrolyse das meistgenutzte Verfahren. Das verwendete Elektrolyt ist eine Kalilauge namens Kaliumhydroxid (KOH). Als Separator kommt ein Diaphragma zum Einsatz, welches nur einen Ionentransport erlaubt. Damit ist der notwendige Ladungsaustausch gewährleistet. Systemdrücke reichen von 30 bar, bei kommerziellen Anwendungen, bis zu 120 bar bei Versuchsanlagen. Durch den erhöhten Druck lassen sich kompakte Elektrolyseeinheiten bauen. [10]

Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolysen arbeiten in einem Temperaturbereich von 30 bis 100°C. Als Elektrolyt kommt ein Polymer zum Einsatz. Weiters wird Platin als Katalysator an den Elektroden verwendet. Die Wirkungsgrade reichen jedoch noch nicht an jene von alkalischen Elektrolyseverfahren heran. An PEM-Brennstoffzellen wird derzeit in einigen Industrieunternehmen geforscht. [10], [14]

Im Gegensatz zu den bereits genannten Elektrolyseverfahren, arbeitet die Hochtemperaturelektrolyse bei Temperaturen von 700 bis 1.000 °C. Das Elektrolyt ist ein Fest-Oxid, welches O²-Ionen leitet. Durch die hohe Temperatur wird weniger elektrische Energie benötigt, um die notwendige Reaktionsenthalpie zu erreichen. Weiters können dadurch unedle und kostengünstige Metalle wie Nickel (Ni) als Katalysator verwendet werden. Aktuell existieren jedoch keine kommerziellen Anlagen.[14]

Der Wirkungsgrad der genannten Systeme beläuft sich auf bis zu 75 %. Dieser Wert wurde mittels der Gegenüberstellung des Heizwertes von Wasserstoff mit der Leistung des bezogenen Stroms, berechnet. [14]

Es existieren noch weitere Elektrolyseverfahren, wie die Hochdruckelektrolyse, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen wird.

2.2.2.3 Vergasung

Die Vergasung ist seit vielen Jahren ein bekannter Prozess zur Herstellung von Wasserstoff. Diese Verfahren haben sich jedoch aufgrund der hohen Kosten für die Reinigung des Produktgases nicht durchsetzen können. Die thermochemische Vergasung eines Brennstoffes ist die Umsetzung eines Kohlenstoffträgers mittels eines sauerstoffhaltigen Vergasungsmittels (Dampf, Luft, Sauerstoff). Je nach Vergasungsart entsteht ein Gas mit einem Wasserstoffgehalt von bis zu 50 vol%. Jedoch kommt es zu flüssigen (Öle) und festen (Asche, Teer und Ruß) Abfällen. [14]

Die Vergasung lässt sich in vier generelle Schritte unterteilen.

- **Trocknung:** Bei einer Temperatur von 200 °C wird der Wassergehalt reduziert. Es kommt zu keinen chemischen Reaktionen.
- **Thermolyse oder Pyrolyse:** Es kommt zu einer Zersetzung des Brennstoffes in Kohlestoff- und Wasserstoffverbindungen. Dieser Prozess läuft unter Luftabschluss bei Temperaturen von 200 bis 500 °C ab. Es bilden sich unerwünschte langkettige Kohlenwasserstoffe.
- **Oxidation:** Der zerlegte Rohstoff wird durch Oxidationsmittel in einer exothermen Reaktion bei 500-2.000 °C teilweise verbrannt. Die freigesetzte Wärme deckt den endothermen Bedarf der Vergasung.
- **Vergasung (Reduktion):** Hier werden die Produkte der vorherigen Zone (Kohlenstoffmonoxid CO, CO₂, H₂O) mit Kohlenstoff bei 500 bis 1.000 °C

umgesetzt. Dabei laufen die Boudouard-Reaktion⁴ und die heterogene Wassergasreaktion ab. Bei steigender Temperatur und fallendem Druck verschiebt sich das Gleichgewicht der Reaktion von CO₂ zu H₂. Zeitgleich läuft eine homogene Wassergasreaktion ab. In der Endphase der Reaktion kommt es zu einer Oxidation von Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Diese Oxidation verringert den Heizwert des Produktgases. [14]

Da jedoch nur Gase mit einem Wasserstoffgehalt von ca. 50 % erzeugt werden können, wird in dieser Arbeit nicht weiter auf dieses Verfahren eingegangen. [14]

2.2.2.5 Chemische Spaltung von Wasser

Zur chemischen Spaltung von Wasser können jene Elemente genutzt werden, welche eine höhere Affinität zu Sauerstoff besitzen als der gebundene Wasserstoff. Dafür können alle Elemente der ersten bis dritten Hauptgruppe genutzt werden (Reaktionsfreudigkeit nimmt mit steigender Hauptgruppe ab). Innerhalb einer Hauptgruppe nimmt die Reaktionsfreudigkeit wiederum von unten nach oben ab, da die gebildeten Metall-Hydroxide zunehmend unlöslicher werden. Ob Hydroxide oder Oxide gebildet werden, hängt von den Reaktionsbedingungen ab. Alkalimetalle spalten Wasser bei Normalbedingungen energetisch auf. Die dabei umgewandelte Wärmeenergie schmilzt die Metalle und entzündet den Wasserstoff. Andere Hauptgruppen reagieren erst bei erhöhten Temperaturen.

Diese Methode wird momentan nicht für die Herstellung von Wasserstoff genutzt, da die Metalle selbst erst gewonnen werden müssen (z.B. durch Schmelzflusselektrolyse). [14]

Ein erwähnenswerter Prozess der chemischen Wasserspaltung ist der Eisen-Dampf-Prozess. Damit wurde das erste Mal nachweislich Wasserstoff hergestellt. Dabei wird Wasserdampf über glühende Eisenspäne geleitet. Bei Temperaturen von ca. 500 °C bildet sich dadurch Eisenoxid und Wasserstoff. Derzeit wird diese Art der Herstellung erforscht, um sie bei solargestützten Systemen zu integrieren. Zuerst wird der Wasserstoff und das Metalloxid erzeugt. Anschließend erfolgt eine endotherme Reduktion im Hochtemperaturbereich (800 bis 2.000 °C). Diese Temperatur werden durch fokussierte Sonnenstrahlen, welche über Spiegel gebündelt werden, erreicht. [14]

2.2.2.6 Chemische Kohlenwasserstoffspaltung

Eine Zufuhr an Energie zur Spaltung von Wasserstoff ist immer dann notwendig, wenn das Normalpotential des Reaktionspartners positiver ist als das von Wasserstoff selbst. Dies tritt bei Kohlenstoff und den meisten anderen Nichtmetallen auf. Bei der chemischen Kohlenwasserstoffspaltung handelt es sich um eine thermische

⁴ Kohlenstoff reagiert mit Kohlenstoffdioxid zu Kohlenstoffmonoxid. Dabei kommt es zu Freisetzung von Energie. [88]

Kohlenwasserstoffspaltung mit einer Oxidation des Kohlenstoffs. Der Sauerstoff für diese Reaktion wird dem Wasser entzogen. Im Folgenden wird die chemische Kohlenwasserstoffspaltung mittels Silizium und Natrium- oder Kalium-Mischung beschrieben. [14]

Unter basischen Bedingungen kann aus Silizium und Wasser, Wasserstoff gewonnen werden. Für die basische Umgebung sorgt unter anderem Natronlauge. Das Wasser reagiert direkt mit dem Silizium zu Silikaten und Wasserstoff. Silizium wird oftmals auch als ergänzender Energieträger zu Wasserstoff gesehen, da es aus Sand hergestellt wird und in großen Mengen verfügbar ist. Es kann exotherm mit Sauerstoff und Stickstoff reagieren und dadurch energiegewinnbringend eingesetzt werden. Dieser Prozess läuft bei einer Temperatur von 600 °C mit Kupferoxiden ab. [14]

Die chemische Spaltung von Wasser mittels Natrium- oder Kalium-Mischung ist eine exotherme Reaktion, welche auch die Charakteristik einer Volumenvergrößerung aufweist. Bei Verwendung einer Kolbenmaschine, kann die mechanische Arbeit genutzt werden. Dadurch kann das Verfahren einen hohen Gesamtwirkungsgrad generieren. Nach der Reaktion können die Produkte wieder in den Ausgangszustand reduziert werden. Dadurch wird der Materialkreislauf des Prozesses geschlossen. Weiters ist er emissionslos und CO₂-frei. [14]

2.2.2.7 Biologische Herstellungsverfahren

Bei vielen verschiedenen biologische Prozessen tritt Wasserstoff als End- oder Zwischenprodukt auf. Die am häufigsten verwendeten sind die Photolyse und die Fermentation. Bei beiden Prozessen werden Algen oder Bakterien genutzt, um Stoffe zu verarbeiten und Wasserstoff zu freizusetzen. Diese Herstellungsverfahren befinden sich in der Forschungs- bzw. Laborphase. [14]

Einer der biologischen „Hacks“ für die Wasserstoffproduktion ist die Verwendung von Enzymen. Enzyme sind Proteine (Eiweiße aus Aminosäuren), welche als biologische Katalysatoren eingesetzt werden und die Aktivierungsenergie von chemischen Prozessen reduzieren. Die Stoffwechselforgänge bei der Photolyse und der Fermentation erfolgen meist mit Hilfe der Enzyme Hydrogenase und Nitrogenase: [14]

- Hydrogenase ist ein Enzym das rasch mit Sauerstoff reagiert und dabei inaktiv wird. Sie sind weit verbreitet unter den Mikroorganismen und treten meist in Metallenzymen auf. Abhängig von den auftretenden Metallionen wird zwischen Nickel-Eisen-Hydrogenasen (Ni-Fe) oder Eisen-Eisen-Hydrogenasen (Fe-Fe) unterschieden.
- Nitrogenasen reagieren mit Stickstoff (N₂) zu Ammonium, wobei Wasserstoff freigesetzt wird.

Die Photokatalyse ist ein Prozess, welcher von Pflanzen genutzt wird. Dabei wird durch Photolyse Lichtenergie und Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt. Auf diesem Sektor wird momentan intensiv geforscht. Der Fokus liegt hier insbesondere auf der Herstellung von Wasserstoff durch „künstliche Blätter“ bzw. durch genetische veränderte Algen. [14], [15]

Algen können unter den richtigen Bedingungen Wasserstoff an Stelle von Sauerstoff produzieren. Dabei ist es notwendig, dass der Alge Schwefel entzogen wird. Wichtig ist, dass dieser Prozess ohne die Anwesenheit von Sauerstoff durchgeführt wird, da dieser den Vorgang aufhalten würde. [15] In Japan wurde unter dem Einsatz von kurzwelligem Licht und Titandioxyd Wasserstoff erzeugt. Dies ist einer von mehreren vielversprechenden Ansätzen zur Erzeugung eines „künstlichen Blattes“.[16]

Der zweite Prozess, der in diesem Kapitel beleuchtet werden soll, ist die Fermentation. Es handelt sich dabei um einen mikrobiellen Abbauprozess, welcher Wasserstoff aus Biomasse bilden kann. Bei der bakteriellen Gärung, in der meist anaeroben Umgebung, werden unter dem Ausschluss von Sauerstoff und Lichtphotonen Essigsäure, Wasserstoff und CO₂ gebildet. Der Wasserstoff muss einem Reinigungsprozess unterzogen werden. Für den Prozess werden Kohlenhydrate aus Energiepflanzen, industriellen und landwirtschaftlichen Nebenprodukte, aber auch organische Abfälle genutzt. Die Bakterien gehören zu der Gruppe der Enterobakterien, Bazillen und der Clostridien. Es kann ein theoretischer Wirkungsgrad von 25 % erreicht werden. [14]

2.2.2.8 Wasserstoff als Nebenprodukt

Mehrere Prozesse in der Industrie oder in der technischen Chemie setzen Wasserstoff frei. Dieser kann direkt genutzt oder für die spätere Verwendung gespeichert werden. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die relevantesten Verfahren gegeben. [14]

Die **Chlor-Alkali-Elektrolyse** ist ein Verfahren zur Herstellung von Chlor, Natriumhydroxid und Wasserstoff aus einer wässrigen Natriumchloridlösung. Chlor und Natronlauge wird für die Herstellung von Salzsäure oder Kunststoff wie Polyvinylchlorid (PVC) benötigt. Als Herausforderung gilt es, dass das Chlor weder mit dem Wasserstoff noch mit dem Hydroxid-Ionen in Kontakt kommt, da es sonst zur Bildung von Knallgas oder Hypochlorit kommt. Dies wird durch die Verwendung einer Membran, welche nur positive Na⁺-Kationen aber nicht OH⁻ und Cl⁻-Anionen durchlässt, realisiert. [14]

Bei Prozessen wie der Polymerisierung (das Umformen von kurzkettigen Alkenen in iso-Alkane), die Umformung in Aromaten oder der Isomerisierung (das Umformen von n-Alkanen in iso-Alkane) werden Kohlenwasserstoffe mit niedriger Oktanzahl in klopffesten Benzin umgewandelt. Diese Prozesse werden auch als

Benzinreformierung bezeichnet. Sie laufen bei Drücken zwischen 5 und 50 bar und bei Temperaturen um 500 °C ab. Dabei kommt es zur Freisetzung von Wasserstoff. [14]

Weiters wird auch bei der Produktion von Ethen Wasserstoff freigesetzt. Ethen ist ein farbloses, süßlich riechendes Gas, welches in der Industrie als Grundstoff für die Herstellung für Mittel zur Schädlingsbekämpfung oder zur Herstellung von Kunststoffen verwendet wird. 75 % des erzeugten Ethens werden in der Kunststofftechnik eingesetzt. Hergestellt wird es durch das Cracken von Erdöl, Erdgas oder anderen Kohlenwasserstoffen durch mehrere Rektifikationsschritte. Es entstehen Acetylen (= Ethin C_2H_2), Ethylen (= Ethen C_2H_4), Ethan (C_2H_6), Methan (CH_4) und Wasserstoff (H_2). Diese Prozesse laufen unter hohen Drücken in einem Temperaturbereich von -150 bis 800 °C ab. [14]

2.2.2.9 Reinigung

Wasserstoff, der aus thermochemischen und biochemischen Verfahren gewonnen wird, enthält Verunreinigungen, welche vor dem Einsatz entfernt werden müssen. Abhängig von der Verwendung des Wasserstoffes muss das Gas auf eine gewisse Reinheit gesäubert werden. Die erste Form der Reinigung ist, die Ausgangsstoffe von unerwünschten Bestandteilen wie Metall oder Schwefel zu befreien. Diese Reinigung erfolgt über die folgenden Schritte: [14]

- **Entstaubung:** Die physikalische Entstaubung von Gasen erfolgt mit mehreren Trennverfahren, welche in Serie geschaltet sind. Dabei kommen Zyklon-Abscheider, welche grobe Teilchen über 5 μm entfernen, Elektrofilter für kleinere Partikel mit einem Reststaubgehalt von 75 mg/Nm^3 und Schütteltrichter, welche das Gas auf bis zu 10 mg/Nm^3 reinigen, zum Einsatz.
- **Entschwefelung:** Katalysatoren werden durch Wasserstoff Sulfit (H_2S) deaktiviert. Deswegen ist eine Entschwefelung notwendig. Bei Erdgas wird diese durch adsorptive Entschwefelung mittels Aktivkohlebett, aktiviertem Aluminiumoxid, Hydrierung oder dem Claus-Prozess⁵, durchgeführt. Bei hohem Schwefelgehalt wird auf das Monoethanolamin-Verfahren (MEA)⁶ oder das Methyldiethanolamin-Verfahren (MDEA)⁷ zurückgegriffen. Katalytische Verfahren für Kleinanlagen befinden sich derzeit in der Forschung.
- **Gaswäsche:** Die chemische Absorption von Verunreinigungen in einer Waschflüssigkeit wird besonders für Methan aus Bio-, Klär- oder Deponiegas verwendet. Aufgrund unselektiver Löseeigenschaften ist kaltes Wasser dazu gut geeignet. Bei erhöhtem Druck, von 8 bis 15 bar, ist von Druckwäsche die Rede. Die Reinigung von CO_2 , Ammoniak (NH_3), Blausäure (HCN), H_2S , aber

⁵ H_2S -Gasstrom wird mit einem Luftstrom vermischt und über einen festen Katalysator entschwefelt. [89]

⁶ Schwefelkomponenten werden durch das chemische Binden an eine Waschflüssigkeit (Monoethanolamin) entfernt. [90]

⁷ Ähnliche Entschwefelung wie beim MAE-Verfahren. Dabei kommt Methyldiethanolamin zum Einsatz als Waschflüssigkeit. Wird verwendet, um H_2S aus Erdgas auszuwaschen. [91]

auch Staubpartikel und Mikroorganismen erfolgt durch Umkehrreaktion mit meist erhitztem Wasser. Dadurch lässt sich die Waschflüssigkeit regenerieren. Eine Aufbereitung nach ÖVGW (Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach) Richtlinien G31 ist möglich.

Weiters lässt sich CO aus dem Produktgas mittels Wassergas-Shift-Reaktion zu CO₂ und H₂ umwandeln. Dabei wird Wasser auskondensiert und anschließend einer Druckwechseladsorption unterzogen. Für die Feinreinigung kommen kleine Anlagen, welche chemische katalytische Reinigungsverfahren verwenden oder zentrale Großanlagen, welche zusätzlich auch physikalische Reinigungsverfahren verwenden, zum Einsatz. [14]

Die gängigsten physikalischen Reinigungsverfahren werden wie folgt untergliedert: [14]

- **Druckwechseladsorption:** Diese wird zur Wasserstoffreinigung nach Reformierungsprozessen und zur Gewinnung von Wasserstoff aus wasserstoffhaltigen Abgasen (Raffinierungsprozessen oder Koksöfen) verwendet. Dabei wird das Gas unter hohem Druck durch Aktivkohlefilter geleitet. Kohlendioxid, leicht und schwere Kohlenwasserstoffe sowie andere Verunreinigungen bleiben an der Aktivkohle hängen. Jedoch muss der Filter regeneriert werden, wodurch es zu einem diskontinuierlichen Betrieb kommt.
- **Temperaturwechseladsorption:** Diese arbeitet bei erhöhten Temperaturen und ermöglicht die Entfernung von Wasser, Quecksilber, Ammoniak, Sauerstoff, Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid. Der hohe benötigte Energieaufwand ist mit der hohen Bindungsenergie des Adsorptivs zu erklären.
- **Membranverfahren:** Bei 5- bis 10-fachem Überdruck wird Wasserstoffgas durch eine Membran aus Palladium (oder Silizium/Palladium) gedrückt. Da nur Wasserstoff durchdiffundiert, werden Kohlenmonoxid und andere Verunreinigungen abgeschieden. Das Material für die Membrane ist jedoch teuer, weswegen immer dünnere Membranen entwickelt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Reinigung von Wasserstoff ist die Speicherung in Metallhydriden. Dabei wird bei der Entladung des Speichers nur der Wasserstoff abgegeben. Die Verunreinigungen bleiben im Trägermaterial zurück. Diese Speicher erreichen den höchsten Reinheitsgrad, sind jedoch kostenintensiv. [14]

Nach der Produktion des Wasserstoffes muss dieser, falls er nicht direkt verwendet werden kann, in einem Speicher zwischengelagert werden. Dafür gibt es unterschiedlichste Technologien, welche im folgenden Kapitel beleuchtet werden.

2.3 Speicherung von Wasserstoff

Die Speicherung von Wasserstoff ist eine der großen Herausforderungen bei der kommerziellen Nutzung in der Energietechnik. Da es das kleinste bekannte Element ist, ist es sehr diffusionsbereit und somit schwer in einem Behälter zu lagern. Es bestehen jedoch verschiedene Methoden, welche bei der Speicherung von Wasserstoff eingesetzt werden. Dazu gehören physikalische, aber auch chemische Speicher. Chemische Speicher werden durch Adsorption- und Absorptionsprozesse realisiert. In diesem Kapitel wird ein allgemeiner Überblick über die verwendeten Speicherarten und deren Vor- und Nachteile gegeben. [10]

2.3.1 Physikalische Speicher

Mit physikalischen Speichern kann Wasserstoff ohne chemische Umwandlung des Elements gelagert werden. Der Wasserstoff wird sowohl im flüssigen als auch im gasförmigen Aggregatzustand bei unterschiedlichen Temperaturen aufbewahrt. Die gängigsten physikalischen Speicher sind Druck-, Flüssig- und Kryokomprimierte Wasserstoffspeicher. Weiters können stationäre Speicher wie Salzkavernenspeicher und verschiedene Arten von Porenspeicherungen eingesetzt werden. In **Abbildung 1** ist zu erkennen, dass der Druck und die Temperatur des Speichersystems erhebliche Auswirkungen auf die Speicherdichte haben. [10]

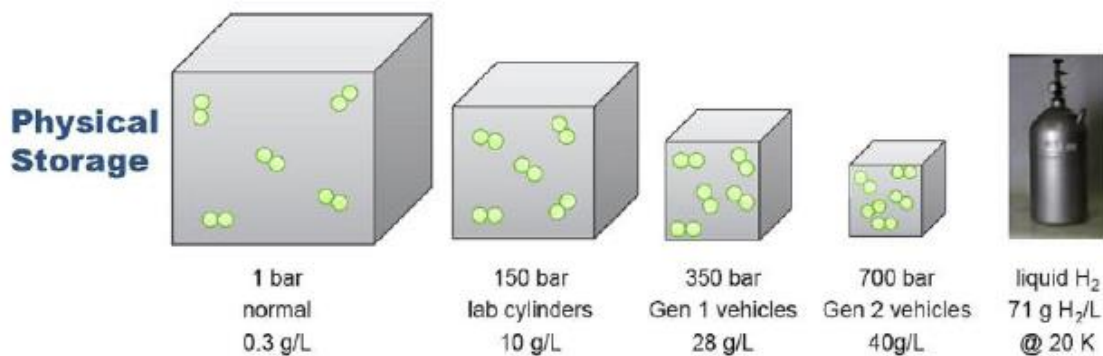


Abbildung 1: Darstellung der verschiedenen Arten von physikalischen Wasserstoffspeichern mit den zugehörigen Speicherdichten. [10]

2.3.1.1 Druckwasserstoffspeicher

Druckspeicher sind die prädestiniertesten Speicherungsvarianten für die mobile Anwendung. Standardspeicher haben ein Druckniveau von 300 bar. Jedoch sind heutzutage auch schon Speicherdrücke von 700 bar möglich. Die Drucksteigerung bewirkt eine Erhöhung der volumetrischen Energiedichte (vol%). Jedoch wird für die Verdichtung auf die Speicherdrücke eine große Energiemenge benötigt. Diese kann adiabatisch (ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung) oder isotherm (bei konstanter Temperatur) erfolgen. Bei einer Verdichtung von 1,013 bar (Umgebungsdruck) auf 300 bar, wird ungefähr 10 % der gespeicherten Energie benötigt, um das gewünschte

Druckniveau zu erreichen (bei einer Kompressor-Arbeit von 3,5 kWh/kg). Bei einem Speicherdruck von 800 bar beläuft sich dieser Wert auf 15 %. [10]

Wenn das Diffundieren des gespeicherten Wasserstoffes unterbunden wird, kann der Behälter als verlustfreies geschlossenes System betrachtet werden. Je höher der Speicherdruck, desto komplexer müssen die eingesetzten Werkstoffe und die Behälterdimensionierung (Behältergeometrie) werden, um die Diffusion zu verhindern. Druckspeicher werden in vier verschiedene Behälteroptionen unterteilt. Diese werden in **Tabelle 4** hinsichtlich ihrer Eigenschaften verglichen. [10]

In den letzten Jahren werden vermehrt Verbundwerkstoffe verwendet, welche einen Speicherdruck von bis zu 900 bar und gleichzeitig leichtere Behälter ermöglichen. Aufgrund der benötigten Mindestreichweite bei mobilen Anwendungen (besonders bei KFZ) werden nur sogenannte Typ 3- und Typ 4-Behälter für Fahrzeuge eingesetzt. Ein Typ 3-Behälter mit 700 bar hat eine gravimetrische Energiedichte (wt%) von 3,6 wt% und eine volumetrische Energiedichte von 0,833 kWh/L. Bei Typ 4-Behältern beläuft sich die Energiedichten auf gravimetrische 5,5 wt% und volumetrische 0,767 kWh/L. Solche Speicher waren vor der Corona-Pandemie zu einem Preis von 20-30 €/kWh erhältlich. [10]

Weiters werden Druckspeicher auch für stationäre Anwendungen verwendet. Bei diesem Anwendungsgebiet sind hohe Druckniveaus, um eine höhere Energiedichte zu erreichen, nicht notwendig. Sie kommen als Wasserstoffspeicher für große Elektrolyseanlagen zum Einsatz. Diese Speicher haben jedoch einen großen Platzbedarf. Die Bauformen sind Gasometer, Kugelgasbehälter und Röhrenspeicher. Der ausschlaggebende Parameter für die Kosten solcher Speicher ist der Materialpreis. [10]

Tabelle 4 Druckluftspeicher und deren Eigenschaften. [10]

Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
Ganzmetall-Zylinder	Metall mit Verstärkung im Mittelteil durch Glasfaser-Ummantelung	Metall mit Verstärkung durch Gasfaser-Ummantelung im gesamten Bereich	Polymerbehälter mit Verstärkung durch Glasfaser-Ummantelung und metallisch-integrierter Öffnung
Drücke bis 300bar möglich	Drücke von mehr als 350bar möglich	Drücke von 350 bis 700bar möglich	Drücke von 350 bis 700bar möglich
Preis Leistung: ++	Preis-Leistung: +	Preis-Leistung: -	Preis-Leistung: -
Gewicht-Leistung: ++	Gewicht-Leistung: 0	Gewicht-Leistung: +	Gewicht-Leistung: ++

2.3.1.2 Flüssigwasserstoffspeicher (LH₂)

Der flüssige Phasenbereich von Wasserstoff ist sehr gering und deswegen nur mit hohem Energieaufwand zu erreichen. Über dem kritischen Punkt von Wasserstoff (TK = 33 K) liegt kein flüssiger Aggregatzustand mehr vor und der Speicherdruck steigt auf 13 bar. Die volumetrische Energiedichte liegt bei flüssigem Wasserstoff bei 70,79 kg/m³. Damit können bei dieser Technologie Energiedichten weit über der von Druckspeichern erreicht werden. [10]

Die theoretische Verflüssigungsarbeit von Wasserstoff beträgt $W_{th}=3,92$ kWh/kg. Dieser Wert gilt jedoch nur in der Theorie. In der Praxis werden weit aus geringere Werte erzielt. Die meistverwendeten Prozesse zur Verflüssigung sind der Linde- oder Joule-Thomson-Expansionszyklus. Dabei kommt es zu einer Verdichtung bei Umgebungstemperatur mit anschließender Vorkühlung durch flüssigen Stickstoff und anschließendes Kühlen durch Wärmetauscher. Durch eine isenthalpische Joule-Thomson-Expansion wird ein Teil des unterkühlten Gases verflüssigt. Der verbleibende gasförmige Anteil wird rezirkuliert und der Wärmetauscher zur Abkühlung des Zufuhrstroms genutzt. Heutige Anlagen erreichen einen Energieverbrauch von 10 bis 13 kWh/kg, wodurch ein thermodynamischer Gesamtwirkungsgrad von 30 bis 40 % erreicht wird. [10]

Durch die Verflüssigung kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der Dichte. Dementsprechend sinkt das Speichervolumen drastisch. 5 bis 10 kg Wasserstoff können in einem Speichervolumen von 70 bis 140 L gespeichert werden. Die Tanks bestehen aus zwei Schichten. Sie setzen sich aus einem Innentank und einem Außentank, welche durch einen Vakuumraum getrennt sind, zusammen. Weiters verfügen Flüssigwasserstofftanks über ein Druckentladesystem und ein Sicherheitssystem. Verluste wegen sogenannter „Boil-Off“-Mechanismen liegen im Bereich von 0,3 bis 3 % pro Tag. Heutige Flüssigwasserstoffspeicher erreichen eine gravimetrische Energiedichte von 6 wt% und eine volumetrische Energiedichte von 1,2 kWh/L. [10]

Größere Tanks haben oft die Form von Sphären. Kleine Speicher sind meist in Zylinder oder in Kugelform aufgebaut. Durch die Verringerung der Oberfläche wird auch versucht die Verluste zu vermindern. Der größte gebaute Behälter ist im Besitz der **NASA** und hat ein Speichervolumen von 3.400 m³ bei einem Durchmesser von 22 m. Die Kosten solcher Speicher belaufen sich auf 10 €/kWh. [10]

2.3.1.3 Transkritische Speicherungen / Kryokomprimierte Flüssigwasserstoffspeicher

Eine Neuerung in der Speicherung von Wasserstoff ist die kryokomprimierte Speicherung. Dabei werden die beiden bereits genannten Speichermethoden (Druckluftspeicher und Flüssigwasserstoffspeicher) kombiniert. Die Speicherung erfolgt über der kritischen Temperatur von 33 K und über dem kritischen Druck von 13

bar bei 300 bis 1.000 bar. Demnach befindet sich der Wasserstoff im superkritischen Zustand und hat eine theoretische maximale volumetrische Speicherdichte von 80 kg/m³. Durch eine kleine Menge an Gas im oberen Teil des Behälters werden „Boil-Off“-Verluste reduziert. Jedoch wird dadurch auch die Speicherdichte verringert. Ein System zur Verdichtung von Flüssigwasserstoff mit einer Zwei-Stufen-Kolbenpumpe wurde von **BMW** in der Kooperation mit **Linde** entwickelt. In **Abbildung 2** ist ersichtlich, dass mittels der kryokomprimierte Wasserstoffspeicherung die höchste Energiedichte aller physikalischen Speicher erreicht wird. [10]

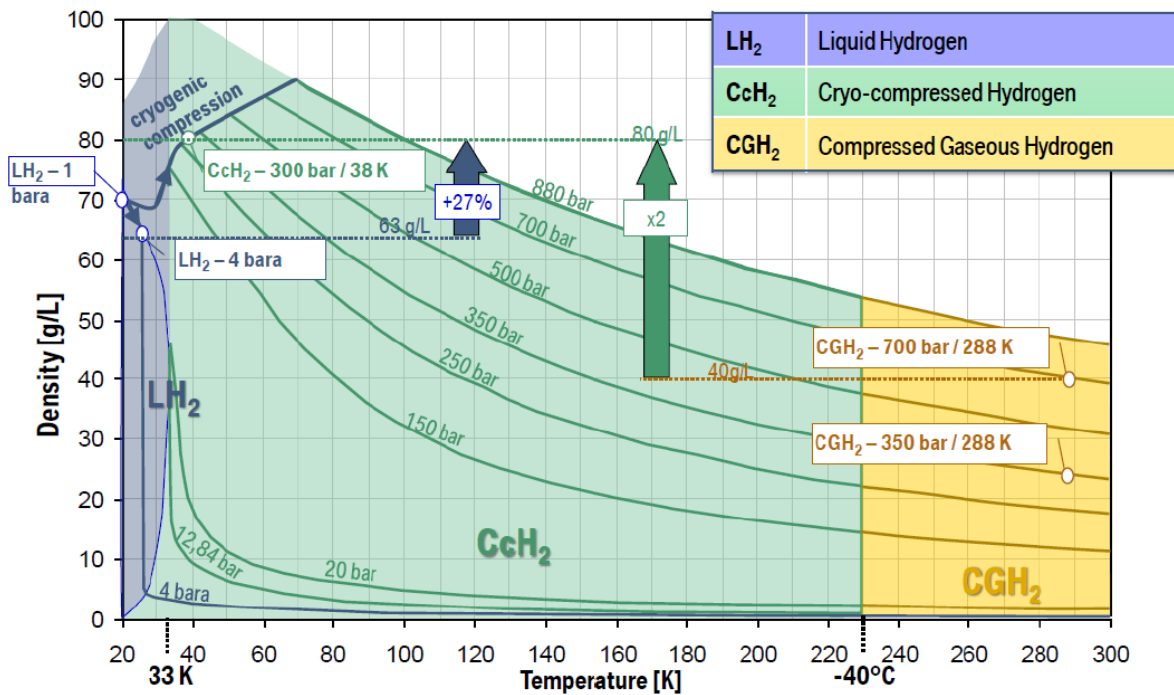


Abbildung 2: Gegenüberstellung von Temperatur und Dichte bei der Wasserstoffspeicherung. [10]

Weiters hat die kryokomprimierte Wasserstoffspeicherung eine höhere Speicherdichte als Druckwasserstoffspeichern und den Vorteil der niedrigen „Boil-Off“-Rate gegenüber den Flüssigwasserstoffspeicher. Die Tanks benötigen weniger Kohlenfaser als Druckbehälter, wodurch diese kostengünstiger sind. Als Nachteil sind jedoch zu erwähnen, dass die „Boil-Off“-Rate nicht 0 % erreichen kann, der hohe Energieaufwand für Kühlung und Verflüssigung, sowie der aufwändige Betankungsprozess und der hohen Preis gegenüber Flüssigwasserstoffspeichern. An Ventile und Pumpe sind zudem einzigartige Anforderungen gestellt (sehr niedrige Temperatur und sehr hoher Druck). Bei bekannten Beispielen werden volumetrische Energiedichten von 1,1 kWh/L und gravimetrische Energiedichten von 5,4 wt% erreicht. Preislich liegen diese Speicher bei 15 €/kWh. [10]

2.3.1.4 Salzkavernenspeicher

Eine stationäre Anwendung ist die Speicherung in Salzkavernen. Es handelt sich dabei um künstlich hergestellte Hohlräume in der Erde. Diese Art der Speicherung bietet den Vorteil, dass sie, zumindest oberflächlich betrachtet, einen geringen Platzverbrauch hat. Weiters lässt sich allein durch die Tiefe der Anlage ein Speicherdruck von 60 bis 180 bar realisieren. Momentan werden solche Speicher besonders für Erdgas eingesetzt. Laut Erfahrungen sind Speicher in 1.000 m Tiefe mit einer Höhe von 500 m und einem Durchmesser von rund 30 m umsetzbar. Diese haben ein Speichervolumen von 500.000 m³. Erzeugt werden die Kavernen durch Ausschwämmen der Erde mit Salzwasser. Das kann durch direktes oder indirektes Aussolen erfolgen. [10]

Aufgrund der selbst bei ungünstigen Bedingungen maximalen Leckagerate von 0,02 % im Jahr eignen sich Salzkavernenspeicher ausgezeichnet als Langzeit- und Großspeicher für Wasserstoff. Weiters ist die Lagerung überaus sicher, da es einen großen Abstand zur Erdoberfläche und dementsprechend keine Fremdeinwirkung geben kann. Salzkavernenspeicher für Wasserstoff sind bereits seit Jahren im Einsatz. Dafür werden speziell angelegte Salzkavernen in Teesside (GB) und Texas (USA) verwendet. Ein bereits genannter Speicher mit 500.000 m³ Speichervolumen könnte rund 5.000 t Wasserstoff bei einem Druck von 100 bar und einer Temperatur von -30 °C speichern. Bei einer Wasserstoff-Energiedichte von 33,3 kWh/kg besteht eine Speicherkapazität von 1.665 GWh. Ein vergleichbarer adiabater Druckluftspeicher hat hingegen eine Kapazität 1,2 GWh. Der Wirkungsgrad bei der Speicherung vom Wasserstoff liegt bei einer Rückverstromung bei 40 %. Pumpenkraftwerke in Österreich, welche zur Gewährleistung der Netzstabilität genutzt werden, laufen mit Wirkungsgraden von 80 %. Durch weitere Forschungen können die Wirkungsgrade der Wasserstoffspeicher verbessert werden. [10]

Neben Salzkavernenspeicher gibt es noch weitere Untertags-Speicher: [10]

- Porenspeicher
- Aquifer-Formationen
- Felskavernen und aufgelassene Bergwerke

Da diese Speicher nicht mit dem Ziel der Arbeit in Zusammenhang stehen, wird hier nicht weiter auf diese eingegangen.

2.3.2 Adsorptionsspeicher

Die Adsorption ist die chemische oder physikalische (über Wechselwirkungen) Bindung von Atomen oder Molekülen an einer festen Oberfläche. Ist diese poröse kann die maximale Fläche erhöht werden, wodurch eine größere Menge des zu

speichernden Mediums adsorbiert werden kann. Materialien, die für diese Art der Speicherung in Frage kommen sind: [10]

- Aktivkohle
- Carbon Nanotubes
- Metal Organic Frameworks (MOF)
- Zeolithe
- Fullerene

Solche Speicher müssen bei niedrigen Temperaturen betrieben werden, da die Adsorption von Wasserstoff temperaturabhängig ist. Physikalische Adsorptionsspeicher haben den Vorteil, dass sie reversibel sind und somit das Speichermedium wiederverwendet werden kann. Weiters verfügen diese Speicher, welche auch Physisorption genannt werden, über ein großes Speichervolumen und eine schnelle Desorption. Die Bindung wird durch Wechselwirkungen erreicht, wobei es zu keiner strukturelle Änderung des Wasserstoffmoleküls kommt. Jedoch sind diese Kräfte im Vergleich zu der chemischen Bindung der Chemisorption gering. [10]

2.3.2.1 Speicherung mit Kohlenstoff / Aktivkohle

Aktivkohle ist ein poröser, feinkörniger Werkstoff aus meist mehr als 90 % Kohlenstoff, welcher sich gut zur Adsorption von Wasserstoff eignet. Durch die schwammartige Struktur verfügt dieser Stoff über eine große Oberfläche. Diese beläuft sich, bei einem Porenradius von 1 bis 5 nm, auf 300 bis 2.000 m²/g. Die Dichte von Aktivkohle beträgt zwischen 0,2 und 0,6 g/cm³. Die Herstellung kann aus mineralischen petrochemischen, tierischen oder pflanzlichen Stoffen erfolgen. Die Bildung der Porenstruktur erfolgt durch eine hydrothermale Reaktion der Oberfläche mit Wasserdampf oder durch Imprägnieren des Stoffes mit oxidations- und dehydratisierungsfördernden Komponenten (Zin-Chlorid ZnCl₂, Phosphorsäure H₃PO₄, Natriumhydroxid NaOH). Nach der Herstellung müssen die Rückstände aus dem Schwamm ausgewaschen werden. [10]

Die Wasserstoffaufnahme ist proportional zur Oberfläche und dem Porenvolumen. Außerdem ist bei dieser Art der Speicherung die Temperatur und der Druck ausschlaggebend. Eine hohe Adsorptionsrate tritt erst bei kryogenen Temperatur oder sehr hohen Drücken auf. Bei Raumtemperatur und einem Druck von 60 bar ist eine gravimetrische Speicherkapazität von 0,5 wt% beobachtet worden. Hingegen wurde bei einer Temperatur von 77 K und einem Druck von 45 bis 60 bar eine Speicherdichte von 5,2 wt% erfasst. Dementsprechend ist eine Wärmekontrolle mit kompetenter Gefäßisolation unbedingt notwendig. [10]

2.3.2.2 Carbon-Nanotubes

Carbon-Nanotubes (CNT) sind röhrenförmige mikroskopische Strukturen, welche ebenfalls aus Kohlenstoffatomen bestehen. Die wabenartigen Strukturen, welche aus

Sechsecken gebildet werden, schließen einen zylindrischen Hohlraum ein. Die theoretische Oberfläche beträgt $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$. Sie können in einwandigen oder mehrwandigen Strukturen ausgeführt werden. Es gibt eine Vielzahl an verschiedenen Techniken zur Herstellung dieser Kohlenstoff-Nanoröhren. Jedoch lässt sich die exakte Länge und der exakte Durchmesser bei keiner dieser Methoden kontrollieren und es kommt immer zu Bildung von Produktgemischen. Deswegen sind Reinigungs- und Separationsmethoden zur Bildung von homogenen Nanotubes zwingend notwendig. [10]

Herstellungsverfahren sind die katalytische Zerlegung von Kohlenwasserstoffen mittels chemischer Gasphasenabscheidungs-Verfahren (CVD), die Zersetzung von Graphit mittels fokussierten Laserstrahls, oder wie bei Fullergenen die Herstellung durch Lichtbogen mittels Katalysatoren. [10]

Durch die Vorteile der großen Oberfläche und der wünschenswerten chemischen und thermischen Stabilität gelten CNT als vielversprechende Option für Gasadsorption. Theoretisch wurde bei Raumtemperatur und einwandigen CNT eine gravimetrische Speicherdichte von 10 wt% genannt. Bei Experimenten wurde jedoch nur eine Speicherdichte von 1,7 wt% bei einem Druck von 120 bar festgestellt. Bei Temperaturen von 233 bis 298 K wurde sogar eine drei bis fünf Mal geringere Speicherdichte als bei Aktivkohle gemessen. CNT haben außerdem ähnliche Probleme wie Aktivkohle. Die hohen Speicherdichten werden erst bei kryogenen Bedingungen erreicht. [10]

2.3.2.3 Metal Organic Framework

„Metal Organic Frameworks“ sind Netzwerke aus Poren und Kanälen, welches aus Metallionen oder Metallclustern gebildet werden. Diese Konstrukte sind durch organische Liganden miteinander verbunden. Experimentell konnten mit diesem Aufbau Oberflächen von theoretisch über $14.600 \text{ m}^2/\text{g}$ und realistisch von $4.000 \text{ m}^2/\text{g}$ erreicht werden. Diese Werte sind der hohen Porosität (90 % freies Volumen) zuzuschreiben. Zur Speicherung von Wasserstoff werden MOF in Pulverform eingesetzt. Einer der bekanntesten Vertreter ist das MOF-5-Konstrukt, welches aus $\text{Zn}_4\text{O}(\text{BDC})_3$ besteht. Dabei sind die Benzenedicarboxylat-Moleküle (BDC) die Kanten und die Zn_4O -Cluster die Eckpunkte. Die theoretische Dichte dieses Beispiels beträgt $4.400 \text{ m}^2/\text{g}$. [10]

Die Herstellung erfolgt über Mikrowellensynthese, Raumtemperatur-Synthese oder Hydrothermalsynthese. [10], [17]

- **Hydrothermalsynthese:** Die **Hydrothermalsynthese**, auch **Solvothermalsynthese**, läuft in einem abgeschlossenen Reaktionsgefäß bei Temperaturen oberhalb des Siedepunkts des Lösungsmittels ab. Es sind hohe Drücke notwendig. Durch diese Voraussetzungen können auch schwer lösliche

Stoffe für die Synthese verwendet werden, da sich durch die Randbedingungen die Löslichkeit erhöht. Die Linkermoleküle im MOF-Gerüst liegen als Anionen vor, weswegen ein Deprotonierungsschritt⁸ notwendig ist. Die notwendige Base wird durch die Auflösung des Lösungsmittels Dialkylformamiden erzeugt.

- **Raumtemperatur-Synthese:** Sind die Ausgangsverbindungen thermisch instabil können nur Herstellungsmethoden verwendet werden, welche bei Raumtemperatur ablaufen. Da bei Carbonsäurelinkern ebenfalls eine Base zur Deprotonierung notwendig ist, wird diese durch kontrollierte Zugabe von organischer Base erreicht. Um keine Verunreinigungen im Gefüge zu erhalten, muss die Zugabe dosiert werden. Diese kann durch ein getrenntes Zersetzen der Komponenten mit anschließenden Übersichten der Lösung oder durch Diffusion der Base in die Reaktionslösung bewerkstelligt werden.
- **Mikrowellensynthese:** Der Vorteile dieser Methode ist die schnelle Erwärmung des Reaktionsgemischs. Lokale Überhitzungen führen zu Kristallisationskeimung und Kristallwachstum. Dadurch werden kurze Reaktionszeiten und enge Partikelgrößenverteilungen erreicht.

MOF gelten als idealer Kandidat für die Speicherung von Wasserstoff. Im Gegensatz zu anderen porösen Materialien verfügen MOF-Poren über keine Wände. Die Adsorption entsteht durch rein physisorbierende Wechselwirkungskräfte. Bei Raumtemperaturen sind jedoch wieder nur geringe gravimetrische Speicherdichten möglich. MOF-5 haben bei 77 K und einem Speicherdruck von 20 bar eine Speicherdichte von 4,5 wt%. Bei anderen Strukturen wie den MOF-177 können Werte in der Höhe von 7,5 wt% (77 K, 70 bis 80 bar) erreicht werden. Die Probleme der Speicherung bei Raumtemperatur kommen, wie auch bei anderen Adsorptionsspeichern, durch die schwachen Wechselwirkungen zustande. Die Speicherung bei 77 K ist reversibel und verfügt über eine schnelle Freisetzungskinetik. [10]

2.3.2.4 Zeolithe

Zeolithe sind Aluminosilikatminerale mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen, Eigenschaften und kristallinen Formen. Der Aufbau besteht aus Oxidoperoxy(oxo)aluminen (AlO_4) und Silicate-Tetraedern (SiO_4). Durch die Verbindung an den Sauerstoffatomen bilden sich Strukturen aus gleichförmigen Poren und Kanälen. Diese Freiräume können Stoffe adsorbieren. Die innere Oberfläche beträgt über $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$. Weiters verfügen diese Konstrukte über eine hohe thermische Stabilität. Solche Zeolithe können nicht nur synthetisch hergestellt werden, sondern treten auch in der Natur auf. Zur Synthese wird ein reaktionsfähiges Gel aus Silicium- und Aluminiumverbindungen erzeugt. Diese amorphe Substanz wird durch

⁸ Bei der Deprotonierung handelt es sich um die Abspaltung von Protonen (Wasserstoffkationen) aus einer Verbindung bei einer Säure-Base-Reaktion. [92]

Keimbildung und Keimwachstum zu einem kristallinen Produkt. Zeolithe finden ihre Anwendung unter anderen als Ionenaustauscher in Wasserenthärter oder zur Reinigung radioaktiver Abfälle. Weiters können sie zu Trocknung von Gasen und Flüssigkeiten, sowie zur Filtration von Trinkwasser und Abwasser als auch zur Sauerstoffanreicherung von Luft verwendet werden. [10]

Wasserstoff kann durch Physisorption oder durch Einkapselung im molekularen Zustand gespeichert werden. Die Einkapselung erfolgt unter erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck. Dabei werden die Moleküle in die käfigartige Struktur der Zeolithe gezwungen. Dementsprechend ist eine Freisetzung auch nur unter erhöhter Temperatur möglich. Bei einer Temperatur von 77 K und einem Speicherdruck von 15 bar kann eine gravimetrische Energiedichte von 2,19 wt% erreicht werden. [10]

2.3.2.5 Fullerene

Bei Fullerene handelt es sich um geschlossene, hohle Moleküle aus Kohlenstoffatomen. Diese liegen entweder als Konstrukt von pentagonalen und hexagonalen Ringen vor, wodurch eine sphärische Krümmung erreicht wird. Das bekannteste Fulleren ist C_{60} welches bereits 1970 in einer Publikation von E. Osawa beschrieben wurde. Die fünf Ringe sind voneinander getrennt, wohingegen die sechs Ringe die Doppelbindung übernehmen. [10]

Eine Art der Herstellung ist die Erzeugung aus Grafit, welcher im Lichtbogen verdunstet wird. Der dabei entstehende Ruß wird chromatographisch gereinigt. Fullerene haben eine hohe Elektronenaffinität und werden deswegen als Elektronenakzeptoren eingesetzt. Sie kommen auch im Bau von Solarzellen zur Anwendung. [10]

Die Speicherung von Wasserstoff erfolgt durch eine Hydrierung mit dadurch verbundener Bildung von CH-Bindungen aufgrund von Chemisorption. Wird diese Verbindung erhitzt, bricht sie wieder auf. Die charakteristische Struktur vom Fulleren bleibt jedoch erhalten. Demnach wäre eine theoretische gravimetrische Speicherdichte von 7,7 wt% möglich. Jedoch kommt es derzeit zu Problemen bei der Einspeicherung, weswegen dieser Wert (noch) theoretisch ist. Durch erhöhte Randbedingungen bei der Hydrierung von C_{60} mit Wasserstoff werden keine Katalysatoren für das Gas benötigt. Der benötigte Bereich liegt zwischen 350 und 450 °C und 5 und 120 bar. [10]

Demnach werden sowohl für die Hydrierung als auch für die Freisetzung von gespeichertem Wasserstoff hohe Temperaturen benötigt. Jedoch werden Katalysatoren für die Beschleunigung der Entladekinematik erforscht. Durch den Einsatz von Ni oder Ti können z.B. die Betriebstemperaturen um ca. 50 bis 100 °C gesenkt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass durch extensive Hydrierung, Instabilitäten der hoch hydrierten Fullerene beobachtet wurden. Dies ist bei niedrig hydrierten Fullerenen nicht der Fall. Es wird angenommen, dass bei einer

gravimetrischen Speicherdichte von 3,5 wt% eine reversible Hydrierung und Dehydrierung vollzogen werden kann. Bei Gemischen mit Lithiumhydriden (Verbundmaterial $\text{Li}_{60}\text{C}_{60}$) wurden reversible Wasserstoffspeicherungen bei einer Speicherdichte von 5,2 wt% beobachtet. Weiters trat dabei eine schnelle Kinetik und eine niedrige Desorptionstemperatur (270 °C statt 500 bis 600 °C bei normalen Fullerenen) auf.[10]

Durch die genannten Nachteile und die hohen Produktionskosten, gelten Fullerene als momentan noch ungeeignet und unwirtschaftlich für die Wasserstoff-Speicherung. Durch weitere Forschungen könnten jedoch Einsatzgebiete erschlossen werden. [10]

2.3.3 Absorptionsspeicher

Im Gegensatz zu Adsorptionsspeichern funktioniert die Absorption von Wasserstoff über das Einlagern im freien Volumen und nicht an der Oberfläche eines anderen Stoffes. Die gängigsten Absorptionsspeicher sind die Metallhydride und die Mikrogaskugeln. Bei Metallhydriden wird der molekulare Wasserstoff durch die Oberfläche der Hydride zunächst katalytisch gespalten und anschließend im atomaren Zustand eingespeichert. Bei den Mikrogaskugeln werden durch die Bedingungen bei der Einspeicherung (hoher Druck und hohe Temperatur) die Wände für den Wasserstoff durchlässig. Durch Diffundierungsprozesse wird der Wasserstoff dabei in die Glaskugeln eingespeichert. [10]

2.3.3.1 Hybridspeicher

Wie bereits erwähnt, sind Hybridspeicher Systeme, in denen Wasserstoff mit anderen Elementen eine Verbindung eingeht. Es werden zwei Arten abhängig von den verwendeten Verbindungselementen beschrieben. Auf beide Arten wird in diesem Kapitel eingegangen. Erstens werden Speicher mit Metallen, Legierungen und intermetallischen Verbindungen (Metallhydride) beschrieben. Zweitens Speicher mit komplexen Hydriden aus Metallen oder Nicht-Metall-Verbindungen.[10]

2.3.3.2.1 Metallhybridspeicher

Metallhydride haben die Eigenschaft, dass der eingespeicherte Wasserstoff bei Erhitzung des Speichers freigesetzt wird. Der zu speichernde Stoff belegt die interstitiellen Stellen im Metall Wirtsgitter. Aufgrund des Volumenzuwachs bei der Einspeicherung liegt das Metall meist als Pulver vor. Weiters wird ab Kristallgrößen unter 1,3 nm die Desorptionsenergie gesenkt. Die Einspeicherung wird wie bereits erwähnt in mehreren Schritten vollzogen. Dabei kommt es zuerst zu einer Adsorption beziehungsweise einer Physisorption des Wasserstoffes an der Oberfläche des Metalls. Hier liegt der Wasserstoff noch molekular vor. Durch die Reaktion zwischen dem Wasserstoff und den Metalloberflächenatomen tritt eine Dissoziation auf, welche die Moleküle in Atome aufspaltet. Anschließend kommt es zu einer Diffusion des Wasserstoffes in das Innere des Metalls. Durch das Einlagern der Wasserstoffatome

in den festen Zwischengitterplätzen werden bei dem nötigen Druck und der geeigneten Temperatur Hydride gebildet. Der Einspeicherungsprozess ist exotherm und setzt Energie in Form von Wärme frei, wohingegen der Entladungsprozess endotherm ist und Energie aufnimmt. [10]

Eingeteilt werden Metallhydride nach der Gleichgewichtstemperatur, die bei einem Desorptionsdruck von 1 bar vorherrscht. Hier gibt es Nieder- (unter 50 °C), Mittel- (zwischen 50 und 200 °C), und Hochtemperaturhydride (über 200 °C). Speichersysteme mit anderen Metallen als Magnesium, Aluminium oder Titan haben nur eine gravimetrische Speicherdichte von 1 bis 2 wt% und sind deswegen unattraktiv für technische Anwendungen. Magnesium erreicht eine Speicherdichte von 7,6 wt% (Desorptionstemperatur 330 °C) und Aluminium von 10,1 wt%. Jedoch ist die Reaktion mit Aluminium nicht reversibel. Eine Speicherung mit Legierungen ist durch die unterschiedlichen chemischen und geometrischen Konfigurationen noch weit komplizierter als eine Speicherung mit Reinmetallen. In den meisten Fällen kommt es zu intermetallischen Verbindungen durch Legierungen mit einem leicht hybridbildenden Metall und einem das keine stabile Hydride bilden kann. Jedoch werden dabei auch nur gravimetrischen Speicherdichte von 1 bis 3 wt% erreicht. Wenn niedrige Sorptionstemperaturen verwendet werden, beläuft sich die Speicherdichte eher auf das untere Ende dieses Bereichs. Daher sind „On-Board“-Speicherungen undenkbar und nur eine Anwendung bei stationären Speicherungen zu erwägen. [10]

2.3.3.3.2 Komplexe Hybridspeicher

Komplexe Hybridspeicher speichern Wasserstoff durch kovalente oder ionische Bindungen in salzähnlichen Materialien. Sie bestehen aus zwei Speichermaterialien. Das erste sind elektropositive Elemente aus der ersten oder zweiten Hauptgruppe. Bei dem zweiten Material handelt es sich um Aluminium, Bor oder Stickstoff in Form von Anionen wie Alanaten, Borhydriden oder Amiden. Sie besitzen eine theoretisch hohe Wasserstoffspeicherdichte und geringes Gewicht. Praktisch wurden volumetrische Energiedichten von 150 g/m³ erreicht. Jedoch haben diese Systeme meist sehr hohe Desorptionstemperaturen und langsame Reaktionskinetik, welche nur unter komplizierten Randbedingungen abläuft. Weiters wird der Wasserstoff bei unterschiedlichen Temperaturen durch unterschiedliche Reaktionen freigesetzt, wodurch besonders hohe Anforderungen an das Wärmemanagement gestellt werden. Besonders Alanaten bieten weitere Vorteile für reversible Wasserstoffspeichersysteme. Wichtige Eigenschaften sind ein niedriges Molekulargewicht, keine Toxizität und kostengünstige Verfügbarkeit. Jedoch ist die Speicherkinetik langsam und die Gewinnung der Alanaten kompliziert. Mittels Dotierung von Natriumalanat und einem Titankatalysator kann eine gravimetrische Speicherdichte von 4 wt% erreicht werden. Dabei kommt es bereits bei Temperaturen von 120 °C zu einer verbesserten Speicherkinetik. [10]

Komplexe Borhydride erreichen eine Speicherdichte von 20 wt%. Diese Stoffe sind toxisch und thermisch stabil, wodurch eine Freisetzung des gespeicherten Wasserstoffes erst bei höheren Temperaturen möglich ist. Weiters ist die Reversibilität nur unter komplizierten technischen Bedingungen möglich. Metallborhydridverbindungen werden jedoch als wasserstoffliefernde Materialien in wässriger Lösung verwendet. Mittels Hydrolysis wird Wasserstoff freigesetzt. [10]

Lithiumnitrid erreicht eine Speicherdichte von 10,5 wt% und gilt als geeignete Option für mobile Anwendungen. Das hochstabile Lithiumhydrid (LiH) zersetzt sich bei Temperaturen von über 600 °C. Dahingegen zersetzt sich Lithiumamide (LiNH₂) schon über 300 °C. Dabei entsteht aber eher NH₃. Anschließend gibt es eine Wechselwirkung zwischen LiNH₂ und LiH welche H₂ bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen freisetzt (<180 °C). Problematisch ist, dass die erste Reaktion nicht reversibel ist. Dadurch sinkt die gravimetrische Speicherdichte auf 7 wt%. Der Nachteil für „On-Board“-Technologien ist hier jedoch die hohen Wasserstoffdesorptionstemperatur der Amide. [10]

2.3.3.4 Mikroglaskugeln

Mikroglaskugeln bestehen aus kleinen hohlen Glaskugeln. Sie haben einen Durchmesser von 10 bis 100 µm. Die Wasserstoffspeicherung funktioniert durch die Diffundierung von Wasserstoff durch die 1 bis 10 µm dicken Wände der Kugeln. Diese Diffusion ist temperaturabhängig. Die Einspeicherung funktioniert bei einer Temperatur von 400 °C und einem hohen Wasserstoffdruck von 200 bis 500 bar. Nachdem die Temperatur reduziert wird, ist der Wasserstoff durch die reduzierte Diffusionsrate in den Glaskugeln gefangen. Dadurch liegt der eingespeicherte Wasserstoff in Pulverform vor. [10]

Der theoretische Bruchwiderstand ohne etwaige Defekte liegt bei über 1.000 bar. Die gravimetrische Speicherdichte unter realen Bedingungen beläuft sich auf theoretische 17,3 wt%. Dies ist dem geringen Eigengewicht der Glaskugeln zuzuschreiben. Die Herstellung der Glaskugeln kann auf die zwei folgenden Arten stattfinden: [10]

- **Sprühpyrolysis-Prozess:** Bei dieser Methode werden Halbprodukte (Glasfritten, Mikrokugeln und Mikropulver) in einer „Exy-fuel“-Flamme (1.000-1.200 °C) eingespritzt. Durch die Parameter Größe und Zusammensetzung werden die Eigenschaften des finalen Produkts gesteuert. Die thermische Zersetzung führt zur Freisetzung von Gasen, welche die Bildung von Hohlkörpern unterstützt.
- **Flüssigkeitstropfen-Methode:** Dabei kommt es zum Einsatz eines Fallturms, in dem sich verschiedenen Temperaturzonen ausbilden. Das Glas wird mit Wasser vermischt und mit einem Luftstrom durch den Fallturm geleitet. Durch die verschiedenen Zonen wird das Wasser nach und nach verdampft und es

bilden sich Gelteilchen. In den unteren heißeren Zonen verschmelzen die Teilchen und es entstehen Mikrogaskugeln.

Durch diese Art der Speicherung lässt sich Wasserstoff ohne nennenswerte Verluste über längere Zeit lagern. Jedoch ist der Entladungsprozess mit Schwierigkeiten verbunden. Diese kann durch das Licht von Infrarot-Lampen oder durch thermische Energie bewerkstelligt werden. Dabei müssen Temperaturen von 200 bis 400 °C erreicht werden, um den Wasserstoff wieder freizusetzen. Diese Wärme kann durch elektrische Heizungen, Abwärme oder Heizöfen realisiert werden. Jedoch ist hier die Wärmeleitfähigkeit der Mikrogaskugeln der limitierende Faktor. Bei der Freisetzung durch Infrarotlicht kann nur mit einer Probendicke von 10 mm, wegen der Strahlungsabsorption, gearbeitet werden. Weiters können die Kugeln für die Freisetzung noch zerstört werden. Dies hat jedoch gravierende wirtschaftliche Nachteile. [10]

2.4 Einsatzgebiete von Wasserstoff

Wasserstoff findet in der Technik und der Medizin eine Vielzahl an Anwendungen. Eine vollständige Erklärung der Technologien dieser zahlreichen Einsatzgebiete würden den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Daher wird in diesem Kapitel mit Blick auf die Ziele dieser Arbeit ein Überblick über die wichtigsten Anwendungsgebiete in der Technik gegeben. Für die stationären und mobile Anwendungen gibt es allgemein folgende Einsatzgebiete von Wasserstoff: [10]

- Stationäre Anwendung
 - Analytische Chemie
 - Fischer-Tropsch-Verfahren
 - Haber-Bosch-Verfahren
 - Halbleiterindustrie
 - Hydrofining
 - Hydrocracking
 - Kältetechnik
 - Lebensmittelchemie
 - Methanol Herstellung
 - Reduktion und Behandlung von Metallen
 - Schweißen und Schneiden
 - Wasseraufbereitung
- Mobile Anwendung
 - Raketenantriebe
 - Synthese von Adenosintriphosphat (ATP)
 - Turbinentreibstoff

2.4.1 Stationäre Wasserstoffnutzungen

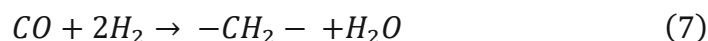
Die Anwendungen in der Verkehrstechnik sind zu großen Teil noch im Entwicklungsstadium und nicht in großflächiger kommerzieller Verwendung. Nur ein kleiner Prozentsatz des weltweiten verwendeten Wasserstoffes wird in diesen Technologien verwendet. Dahingegen sind viele der chemischen Anwendungen wie das Haber-Bosch-Verfahren und die Erdölraffinerie bereits seit Jahren im Einsatz. Im Folgenden werden hier die meistverwendeten Einsätze, in der genannten Liste an Anwendungen, beschrieben. [14]

2.4.1.1 Analytische Chemie

In der analytischen Chemie findet Wasserstoff in einer Vielzahl von Anwendungen Einsatz. Es kann als Betriebsgas und als Brenngas verwendet werden. Ein Beispiel ist die Verwendung als Trägergas bei Gaschromatographie oder als Brenngas bei Flammenionisationsdetektoren. Der Nutzen dabei ist die Erhöhung der Flammentemperatur. Damit besteht ein höheres Ionisationspotential, wodurch Verbindungen und Elemente ionisiert werden können, welche bei niedrigeren Temperaturen nicht zu detektieren sind. [14]

2.4.1.2 Fischer-Tropsch-Verfahren

Das Fischer-Tropsch-Verfahren, welches zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige, feste und langkettige Kohlenwasserstoffe verwendet wird, wurde von den deutschen Chemikern *Franz Fischer* und *Hans Tropsch* entwickelt. Die Reaktion vom Synthesegas erfolgt unter einem Druck von 20 bis 40 bar und einer Temperatur von 200 bis 350 °C. Dabei werden Eisen-, oder Kobaltkatalysatoren verwendet. Die Reaktionsgleichung lautet:



Es entstehen lange gerade Ketten aus gesättigten Alkanen. Die Reaktion läuft exotherm ab. Bei höherer Temperatur wird die Bildung von kurzkettigen leichtsiedenden Ketten gefördert. Bei niedrigen Temperaturen entstehen eher langkettige Alkane. Durch diesen Mechanismus und einen möglichen Katalysator lassen sich die Eigenschaften des Endproduktes gut bestimmen.

Mit diesem Verfahren werden Kraftstoffe hergestellt, welche schwefel- und aromatenfrei sind. Weiters sind dieselben Siedelagen und Zündeigenschaften mit verschiedenen Rohstoffen erreichbar. Die Treibstoffe bekommen ihre Unterteilung durch den für die Synthesegas verwendeten Rohstoff. Es existieren BTL-Kraftstoffe (Biomass to liquid), CTL-Kraftstoffe (Coal to liquid) und GTL-Kraftstoffe (Gas to liquid). Der Wirkungsgrad der ersten beiden beläuft sich auf 50 %. Bei der Erzeugung von GTL wird ein Wirkungsgrad von 70 % erreicht. Solche synthetischen Kraftstoffe werden für alternative Verbrennungsprozesse verwendet. Sie reduzieren die

Emissionen im Motor und verfügen nur über einige Prozent geringeren Energieinhalte als traditionelle fossile Kraftstoffe. [14]

2.4.1.3 Haber-Bosch-Verfahren

Mittels des Haber-Bosch-Verfahrens zur Herstellung von Ammoniak wird etwa die Hälfte des weltweit verwendeten Wasserstoffes eingesetzt. Dabei wird H_2 als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Ammoniak (NH_3) verwendet, welcher weiter notwendig für die Herstellung von Stickstoffdüngemittel ist. Erfunden wurde das Verfahren vom Chemiker *Fritz Haber* und dem Ingenieur *Carl Bosch*. Dabei wird Wasserstoff und Stickstoff zu Ammoniak synthetisiert. Die Reaktionsgleichung lautet:



Bei Experimenten wurden die notwendigen Bedingungen für eine hohe Ammoniakproduktion bestimmt. Diese sind:

- Eine Temperatur von 500 °C,
- ein Druck von 450 bar,
- ein Mengenverhältnis von Stickstoff zu Wasserstoff von 3:1, sowie
- die Verwendung von Katalysatoren zur Beschleunigung der Reaktion.

Durch Druckerhöhung wird das Gleichgewicht der Reaktion auf die rechte Seite der Gleichung verlagert. Bei hohen Temperaturen wird die Ammoniakausbeute jedoch reduziert, weswegen Katalysatoren eingesetzt werden. Weiters wird dadurch die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht. Das Gasgemisch von Stickstoff und Wasserstoff wird mit einem Kompressor auf einen Druck von 450 bar verdichtet. Anschließend wird es von Verunreinigungen (Schwefelverbindungen und Kohlenmonoxide), welche die Reaktion stören würden, gereinigt. Durch die Erhitzung im Kontaktofen läuft die beschriebene Reaktion bei 500 °C ab. Das Reaktionsrohr muss aus kohlenstoffarmem Stahl bestehen, da der Wasserstoff sonst mit dem Kohlenstoff reagieren würde. Das erstandene Ammoniakgas wird in einem Kühler abgekühlt und von den nicht reagierten Stoffen getrennt. Nur 15 % der Ausgangsstoffe werden in Ammoniak umgewandelt. Der Rest wird rezirkuliert. Das Synthesegas wird aus Erdgas reformiert. [14]

2.4.1.4 Kernfusion

Die Erklärung der Kernfusion der Sonne wurde erst durch die theoretischen Gesetze der Quantenphysik möglich. Davor ging man davon aus, dass die Sonne nicht heiß genug für diesen Reaktion sei. Das Prinzip beruht auf dem von Albert Einstein beschriebenen Gesetz, welches es erlaubt Masse in Energie umzuwandeln. Bei einer Kernfusion werden vier Wasserstoff-Atome zu einem Helium-Atom fusioniert. In letzter Zeit wurden signifikante Fortschritte im Bereich dieser Technologie gemacht. Jedoch wird es noch mehrere Jahre, wenn nicht Jahrzehnte dauern, bis solch eine Technologie kommerziell genutzt werden kann. Durch diese Reaktion kann nicht nur

Energie aus Masse umgewandelt, sondern auch schwerere Elemente geschaffen werden.

Es werden Deuterium und Tritium (schwerer Wasserstoff und sehr schwerer Wasserstoff) als Treibstoff verwendet. Diese werden in einem Plasma zur Fusion gebracht. Um dieses Plasma zu erzeugen und stabil zu halten sind sehr herausfordernde Temperaturen erforderlich. Es wird versucht das Plasma durch Magnetfelder oder Laser zu stabilisieren. Helium wird entweder rezirkuliert oder als Abfall ausgeschieden. Die Abwärme dieser Reaktion wird genutzt, um Wasser zu verdampfen und eine Dampfturbine zu betreiben. [18], [19]

Wie bereits erwähnt gibt es eine große Anzahl an verschiedenen Einsatzgebieten von Wasserstoff. Da die meisten jedoch nicht relevant für diese Arbeit sind, werden sie hier nicht weiter ausgeführt.

2.4.2 Mobile Wasserstoffnutzungen

In diesem Kapitel werden verschiedene Konzepte zur Nutzung von Wasserstoff als Treibstoff für mobile Fahrzeuge beschrieben. Dabei kann Wasserstoff bei Flugzeugen, Raketen, Automobilen, Zügen und weiteren Anwendungen zum Einsatz kommen. Verwendete Systeme sind derzeit Wasserstoffmotoren oder Brennstoffzellen. Turbinen sind für stationäre Einsatzgebiete bereits verfügbar, aufgrund der fehlenden Infrastruktur meist jedoch nicht in Verwendung. Große Flugzeughersteller, wie **Airbus** oder **CFM**, forschen bezüglich des Einsatzes von Wasserstoffturbinen in der Luftfahrt. [20]

2.4.2.1 Wasserstoffantriebe

In dieser Arbeit wird auf den Wasserstoffverbrennungsmotor und die Brennstoffzelle eingegangen. Alternative Antriebe, wie etwa Wasserstoff als Raketentreibstoff, werden hier nicht vertieft beleuchtet.

2.4.2.1.1 Verbrennungsmotor

Die Verwendung von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren wird schon seit den 1920er-Jahren erprobt. Dabei werden vorhandene Motoren umgerüstet, um sie für einen Betrieb mit reinem Wasserstoff oder Gasen, welche mit Wasserstoff versetzt sind, einzusetzen. Dabei ist das bereits vorhandene Wissen über Verbrennungsmotoren und die Kompatibilität zum Einsatz von mehreren Treibstoffen von Vorteil. Im Vergleich zu den anderen Brennstoffen (Diesel, Benzin etc.) besitzt Wasserstoff einen hohen massenspezifischen Energiegehalt, jedoch einen niedrigen volumetrischen Energiegehalt. Die Temperatur, bei der es zu einer Selbstzündung kommt, ist weitaus höher als bei Benzin. Deswegen wird Wasserstoff meist in fremdgezündeten Motoren eingesetzt. Diese Verwendung ist zwar möglich, aber wegen den Stoffeigenschaften von Wasserstoff unpraktisch. Um dies auszugleichen und die Klopfеigenschaften zu verbessern, werden nur Treibstoffgemische eingesetzt.

Durch eine hohe laminare Flammgeschwindigkeit können so gute Wirkungsgrade erreicht werden. Mit dem resultierenden Druckanstieg werden jedoch die Materialien auch verstärkt belastet und es kommt zu einem größeren Verbrennungsgeräuschpegel. [14], [21], [22]

Weiters sind Schadstoffemissionen nicht unrelevant. Kohlenstoffe wie CO₂ oder CO liegen an der Nachweisbarkeitsgrenze, da diese nur durch vorhandene Schmierstoffe in das Abgas gelangen können. Jedoch ist der Ausstoß von Stickstoffoxiden zu bedenken. Deswegen kommt es zum Einsatz von 3-Wege-Katalysatoren. Die Unterteilung kann dabei nach Zeitpunkt und Ort der Einspritzung von Wasserstoff, der Bauart des Motors, dem Temperaturniveau, der Art der Zündungseinleitung, der Teillastregelung und des Ladungszustandes erfolgen. Es werden bis auf ein paar wenige Optionen normalerweise Hubkolbenmotoren für die Verbrennung von Wasserstoff eingesetzt. Wankelmotoren sind eine Seltenheit. Aufgrund der großen Breite der Zündgrenzen sind gute Teillastbetriebe möglich. Das Luftverhältnis kann in einem Bereich von 0,13 bis 10 liegen. [14]

Die Einstellung mit den besten Endergebnissen sind die warme, äußere Gasmischbildung, die Direkteinspritzung und die Verwendung von kryogener äußerer Gasmischung mit Fremdzündungen. Jedoch haben diese Systeme eine weitaus höhere Komplexität und damit auch einen höheren Entwicklungsaufwand in der Umsetzung. [14]

Anbei werden bekannte Beispiele von Fahrzeugen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren beschrieben: [14]

- **MAN Wasserstoff-Stadtbus**

Diese Busse gibt es in Ausführungen mit äußerer als auch innerer Gemischbildung. Es kommen 6-Zylinder-Reihenmotoren zum Einsatz. Aufgeladen kommt der Motor mit der äußeren Gemischbildung auf eine Leistung von 200 kW bei einem Wirkungsgrad von 42 %. Davon waren acht Einheiten in Hamburg unter dem Projektnamen **HyFleet-CUTE** im Einsatz.

- **BMW Hydrogen 7**

2007 wurde von BMW die **Hydrogen 7** Reihe vorgestellt. Es handelt sich dabei um Fahrzeuge mit einem bivalenten Motorkonzept, welche sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin betrieben werden können. Die Umschaltung wurde sogar während der Fahrt realisiert. Die Leistung des Motors belief sich mit Wasserstoff und Benzin auf 191 kW. Die Wasserstoffspeicherung erfolgte durch einen kryokomprimierte Flüssigkeitsspeicher.

- **Mazda RX-8 Hydrogen RE**

Mazda verwendete einen Wankel-Verbrennungsmotor. Es konnte sowohl Wasserstoff als auch Benzin als Treibstoff verwendet werden. Der Wasserstoff wurde in einem Drucktank bei 350 bar gespeichert. Die Leistung des Motors mit Wasserstoff betrug 81 kW, allerdings nur mit einer Reichweite von 100 km.

- **Aston Martin Rapid S**

Aston Martin stellte ebenfalls ein bivalentes Wasserstoff-Benzin-System vor. Dieses wurde für den Langstrecken-Rennsport entwickelt. Der Motor war ein V12-Saugmotor, welcher mit einer externen Wasserstoff-Gemischbildung betrieben wurde. Weiters wurde eine Bi-Turbo-Konfiguration eingesetzt.

Weiters werden Systeme mit dem Betrieb von Wasserstoff und Methan vorgeschlagen. Die Vorteile eines solchen Systems lassen sich wie folgt zusammenfassen: [14]

- Absenkung der Emissionen abhängig vom Mischverhältnis
- magerer Betrieb des Motors
- Verbrennungsbeschleunigung und Wirkungsgradverbesserung
- Reichweitenvorteil
- Synergie der gasführenden Komponenten
- Brückenfunktion
- regenerative H₂ Erzeugung

Gase, die für diese Mischung in Frage kommen, wären Erdgas, Biogas oder Gemische. Sie sind mit Wasserstoff bei Normalbedingungen gut vermischbar. Das Verhältnis lässt sich über Partialdrücke steuern. Durch den Methananteil kann der Nachteil der geringen volumetrischen Energiedichte des Wasserstoffes nahezu komplett aufgehoben werden. Jedoch werden dadurch die Abgasemissionen verschlechtert. [14]

Als Beispiel wird der Mercedes **Benz E 200 NGT** beschrieben. Der verwendete Motor ist ein 4-Zylinder Reihenmotor mit Kompressoraufladung und Ladeluftkühlung, welcher mit Benzin oder Erdgas betrieben werden kann. Es wird das Kunststoffsaugrohr gegen eines aus Aluminium getauscht, sowie geeignete Injektoren für den Wasserstoff installiert. Weiters muss die Motorsteuerung grundlegend überarbeitet werden. Mit Wasserstoff hat der Motor eine Leistung von 70 kW. [14]

2.5.2.1.2 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle, dessen Funktionsprinzip schon 1838 von *Christan Friedrich Schönbein* entwickelt wurde, konnte sich aufgrund der zeitgleich entwickelten mechanisch angetriebenen Dynamomaschinen zur Erzeugung von Strom nicht durchsetzen. Demnach wurde in diese Richtung auch weniger geforscht und es gibt noch ein extremes Verbesserungspotential. Die heutigen Herausforderungen für Brennstoffzellen sind die hohen Herstellungskosten bei niedrigen Stückzahlen, die

Lebensdauer, der Wirkungsgrad und die dynamischen Betriebsverhältnisse. Demgegenüber stehen die Vorteile der direkten Umwandlung der chemischen gebundenen Energie, dem hohen Wirkungsgrad - selbst bei niederen Temperaturniveaus (da nicht gebunden an Carnot-Prozess) -, keine Emissionen, keine beweglichen Teile und die niedrigen Herstellungskosten bei hohen Stückzahlen. [14]

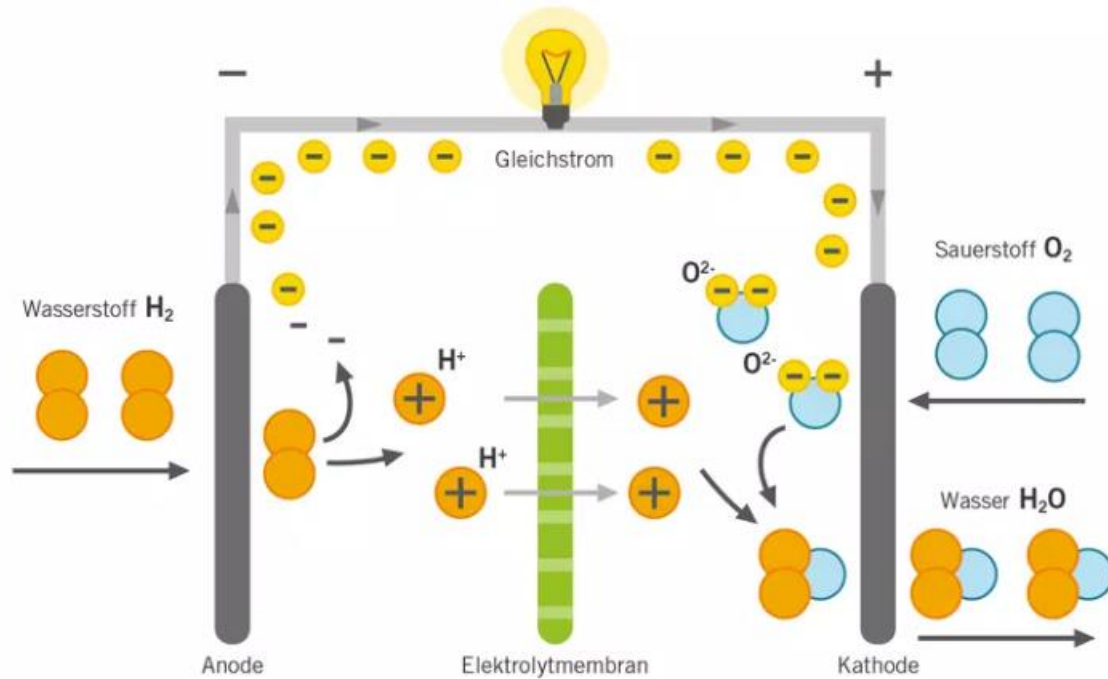
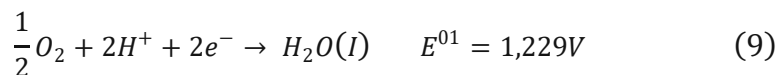


Abbildung 3: Aufbau und Funktion einer PEM-Brennstoffzelle. [14]

Brennstoffzellen können mit vielen verschiedenen Brennstoffen und Konstruktionen realisiert werden. Zur Erklärung des Funktionsprinzips wird eine Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle ausgeführt als Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle beschrieben (**Abbildung 3**). Der Brennstoff (Wasserstoff) gelangt durch Diffusion der Gasdiffusionsschicht an die Anode, wo er durch Katalysatoren zu $2H^+$ Ionen reagiert. Diese $2H^+$ Ionen können über das Elektrolyt durch die Membran zu der Kathode wandern. Dort nehmen sie die zwei Elektronen wieder auf, welche durch den Potentialunterschied über einen äußeren Stromkreis an der Membran vorbei geleitet werden. Dadurch wird eine Spannung induziert. Der zugeführte Sauerstoff auf der Kathodenseite nimmt den Wasserstoff auf und wird anschließend als Wasser abgeschieden. Das Elektrolyt ist leitend für Protonen und isolierend für Elektronen. Es kommt zu einer Oxidation der Anode und einer Reduktion der Kathode. Dabei laufen folgenden Reaktionsgleichungen ab: [14]



Das Elektrodenpotential, und damit die Zellspannung, wird durch die Spannung einer Halbzelle, gegen eine Wasserstoffelektrode als Bezugs-elektrode, bei den

Standardbedingungen von 25 °C und 1,013 bar ermittelt. Elektroden sind porös damit die Fläche der Dreiphasengrenze vergrößert wird (Brennstoff, Katalysator, Ionomer). Elektrochemische Kenngrößen sind die Thermoneutralspannung, das Standardpotential, die reversible Zellspannung und der Wirkungsgrad. Sie werden aus der Reaktionsenthalpie und der freien Reaktionsenthalpie errechnet. Die freie Reaktionsenthalpie ist die maximal abgebbare Arbeit und wird durch die Ladungszahl multipliziert mit der Faraday Konstante und der Zellspannung erhalten. [14]

In **Tabelle 5** werden verschiedene Brennstoffe für Brennstoffzellen und deren Enthalpien verglichen. Weiters werden auch die verschiedenen Brennstoffzellentypen in **Tabelle 6** gegenübergestellt. [14]

Tabelle 5 Vergleich von Eigenschaften der verschiedenen Brennstoffe für Brennstoffzellen.[14]

Brennstoff	Gesamtreaktion	ncl	ΔRHm_0	ΔRGm_0	E0	nth0
			[kJ/mol]	[kJ/mol]	[V]	[%]
Wasserstoff (l)	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	2	-285,83	-237,13	1,229	83
Wasserstoff (g)	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	2	-241,82	-228,57	1,184	94,5
Methan	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	8	-890,8	-818,4	1,06	91,9
Methanol	$CH_3OH + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	6	-726,6	-702,5	1,21	96,7
Kohlenstoff	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	4	-393,7	-394,6	1,02	100,2
Kohlenstoff	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	2	-110,6	-137,3	0,71	124,2

Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle ist vom Laststrom abhängig. Das Optimum wird bei geringen Lastströmen erreicht. Gesamtsysteme haben einen Wirkungsgrad von 60 %, die einzelnen Zellenwirkungsgrade hingegen von bis zu 75 %. Verluste können in Form von Abwärme auftreten. [14]

Tabelle 6 Verschiedene Typen von Brennstoffzellen. [14]

Typ	Betriebstemperatur	Elektrolyt	Ionenleitung	CO ₂ -Toleranz	Brennstoff	Temperaturbereich
AFC	60-80°C	wässrige Kalilauge	OH-	<1ppm	H ₂	NT

DMFC	ca. 80 °C	protonenleitende Membran	H+	-	CH ₃ OH	NT
NT-PEMFC	60-120 °C	protonenleitende Membran	H+	<100 pm	H ₂	NT
HT-PEMFC	120-200 °C	protonenleitende Membran	H+	<500 pm bis 1%	H ₂	NT
PAFC	160-200 °C	konzentrierte Phosphorsäure	H+	<1%	H ₂	NT
MCFC	ca. 650 °C	Karbonat Schmelze	CO ₃ ⁻⁻	verträglich	H ₂ , CO	HT
SOFC	ca. 1.000 °C	dotiertes Zirkoniumdioxid	O ⁻⁻	verträglich	H ₂ , CO	HT

Durch die Serienproduktion des **Hyundai ix35 FCEV** 2015, des **Toyota Mirai** 2016 und des **Honda Clarity** 2017, ist der Markteintritt für Wasserstoff-PKW realisiert worden. Diese Fahrzeuge werden in **Tabelle 7** verglichen. Mit Stand 2017 gab es rund 3.000 Fahrzeugt und 274 Tankstellen weltweit. Die Sicherheitsbedenken wegen Crash-Verhalten und der Entzündung des Wasserstoffes sind erprobt und ausgeräumt. Die Leistungen der Brennstoffzellen der genannten Fahrzeuge belaufen sich auf 100 bis 114 kW. Es werden ausschließlich PEM (Polymerelektrolytmembran)-Brennstoffzellen verwendet. Der Wasserstoff wird bei 700 bar in einem Druckluftspeicher gelagert. Obwohl dadurch nur 5 bis 6 kg Wasserstoff zu Verfügung stehen, reicht dieser für eine Reichweite von 500 bis 600 km. [14]

Tabelle 7 Gegenüberstellung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb. [14]

Fahrzeuge	Hyundai ix35 FCEV	Toyota Mirai	Honda Clarity
Leistung Brennstoffzelle in kW	100	114	103
Leistung Elektromotor in kW	100	113	130
Kapazität Akkumulator in kWh	0,95	1,59	1,73

H₂-Tankinhalt in kg	5,63	4,92	5,46
Reichweite in NEDC in km	594	502	589
Betankungsdauer in min	<3	<3	<3
Anschaffungspreis bzw. Leasing [€]	68.000€	ca. 52.400 ⁹	ca. 336/Monat ¹⁰

Im Vergleich zu batteriebetriebenen PKW haben brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge gewisse Vorteile. Jedoch sind sie aufgrund der hohen Anschaffungskosten, welche aus der niedrigen Stückzahl resultieren, derzeit nicht konkurrenzfähig. Im Vergleich zu Motoren mit fossilem Brennstoff wird bei Brennstoffzellen schon bei niedrigen Leistungen ein guter Wirkungsgrad erzielt. PKW mit Verbrennungsmotore erreichen erst bei höheren Lasten ihren optimalen Wirkungsgrad. Im **NEFZ**¹¹ wird eine Analyse von **Hyundai** beschrieben, welche zeigt, dass die Modelle **ix35 FCEV** einen Wirkungsgrad von 43 % erreichen, wohingegen Benzin- und Dieselfahrzeuge nur Werte im Bereich von 22 und 24 % erzielen. [14], [23]

Mehrere Fahrzeughersteller sind auch mit der Entwicklung oder bereits mit der Produktion von Hybridsystemen beschäftigt. Mercedes produzierte die A-Klasse F-Cell und deren Nachfolger die B-Klasse F-Cell. Weiters stellten sie im Jahre 2018 die Kleinserie der GLC F-Cell Fahrzeuge vor. Dabei handelt es sich um einen Plug-In-Hybrid mit einer Reichweite von 486 km und einem 4,4 kg Wasserstofftank. Dieses Fahrzeug erreicht eine Leistung von 147 kW. [14]

Neben PKW wurden Brennstoffzellenantriebe auch für andere Verkehrsoptionen umgesetzt. Eine Übersicht verschiedener Technologien wird hier beschrieben: [14]

- **Bus**

Personenbusse mit Brennstoffzellen sind bereits weit verbreitet. Sie stehen in Serienfertigung und von mehreren Marken wie **Van Hool**, **Toyota**, **Hyundai** und

⁹ Umgerechnet von 57.500\$

¹⁰ Umgerechnet von 369\$

¹¹ Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ). Heutzutage abgelöst durch den „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure“ (WLTP). Dabei handelt es sich um genormte Messverfahren um den Verbrauch und die CO₂-Emissionen von neu typisierten Fahrzeugen zu messen und die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. [93]

Mercedes zur Verfügung. Aufgrund der eingesetzten Stückzahl befinden sich die Anschaffungskosten jedoch noch über jenen von Dieseln. In der Norm kommt es zum Einsatz von PEM-Brennstoffzellen. Der Aufbau des Antriebsstranges ist analog zu PKW. Sie erreichen eine Reichweite von 300 bis 450 km mit einem Verbrauch von 8 bis 9 kg Wasserstoff pro 100 km. [14]

- **LKW**

Ausführungen von LKW mit Brennstoffzellen werden von mehreren Herstellern erforscht. Momentan sind die Systeme jedoch noch in der Konzept- und Prototypenphase. Es gibt noch keine Serienfertigungen. Bekannte Hersteller auf diesem Sektor ist z.B.: **Nikola Motor Company**. Jedoch muss für einen kommerziellen Nutzen noch die Lebensdauer, die Kraftstoffpreise und die Tankstelleninfrastruktur verbessert werden. [14]

- **Zug**

Der Einsatz von Brennstoffzellen ist bei Fehlen von Oberleitungen eine gute Ergänzung der Bahninfrastruktur, um eine Unabhängigkeit von Dieseltriebwagen zu erreichen. Der erste Personenzug mit Brennstoffzellenantrieb wurde vom Hersteller **Alstom** entwickelt. Er verfügt, dank seines großen Speichers von 140 kg Wasserstoff, über eine Reichweite von 600 bis 800 km. Dieser Zug ist seit 2018 in Deutschland in Probetrieb. Durch die Spitzenleistung der 400 kW Brennstoffzellen kann er eine Geschwindigkeit von 140 km/h erreichen. [14]

- **Stapler**

Ein besonders beliebtes Einsatzgebiet für mobile Brennstoffzellen sind Stapler. Da sie oft in Innenräumen betrieben werden, ist ein emissionsloser Antrieb von großem Vorteil. Im Projekt **HyLOG**, welches ein A3 Leuchtturmprojekt¹² ist, wurden Blei-Säurebatterie betriebene Stapler auf Brennstoffzellen umgerüstet. Der Wasserstoff wird aus einer von Solarzellen betriebenen Elektrolyse erzeugt. Durch diesen Antriebswechsel wurde die „Betankungsdauer“ erheblich reduziert. Weiters konnte die Reichweite der Fahrzeuge verdoppelt werden. Dieses Projekt erhielt mehrere Auszeichnungen von renommierten nationalen und internationalen Institutionen. Es wurde durch das Projekt **E-LOG BioFleet** fortgesetzt. Dabei kommt ein 350 bar Wasserstoffspeichersystem zum Einsatz. Der Umbau auf eine PEM-Brennstoffzelle wurde von der Firma **Linde Fördertechnik GmbH** durchgeführt. Seit Ende 2013 ist diese Flotte bei der Firma **DB Schenker** im Einsatz. Der Wasserstoff für dieses System

¹² Ein Leuchtturmprojekt sind herausragende Projekte, welche eine zukunftsweisende Richtung für mehrere verschiedene Technologien vorgeben soll. [94]

wird von der **OMV Refining & Marketing GmbH** durch die Reformierung von Biomethan CO₂ neutral erzeugt. [14]

- **Wasser (Boote etc.)**

Die deutsche Marine hat vier Unterseeboote mit fünf Dieselgenerator und zwei PEM-Brennstoffzellen in Betrieb. Der Wasserstoffspeicher ist als Metallhybridspeicher ausgeführt. Jede Brennstoffzelle kann eine Leistung von 120 kW generieren. [14]

Weiters gibt es eine große Anzahl an maritimen Anwendungen für Brennstoffzellenantriebe. Es kommt meist zum Einsatz von PEMFC. Anwendungen sind Sportboote, Motorboote, Kanalschiffe und Hafenfähren. Als Beispiel gibt es die Nemo H₂ in Amsterdam. Das Kanalschiff ist mit einer 65 kW PEM-Brennstoffzelle und einer Batterie ausgerüstet. Sie kann 24 kg Wasserstoff in einem Druckspeicher bei 350 bar speichern. [14]

In New York ist ebenfalls eine Passagierfähre im Einsatz. Diese wird mit einem Brennstoffzellen-Batterie-Diesel-Hybrid-Antrieb betrieben. Die beiden Brennstoffzellen liefern eine Leistung von 33 kW. Weiters ist diese Fähre mit Windrädern und Photovoltaikpaneelen zur zusätzlichen Einspeisung in die Batterie ausgestattet. [14]

- **Luft**

In Forschung und Entwicklung bestehen Bemühungen die Emissionen der zivilen Luftfahrt durch Brennstoffzellen zu reduzieren. Erste Versuche wurden mit dem Forschungsflugzeug **Airbus A320 ATRA** durchgeführt. Es kam jedoch nur zu einer Integration einer Brennstoffzelle in den Bugdrantrieb. Dadurch wurde die Rollbewegung am Boden angetrieben. Es konnte damit am Frankfurter Flughafen 17-19 % der Emissionen und 100 % des Geräuschpegels eingespart werden. Weitere untersuchte Systeme sind der Einsatz von Brennstoffzellen anstelle der Hilfstriebwerke zur Versorgung der elektrischen Systeme an Board. [14]

Der Einsatz von Brennstoffzellen als Hauptantrieb wurde nur bei kleinen Flugzeugen und Drohen realisiert. Das von Antares entwickelte **DLR-H₂** war das erste bemannte Flugzeug mit solch einem Antrieb. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle belief sich auf 52 %. [14]

Das erste Passagierflugzeug mit Brennstoffzellenantrieb war die **HY4**. Der Erstflug erfolgte am 29. September 2016 in Stuttgart. Die Maschine hatte aufgrund Gewichtsverteilung drei Rümpfe, wovon der mittlere mit dem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet war. [14]

2.4.2.1.3 Wasserstoff als Raketentreibstoff

Wasserstoff findet auch als Raketentreibstoff Anwendung. Er wird im flüssigen Zustand in der Rakete gespeichert. Zur Verbrennung wird flüssiger Sauerstoff

verwendet. Die Einspritzung in die Brennkammer erfolgt mit Hochleistungspumpen, der Antrieb durch ein Ausstoßen des Wasserdampfes über eine Lavaldüse.[14]

Wie bereits erwähnt werden derzeit Wasserstoffturbinen für Passagierflugzeuge erforscht und getestet. In dieser Arbeit gilt es festzustellen, ob solche Systeme auch für Kleinflugzeuge eine geeignete Lösung darstellen können. Im nächsten Kapitel [3.2 Beschreibung des ausgewählten Flugzeuges, der PC-21](#) wird ein Luftfahrzeug untersucht und die notwendigen Schritte für die Integration eines Wasserstoffantriebes durchgedacht.

3 Integration des Wasserstoff Antriebes in ein Kleinflugzeug

Derzeit werden laufend Forschungen für Wasserstoff-Turbinen bei Passagierflugzeugen durchgeführt. Wie bereits erwähnt sind **Airbus** und **CFM** mit Hochdruck bemüht eine nahezu emissionslose Luftfahrt zu ermöglichen. Für Kleinflugzeuge sieht die Situation etwas anders aus. Es sind keine Hersteller bemüht Wasserstoffturbinen als Antrieb für diese Kategorie von Flugzeugen zu entwickeln. Dementsprechend wird in dieser Arbeit analysiert, ob dies möglich und sinnvoll ist.

3.1 Die Wahl des Flugzeuges

Bei der Wahl des Flugzeuges, in welches die Integration des alternativen Antriebes folgen soll, müssen Faktoren wie die Größe, der Aufbau aber auch das ursprüngliche Antriebssystem berücksichtigt werden. Die Größe ist insofern relevant, da sich diese Arbeit auf Kleinflugzeuge beschränken soll. Weiters soll ein Flugzeug mit Turbinenantrieb ausgewählt werden, da dieses die größte Ähnlichkeit zum neuen Wasserstoff-Antriebssystem aufweist. Vereinfacht gibt es vier verschiedene Turbinentypen: [24]

- Turbojet-Turbine
- Turboprop-Turbine
- Turbofan-Turbine
- Turboshaft-Turbine

All diese Turbinen sind relevant für diese Arbeit. Bei der Turboprop-Turbine handelt es sich um ein Antriebssystem, welches mit einem vorgesetzten Propeller betrieben wird. Dieser limitiert die maximale Geschwindigkeit im Normalfall. Jedoch gibt es bei Kleinflugzeugen mehr Anwendungsgebiete von Turboprops als bei den anderen Turbinentypen. Ähnlich funktionieren Turboshaft-Turbinen. Sie übertragen die Leistung auf eine Welle. Deswegen werden sie für den Antrieb von Helikopter verwendet. [24]

Turbojets haben den Vorteil, dass sie über sehr simples Design verfügen, wenig Platz benötigen und dennoch hohe Geschwindigkeiten erlauben. Jedoch sind sie laut und haben einen hohen Treibstoffverbrauch. Wohingegen Turbofan-Turbinen effizienter und leiser arbeiten. Dafür haben diese ein wesentlich höheres Gewicht. [24]

Die Recherche nach Kleinflugzeugen mit den passenden Parametern hat u.a. den Typus **Vision Jet** von der Firma **Cirrus Aircraft** aufgezeigt. Dieses Flugzeug verfügt über eine **William FJ33** Turbofan-Turbine. Weiters existiert vom Hersteller **Pilatus Aircraft** der „Businessjet“ **PC-24** und die Militärausbildungsjets **PC-21** und **PC-7 MKX**.

Auch diese sind für diese Arbeit von Interesse. Sie arbeiten mit einem Propellerantrieb von **Pratt & Whitney**. [25], [26]

Wegen konstruktiven Ideen zu den Tanksystemen (befüllen der Unterflügeltanks mit Wasserstoff) und der vorliegenden Menge an Informationen zu dem Flugzeugtyp („Payload“, maximale Flugstrecke etc.) wurde die **PC-21** von **Pilatus** für die Integration des Wasserstoffantriebes gewählt.

3.2 Beschreibung des ausgewählten Flugzeuges, der PC-21

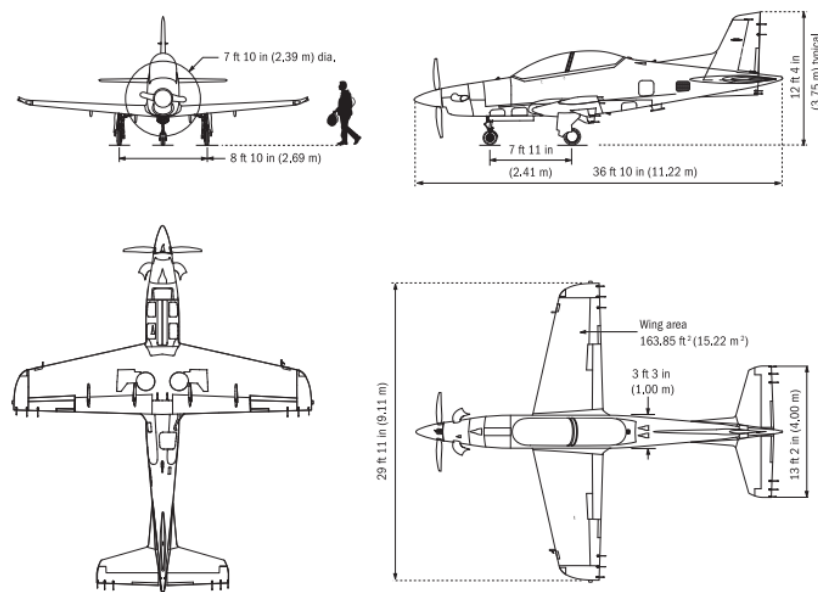


Abbildung 4: Abmessungen der PC-21 von Pilatus. [27]

Die **PC-21** ist ein fortschrittliches Ein-Turbinen-Flugzeug, welches zu Schulungszwecken im privaten, aber auch militärischen Bereich genutzt wird. Der Hersteller, **Pilatus Aircraft**, gibt an, dass die Aerodynamik dieses Fliegers allen anderen Schulungsflugzeugen in dieser Klasse (Turboprop) bei Weitem überlegen ist. Die Maschine verfügt über zwei Sitze, eine Druckkammer und über ein Luftaufbereitungssystem, welches mit einer „On-board“-Sauerstoffversorgung ausgestattet ist. Ein „Anti-G“-System, welches die Belastung auf den Piloten bei herausfordernden Flugmanövern reduzieren soll, ist ebenfalls installiert. [28]

3.2.1 Maße und generelle Informationen

Die Maschine wird von einem **Pratt & Whitney Canada PT6A-68B** Turboprop Motor angetrieben. Dieser betreibt einen fünf-blättrigen **Scimitar-Propeller**¹³ aus Grafit mit einem Durchmesser von 2,39 m. Die Anfertigung des Propellers wird von der Firma **Hartzell** durchgeführt. Dank dieser Ausführung, erreicht das Flugzeug

Geschwindigkeiten und Steigraten, welche normalerweise nur von Jet-betriebenen Maschinen erreicht werden. Die Flügel sind auf eine Belastung von bis zu 8 G ausgelegt und verfügen über hydraulische unterstützte Aileron und Spoiler. Dadurch sind selbst die anspruchsvollsten Manöver möglich. [28]

Das Cockpit verfügt über einen „Cross-Plattform“ Cockpit Emulator, der das Cockpitlayout von verschiedenen Flugzeugen simulieren kann. Zusätzlich sind auch Wassersystem-Emulatoren, taktische Displays, eine Radarfunktion an Board. [28]

Das Flugzeug hat eine Länge von 11,23 m, eine Flügelspanne von 9,11 m und eine Höhe von 3,74 m. Das Leergewicht beträgt 2.270 kg. Das maximale Startgewicht beläuft sich auf 4.250 kg. Die erreichbare Höchstgeschwindigkeit beträgt 685 km/h. Die angegebene Reichweite liegt bei 1.333 km. In **Abbildung 4** sind diese Daten zum Teil zusammengefasst und grafisch am Flugzeug dargestellt. [27] Weiters wird in [29] eine „Payload“¹⁴ von 1.150 kg beschrieben.

3.2.2 Turbine PT6- Pratt & Whitney

Wie bereits erwähnt werden in der **PC-21** von **Pilatus**, **PT6** Turbinen von **Pratt & Whitney Canada** verwendet. Es handelt sich dabei um ein Wellentriebwerk, welches sowohl bei Helikoptern als auch bei Ein-Turbinen-Flugzeugen eingesetzt wird.

Die Turbine wurde mit Blick darauf designt, dass die Bauteile, welche einer höheren thermischen Belastung ausgesetzt sind, leicht zugänglich sind. Dadurch wird die Dauer der Wartungen reduziert. [30] Weiters wurden „Jet-Flap“-Systeme integriert, welche das Rezirkulieren der Luft, welche im Verdichter durch Leckageverluste austritt, gewährleistet. [31] Dies hat zur Folge, dass sich der Teillastbetrieb verbessert. Die Turbine lässt sich in zwei generelle Teile gliedern. Der Gasgenerator, welche heiße verdichtete Luft zu Verfügung stellt und die Freiturbine-Turbowelle. Ein Anstarten erfolgt über das Anstoßen des Gasgenerators. Dieser verfügt über drei axiale Verdichter-Niveaus. Einem niedrigdruck-, einem mitteldruck- und einem Hochdruckverdichter. Die ersten beiden bestehen jeweils aus drei Stufen. Der Hochdruckverdichter hat vier Stufen. Danach durchläuft die Luft einen einstufigen zentrifugalen Verdichter, bevor sie in eine ringförmige Brennkammer geleitet wird. Nach der Verbrennung trifft das Abgas auf eine einstufige Turbine, welche den Verdichter mit rund 45.000 min^{-1} antreibt. Die Powerturbine hat eine Drehzahl von rund 3.000 min^{-1} . Bei den kleineren Baugrößen ist diese einstufig, wohingegen sie bei den größeren Baugrößen zweistufig ist. Diese Turbine treibt bei der Turboprop-Ausführung ein zweistufiges Planetengetriebe an, welches den Propeller mit einer Drehzahl von 1.900 bis 2.000 min^{-1} antreibt. Das Abgas wird durch die zwei seitlich am Gehäuse der Powerturbine platzierten Auspuffs abgeleitet. [32]

¹⁴ Payload: Nutzlast eines Flugzeuges.

Außergewöhnlich bei dieser Turbine ist, dass die Luftansaugung am Ende des Flugzeuges stattfindet. Dadurch wird sie auch als „back-to-front“-Turbine deklariert. Der Power-Teil der Turbine sitzt an der vorderen Seite des Flugzeuges, demnach ist eine kürzere Verbindung zwischen Propeller und Turbine notwendig. Die Auspuffe sind im vorderen Teil des Flugzeuges untergebracht. [33] In einer **PC-21** wird die Turbinenversion **PT6A-68B** mit einer Leistung von 1.600 PS (1.200 kW) eingesetzt. Sie hat eine Länge von 1,83 m und ein Gewicht von 261 kg. Ihr Gewichts- und Leistungsverhältnis beträgt damit 24 PS pro kg. In **Abbildung 5** ist der Aufbau der Turbine zu erkennen. Durch einen Aufschnitt des Gehäuses sind die einzelnen Verdichtungsstufen ersichtlich. [34]



Abbildung 5: Aufbau einer PT6A-68B. [34]

3.2.3 Tanksysteme der PC-21

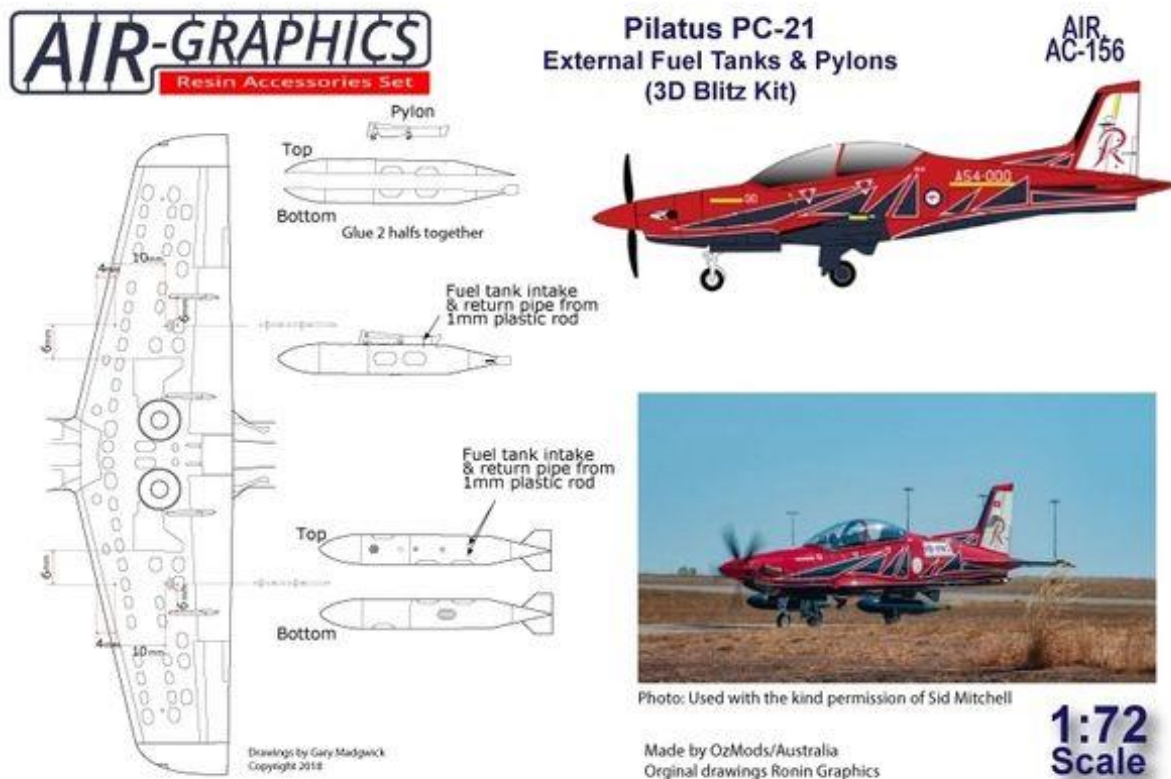


Abbildung 6: Unterflügeltanks eines PC-21 Modells. [35]

Vom Direktor für Technologie und Prozesse von **Pilatus Aircraft**, *Dr. Urs Thomann*, kam die Auskunft, dass die Integraltanks in den Flügeln mit einem Volumen von 800 l Kerosin (640 kg) befüllt werden können.[36] Der Verbrauch des Fliegers beläuft sich auf bis zu 318 kg pro Stunde. In höheren Sphären kann er auf 136 bis 181 kg/h reduziert werden. Optional können zwei 250 l Tanks extern an den Flügeln montiert werden. Dies entspricht einer Menge von 200 kg Kerosin pro Tank. [29], [32] Weiters verfügt die **PC-21** über fünf Anschlüsse für Außenboardlasten. Davon sind drei für nasse Anschlüsse vorgesehen (Tanksysteme). Aufgrund von Zertifizierungen wurde der mittlere Anschluss jedoch nie demensprechend verwendet. In **Abbildung 6** sind die Zusatztanks einer Modelleinheit der **PC-21** dargestellt. Dabei handelt es sich nicht um ein vollwertiges Flugzeug. Das Bild dient lediglich zur Darstellung. [35]

Mit diesen Angaben kann, unter Vernachlässigung der Start- und Landevorganges eine maximale Flugdauer von 4,7 h erreicht werden. Mit den Zusatztanks kann diese Dauer um 2,94 h verlängert werden. Diese Werte sind auf den niedrigsten möglichen Verbrauch von 136 kg/h bezogen. Dementsprechend ist mit einer kürzeren Dauer zu rechnen. Die Reichweite wird mit einem Wert von 1.330 km angegeben. Vergleichbare Systeme mit Wasserstoff werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.3 Alternatives Antriebskonzept für Kleinflugzeuge

Als alternativer Antrieb wurde, wie bereits erwähnt, der Betrieb eines Kleinflugzeuges mittels Wasserstoffturbine angedacht. Angaben zur Turbine wurden aus der Publikation [1] entnommen. Diese Quelle wird auch im folgenden Kapitel [4 Druckverluste bei der Einspritzung](#) ausführlich beschrieben und mittels einer Simulation in dem Programm **Fluent** von der Firma **Ansys** überprüft.

3.3.1 Wasserstoffturbinen in Flugzeugen

In [1] wird nicht genannt, um welche Art der Turbine es sich handelt. Jedoch wird Jet-A mit einer „Lean Direct Injection“ als Treibstoff und als Verbrennungsverhältnis genannt. Bei dem Bestandsflugzeug wurde eine **Pratt & Whitney Canada PT6A-68B** mit einer Leistung von 1.200 kW verwendet. Beim Andenken von der Verwendung von Wasserstoff in bereits eingesetzten Turbinen kommt es meist nur zu einer Supplementierung und nicht zu einem kompletten Austausch des Treibstoffes.

3.3.1.1 Wirkungsgrade und Emissionen

Der Wechsel auf Wasserstoff führt zu drei wesentlichen abgeänderten Parametern, welche in Studien dargestellt wurden, die ein Betrieb von Erdgasturbinen mit Wasserstoff als Treibstoff getestet haben: [37]

- **Massenstrom:** Da Wasserstoff einen höheren Heizwert als Erdgas hat, kommt es zu einem abgeänderten Massenstrom. Es ist ein neuer passender Verdichter für die Turbine notwendig. Weiters muss ein neuer Betriebspunkt, basierend auf dem Massenstrom und dem Druckverhältnis, definiert werden. Der Massenstrom kann auch durch eine Starterklappe (Kaltstarthilfe) des Einlasses herbeigeführt werden. Um den Teillastbetrieb zu verbessern werden Leitschaufeln mit variabler Geometrie (LVG) eingesetzt. Es kommt zu drei verschiedenen Steuerungsstrategien:
 - **Unveränderter Massenstrom des Verdichters:** Dabei wird der Temperatureinlass der Turbine dahingegen manipuliert, dass es zu einem unveränderten strömungsmechanischen Zusammenspiel des Verdichters und der Turbine kommt.
 - **Unveränderte LVG und Turbineneinlasstemperatur:** Das Zusammenspiel wird durch die Erhöhung des Druckniveaus bewirkt. Es ist möglich, dass weitere Verdichterstufen (Hochdruckstufen) installiert werden müssen.
 - **Unveränderte Turbineneinlasstemperatur und Druckverhältnisse:** Der Massenstrom und die LVG werden abgeändert.
- Enthalpie-Reduzierung in der Expansion
- Wärmeübergangskoeffizient an der Außenseite der Turbinenschaufeln, wodurch ein kompetenteres Kühlungssystem notwendig ist.

Zu beachten ist, dass die Kühlung der Turbinenschaufeln durch die Abänderung der Gaszusammensetzung und durch das geänderte Druckniveau beeinflusst wird. Folgende Veränderungen werden erwähnt: [37]

- Die geänderte Gaszusammensetzung erhöht den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Außenseite der Schaufeln.
- Das erhöhte Druckniveau steigert den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Schaufelseiten und die Temperatur der Luft im Kühlkreislauf nimmt zu.

Diese beiden Umstände reduzieren die Leistung des Kühlkreislaufes. Weiters kommt es dadurch zu einer abgeänderten Zusammensetzung des Abgases und damit verbunden auch zu einer Änderung der Abgasemissionen.

Die Kontrolle der Stickstoffoxide-Emissionen (NO_x-Emissionen), welche als einzigen bedenklichen Emissionen bei der Verbrennung von Wasserstoff gelten, wurde mit drei verschiedenen Strategien umgesetzt:

- Vorgemischte-Verbrennung mit katalytischer Verbrennung
- Brennstoffverdünnung durch Dampf-, Wasser- oder Stickstoffverdünnung
- Abgasreinigung

Vorgemischte Verbrennung ist die empfohlene Methode bei Erdgasturbinen. Jedoch haben sie bei Wasserstoffturbinen keinen Nutzen, da die Entflammbarkeitsgrenzen und die Zündtemperatur wesentlich geringer sind als bei Erdgas. [38] Die Bildung von NO_x hängt maßgeblich mit der Verbrennungstemperatur vom Kraftstoff zusammen. [39] Wird Wasserstoff nicht limitiert (verdünnt), muss die Verbrennungsluft auf 2.300 K festgelegt werden, damit zulässige Grenzwerte an Emissionen erreicht werden (25 bis 45 ppmvd). Die Abgasreinigung funktioniert entweder über die katalytische Reduzierung mittels der Einspritzung von Ammoniak oder über das Sconox-Verfahren. Dabei wird eine hohe Abscheiderate durch die Adsorption-Desorption von Kaliumkarbonatbetten ausgenutzt. [40]

In Studien wie [37] ist zu sehen, dass durch die Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff in einer Erdgasturbine der Wirkungsgrad um nur 0,9 % reduziert wurde. Dieser Wert trat bei einem Betrieb mit Stickstoffverdünnung auf. Bei Dampfverdünnungen erreichten die Verluste 1,9 %. Die CO₂-Emissionen wurden eliminiert. Jedoch stiegen die NO_x-Emissionen an. Die stöchiometrische Flammentemperatur wurde auf 2.300 K limitiert (bei Stickstoffverdünnung), um die Emissionen zu verringern. Dabei kommt es zu einer Reduzierung der Enthalpie von 12 % gegenüber dem Betrieb mit Erdgas. Die Steuerung und die Anpassung des Verdichters/ Turbinenpaars wurde über die LVG durchgeführt. [37]

3.3.1.2 Materialeigenschaften

Wenn Turbinen, welche mit Erdgas oder anderen Treibstoffen wie Kerosin betrieben wurden, mit Wasserstoff angefeuert werden sollen, gibt es, wie bereits erwähnt, gewisse Herausforderungen, welche berücksichtigt werden sollten. Die Änderungen bezüglich der Materialeigenschaften werden hier beschrieben. [41]

Der Verdichterabschnitt benötigt, hinsichtlich der Materialeigenschaften, keine Veränderungen. Der Temperaturbereich ist typischerweise auf ein Niveau von 400 bis 500 °C limitiert. Dadurch können günstige Legierungen, wie martensitische Edelstähle, verwendet werden. [42]

In der **Brennkammer** kommt es jedoch zu einer anderen Situation. Materialien, welche dort verwendet werden, haben anspruchsvolle Anforderungen an die Hochtemperatur-Kriechbruchfestigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen thermische und zyklische Ermüdung. Weiters sind eine gute Verformbarkeit und Schweißbarkeit von Vorteil, damit die komplexen Formen gebildet werden können. [43], [44] In Stationären Erdgasturbinen kommen nickelbasierende Superlegierungen wie Hastelloy X, IN617, Nimonic 265, Haynes 188, Haynes 230 und SS309 zum Einsatz. Um die Schmelztemperatur der genannten Werkstoffe nicht zu erreichen, werden interne Luftkühlungen, Wärmedämmschichten oder Keramik-Fließen in der Verbrennungszone eingesetzt. [42], [43], [45], [46]

Erwähnenswert ist ebenfalls, dass andere günstigere auf Chrom basierende Legierungen, welche anstatt den Nickellegierungen eingesetzt werden könnten aufgrund ihrer Versprödung durch Nitrierung im Hochtemperaturbereich weniger geeignet sind. Jedoch wurde festgestellt, dass eine Zugabe von Wasserdampf die Nitrierung von hochreinem Chromoxid verhindern kann. Dementsprechend könnte sich der Einsatz von Wasserstoff und die Bildung von Wasserdampf bei der Verbrennung in Turbinen mit diesem Werkstoff als vorteilhaft herausstellen. [47], [48]

Wird nun Wasserstoff als Treibstoff eingesetzt, kommt es durch die höhere Flammentemperatur und den produzierten Wasserdampf zu noch extremeren Bedingungen. Es werden oxiddispersionsverfestigten Superlegierungen (ODS), ferritischen Legierungen (PM2000 und Incoloy MA956) und keramischen Verbundwerkstoffen (CMC wie Siliziumkarbide SiC- und SiC-basierte Verbundwerkstoffe) verwendet. ODS-Legierungen sind Hochtemperaturwerkstoffe, welche ihre Festigkeit bis zu einem hohen Bruchteil ihres Schmelzpunktes beibehalten. Jedoch ist ihr Einsatzgebiet aufgrund ihrer Kosten, ihrer Sprödhheit auf Flugzeugturbinenschaufeln begrenzt. SiC- und SiC-CMC werden seit einiger Zeit als Alternative für Nickellegierungen in Flugzeugturbinen eingesetzt. Sie haben im Vergleich ein geringeres Gewicht und eine bessere Beständigkeit gegen höhere Betriebstemperaturen. Dadurch ist weniger Kühlung notwendig, wodurch auch ein höherer Wirkungsgrad resultiert. [49]

Die Hochtemperaturbeständigkeit der SiC-Werkstoffe, lässt sich auf die Bildung einer Siliziumdioxid-Schicht (SiO_2) an der Oberfläche der Bauteile zurückzuführen. Aufgrund der Flüchtigkeit von SiO_2 unter feuchten Bedingungen werden die CMC mit Silikaten von seltenen Erden beschichtet. Eine Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff würde zu einem erhöhten Bedarf für solche Beschichtungen führen. [49]

Die Temperaturen bei der **Expansionsstufen** von Turbinen liegt in einem Bereich von 1.200 bis 1.600 °C. Werkstoffe in diesem Bereich haben hohe Ansprüche bezüglich Zug-, Kriech- und Ermüdungsfestigkeiten. Weiters sind hohe Beständigkeit gegen Oxidation und Korrosion notwendig. Hier kommt es wieder zum Einsatz von nickelbasierenden Superlegierungen. [43] Dabei werden Guss- und Knetverfahren für Legierungen wie IN718, IN706, Waspaloy und U720Li eingesetzt. Eigene Legierungen wie Udimet 720Li wurden für große Schmiedestücke aus seigerungsfreien Nickelbasis-Superlegierungen entwickelt. Sie werden bei stationären Gasturbinen eingesetzt. [42], [50] Die additive Fertigung ist in letzter Zeit immer relevanter geworden. Dieser Fertigungsansatz erfordert die Entwicklung neuer Legierungszusammensetzungen, die für den 3D-Druck optimiert sind und den Einfluss von metallurgischen Defekten wie Porosität und Rissbildung verringern. [51]–[54]

Herausforderungen bei der Umstellung von bereits verwendeten Turbinen auf einen Betrieb mit Wasserstoff sind unter anderem der höhere Temperaturgradient in der Brennkammer und in den Expansionsstufen. Dieser Temperaturgradient resultiert aus dem geringeren Abstand zwischen der Flamme und der Wand, der potenziell höheren Flammentemperatur und dem größeren Wärmeübergangskoeffizienten der Verbrennungsprodukte. Diese Umstände machen die Entwicklung von thermischen Isolierungen („Thermal Barrier Coating“ TBC) mit geringen Wärmeleitfähigkeiten und Bruchzähigkeit erforderlich. Weiters ist auch der höhere Wasserdampfgehalt ein nicht zu vernachlässigender Faktor. Dieser wirkt sich negativ auf die Korrosionsbeständigkeit und die Lebensdauer der Barriere-Beschichtungen und der darunterliegenden Metallteile aus. Aus [41] geht hervor, dass die Kombination des erhöhten Wasserdampfs und den Befeuerungszyklen von erheblichem Nachteil ist. Diese Situation ist für Luftfahrtanwendungen kritischer als für stationäre Anwendungen. Derzeit gibt es noch keine ausreichende Forschung auf diesem Gebiet. Weiters sind bei Wasserstoffturbinen andere Degenerationsmechanismen wie die Wasserstoffversprödung oder die Dual-Atmosphäre ebenfalls zu berücksichtigen. Auch hier ist weitere Forschung notwendig, um eine klare Aussage treffen zu können. [41]

3.3.2 Tanksysteme des alternativen Antriebes

Eine genaue Erklärung mit den Vor- und Nachteilen und den generellen Eigenschaften der verschiedenen Speichersystemen ist in den [2.3 Speicherung von Wasserstoff](#) zu finden.

Die Herausforderung bei Wasserstofflagerung bei mobilen Anwendungen ist wie bereits erwähnt nicht nur das Gewicht des Tanks, sondern auch die Größe. Diese beiden Parameter manifestieren sich in der gravimetrischen und der volumetrischen Energiedichte. Weiters sind die Speicherbedingungen wie Temperatur und Druck als auch die Kinetik der Speicherentladung, der Fortschritt der Technologie und die Sicherheitsbedenken wichtige Kriterien. Aufgrund von zu niedriger gravimetrischer Energiedichte, dem Energieaufwand zum Entladen der Speicher und der langsamen Wasserstoffkinetik werden Materialspeicher von Anfang an ausgeschlossen. Jedoch ist es durch weitere Forschungen möglich, dass diese Faktoren verbessert werden. Zum Beispiel können Puffertanks zur schnelleren Bereitstellung von Wasserstoff verwendet werden. [55]

Genannte Materialspeichersysteme, wie Metallhybride, welche in Magnesium gebunden werden, können eine gravimetrische Energiespeicherdichte von 7,6 wt% zur Verfügung stellen. Die Desorptionstemperatur bei solch einem System beträgt 330 °C. Es ist zu erwähnen, dass solche Systeme bei der Speicherung mit einem Volumenzuwachs agieren. [10]

Es wurden sowohl Druckspeicher, Flüssigspeicher als auch Kryokomprimierte-Speicher in Erwägung gezogen. Dabei stechen die beiden letzten Technologien durch bessere Speicherdichten hervor. Diese drei Technologien werden hier nochmals bezüglich ihrer Eckdaten verglichen. [55]

Druckspeicher arbeiten bei einem Druck von bis zu 700 bar mit Umgebungstemperatur. Es kann 42 kg Wasserstoff pro Kubikmeter gespeichert werden. Die gravimetrische Energiedichte bezieht sich auf 5,7 wt%. Jedoch ist die volumetrische Energiedichte mit 5,6 MJ/L niedrig. Außerdem entstehen durch den hohen Druck Sicherheitsrisiken.[55]

Flüssigstoffspeicher haben durch ihre Speichertemperatur (20 K) einen weitaus höhere volumetrische Speicherdichte von 71 kg/m³. Die Energiedichten beziehen sich auf 7,5 wt% und 6,4 MJ/L. Jedoch kann es zu „Boil-Off“-Effekten kommen. Diese können durch ausreichende Isolierung, die Geometrie des Tanks (sphärisch verringert „Boil-Off“) und Umwandlung des Wasserstoffes in seinen Para-Zustand verringert werden. Sicherheitsbedenken resultieren bei diesen Speichern nur durch die niedrigen Temperaturen.[55]

Kryokomprimierte Speicher haben durch die Kombination der bereits genannten Systeme eine noch bessere gravimetrische Speicherdichte von bis zu 10 wt%. Dennoch kommen sie in der Luftfahrt selten zum Einsatz. [55]

In [56] wird gezeigt, dass sich die empfohlenen Speichersysteme immer mehr von Druckspeichern zu Flüssigkeitsspeichern bewegen. Deswegen wurden für dieses

Projekt Flüssigspeicher ausgewählt. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass die Quellen sich jedoch nur auf Flugzeuge mit Brennstoffzellen bezogen haben. Eine Aufstellung der verwendeten Systeme bei Publikationen der letzten Jahre ist in **Tabelle 8** zu finden. Dabei wurden nur Wasserstoffspeicher berücksichtigt, Speicherungen in anderen Formen, wie Propan oder Erdgas, wurden nicht genannt. [56]

Tabelle 8: Verwendete Speichersysteme in Luftfahrtanwendungen der letzten Jahre. [56]

Veröffentlichung	Speichertechnologie	Brennstoffzellentechnologie	Elektrische Leistung [kW]	Quelle
2003	Druckspeicherung H ₂ / Flüssig H ₂	PEMFC	60	[57]
2007	Druckspeicherung H ₂	PEMFC	0,5	[58]
2009	Druckspeicherung H ₂	PEMFC	0,27	[59]
2012	Druckspeicherung H ₂	PEMFC	20-170	[60]
2014	Druckspeicherung H ₂	PEMFC	0,6	[61]
2014	Druckspeicherung H ₂	PEMFC	53	[62]
2015	Druckspeicherung H ₂	PEMFC	20	[63]
2016	Druckspeicherung H ₂	PEMFC	24	[64]
2018	Flüssig H ₂	PEMFC	16.300-27.600	[65]
2018	Flüssig H ₂	PEMFC	NA	[66]
2019	Kryogene Speicher	PEMFC	NA	[67]
2020	Flüssig H ₂	SOFC	28.700	[68]
2021	Flüssig H ₂	PEMFC	120	[69]
2021	Flüssig H ₂	PEMFC	845	[70]
2022	Flüssig H ₂	PEMFC	560	[71]

Die Tanksysteme können durch sphärische Tanksysteme, welche am Rumpf des Flügels zu montieren sind, erweitert werden. Wie in **Abbildung 7** dargestellt, kann dadurch das Tanksystem des Fliegers erweitert oder geändert werden. Speicherung von Wasserstoff in den Flügeln funktioniert mit Wasserstoff aufgrund der Speicherform nur bedingt. Der „Boil-Off“-Effekt würde hier speziell zum Tragen kommen. Jedoch könnte eine Kombination von verschiedenen Speichersystemen angedacht werden, um die Speicherkapazität zu erhöhen. In den Flügeln könnten materialbasierte Speicher (Magnesium-Metallhybridspeicher) verbaut werden und in den sphärischen

Tanks unter den Flügeln Flüssigspeicher. Im [Kapitel 3.4 Integration des alternativen Wasserstoffantriebes](#) in die **PC-21** wird noch genauer auf diese Idee eingegangen.

3.3.3 Betankung eines Wasserstoffflugzeuges Betankung

Zur Betankung mit dem flüssigen Wasserstoff sind mehrere Schritte notwendig. Anfangs muss sichergestellt werden, dass eine gewisse Gastemperatur eingehalten wird. Der Tank wird mit Helium gespült, um ihn zu reinigen und auf die gewünschte Temperatur abzukühlen. In der nächsten Phase wird Wasserstoff eingeleitet. Jedoch wird ein weiteres Ventil geöffnet, durch welches dieser wieder austritt. Dadurch wird die Wasserstoffzuleitung von verbliebenen Heliumresten gereinigt. Auch hier wird der Tank weiter abgekühlt. Dabei wird der Druck im Tank reguliert und konstant gehalten. Die Betankung der Flüssigwasserstoff Tanks erfolgt anfangs durch einen reduzierten Volumenstrom bevor der maximal mögliche eingestellt wird. Das zweite Ventil wird dafür geschlossen. Es wird ein Unterdruck eingestellt und der Tank bis zu einem gewissen Level befüllt. Ist dieses erreicht wird wieder auf den ursprünglichen Volumenstrom reduziert. Durch den reduzierten Volumenstrom wird das genaue Level an Wasserstoff, welches gewünscht wird, eingestellt. Anschließend werden die Ventile geschlossen und die Einstellung des gewünschten Drucks, welcher für den Flug notwendig ist, wird eingestellt. Dieser wird durch das Einspritzen von Helium an der oberen Seite der Tanks reguliert. [72]

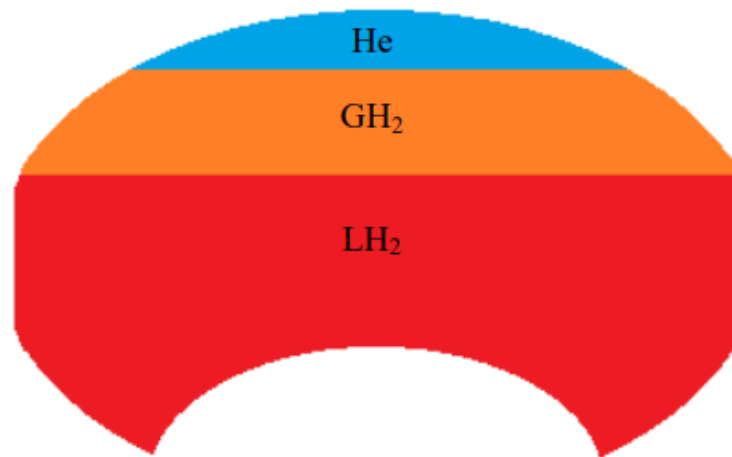


Abbildung 7: Füllzustand eines Flüssigwasserstoffspeichers. [72]

Bei diesem Verfahren bewirken die Temperaturschwankungen und die Druckschwankungen signifikante Änderungen im Volumen des Tanks. Die Druckregulierung erfolgt über ein Ablassventil, welches aktiviert wird, wenn der Druck im Tank einen eingestellten Wert überschreitet. Dieser Umstand tritt bei dem „Boil-Off“-Effekt auf. In **Abbildung 7** ist zu sehen, dass in Flüssigwasserstoffspeichern nie der gesamte Wasserstoff im flüssigen Zustand vorliegt. Es kommt immer zu einer

Ausbildung einer Gasphase. Weiters ist das Helium zur Regulierung des Drucks ersichtlich. [72]

3.3.4 Isolierung von Flüssigwasserstoffspeichern

An die Isolierungen der Flüssigwasserstoffspeicher von Flugzeugen werden hohe Anforderungen gestellt. Es ist notwendig diese zu erfüllen, um Verluste durch den "Boil Off"-Effekt zu reduzieren. In [73] wurden verschiedene Materialien bezüglich ihres Nutzens in LH₂-Speichern getestet. Der Wärmeübergangskoeffizient k der Materialien ist abhängig von den Umgebungsdrücken der Speicher. Getestet wurden folgende Materialien:

- 15 Schichten Stoff/Folie (18,7 mm)
- 40 Schichten MLI (Multi-Layer Isolierung) (22,3 mm)
- MLI-Folienpapier
- Glasfaser
- Glasblasen
- MLI-Mylar Netz
- Aerogel Decke
- BX Aufsprühschaum

Die Tests wurden mit einem Doppel-Poren-Modell durchgeführt. Dabei ist ersichtlich, dass bei einem Umgebungsdruck die 15 Schichten Stoff/Folie den niedrigsten Wärmeübergangskoeffizienten haben. Danach folgen das MLI-Folienpapier und die Aerogel-Decke. Den höchsten Wärmeübergangskoeffizienten hat die Glasfaser und die Glasblasen. In **Abbildung 8** ist die Änderung der thermischen Leitfähigkeit in Bezug auf den Druck dargestellt. [73]

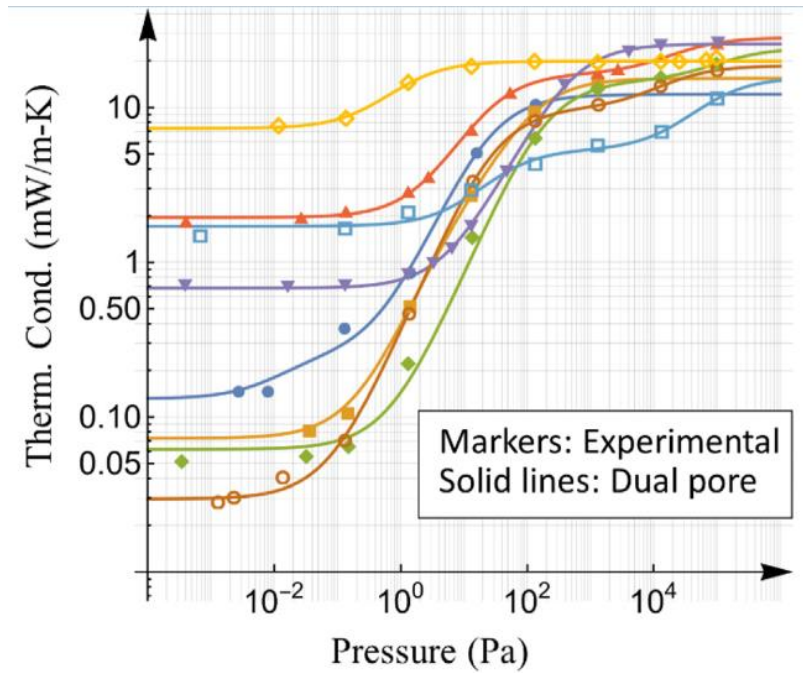


Abbildung 8: Thermische Leitfähigkeit von unterschiedlichen Materialien bei verschiedenem Drücken. [73]

Nach diesen Erkenntnissen ist ersichtlich, dass eine Kombination von Stoff/Folie in Kombination von MLI-Folienpapier die besten Effekte bei der Isolierung von LH₂-Speichern erzielen würde.

3.3.5 Wasserstoffführung

Der Wasserstoff wird mittels einer Düse in den Luftvolumenstrom eingespritzt. Dabei wurde die Düse anhand der Publikation „Low Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection“ ausgeführt. [1] In der Quelle wird eine Reduzierung von NO_x-Emissionen mittels unterschiedlicher Einspritzdüsen getestet. Die Düsen wurden mit variierenden Eintrittsbedingungen untersucht. Auf diese Bedingungen und die Ergebnisse wird in der Simulation im Kapitel [4 Druckverlustabschätzung bei der Einspritzung laut NASA-Publikation](#) genauer eingegangen. Die Wasserstoffzuleitung erfolgt gasförmig über Zuleitungen, die in **Abbildung 10** blau dargestellt sind. Der Wasserstoff wird in einem 1.982,18 m³ Tank bei einem Druck von 1,6547e+7 Pa (165,474 bar) gespeichert. Der Massenfluss wird durch ein Coriolis-Massendurchflussmeter und ein kalibriertes Ultraschallventil gemessen. [1], [72]

3.4 Integration des alternativen Wasserstoffantriebes in die PC-21

In diesem Kapitel wird die Integration der in [3.3 Alternatives Antriebskonzept für Kleinflugzeuge](#) erwähnten Ansätze in die Maschine aus [3.1 Die Wahl des Flugzeuges](#) durchgedacht. Damit soll geklärt werden, ob es möglich und sinnvoll ist, Turbinen als

Retrofit mit Wasserstoff zu betreiben. Es wird auf die Turbine, die Tanksysteme, die Wasserstoffführung und die Sicherheitsaspekte des neuen Treibstoffes, Rücksicht genommen.

3.4.1 Retrofit einer PT6 für den Betrieb mit Wasserstoff Turbine

Da eine Integration einer neuen Turbine zu viel Aufwand wäre, wird überlegt, welche Schritte gesetzt werden müssten damit die momentan verwendete Turbine auch mit Wasserstoff betrieben werden kann. Demnach wird zuerst analysiert, welcher Treibstoff normalerweise bei dieser Turbine zum Einsatz kommt.

3.4.1.1 Betriebspunktänderung

Der Betriebspunkt kann beim Wechsel des Treibstoffes nicht konstant bleiben. Durch die in [3.3 Alternatives Antriebskonzept für Kleinflugzeuge](#) beschriebenen Regelungsverfahren muss das Zusammenspiel zwischen Verdichter und Turbine neu eingestellt werden. Dazu kommen sowohl das Verfahren zur Reduzierung des Massenstromes bei gleichbleibender Temperatur und Druckverhältnissen als auch die Reduzierung der Turbineneintrittstemperatur bei konstantem Massenstrom, in Frage. Die Erhöhung des Druckniveaus ist aufgrund der dadurch weiter zunehmenden Temperatur in der Brennkammer und des möglicherweise notwendigen Umbaus der Verdichterstufen, zu vermeiden.

- Konstanter Massenstrom mit regulierter Turbineneintrittstemperatur

Bei der Regelung mit konstantem Massenstrom ist ein Wärmemanagement zur Überwachung und Einstellung der Turbineneintrittstemperatur notwendig. Weiters ist das Luft-Treibstoffverhältnis anzupassen.

Bezogen auf den Heizwert von Wasserstoff (120 MJ/kg [74], 33,33 kWh/kg [8]) und den von Kerosin (43,5 MJ/kg [75]) würde die 2,76-fache Menge an Kerosin benötigt werden, um dieselbe theoretische Leistung der Turbine zu erreichen. Die Luftmenge muss um dieselbe Masse erhöht werden, um die der Wasserstoffmassenstrom reduziert wird. Der gesamte Massenstrom sollte bei dieser Art der Steuerung konstant bleiben.

Da der Betriebspunkt jedoch nicht linear verläuft, kann dieser Aussage nicht viel Gewichtung zugeschrieben werden. Eine Regelung mit konstantem Massenstrom ist nicht von Vorteil, da mit dem „On-Board“-Wasserstoff so sparsam wie möglich umgegangen werden sollte. Jedoch könnten die Temperaturverhältnisse im Brennraum damit reduziert werden, wodurch die Materialien der Turbine geschont werden könnten.

- Konstante Temperatur- und Druckverhältnisse bei reduziertem Massenstrom

Bei Wasserstoffflugzeugen, welche eine beschränkte Menge an Wasserstoff transportieren können, ist eine Regelung durch die Reduzierung vom Massenstrom und damit verbunden auch vom Wasserstoff, eine attraktive Lösung.

Die Temperatur- und Druckverhältnisse, welche in der Turbine mit Betrieb von Kerosin vorherrschen, werden versucht beizubehalten. Aufgrund des höheren Heizwertes von Wasserstoff, und der erwünschten mageren Verbrennung, muss infolge der Massenstrom des Treibstoffes reduziert werden.

3.4.1.2 Treibstoffvergleich Kerosin vs Wasserstoff

Turboprop-Turbinen werden normalerweise mit **Jet-A** oder **Jet-A-1** betrieben. Es handelt sich dabei um einen auf Kerosin basierenden Treibstoff. Sie unterscheiden sich durch ihren Gefrierpunkt. Dieser liegt bei -40 °C beim ersten und bei -47 °C beim zweiten. Die verwendete Turbine wird normalerweise mit **JP-4** oder **JP-5** betrieben. [76]

JP-4 ist eine 50/50 Kerosin-Benzin-Mischung. Dieser Treibstoff ist aufgrund seiner großen Verfügbarkeit sehr attraktiv. Er war der Haupttreibstoff der US-amerikanischen Militärs in den Jahren zwischen 1951 und 1995. Der NATO-Code lautet F-40. [76], [77]

JP-5 ist eine komplexe Mischung aus Wasserkohlenstoffen. Er hat ein Gewicht von $0,81\text{ kg/L}$ und einen Flammpunkt¹⁵ von 60 °C . Der NATO-Code ist F-44. Dieser Treibstoff wurde 1952 entwickelt. [76], [77]

Wasserstoff hat keinen konkreten Flammpunkt, da es selbst bei niedrigsten Temperaturen entflammbar ist. [78] Herkömmliche Flugzeugtreibstoffe basieren auf Kohlenwasserstoffen. Um die CO_2 -Emissionen zu verringern, wird der Überlegung nachgegangen, den Kohlenstoffe wegzulassen und allein Wasserstoff zum Einsatz zu bringen. Wasserstoff verfügt nicht nur über die 2,5-fache Energiedichte pro Kilogramm, sondern verbrennt auch ohne die Bildung von CO_2 . Weiters kommt es zu einer Reduzierung der NO_x -Emission von bis zu 90%.

Jedoch ist auch zu bedenken, dass der Wasserdampf, der sich bei der Verbrennung von Wasserstoff bildet, ebenfalls den Greenhouse-Effekt unterstützt. Dies aber weitaus weniger als CO_2 . Weiters ist die Verweildauer von Wasserdampf in der Atmosphäre wesentlich geringer. CO_2 bleibt bis zu 100 Jahre bestehen wohingegen sich Wasserdampf in einer Zeitspanne von wenigen Tagen bis zu einem Jahr verflüchtigt. [79]

Die Temperatur, bei der sich Wasserstoff selbst entzündet liegt mit 550 °C weit über der von Kerosin (220 °C). Jedoch ist die Energie, welche bei niedrigeren Temperaturen benötigt wird, um eine Flamme auszulösen, weitaus geringer als bei Kerosin.

15 Der Flammpunkt ist die niedrigste Temperatur, bei der sich mit dem Stoff ein zündfähiges Dampf-Luft-Gemisch bilden kann. (Laut DIN V 14011)

Wasserstoff kann sich bei einem gemeinsamen Gemisch mit Luft in einer Spanne von 4 bis 76 % entflammen. Bei Kerosin liegt diese Spanne bei 1,4 bis 7,6 %. [79]

3.4.1.2 Emissionen bei der Verwendung von Wasserstoff in Turbinen

In [37] wird eine maximale Temperatur von 2.300 K genannt, um akzeptable Stickstoffemissionen zu erhalten. Bei der Verbrennung von Wasserstoff in Turbinen sind NO_x -Emissionen die einzigen als schädlich für die Umwelt einzustufenden Emissionen. Die Bildung von Stickstoff resultiert bei der Verbrennung von Wasserstoff komplett aus der Luft. Dieser wird auch thermisches NO_x genannt. Sie steigen mit der Zunahme der Temperatur der Verbrennungsluft. Stickstoffoxide haben negative Auswirkungen auf Pflanzenwachstum und auf den menschlichen Körper. Es kann z.B. zu Schädigung der Lunge und Reizung der Atemwege kommen. Dementsprechend ist eine Reduktion der ausgestoßenen NO_x -Emissionen in der Abgasluft von Verbrennungen anzustreben. [80], [81]

Eine signifikante Reduzierung der NO_x -Emissionen kann nicht nur durch eine bessere Vermischung der Reaktanten im Brennstoff-Luftgemisch, sondern auch durch eine verkürzte Verweilzeit in der Brennkammer erzielt werden. [82]

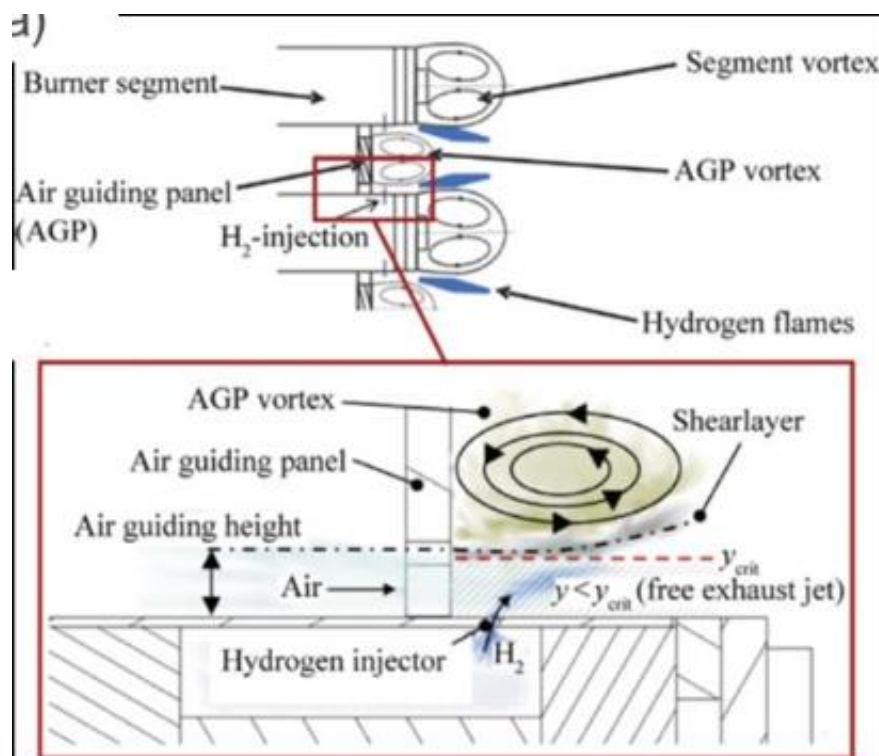


Abbildung 9: Darstellung der Einspritzung von Wasserstoff in einer „MMX-Combustion“ (Micromix) Düse. [82]

Um eine bessere Durchmischung der Luft mit dem Wasserstoff zu erreichen, wird der Treibstoff durch Mikro-Bohrungen senkrecht zum Luftstrom eingeströmt. Dieses Einleiten ist in **Abbildung 9** ersichtlich. Es bilden sich Wirbel, die ein Mixen der beiden Stoffe unterstützen. Dadurch wird die Länge der Flammen auf einen Bereich von 5 bis 10 mm limitiert. Dieser Umstand verringert die Verweildauer der Komponenten im

heißen Gebiet. Bei herkömmlichen Turbinen gibt es dadurch eine geringere Anzahl an größeren Flammen. [82]

Dieses Verfahren wird „MMX-Combustion“ genannt und wurde von der Firma **Kawasaki Heavy Industries Ltd** in Kooperation mit der **FH Aachen** und der **B&B-AGEMA** entwickelt und erfolgreich getestet. [82]

3.4.2 Integration von Wasserstofftanks in eine PC-21

Das Tanksystem der **PC-21** sieht wie bereits erwähnt, Tanks in den Flügeln und zusätzliche Unterflügeltanks vor. Die Tanks in den Flügeln sind aufgrund der Form und des dadurch unterstützten „Boil-Off“-Effektes ungeeignet für LH₂-Speicherung. Demnach bieten sich zwei verschiedene Speichermöglichkeiten an.

3.4.2.1 Materialspeicher in den Flügeln

Metallhybridspeicher auf Magnesium-Basis haben die höchste genannte gravimetrische Speicherdichte bei einer reversiblen Speicherung von Wasserstoff. Die Speicherdichte beträgt um die 7,6 wt%. Die gefüllten Tanks in den Flügeln einer **PC-21** haben eine Kapazität von 800 L Kerosin. Dies entspricht einem Eigengewicht von 640 kg (Dichte von Kerosin: 0,8 kg/L [83]). Mit der gegebenen Speicherdichte und diesem Gewicht könnte man bei einem Magnesium-Hybridspeichern rund 50 kg Wasserstoff speichern.

Nutzt man die Payload des Flugzeuges ebenfalls aus, können dadurch 1.150 kg mehr für die Materialspeicher zur Verfügung stehen. Dabei wird der Payload um die 150 kg für das Gehäuse und die Füllmenge der Unterflügeltanks abgezogen. Das würde zu einer Erweiterung der Flügeltanks von rund 76 kg Wasserstoff führen.

Damit lässt sich insgesamt eine Wasserstoffmenge von rund 126 kg in den Flügeln speichern. Mit diesem Reservoir kann der Start von dem Wasserstoffflugzeug jedoch nicht ohne Wärmemanagement garantiert werden. Es ist ein Temperaturniveau von 330 °C [10] notwendig, um den Wasserstoff aus dem Speicher zu entladen. Dieses kann durch eine bereits laufende Turbine zur Verfügung gestellt werden. In den Berechnungen wurden keine volumetrischen Anforderungen an die Speicher berücksichtigt.

Zum Start des Flugzeuges soll auf die LH₂-Speicher unter den Flügeln zurückgegriffen werden.

3.4.2.2 Flüssigwasserstoffspeicher für Unterflügelmontage

Nach Auskunft von **Pilatus** können in die montierbaren Unterflügeltanks jeweils 250 L gespeichert werden. Das ergibt bei flüssigem Wasserstoff eine Kapazität von fast 18 kg pro Tank. Damit würde eine Speicherkapazität von rund 35 kg zur Verfügung stehen. Aus aerodynamischen Gründen kann das Volumen der Unterflügeltanks nicht

beliebig vergrößert werden. Im Tank bildet sich wie in **Abbildung 7** zu sehen eine gasförmige Phase über der flüssigen Phase. [36]

Die Unterflügeltanks können aufgrund ihrer schnellen Entladedynamik als „Kickon“ genutzt werden. Dabei muss die Turbine zum Laufen gebracht werden, damit sie den Wärmestrom für die Entladung der Materialspeicher gewährleistet.

Eine Kombination der beiden genannten Speichersysteme würde in einer maximalen Speicherkapazität von 161 kg Wasserstoff resultieren. Wird der Treibstoffverbrauch der **PC-21** über das Heizwertverhältnis (120 MJ/kg zu 43 MJ/kg [8], [84]) von Kerosin zu Wasserstoff auf den Wasserstoffverbrauch umgerechnet, kommt es unter idealen Flugbedingungen zu einem Verbrauch von 48,75 bis 64,75 kg Wasserstoff pro Stunde. Durch ungünstigere Bedingungen wurden Treibstoffverbrauch von bis zu 318 kg/h bei Kerosin genannt. [29] Bei einem Betrieb mit Wasserstoff würde dieser Betriebsfall zu einem Verbrauch von 114 kg/h führen. Dies ist jedoch ein Sonderfall, weswegen ein Verbrauch von rund 50 kg/h für die Berechnungen herangezogen wird. Damit kommt man auf eine Flugdauer von rund drei Stunden. Jedoch wird dieser Wert in der Praxis niedriger ausfallen, da die Verbrauchsberechnung, bei einem Betrieb mit Kerosin, nicht mit dem maximalen zulässigen Fluggewicht durchgeführt wurde. Weiters wurde kein erhöhter Verbrauch durch Start- und Landevorgänge berücksichtigt.

Die genannten Angaben bezüglich der **PC-21** wurden von *Dr. Urs Thomann* der Firma **Pilatus Aircraft** übermittelt. [36]

Die Umsetzung eines Kryotanks bei Flugzeugen ist erheblich komplizierter als bei einer Rakete. Da dies nicht der Fokus der Arbeit ist wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

3.4.3 Wasserstoffführung

Der Wasserstoff (in **Abbildung 11** blau eingezeichnet) wird gasförmig vom Tank bei einem Temperaturniveau von 20 °C zu der Einspritzdüse geleitet. Die Luft (grün dargestellt) wird durch die Vorstufen der Turbine auf bis zu 3,1 MPa verdichtet und über die Düse mit dem Wasserstoff vermischt. Anschließend wird das Gemisch in die Brennkammer eingeleitet und dort verbrannt. Verschiedene dargestellte Einrichtungen in der Brennkammer messen die Temperatur, die Zusammensetzung und den Druck bei der Verbrennung.

3.4.4 Sicherheitsbedenken bei der Umrüstung der PC-21 auf Wasserstoff

Der Sicherheitsaspekt ist bei Flugzeugen ein äußerst relevanter. Einen brennbaren Treibstoff zu transportieren, muss immer durch gewisse Sicherheitsvorkehrungen so

ungefährlich wie möglich bewerkstelligt werden. Im Vergleich zu Kerosin hat Wasserstoff gewisse Vor- und Nachteile.

Zum Beispiel verfügt Wasserstoff über eine höhere Selbstentzündungstemperatur als Kerosin (550 °C gegen 220 °C). Weiters ist er sehr diffusiv und verfügt wegen seiner Dichte über einen großen Auftrieb. Demensprechend verschwindet der durch Leckage austretende Treibstoff sehr schnell. Weiters gehen von Wasserstoff keine bzw. vernachlässigbare umwelttechnische Bedrohungen aus. Die Flammgeschwindigkeit und das untere Limit für ein zündbares Gemisch sind ebenfalls in einem sichereren Bereich als bei Kerosin. Dafür lassen sich Leckagen von Kerosin leichter finden. Weiters ist die minimale Entzündungsenergie wesentlich höher. Der Entzündungsbereich liegt, wie bereits beschrieben, bei Wasserstoff in einem Bereich von 4 bis 76 % und bei Kerosin bei 1,4 bis 7,6 %. [78]

Die Integration einer Wasserstoffturbine, bzw. der Retrofit einer bestehenden Turbine für die Verwendung mit Wasserstoff ist grundsätzlich möglich. Es muss das Regelungsverhalten der Turbine und das Zusammenspiel zwischen Verdichter und Turbine neu geplant werden. Weiters ist zu beachten, dass die Brennraumtemperatur, zum Schutz der Bauteile, nicht zu hoch wird. Dies hat auch eine Reduzierung der NO_x-Emissionen zu Folge. Falls die Temperatur nicht genug gesenkt werden kann, müssen besonders thermisch belastete Bauteile mit Keramikfließen verstärkt werden. Jedoch ist aufgrund der Problematik bei der Speicherung mit einer Reduktion der maximalen Reichweite und Flugdauer zu rechnen.

4 Druckverlustabschätzung bei der Einspritzung laut NASA-Publikation

Im folgenden Teil der Arbeit werden die Aussagen der Veröffentlichung [1] von der **NASA** simuliert und überprüft. Dabei werden die Einspritzung und die Vermischung des Wasserstoffes in den Luftstrom nachgestellt, um die angegebenen Druckverluste nachzustellen.

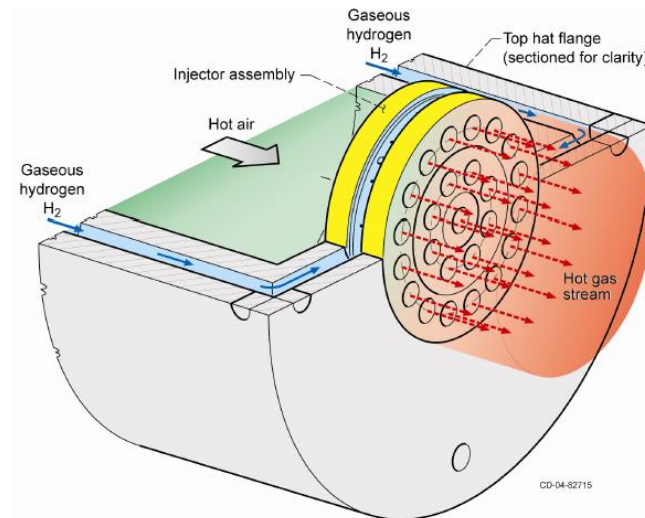


Abbildung 10: Aufbau des NASA „N1 Injectors“. [1]

Es werden sowohl die strömungstechnischen Zustände als auch der Druckverlauf der Einspritzung beleuchtet und untersucht. Zum Simulieren wird das Programm **Fluent** der Firma **Ansys**, eingesetzt. Zur Konstruktion der Einspritzdüse wird **Autodesk Inventor** verwendet. In **Abbildung 10** wird der zu simulierende Teil der Ansaugung samt Düse und Einspritzung dargestellt. Die Verbrennung ist nicht mehr Bestandteil der Untersuchung, da diese den Umfang dieser Arbeit übersteigen würde. Der gasförmige Wasserstoff ist in der **Abbildung 11** blau dargestellt und die heiße Luft aus dem Verdichter grün. Die Brennzone, in der das Luft-Treibstoff-Gemisch verbrannt wird, ist in rot zu sehen.

4.1 Die Simulationskonstruktion

Der Aufbau wurde auf **Autodesk Inventor 2022** nach den Angaben der Publikation konstruiert. Das Strömungsvolumen mit demselben Programm erstellt. Aus Gründen, die auf die Rechenleistung und auf die genutzte Version von **Ansys** zurückzuführen sind, wurde der Volumenkörper symmetrisch geviertelt.

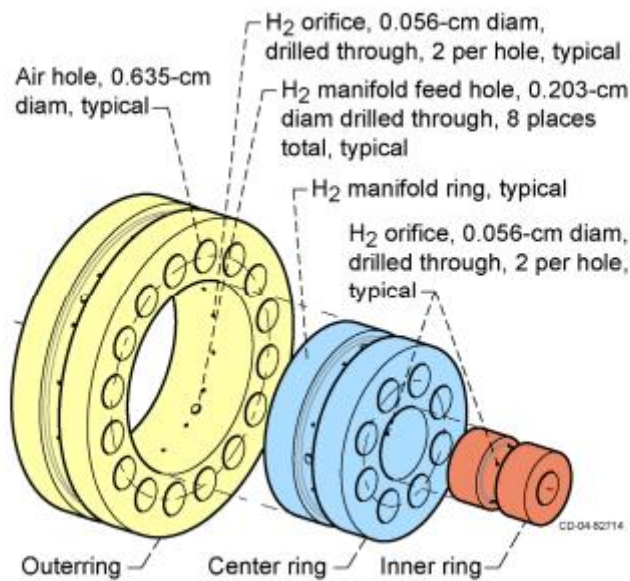


Abbildung 11: Der Aufbau einer Düse des NASA „N1 Injectors“. [1]

Die Einspritzdüsen setzen sich aus drei Ringen zusammen. Der innere Ring verfügt über eine Luftzuleitung mit einem Durchmesser von 6,35 mm. Der Wasserstoff wird durch seitliche Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,56 mm in den Luftstrom eingeleitet. Der Durchmesser des inneren Rings beträgt 12,5 mm. Der mittlere Ring hat acht und der äußere Ring 16 Luftzuleitungen. Die Durchmesser sind auf die Werte 45 mm und 70 mm festgelegt worden. Die Nut an der runden Oberfläche der Düse dient zur Zuleitung des Wasserstoffes zu den inneren Ringen. Dieser wird durch Bohrungen mit einem Durchmesser von 2,03 mm weitergeleitet. In [1] wird ein maximaler Druckverlust von 4 % angegeben. Weiters wurden verschiedene Einspritzdüsen getestet. In dieser Arbeit wird jedoch nur auf die Beschriebene und Dargestellte Bezug genommen. Der Aufbau ist in der **Abbildung 11** dargestellt.

4.2 Die Simulation

Wie bereits erwähnt ist die Simulation mit **Fluent** von **Ansys** durchgeführt worden. Dabei kam es zu der Erstellung eines Projektes in der **Workbench** von **Ansys**.

4.2.1 Simulationsbaukasten und Vernetzung

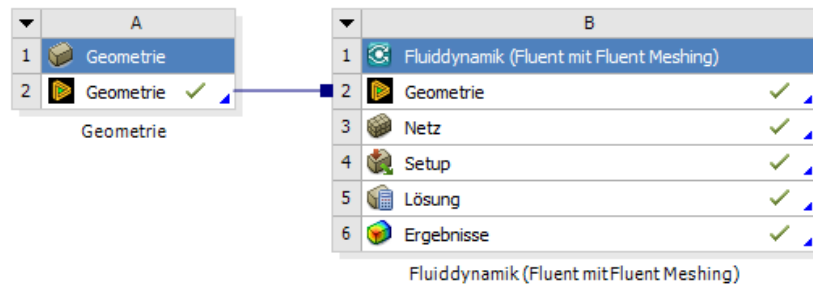


Abbildung 12: Der Aufbau eines Simulationsbaukastens in der Workbench von Ansys.

Die Geometrie des Strömungsvolumens wurde in **Autodesk Inventor** erstellt und anschließend in einen Geometrie-Baukasten eingelesen (siehe **Abbildung 12**). Der Import erfolgte durch den **Designmodeler** von **Ansys**, welcher dem Geometrie-Baukasten hinterlegt ist. Dieser Baukasten wurde mit einem Fluid-Dynamik (**Fluent** mit **Fluent Meshing**) Baukasten verknüpft. Der Volumenkörper ist in **Abbildung 13** dargestellt. Die Verteilung des Körpers ist in der Abbildung gut ersichtlich.

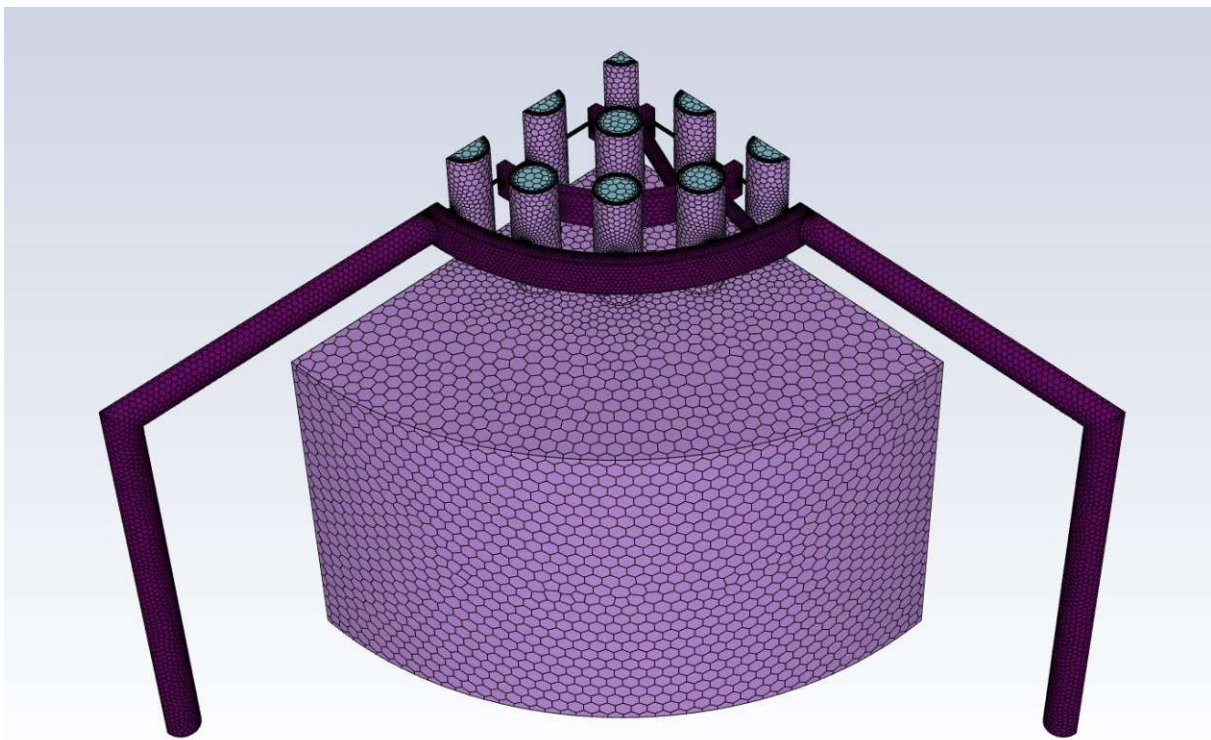


Abbildung 13: Darstellung des Oberflächenvernetzung des Volumenkörpers.

Die Erstellung des Rechnetzes wurde von **Fluent** mittels **Fluent Meshing** durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass die gesamte Geometrie aus einer Flüssigkeit besteht und keine „Voids“ existieren. Weiters wurde „Multizone Meshing“ deaktiviert. In **Abbildung 13** ist das Oberflächennetzes dargestellt.

Den Oberflächen des Volumenkörpers wurden gewisse Namen und Funktionen zugeteilt, welche in der folgenden Liste aufgelistet werden:

- Druckeinlass
 - Lufteinlass
 - Wasserstoffeinlass
- Wände
- Treibstoffauslass
- interne Flächen (wegen der symmetrischen Teilung)

Auf diese Flächen wird in dem Kapitel [4.2.2 Allgemeine Randbedingungen](#) weiter eingegangen.

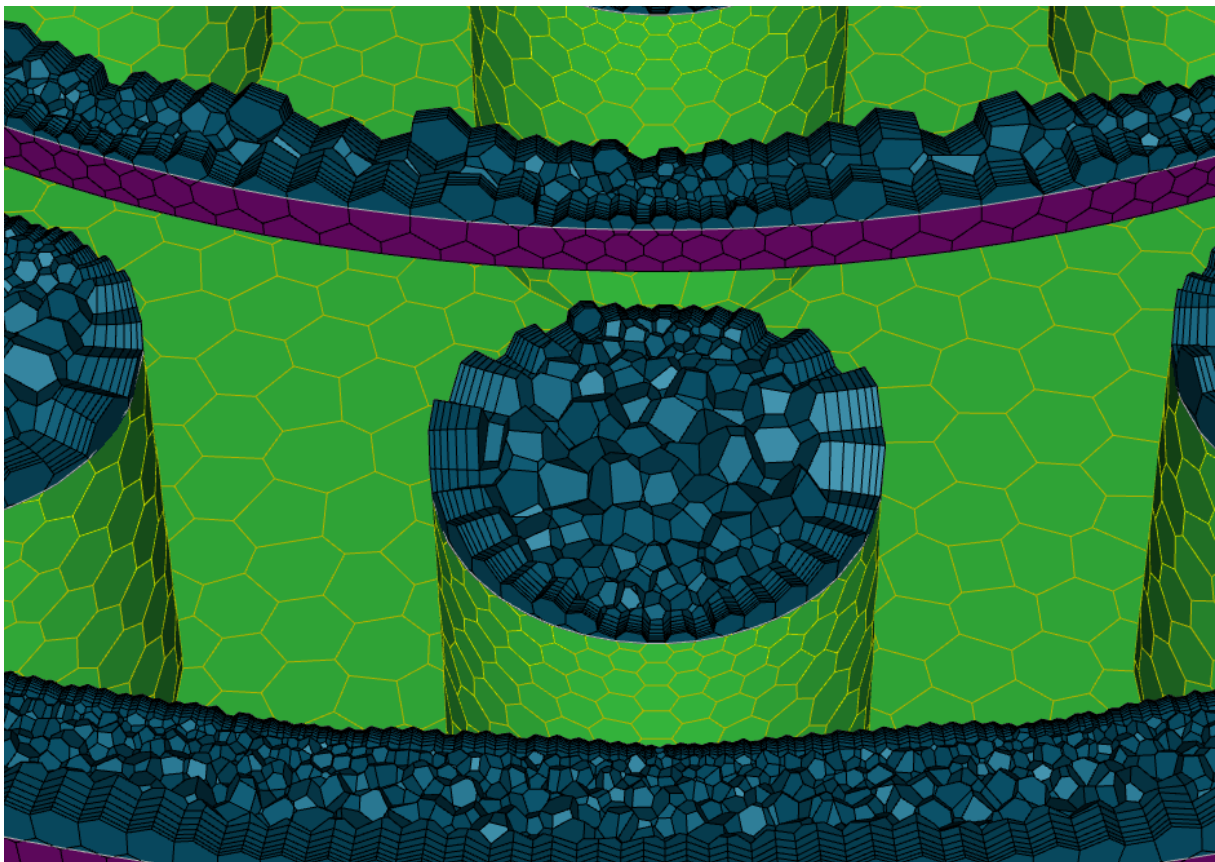


Abbildung 14: Schnitt des Volumenkörpers zur Darstellung des Volumenvernetzungs.

Für das Vernetzen wurden sowohl an der Oberfläche als auch im Körper „Polyeder Meshing“ Formen verwendet. In **Abbildung 14** wurde das Netz aufgeschnitten, um einen genauen Einblick auf die Form der Volumenvernetzung zu erhalten. Als „Offset-Methode“ wurde „Smooth Transition“ gewählt. Die Anzahl der „Layer“ ist drei und das Transition-Verhältnis wurde mit 0,272 festgelegt. Die Wachstumsrate hat einen Wert von 1,2. Das generierte Mesh verfügt über die Parameter, welche in der **Tabelle 9** aufgezeigt werden.

Tabelle 9: Darstellung der Parameter des Vernetzung.

Nodes	Edges	Faces	Cells
1.083.979	3.463	1.592.995	341.234

Im Bereich **Setup** (Punkt viere aus **Abbildung 12**) wurden die Parameter für die Simulation festgelegt. Die einzelnen Punkte sind Schritt für Schritt abgearbeitet worden, um die Simulation mit den gewünschten Eigenschaften auszustatten. Diese werden in den nächsten zwei Kapiteln [4.2.2 Allgemeine Randbedingungen](#) und [4.2.3 Variable Randbedingungen](#) definiert.

4.2.2 Allgemeine Randbedingungen

Simulationen in **Ansys**, können mit zwei unterschiedlichen Berechnungsmethoden durchgeführt werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob das Strömungsmedium kompressibel ist oder nicht. Soll ein kompressibles Medium simuliert werden, wird auf die druckbasierende Berechnungsmethode zurückgegriffen. Bei einem inkompressiblen Medium wird eine Dichtebasierender Methode verwendet.

Durch den Einsatz eines Multiphase-Modells mit Einbindung der Energiegleichung muss eine druckbasierende Berechnungsmethode gewählt werden (Vorgabe von **Ansys**). Die zwei Medien, Wasserstoff und Luft, wurden samt Stoffeigenschaften aus der Materialbibliothek von **Ansys** bezogen. Bei der Viskositätsgleichung kam es zu einer Turbulenzmodellierung durch das k-epsilon-Modell. In **Abbildung 15** sind die Parameter bezüglich des Modells ersichtlich. Diese Standardeinstellungen von **Ansys** wurden nicht verändert. Andere Gleichungen wie ionisierende Strahlung und Wärmeaustausch wurden nicht berücksichtigt.

Die Randparameter sind wie folgend eingestellt: Der Lufteintritt und der Wasserstoffeintritt sind als Druckeintritt definiert. Der Referenzrahmen des

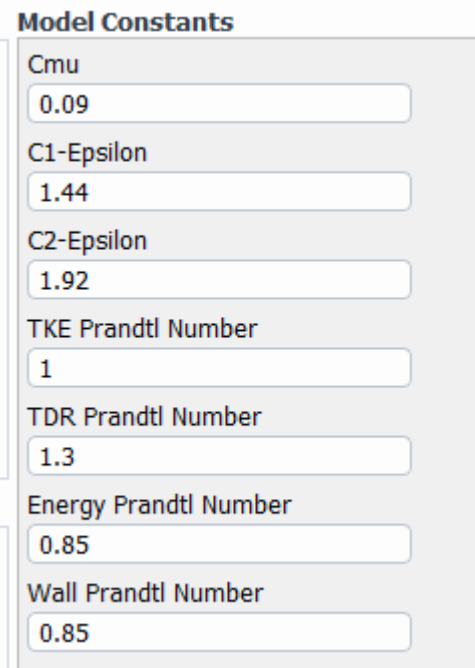


Abbildung 15: Viskositätsparameter.

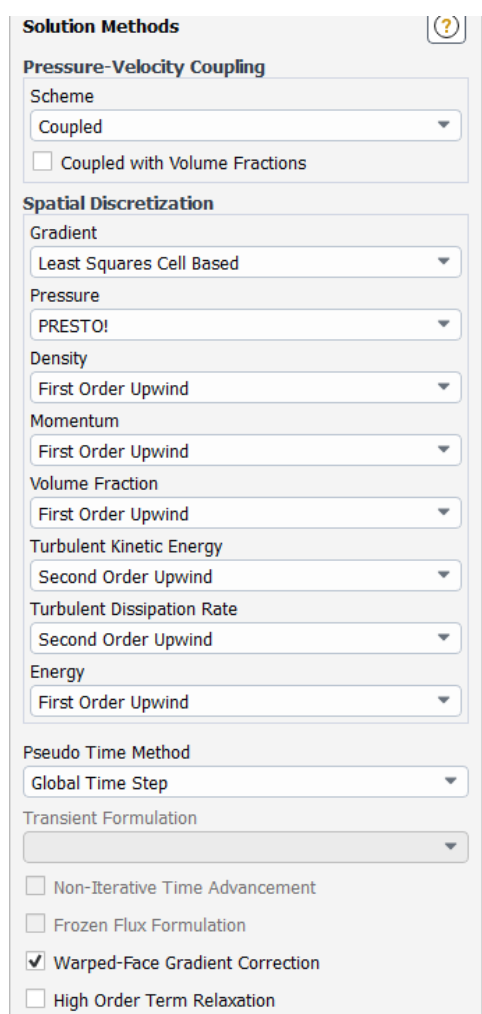


Abbildung 16: Parameter der Methodik.

Druckes ist absolut und die Randbedingung der Turbulenzvariablen wurde auf Intensität und hydraulischer Durchmesser gestellt. Dabei hat die Intensität einen Wert von 5 % und der Durchmesser die Hälfte des Eintrittsdurchmessers. Dieselben Parameter wurden auch bei dem Wasserstoffeintritt definiert. Interne Wände (Schnitte der Symmetrie) sind als Wände definiert worden, mit einem „Shear Stress“ von 0. Der Auslass des Gemisches ist ein Druckauslass. Beim Druck kam es zu einem variablen Auslass. Dieser wurde je nach gewünschtem Betriebspunkt verändert. Auf diesen Umstand wird bei den variablen Randbedingungen noch weiter eingegangen. Die turbulente Rückstromintensität wurde ebenfalls wieder auf 5 % gesetzt. Ebenso ist der Rückstromdurchmesser mit der Hälfte des Auslassdurchmesser definiert worden.

Sowohl die Luft als auch der Wasserstoff wurden als ideales kompressibles Gas angenommen.

Die Randbedingungen des Wasserstoffes werden als konstant angenommen. Die Temperatur wird auf 293 K und der Eintrittsdruck auf 9 bar festgelegt.

Es existieren die folgenden Lösungsmethoden für die Simulation:

- „Coupled“
- „Simple“
- „SimpleC“
- „PISO“

Die Methoden unterscheiden sich, ob die Berechnung vom Strömungsdruck und Strömungsgeschwindigkeit gekoppelt sind oder nicht. Getrennte Lösungsmethoden sind die „Simple“-Methode, die „SimpleC“-Methode und die „PISO“-Methode. Die „Coupled“-Methode diese beiden Berechnungen koppelt, benötigt sie mehr Zeit pro Iteration. Jedoch wird dadurch eine geringere Anzahl an Iterationen benötigt, um eine Konvergenz zu erreichen. Die Berechnungsmethode für den Gradient wurde auf der Standardeinstellung „Least Square Cell Based“ belassen. Die Druckberechnungsmethode wurde auf „PRESTO!“ eingestellt. Dadurch werden unrealistische Resultate der Konvergenz aufgrund des Einflusses von Gravitation vermieden. Bei der Berechnung von der Dichte, dem Moment, des Volumenanteils und der Energiegleichung wurden Lösungen erster Ordnung verwendet, um eine Konvergenz zu unterstützen. Die turbulente kinetische Energie und die turbulente Dissipationsrate wurden mit einer Gleichung zweiter Ordnung gelöst. Diese Einstellungen sind in der **Abbildung 16** dargestellt.

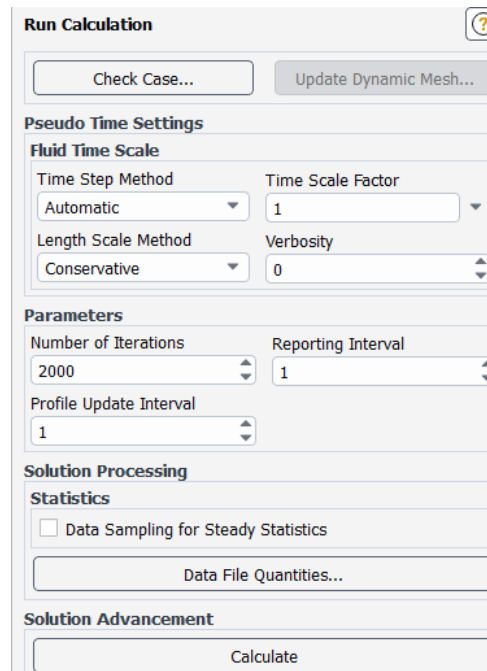


Abbildung 17: Iterationsparameter.

Die Simulation wurde sowohl als „Coupled“ als auch als „PISO“ durchgeführt. Sonst wurde mit den Default-Einstellungen gearbeitet. Bei allen Tests wurde eine Hybrid-Initialisierung durchgeführt, um die Eintrittsparameter in den Start der Simulation zu laden.

Es kam zu einer Abänderung der Konvergenzbedingungen von den Standardeinstellungen. Dabei sind die Bedingungen unter „Residential Monitors“ auf 0,0001 gestellt worden. Dadurch wurde eine Konvergenz einer Lösung, welche den Genauigkeitsstandards nicht entspricht, verhindert.

Die notwendige Anzahl an Iterationsschritten ist abhängig von dem generierten Rechenetz. Die geringste Anzahl ist die doppelte Anzahl der Flächen, die bei einer Durchströmung durchlaufen werden. Die „Time-Step-Methode“ der Kalkulation wurde auf Automatik gestellt. Der „Time-Scale-Factor“ auf 1. Die „Length-Scale-Methode“ ist konservativ gewählt worden. Die Einstellungen sind in **Abbildung 17** dargestellt. Die Anzahl der Iterationen wird in dem Kapitel [4.2.5 Durchführung der Simulation](#) nochmals genauer beleuchtet.

Der Eintrittsdruck der Luft, der Eintrittsdruck des Wasserstoffes und die Eintrittstemperatur des Wasserstoffes wurden mit den folgenden Werten als fixe Eintrittsparameter definiert:

- $P_a = 7$ bar (Lufteintrittsdruck)
- $P_{H_2} = 9$ bar (Wasserstoffeintrittsdruck)
- $T_{H_2} = 293$ K (Wasserstoffeintrittstemperatur)

4.2.3 Variable Randbedingungen

Die Variabilität der Randbedingungen wird im Allgemeinen auf die Einlasstemperatur der Luft bezogen. Der niedrigste genannte Wert ist 600 K. Dabei wird ein Druckeinlass von 689.476 Pa (6,90 bar) bis zu 1.034.000 Pa (10,34 bar) beschrieben. In [1] wird dieser Druckbereich auch bei den Eintrittstemperatur von 700 K und 800 K getestet. In der Simulation wurde der Betriebspunkt bei einem Lufteintrittsdruck von 7 bar und einem Wasserstoffeintrittsdruck von 9 bar fixiert. Die Eintrittstemperatur und der Auslassdruck des Gemisches sind variable Parameter, welche zur Darstellung der unterschiedlichen Betriebspunkte genutzt wurden.

Das Luft-Treibstoff-Verhältnis wird in der Publikation mit einem Wert von 0,0029 bis 0,014 beschrieben. Das Äquivalenzverhältnis mit 0,1 zu 0,48. Dadurch wurde stets die Verbrennung bei einem Luftüberschuss betrachtet (magere Verbrennung). Anhand der variablen Eintrittsbedingungen wurden auch diese Verhältnisse verändert.

Die Austrittstemperatur des Gemisches wurde mit der Eintrittstemperatur der Luft in den Einstellungen gleichgesetzt. Jedoch ist sie, durch die Vermischung mit dem kälteren Wasserstoff, niedriger als die Eintrittstemperatur.

Die gewählten Parameter für die Simulationen sind wie folgt festgelegt worden:

- I: 600 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck
 - I.I: 6,25 bar Austrittsdruck
 - I.II: 6,50 bar Austrittsdruck
 - I.III: 6,60 bar Austrittsdruck
 - I.IV: 6,75 bar Austrittsdruck
- I: 700 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck
 - II.I: 6,25 bar Austrittsdruck
 - II.II: 6,50 bar Austrittsdruck
 - II.III: 6,60 bar Austrittsdruck
 - II.IV: 6,75 bar Austrittsdruck
- I: 800 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck
 - III.I: 6,25 bar Austrittsdruck
 - III.II: 6,50 bar Austrittsdruck
 - III.III: 6,60 bar Austrittsdruck
 - III.IV: 6,75 bar Austrittsdruck

Das Äquivalenzverhältnis¹⁶ hängt über das stöchiometrische Luftverhältnis mit dem Luft-Treibstoff-Verhältnis zusammen und hat einen signifikanten Einfluss auf die NO_x-Produktion. In der Publikation [1] ist ersichtlich, dass ein niedrigeres Äquivalenzverhältnis, welches für einen höheren Luftüberschuss spricht, niedrigere NO_x-Emissionen zur Folge hat.

4.2.4 Monitoring

Zur Auswertung der Simulationen wurden verschiedene Werte während der Berechnung aufgezeichnet. Diese sind in der folgenden Aufstellung ersichtlich:

- Druck [Pa/bar]
 - Eintrittsdruck Luft
 - Eintrittsdruck Wasserstoff
 - Austrittsdruck
 - Druckdifferenz Lufteintritt zu Austritt
- Temperatur [K]
 - Eintrittstemperatur Luft
 - Eintrittstemperatur Wasserstoff
 - Austrittstemperatur

¹⁶ Das Äquivalenzverhältnis ist der Kehrwert des Luftverhältnisses. [95]

- Volumenanteile [%] (am Austritt)
 - Volumenanteile Luft
 - Volumenanteile Wasserstoff
- Massenströme [kg/s]
 - Massenstrom Luft
 - Massenstrom Wasserstoff

Durch die aufgezeichneten Werte wurden das Luft-Treibstoff-Verhältnis und der Druckverlust errechnet. Die resultierenden Werte werden im Kapitel [4.2.6 Ergebnisse der Simulation](#) beschrieben.

4.2.5 Durchführung der Simulation

Es wurde ein Betriebspunkt aus der Publikation [1] gewählt (7 bar Lufteinlassdruck, Druckverlust von 4 %) und in der Simulation nachgestellt. Akzeptable Ergebnisse wurden bei einem Wasserstoffeintrittsdruck von 9 bar und einem Brennkammerdruck von 6,6 bar erreicht. Anhand dieses Ausgangspunktes wurden Betriebspunkte in der näheren Umgebung beobachtet.

Es kam zu der Durchführung von drei Simulationen pro Berechnungsmethode. Diese sind, wie bereits erwähnt, die Methode „Coupled“ und die Methode „PISO“. Gestartet wurde mit den bereits genannten Parametern. Nachdem sich die Konvergenz eingestellt hat, ist der Austrittsdruck schrittweise erhöht worden. Bei jedem Schritt wurde wieder auf eine Konvergenz gewartet, bevor es zu einer weiteren Steigerung kam. In **Abbildung 18** ist der Druckverlauf bei 800 K Lufteintrittstemperatur mit der „Coupled“-Berechnungsmethode ersichtlich. Der Druck hat nach 2.000 Iterationsschritten einen konstanten Wert erreicht. Der anfangs eingestellte Druck am Auslass der Düse lag bei 6,25 bar. Nach der Erhöhung auf 6,50 bar, wurden wieder 1.000 Iterationsschritte durchgeführt, um konstante Ausgangswerte zu garantieren. Die weiteren Schritte sind mit der Drucksteigerung auf 6,60 bar und 6,75 bar auf dieselbe Art und Weise durchgeführt worden. In **Abbildung 18** ist ersichtlich, dass der Eintrittsdruck der Luft und dem Wasserstoff konstant ist. Der eingestellte Austrittsdruck wurde aufgrund der strömungsmechanischen Resultate nicht erreicht. Am Ende jedes Schrittes wurde die Simulation und die Plots über die aufgezeichneten Werte, gespeichert.

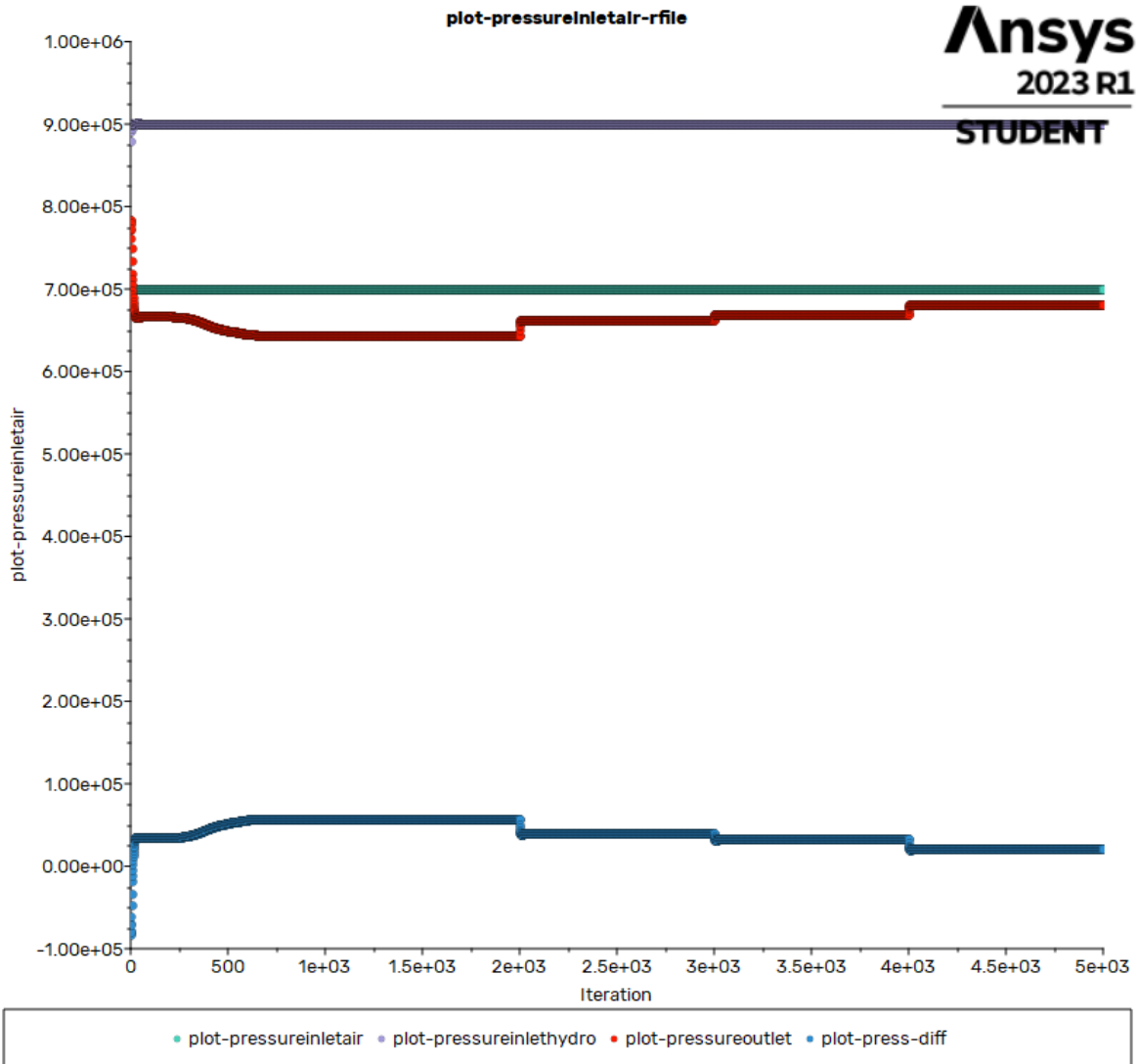


Abbildung 18: Druckverlauf bei einer Simulation mit 800 K Luft Eintrittstemperatur und geänderten angelegten Austrittsdrücken.

Der Druckverlust ist bei dem Monitoring mitaufgezeichnet worden. Der Prozentuelle wurde durch folgende Formel errechnet:

$$p_{\%} = \frac{\Delta p}{p_{Air\ in}} \quad (10)$$

Diese Prozedur wurde bei einer Eintrittstemperatur von 600 K, 700 K und 800 K durchgeführt. Weitere Aufzeichnungen zu den einzelnen Simulationen sind in [6 Anhang](#) angehängt.

Der Wasserstoffeintrittsdruck in **Abbildung 18** ist in violett dargestellt, wohingegen der Luft eintrittsdruck in grün und der Austrittsdruck in rot zu sehen sind. Die Druckdifferenz zwischen Luft eintritt und Gemischaustritt ist in blau dargestellt.

4.2.6 Ergebnisse der Simulationen

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die aufgezeichneten Werte dargestellt. Die Startparameter der Simulation mittels Berechnungsmethode „Coupled“ sind in den **Tabellen 10 und 12** nochmals dargestellt. Die Ergebnisse sind in den **Tabellen 11, 13** und **15** ersichtlich.

Tabelle 10: Eintrittsparameter Bedingungen I.XXXC

	Bed I.I C	Bed I.II C	Bed I.III C	Bed I.IV C
Temperatur Luft Einlass [K]	600	600	600	600
Temperatur H₂ Einlass [K]	293	293	293	293
Druck Luft Einlass [bar]	7	7	7	7
Druck H₂ Einlass [bar]	9	9	9	9
Austrittsdruck eingestellt [bar]	6,25	6,50	6,60	6,75

Tabelle 11: Ergebnisse Bedingungen I.XXXC

	Bed I.I C	Bed I.II C	Bed I.III C	Bed I.IV C
Temperatur Gemischauslass [K]	562,3	556,7	553,1	544,1
Austrittsdruck [bar]	6,440073	6,61618	6,8763	6,7987
Massenstrom Luft [kg/s]	0,107	0,0883	0,0792	0,0627
Massenstrom H₂ [kg/s]	0,0011	0,0011	0,0011	0,001
f/a Verhältnis	0,010280374	0,012457531	0,01388888	0,0159489
Druckverlust [bar]	0,559927	0,38382	0,31237	0,2013
Druckverlust [%]	7,999	5,483	4,462	2,876

Tabelle 12: Eintrittsparameter Bedingungen II.XXXC

	Bed II.I C	Bed II.II C	Bed II.II C	Bed II.IV C
Temperatur Luft Einlass [K]	700	700	700	700

Temperatur H₂ Einlass [K]	293	293	293	293
Druck Luft Einlass [bar]	7	7	7	7
Druck H₂ Einlass [bar]	9	9	9	9
Austrittsdruck eingestellt [bar]	6,25	6,50	6,60	6,75

Tabelle 13: Ergebnisse Bedingungen II.XXXC

	Bed II.I C	Bed II.II C	Bed II.II C	Bed II.IV C
Temperatur Gemischauslass [K]	646,4	638,3	633,4	621,2
Austrittsdruck [bar]	6,43699	6,61185	6,68524	6,79686
Massenstrom Luft [kg/s]	0,0993	0,0819	0,0734	0,0582
Massenstrom H₂ [kg/s]	0,0011	0,0011	0,0011	0,001
f/a Verhältnis	0,011077543	0,013431013	0,014986376	0,01718131
Druckverlust [bar]	0,56301	0,38815	0,31476	0,20314
Druckverlust [%]	8,043	5,545	4,490	2,902

Tabelle 14: Eintrittsparameter Bedingungen III.XXXC

	Bed III.I C	Bed III.II C	Bed III.III C	Bed III.IV C
Temperatur Luft Einlass [K]	800	800	800	800
Temperatur H₂ Einlass [K]	293	293	293	293
Druck Luft Einlass [bar]	7	7	7	7
Druck H₂ Einlass [bar]	9	9	9	9
Austrittsdruck eingestellt [bar]	6,25	6,50	6,60	6,75

Tabelle 15: Ergebnisse Bedingungen III.XXXC

	Bed III.I C	Bed III.II C	Bed III.III C	Bed III.IV C
Temperatur Gemischauslass [K]	729,0	718,4	712,3	696,6
Austrittsdruck [bar]	6,43202	6,60922	6,68275	6,79529
Massenstrom Luft [kg/s]	0,0929	0,0767	0,0678	0,0546
Massenstrom H₂ [kg/s]	0,0011	0,0011	0,0011	0,001
f/a Verhältnis	0,011840689	0,014341591	0,016224189	0,018315018
Druckverlust [bar]	0,56798	0,39078	0,31725	0,20471
Druckverlust [%]	8,114	5,583	4,532	2,924

Zu beobachten ist, dass der Druckverlust mit steigender Eintrittstemperatur zunimmt. Weiters fällt er mit steigendem Brennkammerdruck (eingestelltem Ausgangsdruck der Einspritzdüse). Dadurch steigt jedoch das Luft-Treibstoff-Verhältnis an. Die Ergebnisse der „Coupled“-Methode sind in den Abbildungen **19**, **20**, **21** und **22** grafisch dargestellt. Da die Abweichungen zur „PISO“- Methode sehr gering sind (im Bereich von 0,002 % beim Druckverlust), wird darauf hier nicht weiter eingegangen.

Die Druckverluste haben sich bei den drei verschiedenen Temperaturen sehr ähnlich verhalten. Der Austrittsdruck spielt dabei eine weit wichtigere Rolle als die Eintrittstemperatur. Der prozentuelle Druckverlust wird in **Abbildung 19** bei den verschiedenen angelegten Brennkammerdrücken und Lufteintrittstemperatur dargestellt. Mit steigendem Brennkammerdruck steigt der Austrittsdruck der Düse und sinkt der Druckverlust. Der Verlauf der Austrittsdrücke ist in **Abbildung 20** ersichtlich.

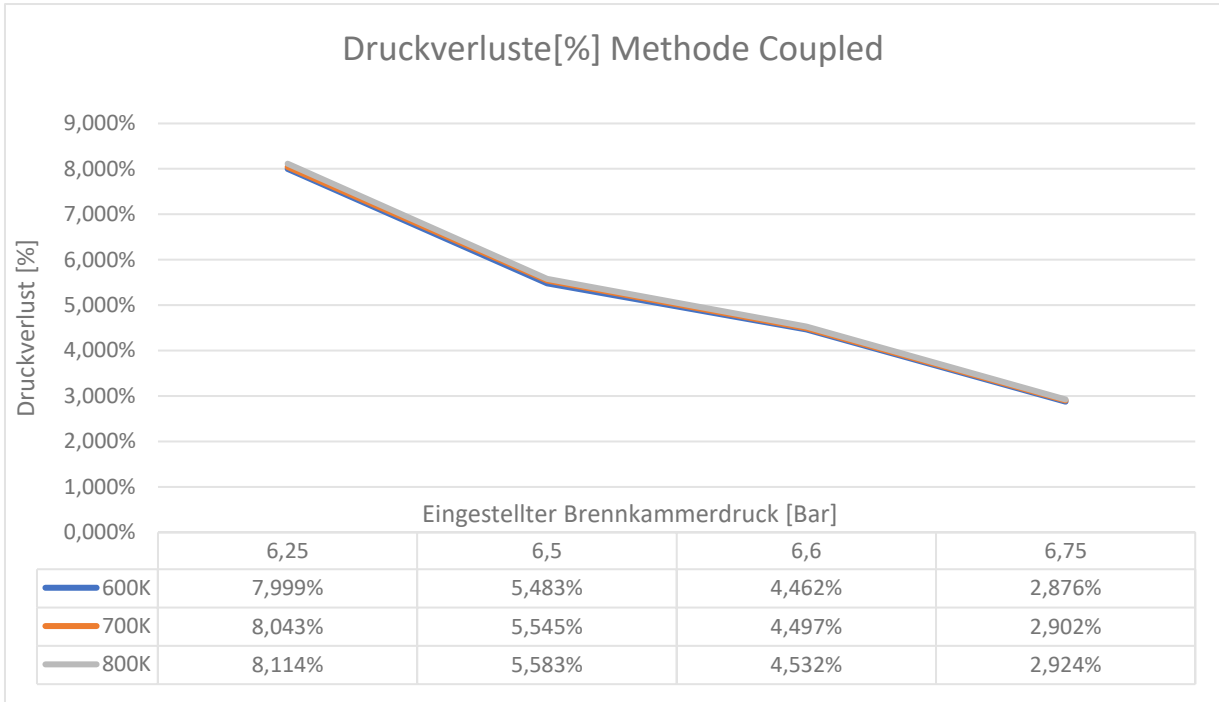


Abbildung 19: Druckverluste der „Coupled“-Simulationen gegenüber den angelegten Austrittsdrücken.

Die Austrittstemperatur steigt mit der Lufteintrittstemperatur. Jedoch erhöht sich der Temperaturverlust aufgrund des eingeströmten Wasserstoffes, welcher mit einer konstanten Temperatur von 293 K bei allen Simulationen einspritzt, bei steigender Eintrittstemperatur. Dieser Verlust lässt sich, durch die steigende Temperaturdifferenz zwischen der Wasserstoffeintrittstemperatur und der Lufteintrittstemperatur erklären. In **Abbildung 21** ist die Austrittstemperatur bei den verschiedenen Eintrittsbedingungen dargestellt.

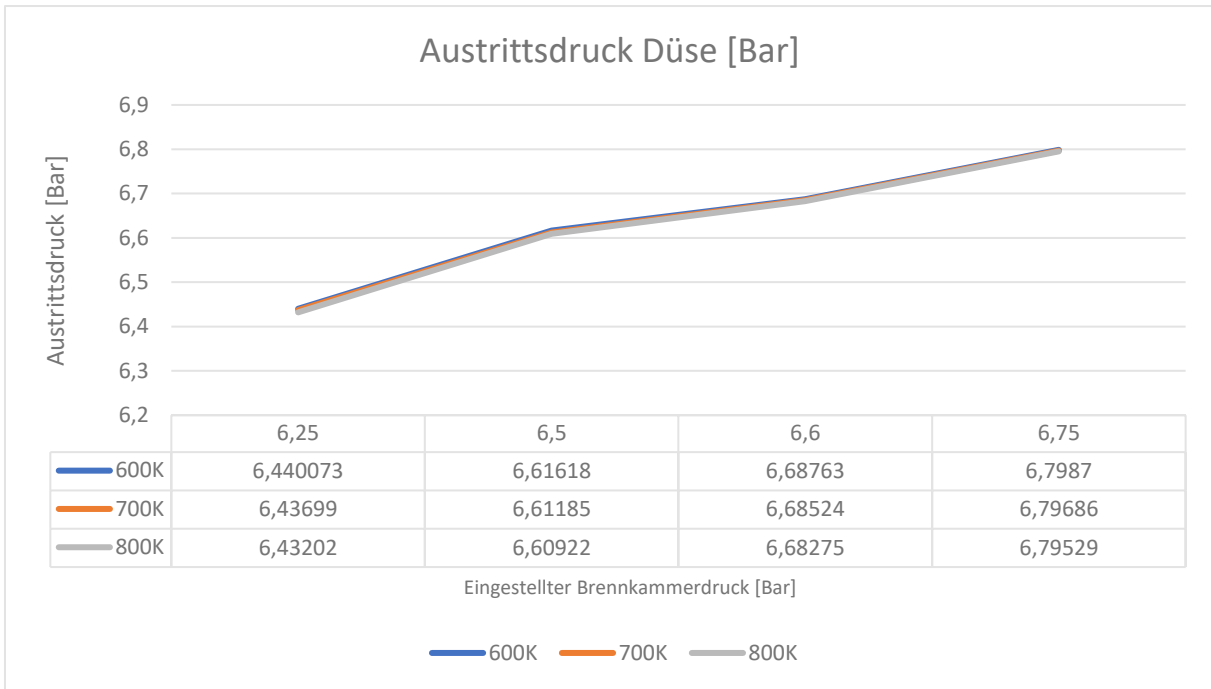


Abbildung 20: Austrittsdrücke der „Coupled“-Simulationen gegenüber den angelegten Austrittsdrücken.

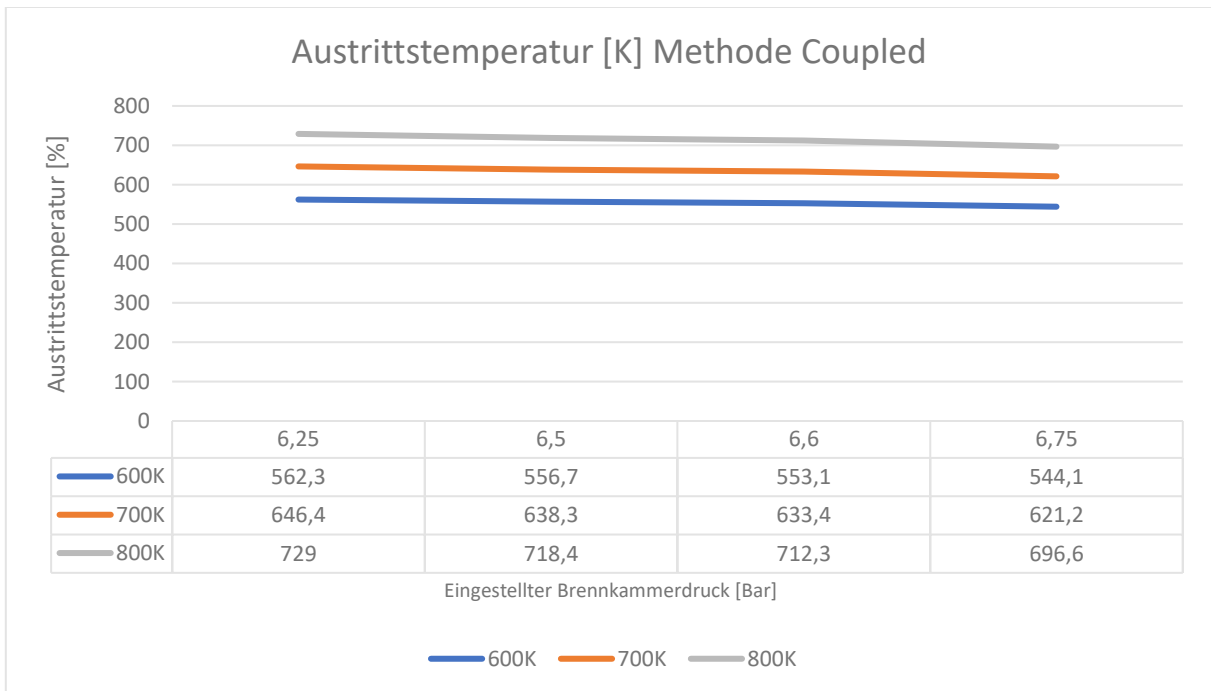


Abbildung 21: Austrittstemperaturen der „Coupled“-Simulationen gegenüber den angelegten Austrittsdrücken.

Das Luft-Treibstoff-Verhältnis, welches sich durch die gegebenen Randbedingungen einstellt, steigt mit der Brennkammerdruck und dem Lufteintrittstemperatur. Die in [1] beschriebenen Luft-Treibstoff-Verhältnisse decken nur rund 50 % der Ergebnisse aus der Simulation ab. Da heutzutage bessere Technologien vorhanden sind könnten damit auch höhere Luft-Treibstoff-Verhältnisse erreicht werden, wodurch der Druckverlust reduziert werden würde. Die Ergebnisse sind in der **Abbildung 22**

dargestellt. Die Aufzeichnungen der einzelnen Simulationen sind im [6 Anhang](#) zu finden. Die Druckverläufe, die Temperaturverläufe, die Volumenanteile von Luft und Wasserstoff und die Residuen sind dort ersichtlich.

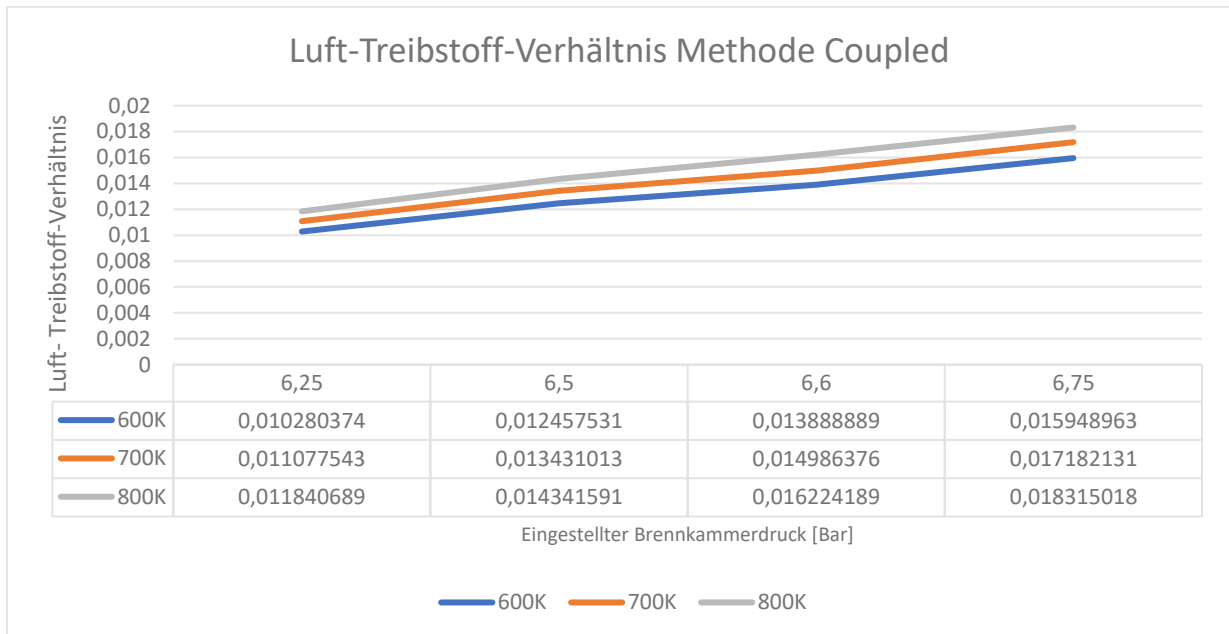


Abbildung 22: Luft-Treibstoff-Verhältnis der „Coupled“-Simulationen gegenüber den angelegten Austrittsdrücken.

Die Ergebnisse zeigen die Betriebszustände der Einspritzdüse um den genannten Bereich in [1]. Dadurch können im nächsten Kapitel [4.3 Vergleich mit „Low-Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection“](#) die Ergebnisse mit den tatsächlich aufgenommenen Werten verglichen werden.

4.3 Vergleich mit “Low-Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection” [1]

Zum Vergleich der Resultate aus der Simulation mit realen Werten, werden die tatsächlich in [1] gemessenen Ergebnisse verwendet. Die Quelle hält fest, welche NO_x-Emissionen bei welchen Betriebsverhalten von Wasserstoffturbinen, auftreten. Weiters wurden die Druckverluste bei unterschiedlichen Einspritzdüsen aufgezeichnet.

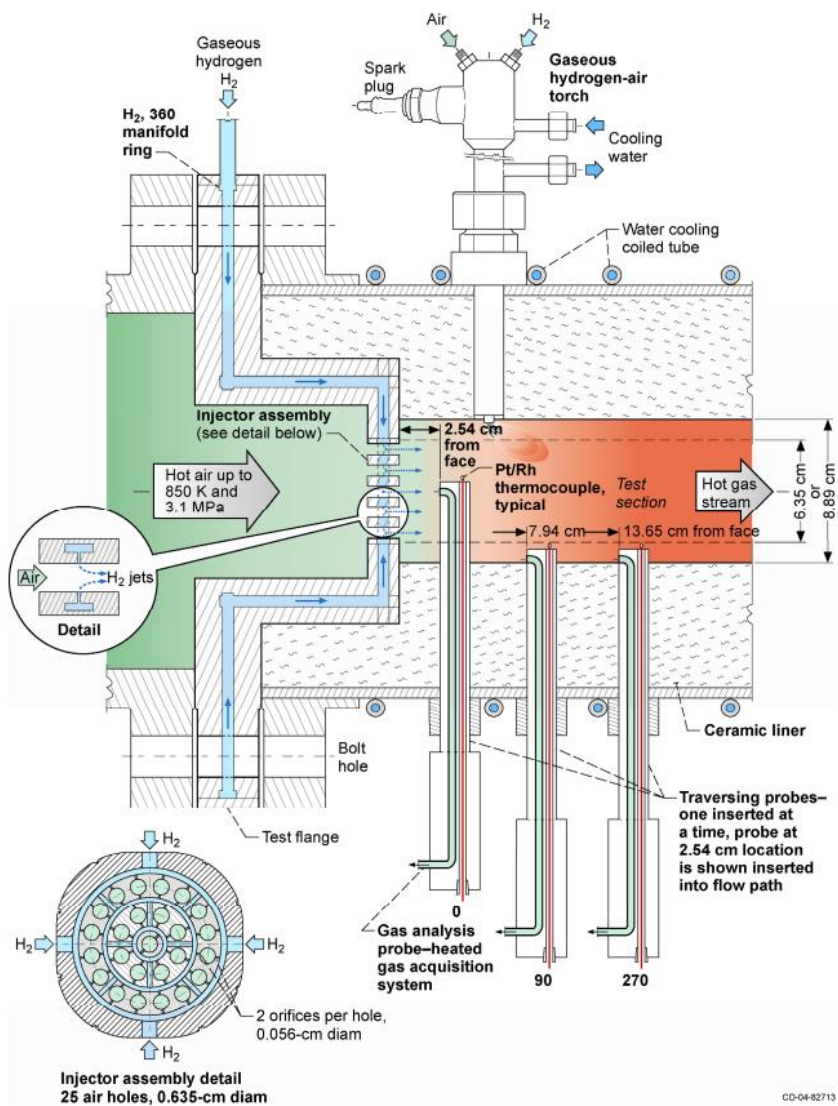


Abbildung 23: Darstellung des von der NASA getesteten Verbrenners. [1]

4.3.1 NASA N1 Einspritzdüsen Parameter und Resultate

Es wurden mehrere Düsen mit der Bedingung, dass der minimale Druckverlust maximal 4 % betragen darf, getestet. Selbst bei Konstruktionen, die diesen Wert nicht erreichten, wurden die Versuche jedoch nicht abgebrochen, sondern weitergeführt.

Die Resultate des „NASA N1 Injektor“ sind für diese Arbeit relevant, da dieser für die Simulation nachkonstruiert wurden. Die Konstruktion ist in **Abbildung 11** in Kapitel [4.1 Die Simulationskonstruktion](#) und **Abbildung 23** ersichtlich. Diese Einspritzdüse wurde bei Luftertrittsdrücken von 7 bis 10 bar getestet. Die Simulation wurde mit einem konstanten Luftertrittsdruck von 7 bar durchgeführt. Es werden nur die Ergebnisse korrelierender Eintrittsdrücke verglichen. Es gibt zwei unterschiedliche Ausführungen. Der Brennkammerdurchmesser beträgt 6,35 cm oder 8,89 cm. Da der Großteil der Aufzeichnungen bei Tests mit dem ersten durchgeführt wurde, bezieht sich diese Arbeit auf diesen.

Die Messstellen des Aufbaus sind 2,54 cm, 7,94 cm und 13,65 cm von dem Düsenauslass entfernt. Dabei wurde bei den ersten beiden sowohl am Rand als auch in der Mitte der Brennkammer gemessen. Nur die letzte Messstelle verfügt lediglich über eine Messung an der Wand. [1]

Der bereits genannte Druckverlust von 4 % tritt bei dem „**NASA N1 Injektor**“ bei einem Luft-Treibstoff-Verhältnis von 0,014 auf. Dabei handelt es sich auch um das maximale genannte Verhältnis. Eine Steigerung dieses würde zu Verbrennungstemperaturen von über 1.900 K führen. Dies wurde in [1] zu verhindern, um die Bauteile in der Turbine nicht zu hohen thermischen Belastungen auszusetzen. Die Tests wurden nach den nachfolgenden Parametern ausgeführt. Weiters sind die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten am Verbrennereintritt ersichtlich:

- 7 bar Lufteinlassdruck, 600 K Lufteintrittstemperatur, 30,48 m/s
- 7 bar Lufteinlassdruck, 700 K Lufteintrittstemperatur, 39,63 m/s
- 7 bar Lufteinlassdruck, 800 K Lufteintrittstemperatur, 45,73 m/s

Die Strömungsgeschwindigkeiten am Brennkammereintritt wurden anhand der Parameter der Simulation nachträglich berechnet. Dies wurde für den Simulationsfall, der dem genannten realistischen Fall am nächsten kommt (eingestellter Brennkammerdruck bei 6,60 bar), durchgeführt. Durch die Massenströme der Simulation und die Dichten von Luft und Wasserstoff bei den genannten Bedingungen (7 bar und 600 bis 800 K) welche anhand der Website [85] ermittelt worden sind, wurden die theoretischen Strömungsgeschwindigkeiten berechnet.

4.3.2 Gegenüberstellung der Resultate

Die Resultate der Simulation zeigen einen Betriebspunkt mit einem Druckverlust von 4,462 % bei 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck und einem Lufteintrittstemperatur von 600 K. Das Luft-Treibstoff-Verhältnis ist dabei 0,014 und der Austrittsdruck 6,688 bar. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Aufzeichnungen aus [1]. Die Abweichung des prozentualen Druckverlustes der Simulation und der real gemessenen Ergebnisse beläuft sich auf 11,55%. Die ermittelte Strömungsgeschwindigkeit am Eintritt des Brenners lag bei 34,46 m/s. Die Abweichung zu der realen Strömungsgeschwindigkeit beläuft sich somit auf 13,06 %. Wie bereits erwähnt, wurde bei allen Strömungsgeschwindigkeitsberechnungen die Ergebnisse der Simulation bei dem eingestellten Brennkammerdruck von 6,60 bar verwendet. Dies trifft auch auf die Geschwindigkeitsberechnungen bei den 700 K und den 800 K Simulationen zu.

Durch eine Steigerung des Luft-Treibstoff-Verhältnisses und bei einem Austrittsdruck von 6,798 bar wurden sogar Druckverluste von 2,876 % erzielt. Das Luft-Treibstoff-Verhältnis beträgt dabei 0,016. Diese Betriebspunkte wurden in der Publikation von

der **NASA** jedoch nicht weiter untersucht. Stattdessen wurden andere Einspritzdüsen getestet, bei denen folgende Druckverluste gemessen worden sind.

Tabelle 16: Resultate der Publikation der NASA [1]

Einspritzdüse:	NASA N1 (6,350 cm)	C1	C2	C3	C4	NASA N1 (8,890 cm)
Druckverlust [%]	4	12	4	20	25	16

Eine kontrollierte Reduzierung des Austrittsdruckes, steigert den Druckverlust. Dadurch wird auch das Luft-Treibstoff-Verhältnis reduziert, wodurch es zu einer magereren Verbrennung kommt. Bei den gleichen Eintrittsparametern und einem Austrittsdruck von 6,44 bar, steigt der Druckverlust auf bis zu 7,99 % an. Dabei kam es zu einem Luft-Treibstoff-Verhältnis von 0,010.

Bei einer Lufteintrittstemperatur von 700 K reichte der Druckverlust der Simulation von 2,902 % bei einem Austrittsdruck von 6,797 bar bis zu 8,043 % bei 6,437 bar. Die Luft-Treibstoff-Verhältnisse zeigten einen signifikanteren Unterschied. Es kam zu Werten zwischen 0,017 und 0,011. In der Publikation [1] wurde nur für den Test mit 600 K ein prozentueller Druckverlust genannt. Es ist damit zu rechnen, dass dieser bei den Tests mit 700 K und 800 K größer ausfällt. Die berechnete Strömungsgeschwindigkeit am Brennkammereintritt beläuft sich auf 38,14m/s. Die prozentuelle Abweichung zu der genannten Strömungsgeschwindigkeit (39,63 m/s) ergibt damit 3,92%. Diese Berechnung wurde, wie bei der ersten Testreihe, mit den Parametern aus der Simulation mit einem eingestellten Brennkammerdruck von 6,6 bar durchgeführt.

In der letzten Testreihe wurden die höchsten Druckverluste erreicht. Bei einem Austrittsdruck von 6,795 bar betrug er 2,924 %. Der Druckverlust steigt bis auf einen Wert von 8,114 % mit einem Austrittsdruck von 6,432 bar an. Die Luft-Treibstoff-Verhältnisse erreichte Werte von 0,018 bis 0,012. Es wurde ebenfalls eine Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt. Der berechnete Wert resultierte zu 41,28m/s. Die prozentuelle Abweichung beläuft sich auf 10,11%. Auch hier wurde wieder der Teil der Simulation bei einem eingestellten Brennkammerdruck von 6,6 bar beleuchtet.

In [1] wird erwähnt, dass mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten höhere Druckverluste einhergehen. Die Geschwindigkeiten, sowohl in der Simulation als auch im realen Versuch, stiegen mit der Erhöhung der Lufteintrittstemperatur. Die höchsten Druckverluste sind bei den Untersuchungen mit 800 K Lufteintrittstemperatur aufgetreten.

Der Druck, der sich in der Verbrennungskammer durch die Verbrennung bei der Publikation einstellt, ist nicht bekannt. Deswegen wurde die Simulation bei

verschiedenen Brennkammerdrücken durchgeführt. Diese Drücke sind unter anderem abhängig von den Eintrittsdrücken, aber auch von dem Luft-Treibstoff-Verhältnis, welches in der Realität durch die Massenstromregler eingestellt werden kann. Damit konstanten Druckeinlässen auftreten, wurde der Austrittsdruck manuell verändert, Jedoch werden nur rund 50 % der möglichen Triebstoffverhältnisse in [1] als möglich erachtet. Wegen zu hohen Verbrennungstemperaturen wurden Luft-Treibstoff-Verhältnisse über 0,014 vermieden. Jedoch sind genau bei diesen Werten die geringsten Druckverluste anzunehmen.

Das sich einstellende Äquivalenzverhältnis hängt über das stöchiometrische Luftverhältnis mit dem Luft-Treibstoff-Verhältnis zusammen und hat einen signifikanten Einfluss auf die NO_x -Produktion. In der Publikation [1] ist ersichtlich, dass ein niedrigeres Äquivalenzverhältnis, welches für einen höheren Luftüberschuss spricht, niedrigere NO_x -Emissionen zur Folge hat. Die NO_x -Produktion wurde in der Simulation jedoch nicht beleuchtet, weswegen auf diesen Punkt hier nicht weiter eingegangen wird. Weiters ist wie bereits erwähnt die Verbrennung in der Brennkammer nicht Bestandteil der Simulation oder der Untersuchung in dieser Arbeit.

5 Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Arbeit war es, ein alternatives Antriebskonzept für Flugzeuge mit Wasserstoff als Treibstoff vorzuschlagen und einen Teil dieses Antriebes, die Einspritzdüse in die Brennkammer, strömungsmechanisch zu untersuchen und zu simulieren. Dabei sollten die Aussagen aus [1] überprüft und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen werden.

Das alternative Antriebskonzept, welches sich auf Wasserstoffturbinen bei Kleinflugzeugen bezieht, wurde mit noch nicht umgesetzten Wasserstoffspeichern beschrieben. Die Untersuchung einer **PC-21** von **Pilatus** ließ darauf schließen, dass es möglich ist zusätzliche Unterflügeltanks mit Flüssigwasserstoff auszustatten, aber auch Materialspeicher in den Flügel unterzubringen. Jedoch zeigen Berechnungen, dass dabei mit einer verringerten Flugdauer zu rechnen ist. Durch Zusatz tanks kann die **PC-21** mit Kerosin eine Flugdauer von bis zu 7,6 h erreichen. Durch die Umrüstung auf Wasserstoff ist theoretisch nur noch eine Flugdauer von rund 3 h möglich. Da dieser Flugzeugstyp jedoch als Übungsflugzeug für das Militär verwendet wird, wird die Maschine selten im optimalen Betriebspunkt verwendet. Dadurch wird sich die Flugdauer weiters drastisch reduzieren. Es wird mit dem bis zu 3-fachen Treibstoffverbrauch gerechnet, wodurch nur noch eine Flugdauer von rund einer Stunde erreicht werden würde. Für Kurzstrecken wäre ein Kleinflugzeugkonzept mit Wasserstoffturbine umsetzbar. Jedoch müssen weitere Mittel in die Wasserstoffinfrastruktur investiert werden, damit solche Flüge zur Norm werden. Außerdem ist es notwendig, dass weiter Forschung in Richtung der Wasserstoffspeicherung durchgeführt wird. Eine Verbesserung der Speicherung würde nicht nur die Flugdauer verlängern, sondern auch das Einsatzgebiet für Wasserstoff in Flugzeugen bei allen Größen, erweitern.

Die Simulation des in [1] beschriebenen Aufbau des „**NASA N1 Injectors**“, hat einen Betriebspunkt der Publikation gefunden und die Betriebszustände um diesen Punkt untersucht. Dabei ist zu erkennen, dass höhere Eintrittstemperaturen der Luft zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten und damit auch zu höheren Druckverlusten führt. Eine Reduzierung war durch die Erhöhung des Luft-Treibstoff-Verhältnisses möglich. Jedoch wird in der Publikation ein maximaler Wert von 0,014 genannt, um eine Verbrennungstemperatur von 1.900 K nicht zu überschreiten und die Materialien in der Turbine vor zu hoher thermischer Belastung zu schützen. Die Versuche wurden im Jahre 2005 durchgeführt. Seit diesem Zeitpunkt kam es zu Fortschritten auf dem Gebiet der Materialien in Wasserstoffturbinen. In [37] wurden bereits mögliche Verbrennungstemperaturen von 2.300 K genannt. Der limitierende Faktor in dieser Quelle war nicht die thermische Belastung der Materialien, sondern die Reduktion von Stickstoffemissionen. In der Simulation ist ersichtlich, dass Luft-Treibstoff-Verhältnisse mit Verbrennungstemperaturen über 1.900 K möglich sind. Bei welchem Verhältnis

eine Temperatur von 2.300 K resultiert, ist aus der Simulation nicht ersichtlich. [1] nennt einen gewünschten Druckverlust von maximal 4 %. Dieser wurde bei allen Lufteintrittstemperaturen unterschritten. Jedoch nur in Kombination mit einem Luft-Treibstoff-Verhältnis von über 0,014. Nur bei der 600 K Simulation wurde der Betriebspunkt bei einem Austrittsdruck von 6,687 bar, einem Verhältnis von 0,014 und einem Druckverlust von 4,462 % nahezu erreicht.

Die Reduzierung der Stickstoffemissionen kann auch durch andere Faktoren, wie die Minimierung der Zeit des Treibstoffes in der Verbrennungszone (Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit) erreicht werden. Dadurch ist jedoch wieder mit höheren Druckverlusten der Einspritzdüse zu rechnen. [82]

Weitere Forschungen können zu besserem Verständnis für die Betriebsverhalten von Wasserstoffturbinen führen und somit auch das Einsatzgebiet von Wasserstoff als Treibstoff in der Luftfahrt erweitern. Dieser Umstand bietet eine potenzielle Chance die Luftfahrt von einem Großteil ihrer Emissionswerte zu befreien und somit den Flugverkehr nachhaltiger zu machen.

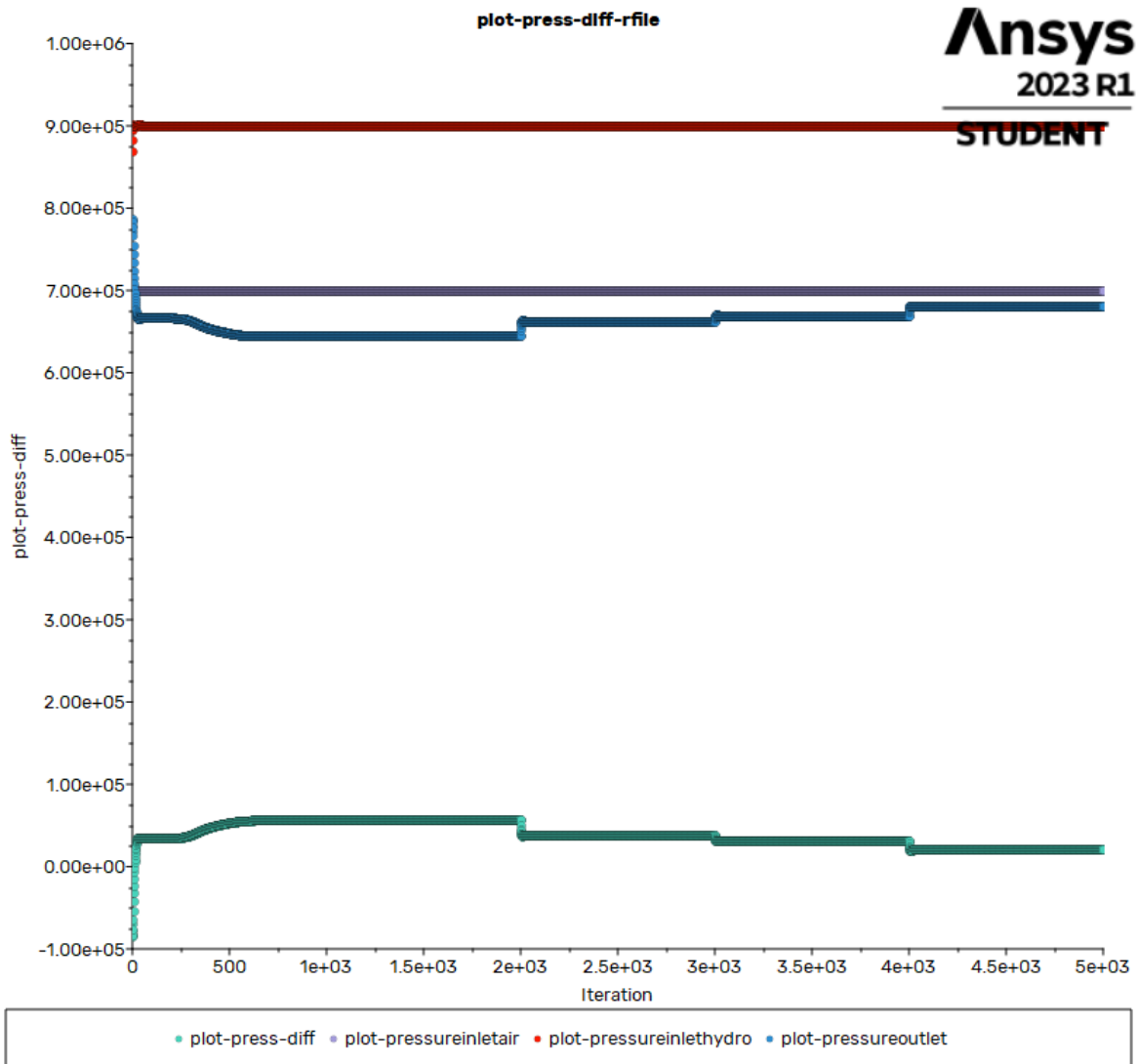
6 Anhang

a. Anhang A Simulationsdiagramme

Da die Simulationen einer Eintrittstemperatur aufeinander aufbauend sind, werden nur die Diagramme der jeweils letzten Simulation angehängt.

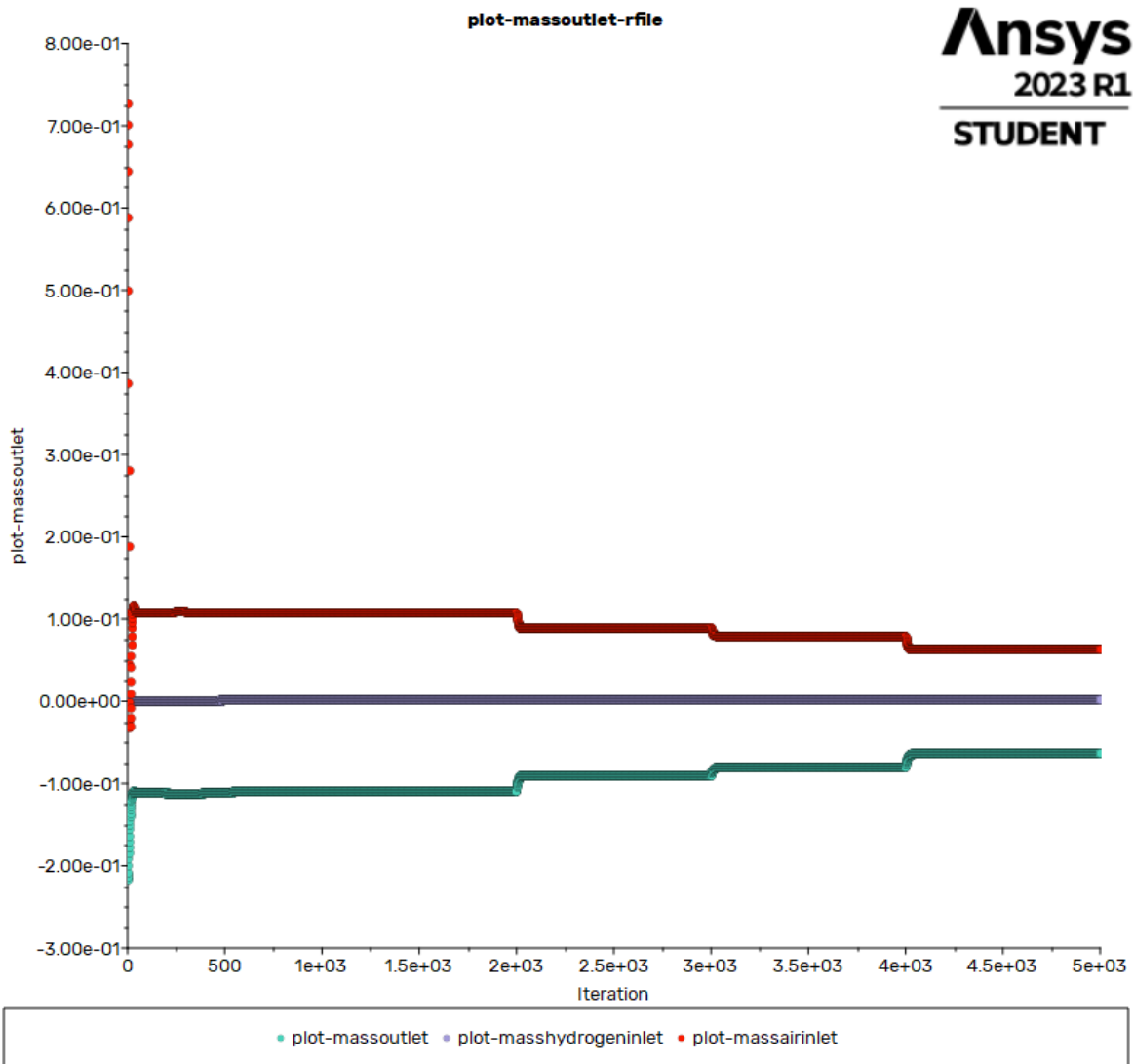
6.a.1 600 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintritt

6.a.1.1 Druckverlauf



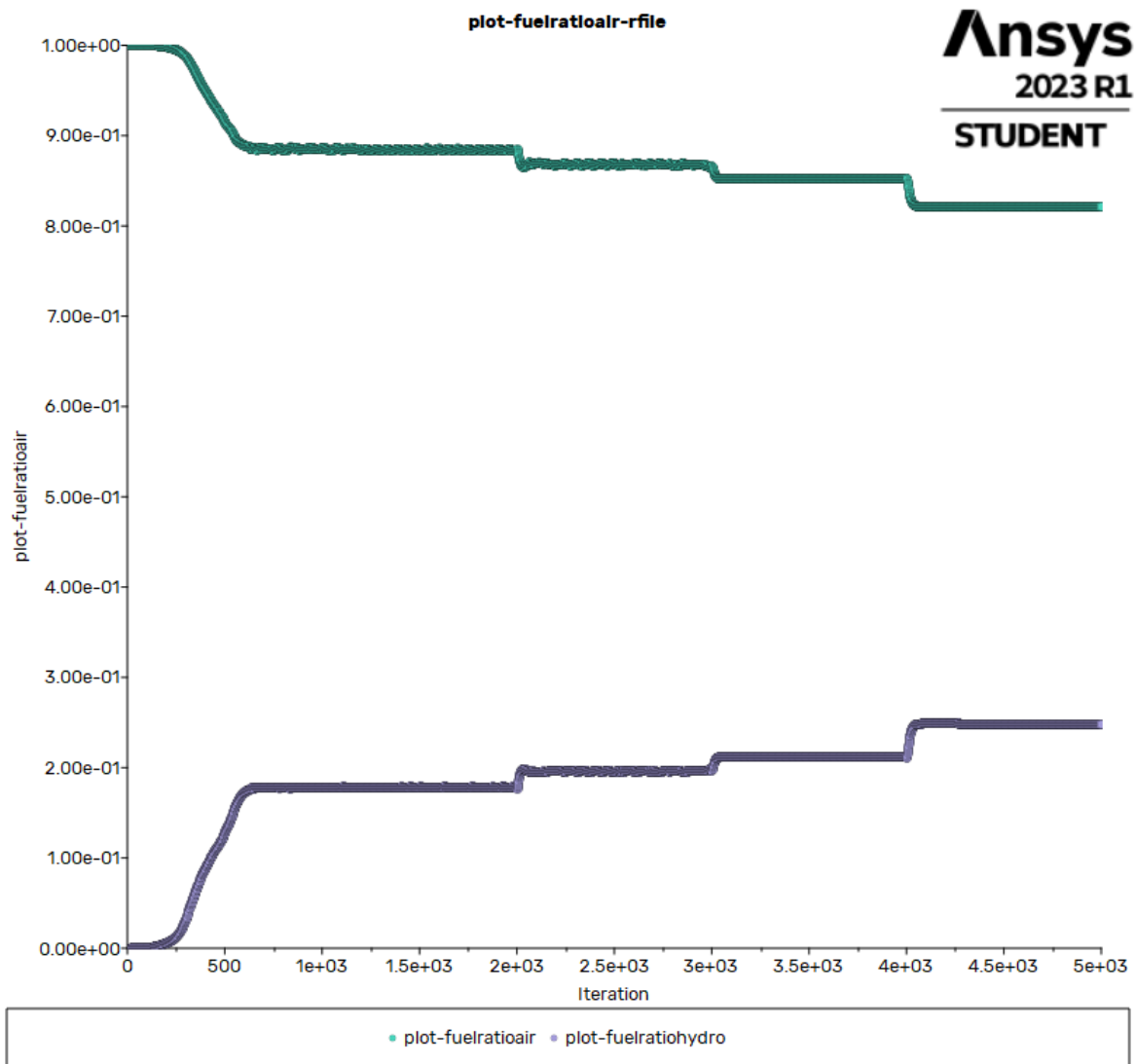
Anhang 6.a.1.1: Druckverlauf Simulation 600 K Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = Wasserstoffeintrittsdruck, Violet = Lufteintrittsdruck, Blau = Austrittsdruck, Türkis = Differenzdruck Lufteintritt zu Austritt.

6.a.1.2 Massenstrom



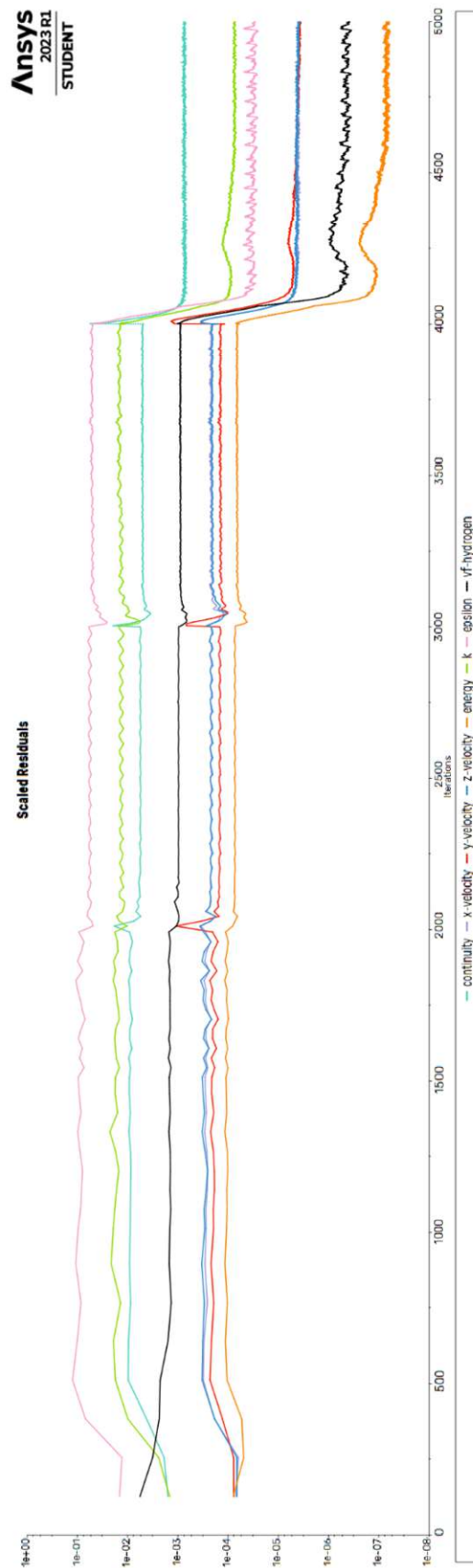
Anhang 6.a.1.2: Massenstrom Simulation 600 K Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9Bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Rot = Lufteintrittsmassenstrom, Violet = Wasserstoffeintrittsmassenstrom, Türkis = Austrittsmassenstrom.

6.a.1.3 Volumenverhältnis



**Anhang 6.a.1.3: Volumenverhältnis Luft / Wasserstoff der Simulation 600 K
Luft Eintrittstemperatur, 7 bar Luft eintrittsdruck, 9 bar Wasserstoff eintrittsdruck, eingestellter
Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = Luftmengenanteil, Violett =
Wasserstoffmengenanteil.**

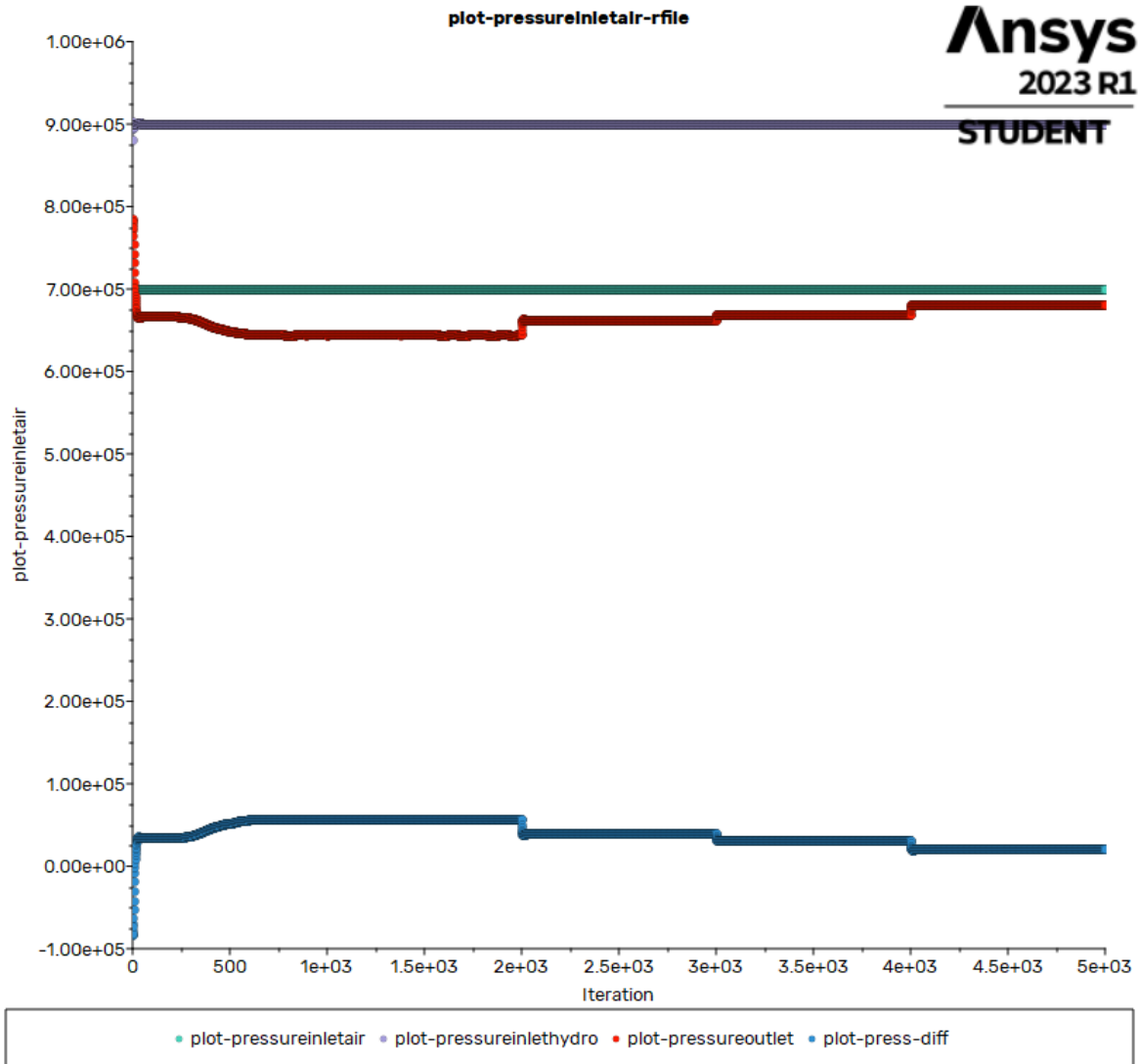
6.a.1.4 Residuen



Anhang 6.4: Residuen der Simulation 600 K Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = continuity, Violett = x-velocity, Rot = y-velocity, Blau = z-velocity, Orange = epsilon, Schwarz = vf-hydrogen

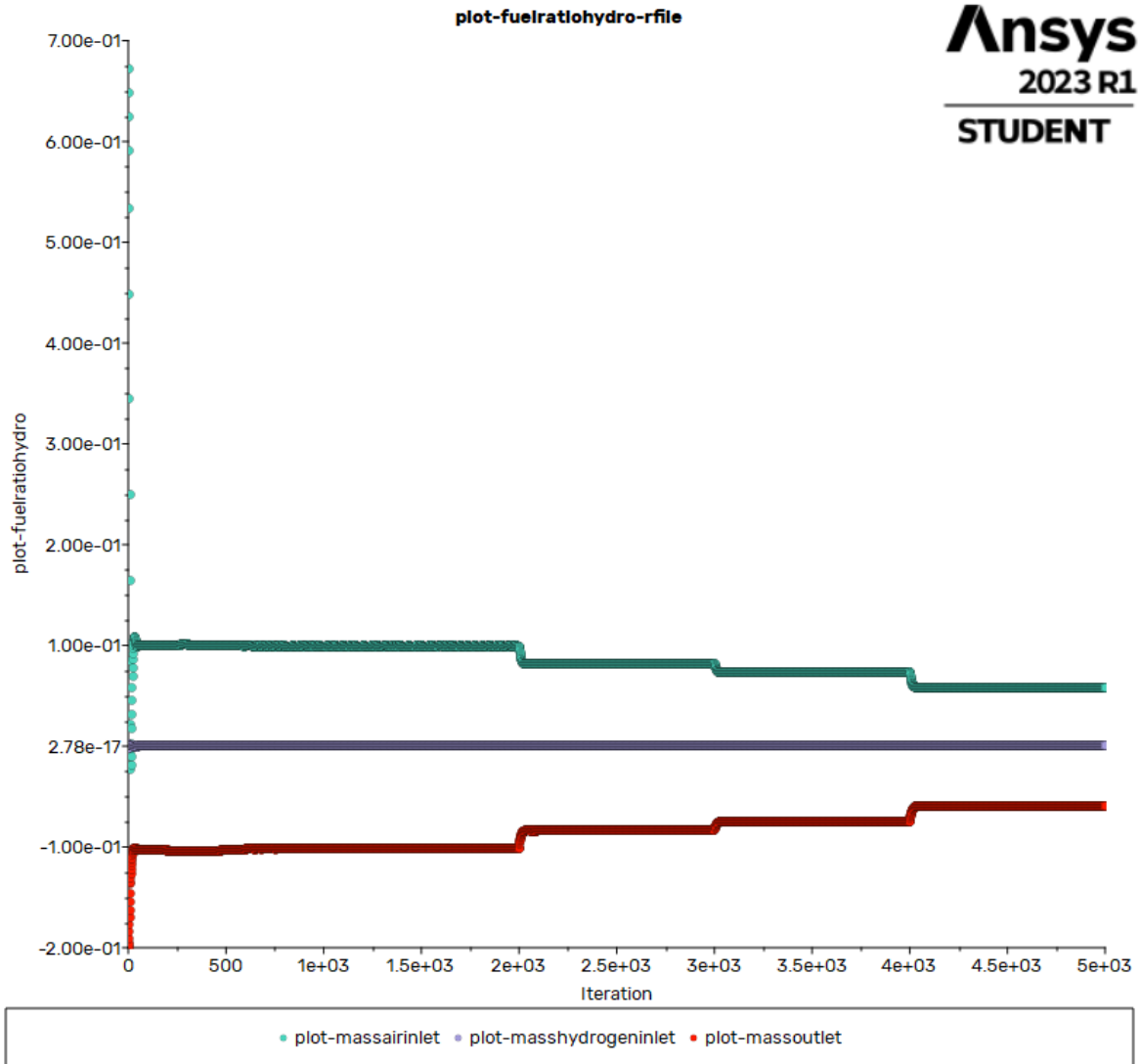
6.a.2 700 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintritt

6.a.2.1 Druckverlauf



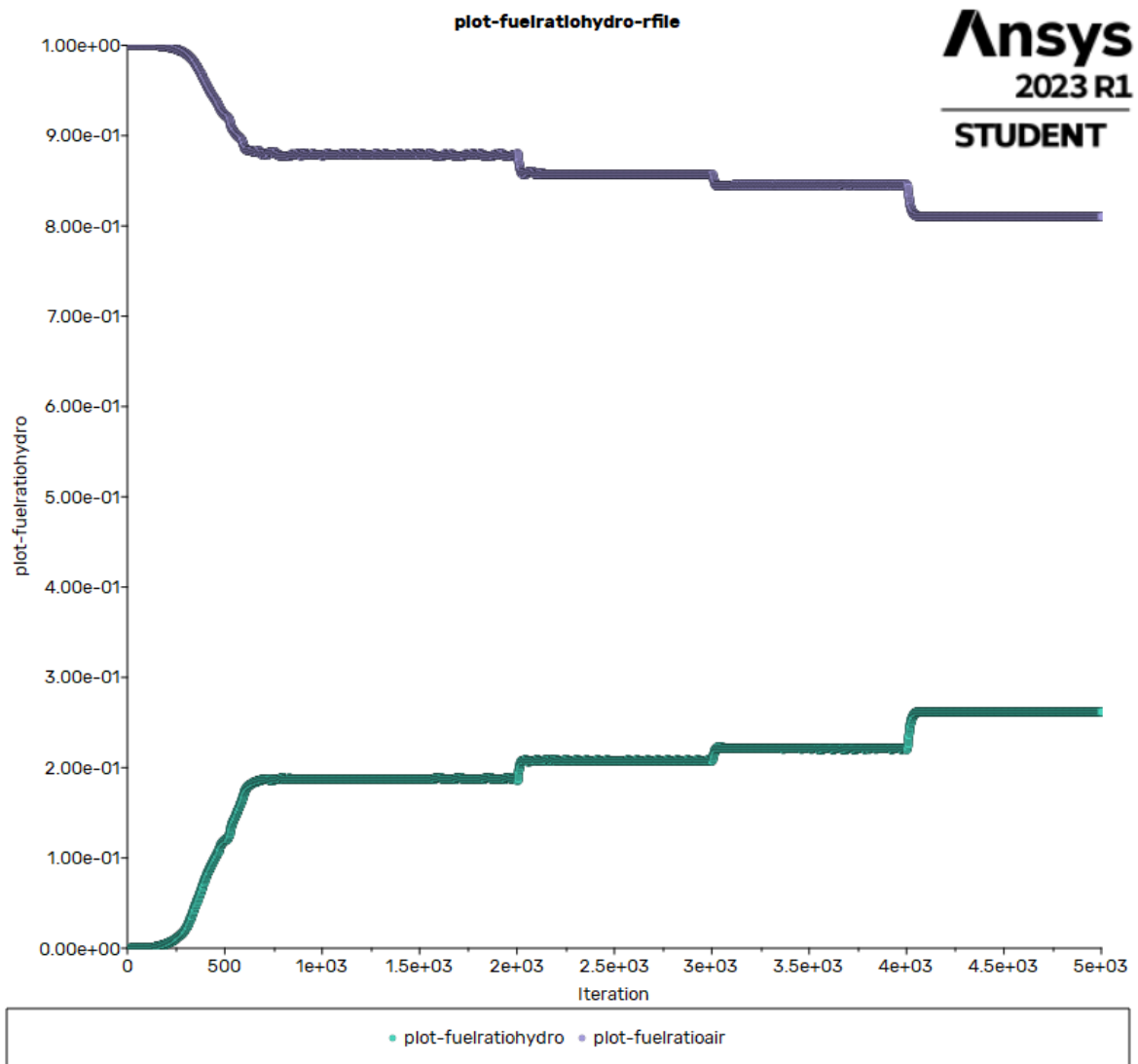
Anhang 6.a.2.1: Druckverlauf Simulation 700 K Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Violet = Wasserstoffeintrittsdruck, Türkis = Lufteintrittsdruck, Rot = Austrittsdruck, Blau = Differenzdruck Lufteintritt zu Austritt.

6.a.2.2 Massenstrom



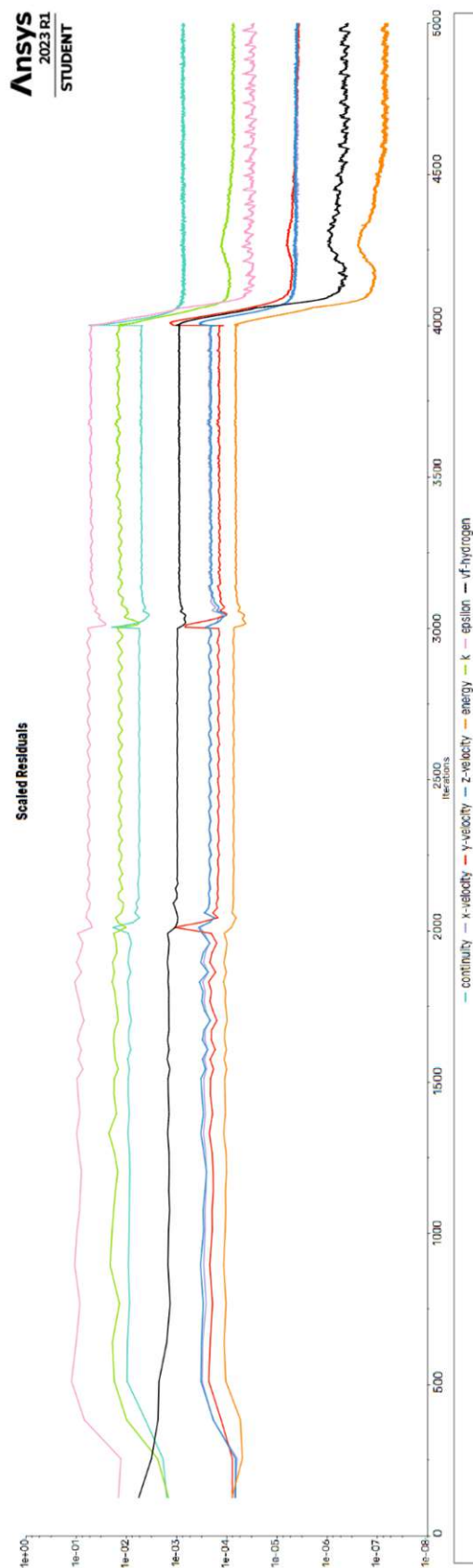
Anhang 6.a.2.2: Massenstrom Simulation 700 K Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = Lufteintrittsmassenstrom, Violet = Wasserstoffeintrittsmassenstrom, Rot = Austrittsmassenstrom.

6.a.2.3 Volumenverhältnis



**Anhang 6.a.2.3: Volumenverhältnis Luft / Wasserstoff der Simulation 700 K
Luft Eintrittstemperatur, 7 bar Luft eintrittsdruck, 9 bar Wasserstoff eintrittsdruck, eingestellter
Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Violet = Luftmengenanteil, Türkis =
Wasserstoffmengenanteil.**

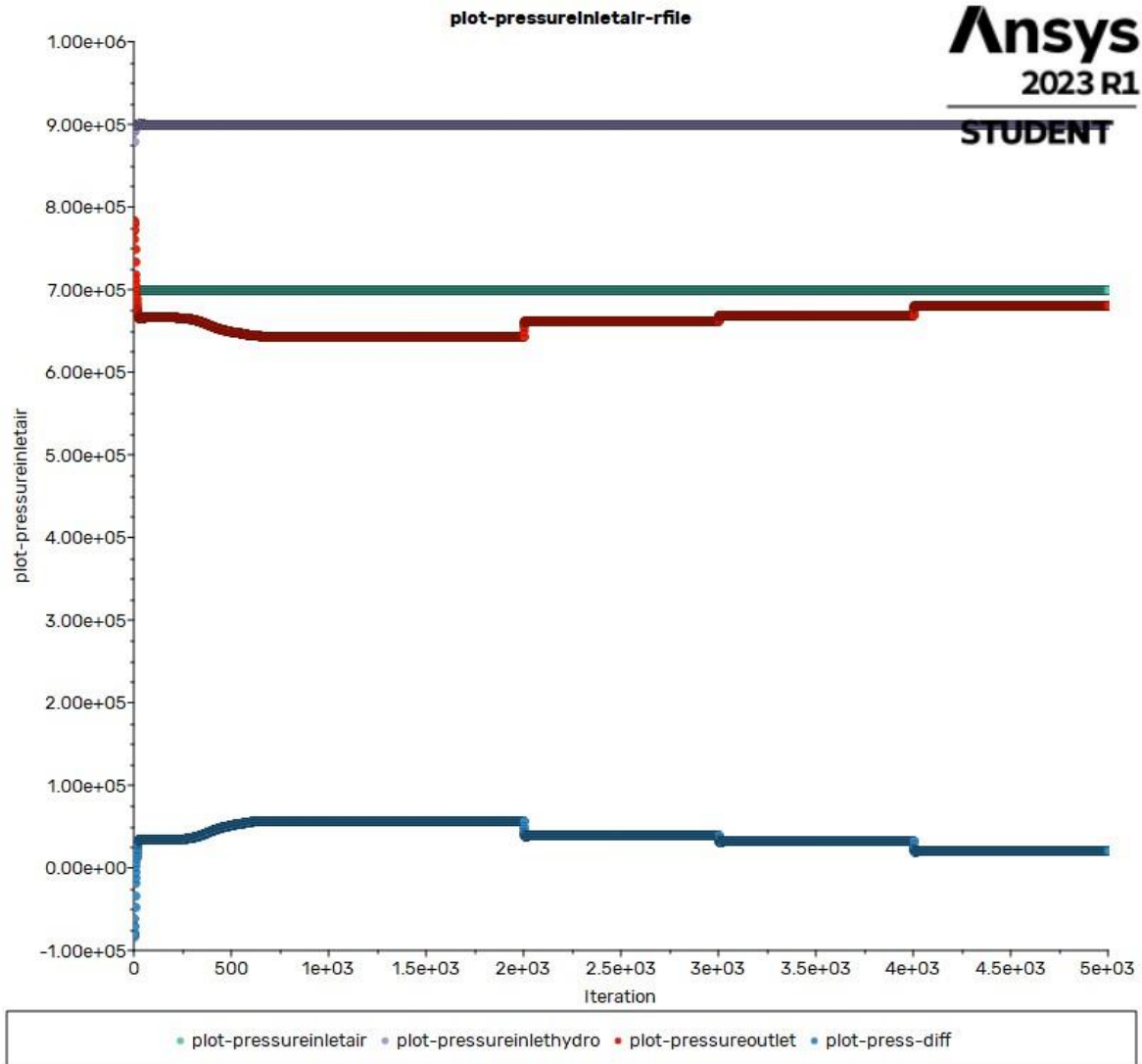
6.a.2.4 Residuen



Anhang 6.a.2.4: Residuen der Simulation 700 K Luftertrittstemperatur, 7 bar Luftertrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = continuity, Violet = x-velocity, Rot = y-velocity, Blau = z-velocity, Orange= epsilon, Schwarz vf-hydrogen

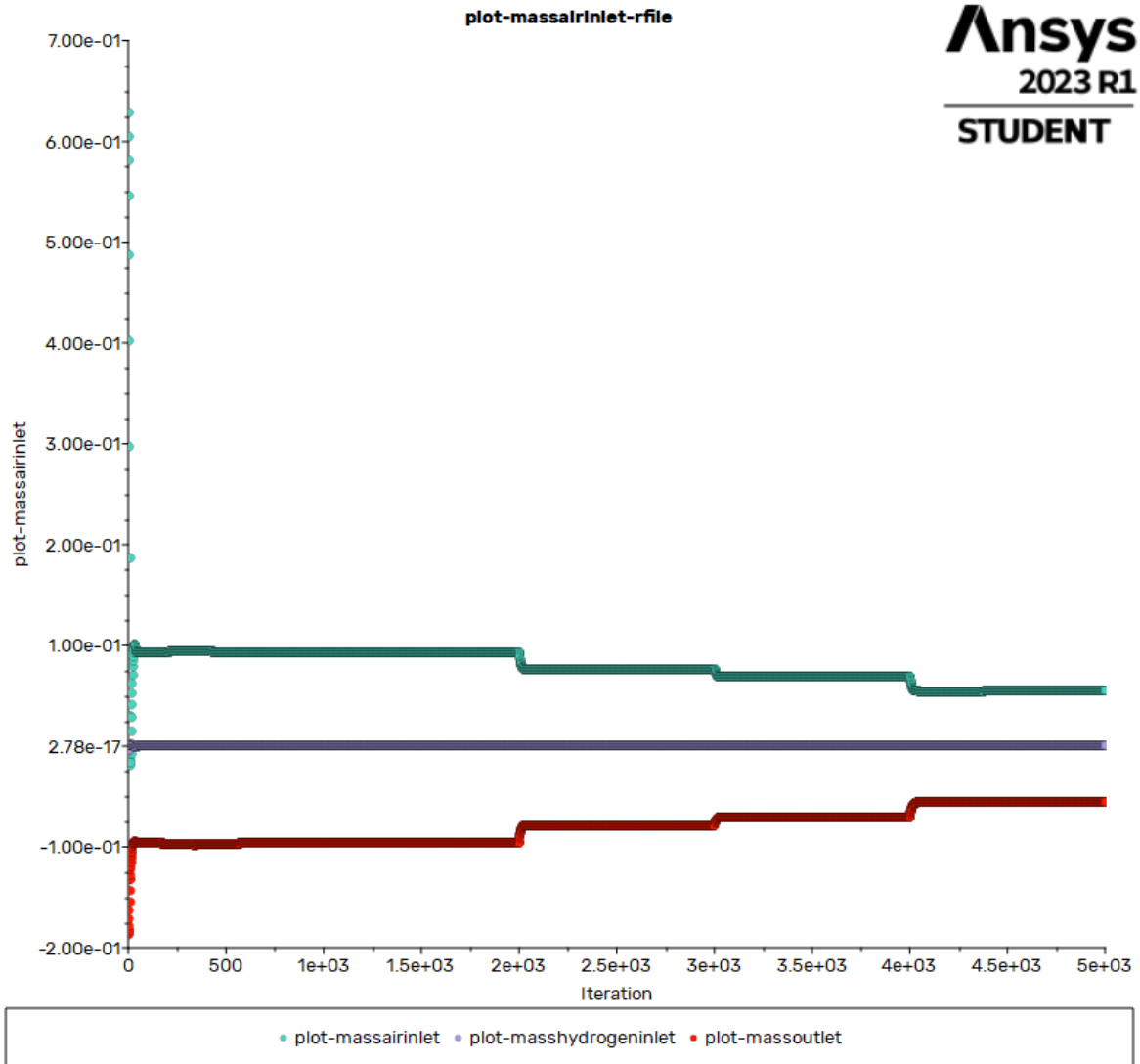
6.a.3 800 K, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintritt

6.a.3.1 Druckverlauf



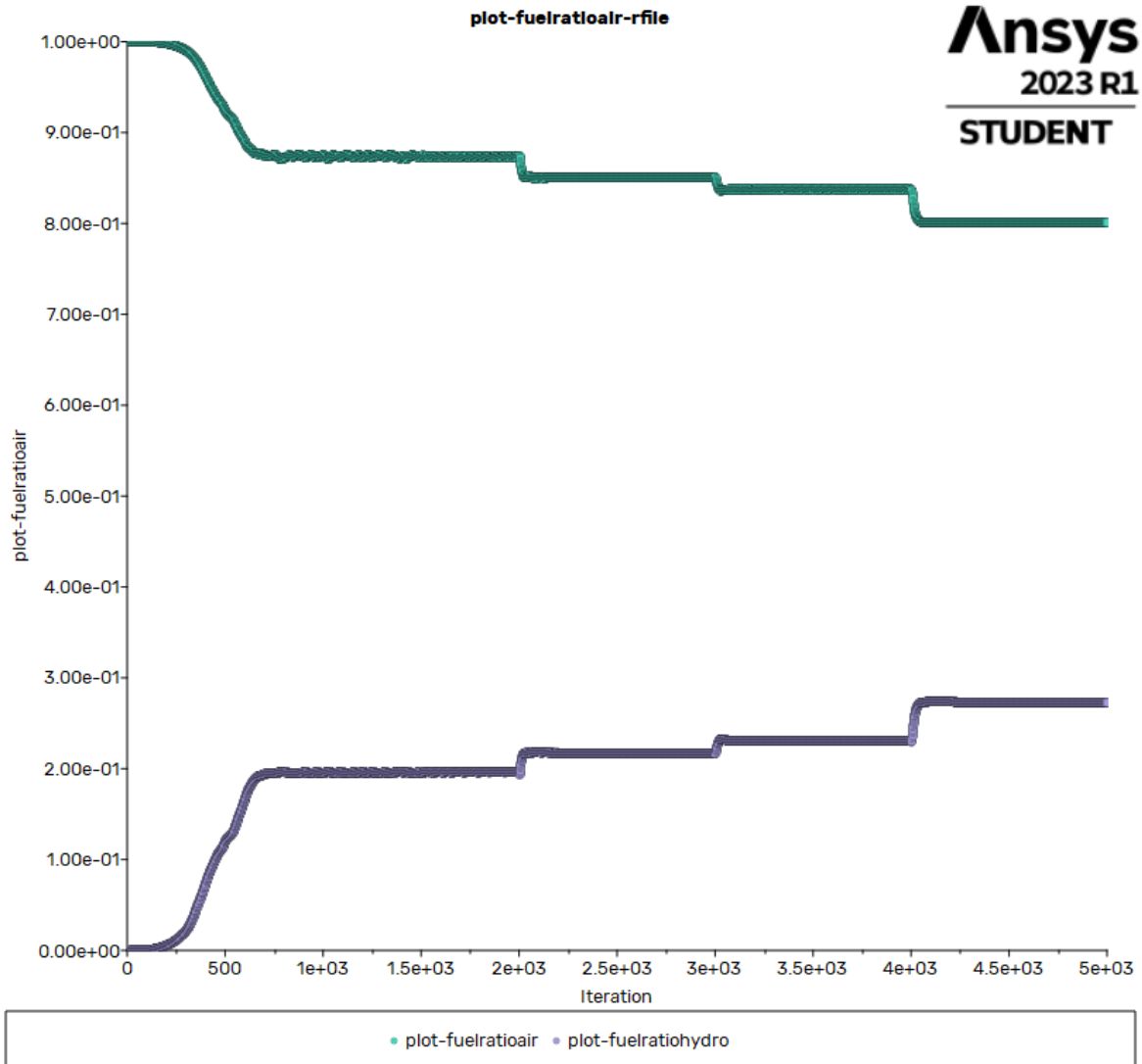
Anhang 6.a.3.1: Druckverlauf Simulation 800 K Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Violet = Wasserstoffeintrittsdruck, Türkis = Lufteintrittsdruck, Rot = Austrittsdruck, Blau = Differenzdruck Lufteintritt zu Austritt.

6.a.3.2 Massenstrom



Anhang 6.a.3.2: Massenstrom Simulation 800 K Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = Lufteintrittsmassenstrom, Violet = Wasserstoffeintrittsmassenstrom, Rot = Austrittsmassenstrom.

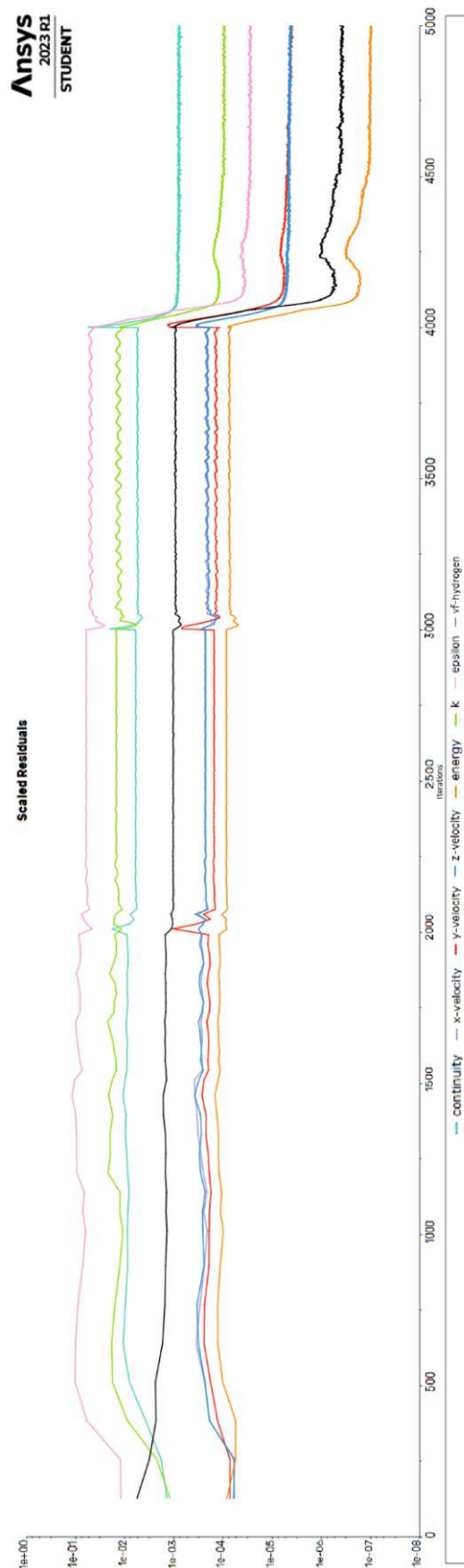
6.a.3.3 Volumenverhältnis



**Anhang 6.a.3.3: Volumenverhältnis Luft / Wasserstoff der Simulation 800 K
 Lufteintrittstemperatur, 7 bar Lufteintrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter
 Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = Luftmengenanteil, Violet =
 Wasserstoffmengenanteil.**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

6.a.3.4 Residuen



Anhang 6.a.3.4: Residuen der Simulation 800 K Luftertrittstemperatur, 7 bar Luftertrittsdruck, 9 bar Wasserstoffeintrittsdruck, eingestellter Brennkammerdruck 6,25-6,75 bar. Türkis = continuity, Violet = x-velocity, Rot = y-velocity, Blau = z-velocity, Orange= epsilon, Schwarz vf-hydrogen

7 Literaturverzeichnis

- [1] C. J. Marek, T. D. Smith, and K. Kundu, "Low Emission Hydrogen Combustors for Gas Turbines Using Lean Direct Injection," Cleveland, Ohio, Jul. 2005.
- [2] A. (Andreas) Grohmann, *Wasser: Chemie, Mikrobiologie und nachhaltige Nutzung*. De Gruyter, 2011.
- [3] S. Jeanvré and J. Woidasky, *Die Luftfahrtindustrie als anthropogenes Rohstofflager Fahrzeuge Die Luftfahrtindustrie als anthropogenes Rohstofflager*. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2017. [Online]. Available: <http://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/>
- [4] Theodore L., H. Brown, Eugene LeMay, and Bruce E. Bursten, *Chemie. Die zentrale Wissenschaft*. Pearson Studium, 2006.
- [5] M. E. Wieser and T. B. Coplen, "Atomic weights of the elements 2009 (IUPAC technical report)," in *Pure and Applied Chemistry*, Dec. 2011, pp. 359–396. doi: 10.1351/PAC-REP-10-09-14.
- [6] "Hydrogen - 1H: the essentials." <https://www.webelements.com/hydrogen/> (accessed Jul. 23, 2023).
- [7] "IFA Stoffdaten: Wasserstoff," Jan. 2023.
- [8] "BRENNWERT." <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/b/brennwert.html> (accessed Jul. 23, 2023).
- [9] Dr. Frank Mastiaux, "Grün, blau, türkis... das bedeuten die Wasserstoff-Farben," *EnBW*, 2021. <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html#:~:text=Als%20farbloses%20Gas%20hat%20Wasserstoff,so%20erzeugten%20Wassers toffs%20zu%20unterscheiden> (accessed Jun. 23, 2023).
- [10] Töpler Jochen and J. Lehmann Hrsg, "Wasserstoff und Brennstoffzelle," 2000.
- [11] E. Nurkanovic, "Costs of Hydrogen-Through History and Currently From Different Technologies and Energy Sources," Institute of Energy Systems and Electrical Drives Enver Nurkanovic, Vienna, 2020.
- [12] N. Hodnik, M. Bele, A. Rečnik, N. Z. Logar, M. Gaberšček, and S. Hočevar, "Enhanced oxygen reduction and methanol oxidation reaction activities of partially ordered PtCu nanoparticles," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2012, pp. 208–215. doi: 10.1016/j.egypro.2012.09.026.
- [13] R. E. Stoll and F. von Linde, "Hydrogen-What-are-the-costs," *HYDROCARBON PROCESSING*, 2023.
- [14] Klell Helmut, Eichseder Alexander, and Trattner Manfred, "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik," Graz, 2008. doi: 10.1007/978-3-658-20447-1.
- [15] S. I. Allakhverdiev *et al.*, "Photosynthetic hydrogen production," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 11, no. 2–3. pp. 101–113, Sep. 2010. doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2010.07.002.
- [16] Robert F., "Turning over a new leaf," *Science*, vol. 334, no. 6058. American Association for the Advancement of Science, pp. 925–927, Nov. 18, 2011. doi: 10.1126/science.334.6058.925.
- [17] V. A. Habib, "Hydrothermal Synthesis of Nanocrystalline Barium Titanate and the Production of thin Ceramic-Polymer." [Online]. Available: <http://www.ub.tuwien.ac.at>
- [18] C. N. Taylor, "Hydrogen and its detection in fusion and fission nuclear materials – a review," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 558, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jnucmat.2021.153396.
- [19] G. Mccracken and P. Stott, "The Energy of the Universe," Apr. 2012.

- [20] Marian Willuhn, "Airbus und CFM starten Testlauf für Wasserstoff-Triebwerk," *pv magazine*, Feb. 28, 2022. <https://www.pv-magazine.de/2022/02/28/airbus-und-cfm-starten-testlauf-fuer-wasserstoff-triebwerk/> (accessed Jun. 23, 2023).
- [21] M. Oehmichen, "Wasserstoff als Motortreibmittel," *Deutsche Kraftfahrzeugforschung, Heft 68*, 1942. doi: 10.1007/978-3-8348-9503-5_7.
- [22] R. A. Erren, "Der Erren-Wasserstoffmotor," *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 41*, pp. 523–524, 1939. doi: 10.1007/978-3-8348-9503-5_7.
- [23] "Brennstoffzellen-Fahrzeug." <https://www.oeamtc.at/thema/tests/test-hyundai-ix35-fcev-40132118> (accessed Jul. 24, 2023).
- [24] Colin Cutler, "How The 4 Types Of Turbine Engines Work," Oct. 24, 2017. <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/the-4-types-of-turbine-engines/> (accessed May 19, 2023).
- [25] "Pilatus Aircraft." <https://www.pilatus-aircraft.com/en> (accessed May 20, 2023).
- [26] "Vision Jet." <https://cirusaircraft.com/aircraft/vision-jet/> (accessed May 20, 2023).
- [27] "Skybary: PILATUS PC-21." <https://www.skybary.aero/aircraft/pc21> (accessed May 20, 2023).
- [28] Robert Erdos, "Skiesmag: Pilatus PC-21: This simulator burns jet fuel," Jan. 06, 2020. <https://skiesmag.com/features/pilatus-pc-21-this-simulator-burns-jet-fuel/> (accessed May 20, 2023).
- [29] "WeaponSystems: Pilatus PC-21." <https://weaponsystems.net/system/1209-Pilatus%20PC-21> (accessed May 20, 2023).
- [30] A.B. Newland, "US3152443," *Gaas Turbine Powerplant*, vol. 5, no. 1, Jul. 1964.
- [31] Hans H. Schaum, "US4222703," Sep. 16, 1980
- [32] Pratt Whitney, "An Engine Ahead of Its Time," Jul. 12, 2013. <https://www.prattwhitney.com/ar/blogs/pt6-nation/2013/04/12/history-an-engine-ahead-of-its-time> (accessed May 20, 2023).
- [33] Thomas A., "MILESTONES: THE PT6 AT 50 A HALF-CENTURY OF TURBOPROP POWER," *AOPA PILOT*, Dec. 05, 2013. <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2013/december/pilot/milestones-the-pt6-at-50> (accessed May 20, 2023).
- [34] Aviationweek, "Gas Turbine Engines OVERALL PRESSURE RATIO AT MAX. POWER MAX. ENVELOPE," Jan. 2008. [Online]. Available: www.aviationweek.com/awst
- [35] Air Graphics, "AC-156 Pilatus PC-21 External Fuel Tanks and Pylons." <https://air-graphics.uk/shop/ols/products/ac-156-pilatus-pc-21-external-fuel-tanks-and-pylons> (accessed May 20, 2023).
- [36] "Information form Pilatus Aircraft."
- [37] P. Chiesa, G. Lozza, and L. Mazzocchi, "Using hydrogen as gas turbine fuel," *J Eng Gas Turbine Power*, vol. 127, no. 1, pp. 73–80, Jan. 2005, doi: 10.1115/1.1787513.
- [38] I. L. Drell and F. E. Belles, "SURVEY OF HYDROGEN COMBUSTION PROPERTIES," 1915.
- [39] D. M. , Todd and R. A. Battista, "Demonstrated Applicability of Hydrogen Fuel for Gas Turbines," *Proc. of the IchemE Gasification 4 Conference, Noordwijk, The Netherlands.*, 2000.
- [40] B. Major, "Cost Analysis of NO x Control Alternatives for Stationary Gas Turbines Contract," Nov. 1999.

- [41] E. Stefan, B. Talic, Y. Larring, A. Gruber, and T. A. Peters, "Materials challenges in hydrogen-fuelled gas turbines," *International Materials Reviews*, vol. 67, no. 5. Taylor and Francis Ltd., pp. 461–486, 2022. doi: 10.1080/09506608.2021.1981706.
- [42] N. Rao Muktinutalapati, *Materials for Gas Turbines-An Overview*. 2011. [Online]. Available: www.intechopen.com
- [43] K. Singh, "Advanced Materials for Land Based Gas Turbines," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 67, no. 5. Springer India, pp. 601–615, Oct. 01, 2014. doi: 10.1007/s12666-014-0398-3.
- [44] I. G. Wright and T. B. Gibbons, "Recent developments in gas turbine materials and technology and their implications for syngas firing," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 16, pp. 3610–3621, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.08.049.
- [45] Schilke P, "Advanced gas turbine materials and coatings," *GE Reference Library*, vol. GER-3569G, pp. 1–25, 2004, doi: GER-3569G.
- [46] A. A. Pauzi, M. J. Ghazali, W. F. H. W. Zamri, and A. Rajabi, "Wear characteristics of superalloy and hardface coatings in gas turbine applications—a review," *Metals*, vol. 10, no. 9. MDPI AG, pp. 1–14, Sep. 01, 2020. doi: 10.3390/met10091171.
- [47] M. Michalik, S. L. Tobing, M. Hänsel, V. Shemet, W. J. Quadackers, and D. J. Young, "Effects of water vapour on the high temperature nitridation of chromium," *Materials and Corrosion*, vol. 65, no. 3, 2013, doi: 10.1002/maco.201307160.
- [48] A. S. Dorcheh and M. C. Galetz, "Challenges in Developing Oxidation-Resistant Chromium-Based Alloys for Applications Above 900°C," *JOM*, vol. 68, no. 11. Minerals, Metals and Materials Society, pp. 2793–2802, Nov. 01, 2016. doi: 10.1007/s11837-016-2079-7.
- [49] G. Pimentel *et al.*, "Advanced FeCrAl ODS steels for high-temperature structural applications in energy generation systems," *Revista de Metalurgia*, vol. 48, no. 4, pp. 303–316, 2012, doi: 10.3989/revmetalm.1165.
- [50] D. Furrer and H. Fecht, "Ni-Based Superalloys for Turbine Discs," 1999.
- [51] S. M. H. Hojjatzadeh *et al.*, "Pore elimination mechanisms during 3D printing of metals," *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-10973-9.
- [52] E. Chauvet *et al.*, "Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting," *Acta Mater*, vol. 142, pp. 82–94, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.actamat.2017.09.047.
- [53] C. Panwisawas, Y. T. Tang, and R. C. Reed, "Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1. Nature Research, Dec. 01, 2020. doi: 10.1038/s41467-020-16188-7.
- [54] H. C. Basoalto *et al.*, "A computational study on the three-dimensional printability of precipitate-strengthened nickel-based superalloys," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 474, no. 2220, Dec. 2018, doi: 10.1098/rspa.2018.0295.
- [55] B. Khandelwal, A. Karakurt, P. R. Sekaran, V. Sethi, and R. Singh, "Hydrogen powered aircraft: The future of air transport," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 60. Elsevier Ltd, pp. 45–59, 2013. doi: 10.1016/j.paerosci.2012.12.002.
- [56] M. C. Massaro, R. Biga, A. Kolisnichenko, P. Marocco, A. H. A. Monteverde, and M. Santarelli, "Potential and technical challenges of on-board hydrogen storage technologies coupled with fuel cell systems for aircraft electrification," *Journal of Power Sources*, vol. 555. Elsevier B.V., Jan. 30, 2023. doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.232397.

- [57] H. Xing, C. Stuart, S. Spence, and H. Chen, "Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–34, Feb. 2021, doi: 10.3390/su13031213.
- [58] T. H. Bradley, B. A. Moffitt, D. N. Mavris, and D. E. Parekh, "Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft," *J Power Sources*, vol. 171, no. 2, pp. 793–801, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.06.215.
- [59] Thomas H. Brandley, Blake A. Moffin, David E. Pareskh, Thomas F. Fuller, and Dimitri N. Marvis, "Energy Managment for Fuel Cell Powered Hybrid-Electric Aircraft," *international Energy Conversion Engineering Conference*, Aug. 2009, doi: 10.2514/6.2009-4590.
- [60] J. W. Pratt, L. E. Klebanoff, K. Munoz-Ramos, A. A. Akhil, D. B. Curgus, and B. L. Schenkman, "Proton exchange membrane fuel cells for electrical power generation on-board commercial airplanes," *Appl Energy*, vol. 101, pp. 776–796, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.08.003.
- [61] D. Verstraete, K. Lehmkuehler, A. Gong, J. R. Harvey, G. Brian, and J. L. Palmer, "Characterisation of a hybrid, fuel-cell-based propulsion system for small unmanned aircraft," *J Power Sources*, vol. 250, pp. 204–211, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.11.017.
- [62] P. Prochazka, I. Pazdera, and K. Bencalik, "Usage of the Fuel Cell-Powered Electric Drive in Aviation," *ECS Trans*, vol. 48, no. 1, pp. 207–215, Jan. 2014, doi: 10.1149/04801.0207ecst.
- [63] G. Correa, M. Santarelli, F. Borello, E. Cestino, and G. Romeo, "Flight test validation of the dynamic model of a fuel cell system for ultra-light aircraft," *Proc Inst Mech Eng G J Aersp Eng*, vol. 229, pp. 917–932, Mar. 2015, doi: 10.1177/0954410014541081.
- [64] D. Guida and M. Minutillo, "Design methodology for a PEM fuel cell power system in a more electrical aircraft," *Appl Energy*, vol. 192, pp. 446–456, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.090.
- [65] T. Kadyk, C. Winnefeld, R. Hanke-Rauschenbach, and U. Krewer, "Analysis and Design of Fuel Cell Systems for Aviation," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11020375.
- [66] C. Winnefeld, T. Kadyk, B. Bensmann, U. Krewer, and R. Hanke-Rauschenbach, "Modelling and designing cryogenic hydrogen tanks for future aircraft applications," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.3390/en11010105.
- [67] Wanyi Ng and Anubhav Datta, "Hydrogen fuel cells and batteries for electric-vertical takeoff and landing aircraft," *J Aircr*, vol. 56, no. 5, pp. 1765–1782, Sep. 2019, doi: 10.2514/1.C035218.
- [68] J. Pirkandi, M. Mahmoodi, and M. Ommian, "An optimal configuration for a solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid system based on thermo-economic modelling," *J Clean Prod*, vol. 144, pp. 375–386, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.019.
- [69] S. Nicolay, S. Karpuk, Y. Liu, and A. Elham, "Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 64, pp. 32676–32694, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.127.
- [70] M. Schröder, F. Becker, J. Kallo, and C. Gentner, "Optimal operating conditions of PEM fuel cells in commercial aircraft," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 66, pp. 33218–33240, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.099.
- [71] A. F. B. Abu Kasim, M. S. C. Chan, and E. J. Marek, "Performance and failure analysis of a retrofitted Cessna aircraft with a Fuel Cell Power System fuelled with liquid hydrogen," *J Power Sources*, vol. 521, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.230987.
- [72] C. Hoppe, "LH2-TANK PERFORMANCE ANALYSIS Master Thesis," 2013.

- [73] R. R. Ratnakar, Z. Sun, and V. Balakotaiah, "Effective thermal conductivity of insulation materials for cryogenic LH2 storage tanks: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 21. Elsevier Ltd, pp. 7770–7793, Mar. 08, 2023. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.130.
- [74] "SFC Brennwert und Heizwert von Wasserstoff." <https://www.sfc.com/glossar/heizwert-von-wasserstoff/#:~:text=Im%20Vergleich%20mit%20anderen%20Brennstoffen,von%20Wasserstoff%20Oliegt%20bei%20120> (accessed May 23, 2023).
- [75] "Exxonmobil Technical Data Sheets." <https://www.exxonmobilchemical.com/en/resources/product-data-sheets> (accessed May 23, 2023).
- [76] "Chevron Aviation Fuels," 2007. <http://www.chevron.com/productsservices/aviation/>
- [77] Salvatore J. Rand (ed), "Significance of Tests for Petroleum Products," *ASTM International*, vol. 8, 2010.
- [78] IATA, "Liquid hydrogen as a potential low-carbon fuel for aviation," 2019.
- [79] Roberto ANDRIANI, Fausto GAMMA, and Umberto GHEZZI, "Thermodynamic analysis of a turboprop engine with regeneration and intercooling," *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci*, vol. 54, no. 183, pp. 44–50, Jan. 2011.
- [80] "Was sind Stickoxide und wie schädlich sind sie?" <https://vcoe.at/service/fragen-und-antworten/was-sind-stickoxide-und-wie-schaedlich-sind-sie> (accessed Jul. 16, 2023).
- [81] Dr. Dr. h.c. Jürgen Warnatz, "Das komplexe Problem der Verbrennung." https://www.uni-heidelberg.de/uni/presse/RuCa1_99/warnatz.htm (accessed Jul. 16, 2023).
- [82] Dr.-Ing. Nurettin Tekin, "Innovative Wasserstoff-Verbrennungssysteme für Industriegasturbinen - MMX-Combustion." <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/wasserstoff-als-alternativer-brennstoff> (accessed May 23, 2023).
- [83] "<https://www.oiltanking.com/de/news-info/glossar/kerosin-englisch-jet-fuel.html#:~:text=Damit%20hat%20der%20farblose%20bis,43%2C1%20MJ%2Fkg.>" <https://www.oiltanking.com/de/news-info/glossar/kerosin-englisch-jet-fuel.html#:~:text=Damit%20hat%20der%20farblose%20bis,43%2C1%20MJ%2Fkg.> (accessed Jul. 31, 2023).
- [84] "Brennwert Kerosin." https://www.rhetos.de/html/lex/brennwert_kerosin.htm (accessed Jul. 31, 2023).
- [85] "Dichte von Gas Taschenrechner." <https://www.calculatoratoz.com/de/density-of-gas-calculator/Calc-4232> (accessed Jul. 31, 2023).
- [86] Umwelt Bundesamt Österreich, "Erneuerbare Energie." <https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie> (accessed Jul. 12, 2023).
- [87] P. Sadooghi, "Hydrogen Production by Steam Reforming of Hydrocarbons from Biomass Gasification Modeling and Experimental Study." [Online]. Available: <http://www.ub.tuwien.ac.athttp://www.ub.tuwien.ac.at/eng>
- [88] U. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer and S. Graf, "Synergetische Nutzung von fluktuierender Windenergie und gespeicherter Energie in Form von Biomasse ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von." [Online]. Available: <http://www.ub.tuwien.ac.athttp://www.ub.tuwien.ac.at/eng>
- [89] B. Schreiner, "Reich an Jahren und bedeutender denn je: Der Claus-Prozess," *Chemie in Unserer Zeit*, vol. 42, no. 6. pp. 378–392, Dec. 2008. doi: 10.1002/ciuz.200800461.

- [90] "Gaswäsche." <https://www.biogas-netzeinspeisung.at/technische-planung/aufbereitung/methananreicherung/monoethanolaminwaesche.html#:~:text=Das%20Verfahren%20ist%20mit%20dem,werden%20Druck%20und%20Temperatur%20erh%C3%B6ht> (accessed Jul. 12, 2023).
- [91] Alfred. Ecker and Brigitte. Winter, *Stand der Technik bei Raffinerien im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie*. Umweltbundesamt, 2000.
- [92] Dr. No, "Deprotonierung." <https://flexikon.doccheck.com/de/Deprotonierung> (accessed Jul. 12, 2023).
- [93] "Erklärung der unterschiedlichen Normverbrauchs-Messungen." <https://www.oeamt.at/thema/steuern-abgaben/erklaerung-der-unterschiedlichen-normverbrauchs-messungen-23987937> (accessed Jul. 12, 2023).
- [94] "Leuchttürme stehen nur an der Küste. Leuchtturmprojekte hingegen können überall sein.", Accessed: Jul. 12, 2023. [Online]. Available: <https://learngerman.dw.com/de/das-leuchtturmprojekt/a-45076913>
- [95] "Sebastian Kanzer (Autor) Strömungs-und Verbrennungsdynamik eines drallstabilisierten Gasturbinenbrenners." [Online]. Available: <https://cuvillier.de/de/shop/publications/941>