



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Felix Lange

Detailplanung und Realisierung eines
modularen PEM-Brennstoffzellen-
Versuchsstands

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Felix Lange

**Detailplanung und Realisierung eines
modularen PEM-Brennstoffzellen-
Versuchsstands**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau – Energie und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Professor Dr.-Ing. Achim Schmidt
Zweitprüfer/in : Dipl.-Ing. Alexander v. Stryk

Abgabedatum: 31.03.2016

Zusammenfassung

Felix Lange

Thema der Bachelorthesis

Detailplanung und Realisierung eines modularen PEM-Brennstoffzellen-Versuchsstands

Stichworte

Wasserstoff, PEM-Brennstoffzelle, CAD-Konstruktion, Wasserstoffgenerator, Kühlung, Sicherheitsvorkehrungen.

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Planung und Konstruktion eines mobilen Versuchstisches für einen Brennstoffzellen-Versuchsstand, inklusive Modellierung mittels CAD. Des Weiteren wird untersucht, wie die Wasserstoffversorgung und die Kühlung der Brennstoffzelle umgesetzt werden können. Dafür wird der abzuführende Wärmestrom berechnet. Ein weiterer Aufgabenteil behandelt die Sicherheit des Arbeitsplatzes. Dabei wird unter Beachtung von Gesetzen, Verordnungen und Regeln für Gefahrstoffe untersucht, welche Maßnahmen für die Sicherheit erforderlich sind. Das Ziel dabei ist, die Risiken für Gefährdungen zu minimieren.

Felix Lange

Title of the paper

Detailed planning and realisation of a modular PEM fuel cell test station

Keywords

Hydrogen, PEM fuel cell, hydrogen generator, CAD construction, cooling, safety precautions.

Abstract

Inside this report the development and construction of a mobile laboratory bench, in order to carry a fuel cell, will be done. It includes a construction with computer-aided design. How to implement a cooling system and hydrogen supply for the fuel cell is being researched. For this reason the heat flow for discharge is being calculated. Furthermore the safety of the workplace in considering of laws, regulations and rules is part of this report. Arrangements, in order to lower risks of hazard, are getting produced.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Inhalt und Zielstellung der Arbeit.....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Wasserstoff.....	3
2.2 PEM-Brennstoffzelle.....	4
2.2.2 Aufbau der PEM-Brennstoffzelle.....	5
2.2.2 Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle	6
2.3 Wasserstoffgenerator.....	7
3 Planungen zum Versuchsstand	10
3.1 Beschreibung und Anforderungen des Versuchsstands	10
3.2 Konstruktion des Versuchstisches.....	10
3.2.1 Anforderungen an den Versuchstisch.....	10
3.2.2 Planung, Anfrage und Bestellung.....	11
3.2.3 Montage des Versuchstisches.....	13
3.2.4 CAD-Konstruktion.....	16
3.3 Wasserstoffversorgung.....	18
3.3.1 Anforderungen an die Wasserstoffversorgung.....	19
3.3.2 Druckflasche	20

3.3.3 Wasserstoffgenerator/ Elektrolyseur.....	20
3.3.4 Leitungen für Wasserstoff.....	21
3.3.5 Fazit	23
4 Kühlung der Brennstoffzelle	24
4.1 Allgemeines und Anforderungen an die Kühlung.....	24
4.2 Abzuführende Wärmemenge.....	24
4.2.1 Junkers Kalorimeter	26
4.2.2 Maximaler Wärmestrom.....	26
4.3 Wärmeübertragung.....	27
4.3.1 Konvektiver Wärmeübergang	28
4.3.2 Wärmestrom	28
4.4 Luftkühlung und Wasserkühlung im Vergleich.....	29
4.4.1 Vergleichsrechnungen.....	29
4.4.2 Luftkühlung	30
4.4.3 Wasserkühlung.....	31
4.5 Fazit	31
5 Sicherheit im Labor	32
5.1 Einleitung.....	32
5.2 Gesetze, Verordnungen und Regeln	33
5.2.1 Arbeitsschutzgesetz	33
5.2.2 Betriebssicherheitsverordnung.....	34
5.2.3 Gefahrstoffverordnung	35
5.2.4 Technisches Regelwerk zur Gefahrstoffverordnung.....	35
5.2.5 Zusammenfassung der Gesetze und daraus abgeleitete Vorgehensweisen	38
5.3 Gefährdungsbeurteilung.....	39

5.3.1 Gefährdung durch Gefahrstoffe.....	40
5.3.2 Gefährdung durch Brände.....	40
5.3.3 Gefährdung durch Explosion.....	41
5.3.4 Zusammenfassung der Beurteilung	41
5.3.5 Zu ergreifende Schutzmaßnahmen.....	42
5.4 Sicherheitstechnische Anlagen und Ausrüstungen.....	42
5.4.1 Raumluftechnische Anlage oder Abzugshaube	43
5.4.2 Konstruktive Maßnahmen	43
5.4.3 Gassensoren	43
5.4.4 Gaslecksuchgeräte	44
5.4.5 Lecksuchspray	44
5.4.6 Schutzkleidung	44
5.4.7 Löschmittel	44
5.5 Sicherheitsinformationen für Anwender	45
5.5.1 Hinweistafel.....	45
5.5.2 Sicherheitsbelehrung	45
5.6 Sicherheitsprüfungen	46
5.6.1 Vorbereitungen	46
5.6.2 Durchführung	47
5.6.3 Dokumentation	48
5.7 Fazit	48
Quellenverzeichnis	49
Anhangverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle.....	5
Abbildung 2: Schematischer Aufbau der PEM-Brennstoffzelle.....	6
Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise eines PEM-Elektrolyseur	9
Abbildung 4: erster Entwurf des Versuchstisches.....	11
Abbildung 5: Strukturbaum der CAD-Konstruktion	16
Abbildung 6: CAD-Zusammenbau	18
Abbildung 7: Arbeitsdruck in Abhängigkeit vom Innendurchmesser	22
Abbildung 8: Energieflussdiagramm	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von Wasserstoff	3
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Elektrolysetechniken	9
Tabelle 3 Stückliste des Grundgestells	15
Tabelle 4: Flächenelemente	17
Tabelle 5: Elektrolyseure	20
Tabelle 6: Abminderungsfaktor F	23
Tabelle 7: Stoffeigenschaften von Luft und Wasser	29
Tabelle 8: Übersicht der TRGS	36

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen, Indizes

A	Fläche	m^2
c_p	Wärmekapazität	kJ/KgK
e^-	Elektron	
h	spezifische Enthalpie	J/Kg
H^+	Wasserstoffion, Proton	
H	atomarer Wasserstoff	
H_2	molekularer Wasserstoff	
H_2O	Wasser	
H_o	Brennwert	J/mol
H_u	Heizwert	J/mol
\dot{H}	Enthalpiestrom	W
\dot{m}	Massenstrom	mg/s
O	atomarer Sauerstoff	
O_2	molekularer Sauerstoff	
P	Leistung	W
P_{el}	elektrische Leistung	W
\dot{Q}	Wärmestrom	W
r	Verdampfungsenthalpie	J/Kg
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/h
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W/m}^2\text{K}$
ϑ	Temperatur	$^\circ\text{C}$
λ	Stöchiometrie	-

Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EME	Elektrode-Membran-Einheit
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
PEM	Proton Exchange Membrane
ppm	parts per million
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

1 Einleitung

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) der Bundesrepublik Deutschland fördert die Entwicklung von Technologien für eine umweltfreundliche Energieversorgung. Mit den hohen Zielen, die dieses Gesetz ausgibt, wie etwa ein Anteil von 80% an erneuerbaren Energien an der Energieversorgung bis 2050¹, ergeben sich neue Herausforderungen. Eine besondere Herausforderung kommt dabei der Speicherung und der Wiederbereitstellung von Energien aus Wind, Sonne und Wasser zu, besonders für mobile Anwendungen, wie in Kraftfahrzeugen. Eine Technologie, die in diese Schnittstelle eingesetzt werden kann und bereits eingesetzt wird, ist die Brennstoffzelle. Der bekannteste und wohl mit den besten Zukunftsaussichten behaftete Brennstoffzellentyp ist die PEM-Brennstoffzelle. Diese wandelt im Wasserstoff gespeicherte chemische Energie zusammen mit Sauerstoff in elektrische Energie und Wasser um. Wasserstoff wiederum kann durch die Elektrolyse, also mit dem Einsatz von elektrischem Strom, aus Wasser gewonnen werden. Auf diese Weise kann elektrischer Strom aus erneuerbaren Quellen als chemische Energie im Wasserstoff gespeichert und mit der Brennstoffzelle bei Bedarf wieder rückverstromt werden. Der komplette Prozess ist völlig emissionsfrei durchführbar und mit Brennstoffzellen für den mobilen wie stationären Verbrauch geeignet. Daher wird die Brennstoffzellentechnologie in Zukunft einen immer größeren Platz einnehmen und dazu beitragen, die Ziele der Energiewende zu erreichen.

Um an dieser vielversprechenden Technologie teilzuhaben und diese besser vermitteln zu können, soll an der HAW-Hamburg im Department Maschinenbau und Produktion ein Brennstoffzellen-Labor aufgebaut und betrieben werden. Das Ziel dabei ist, einen mobilen Versuchsstand zu errichten, sodass die Brennstoffzelle an verschiedenen Orten betrieben werden kann. Im Rahmen von Laborversuchen sollen Studenten praktische Erfahrungen mit dieser Technologie erlangen.

¹ Vgl. Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz: Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014, 2014, S.5, in: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf (05.Feb.2016).

1.1 Inhalt und Zielstellung der Arbeit

Diese Bachelorthesis mit dem Thema „Detailplanung und Realisierung eines PEM Brennstoffzellen-Versuchsstand“ ist an bereits durchgeführten Planungen gekoppelt und erweitert diese mit verschiedenen Konzepten. In einer vorherigen Arbeit wurden Anforderungen an die Brennstoffzelle erarbeitet und damit ein Anlagenschema sowie die technische Auslegung entworfen. Auf dieser Grundlage wurden in dieser Arbeit die Planungen zum Versuchsstand fortgeführt.

Diese Arbeit beinhaltet einen praktisch ausgelegten Teil, bei dem es das Ziel ist, einen mobilen Versuchstisch zu konstruieren. Es werden die durchgeführten Tätigkeiten von der Planungsphase bis zur Montage beschrieben und eine entsprechende CAD-Konstruktion wird erstellt. Für die Kühlung der Brennstoffzelle wird der maximal abzuführende Wärmestrom berechnet. Weitergehend wird untersucht, welche Arten von Kühlungen in Betracht gezogen werden können. Des Weiteren soll eine wasserstoffseitige Betrachtung der Brennstoffzelle, insbesondere was die Sicherheit anbelangt, im Vordergrund stehen. Die Möglichkeit der Wasserstoffversorgung mittels eines Wasserstoffgenerators wird geprüft, da die Verwendung von Druckflaschen ein sehr hohes Risiko birgt. Die auf Wasserstoffbezogenen Gefährdungen werden analysiert und daraus Sicherheitsmaßnahmen abgeleitet. Dafür werden entsprechende Gesetze, Verordnungen und Regeln für Gefahrenstoffe herangezogen. Das Ziel dabei ist es, die Risiken für Gefährdungen durch Wasserstoff zu minimieren.

2 Grundlagen

2.1 Wasserstoff

Wasserstoff (H) ist das am häufigsten vorkommende Element der Welt und kommt hauptsächlich in gebundener Form vor, größtenteils im Wasser. Im Periodensystem der Elemente steht es an erster Stelle und ist damit das Element mit der geringsten Atommasse. Liegt es in atomarer Form (H) vor, reagiert es besonders stark mit anderen Elementen. Unter Normbedingungen kommt Wasserstoff in der molekularen Form (H₂) vor.

Eigenschaften von Wasserstoff

Farb-, geruch- und geschmackloses Gas	
Häufigstes Element im Universum	90 % aller Atome sind Wasserstoff, er macht 3/4 der Gesamtmasse aus.
Dichte (gasförmig bei 0°C und 1 bar):	0,0899 Kgm ⁻³
Sein Verbrennungsprodukt, Wasser, enthält 11,2 Gewichtsprozent Wasserstoff.	
Der (untere) Heizwert des Gases, d.h. sein Energiegehalt, beträgt 10,8 MJ/Nm ³ , das sind 3,0 kW/m ³ (bei 0°C und 1 bar)	
Gasgemische von 4 % bis 75 % Wasserstoff in der Luft sind brennbar.	
In einer Atmosphäre aus 100 % Wasserstoff erstickt die Flamme.	
Flammentemperatur:	2318 °C bei 29 % Wasserstoff in der Luft > 3000 °C bei reinem Sauerstoff
Diffusionskoeffizient:	0,61 cm ² /s

Tabelle 1: Eigenschaften von Wasserstoff²

² Vgl. Lehmann, Jochen; Lauschtinetz, Thomas: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014, S.77

Um Wasserstoff als Energieträger nutzen zu können, muss dieser unter Energieaufwand aus dem Wasser herausgelöst werden. Beim Verbrennen von Wasserstoff wird diese Energie wieder freigegeben, weshalb Wasserstoff ein Energieträger ist und als Kraftstoff genutzt werden kann. Das Wissen um Wasserstoff als Energieträger ist bereits seit dem 18. Jahrhundert bekannt. Jules Verne schrieb 1874 über den Wasserstoff:

„Ja, meine Freunde, ich glaube, dass Wasser eines Tages als Brennstoff genutzt werden wird, dass seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff, gemeinsam oder separat eingesetzt, eine unerschöpfliche Quelle von Wärme und Licht sein werden – mit einer Intensität, wie sie Kohle nicht erreicht...Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. (Jules Verne, L'Île mystérieuse, 1874)“³

2.2 PEM-Brennstoffzelle

Die PEM-Brennstoffzelle (engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ist wie alle Brennstoffzellentypen eine galvanische Zelle und kann chemisch gebundene Energie aus Brennstoffen in elektrische Energie umwandeln. Sie ist eine Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle mit Betriebstemperaturen in Bereichen zwischen 60 und 120 °C. Bei kontinuierlicher Zuführung von Wasserstoff als Brennstoff und Sauerstoff als Oxidationsmittel, werden durch eine elektrochemische Reaktion Wasser und ein konstanter elektrischer Strom erzeugt. Die Edukte sind durch einen ionenleitenden Elektrolyten räumlich voneinander getrennt und können deshalb nicht exotherm verbrennen. Daher wird dieser elektrochemische Prozess als „kalte Verbrennung“ bezeichnet, es entsteht wesentlich weniger Wärmeenergie als bei einer herkömmlichen Verbrennung. Als Abgase fallen nicht an der Reaktion teilgenommene Restgase an.

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Brennstoffzelle sowie die inneren Abläufe.

³ vgl. Lehmann, Jochen; et al.: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff, S.1

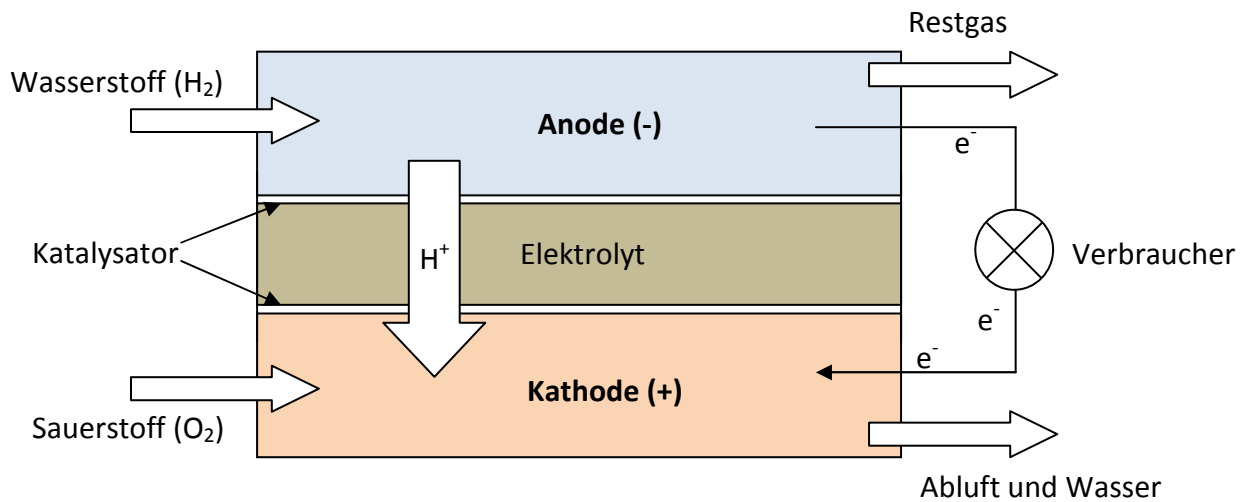


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle

2.2.2 Aufbau der PEM-Brennstoffzelle

Wie in Abbildung 1 dargestellt, besteht eine einzelne Brennstoffzelle im Wesentlichen aus einer Anode und einer Kathode, getrennt durch einen Elektrolyten. Als Elektrolyt wird meistens eine feste Polymermembran verwendet, welche sich als dünne Folie zwischen den Elektroden befindet. An den Elektroden sind Katalysatoren aus Edelmetallen aufgebracht, wodurch der Reaktionsprozess verbessert wird. Die Membran wird zusammen mit den Elektroden auch als Elektrode-Membran-Einheit (EME) bezeichnet. Um die Leistung der Brennstoffzelle zu erhöhen, werden mehrere dieser Zellen zu einem Stapel zusammengeschaltet. Damit sich ein solcher Stapel realisieren lässt, werden die Zellen durch zusammengeschaltete Bipolarplatten verknüpft. Diese Platten trennen die unterschiedlich geladenen Gasströme und leiten die entstehenden Elektronen zum Verbraucher. Außerdem führen sie die Gasströme an der EME entlang. Eine gasdurchlässige und leitende Gasdiffusionslage zwischen EME und Bipolarplatte verteilt die Reaktionsgase auf die Elektrodenflächen.⁴

⁴ vgl. Kabza, Alexander: Funktion und Aufbau einer PEMFC, <http://www.pemfc.de/pemfc.html>, (20.Jan.2016).

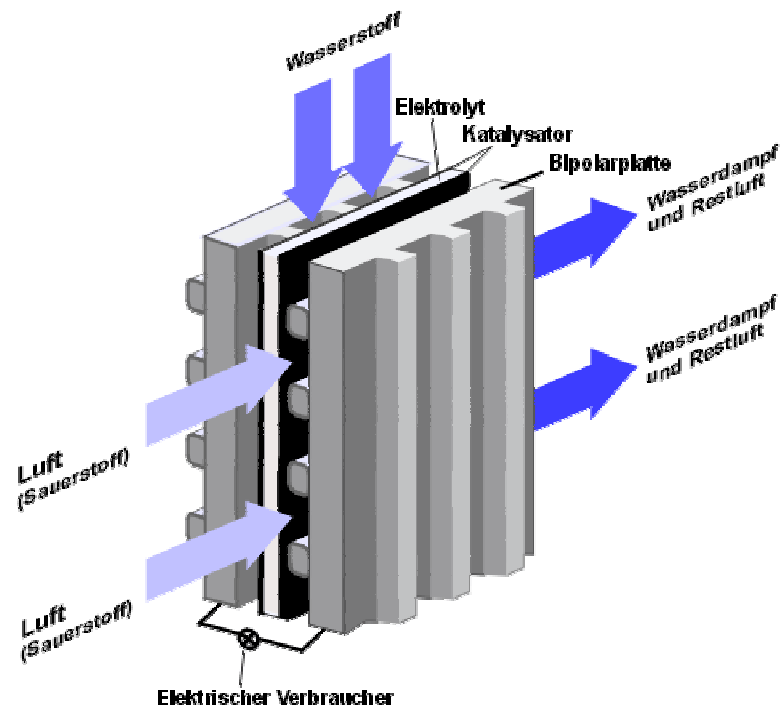


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der PEM-Brennstoffzelle⁵

2.2.2 Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle

Der Wasserstoff an der Anode wird oxidiert, gibt also Elektronen ab, die über einen Leiter zum Verbraucher und weiter zur positiven Kathode gelangen. Auf diese Weise teilt sich ein Wasserstoffmolekül in zwei Elektronen (H^+) sowie 2 Wasserstoffionen (e^-). Gleichung 1 beschreibt diese Anodenreaktion.



Die Wasserstoffionen gelangen durch den Elektrolyten zur Kathode und reagieren mit Sauerstoff und den Elektronen zu Wasser, wie in Gleichung 2 gezeigt (Kathodenreaktion):



⁵http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/13/pc/echemie/galvanische_elemente/images/aufbau.gif, (18.Feb..2016).

Mit Hilfe spezieller Katalysatoren werden diese beiden Reaktionen begünstigt, indem die Reaktionsenergie gesenkt wird. Die Gesamtreaktion der Brennstoffzelle setzt sich aus der Anodenreaktion und der Kathodenreaktion zusammen und ergibt sich zu:



Dadurch dass die Elektronen über eine externe Leitung geführt werden, wird elektrische Energie freigegeben. Die meisten dieser Brennstoffzellen wandeln etwa die Hälfte der im Wasserstoff gebundenen chemischen Energie in elektrische Energie um, die andere Hälfte in Wärme⁶. Die chemisch gebundene Energie wird also auf diese Weise bei einem Wirkungsgrad von etwa 50 % in elektrische Energie umgewandelt und nutzbar gemacht.⁷

2.3 Wasserstoffgenerator

Wasserstoffgeneratoren sind Geräte, die molekularen Wasserstoff (H_2) durch Elektrolyse produzieren. Somit sind es Elektrolyseure, die durch den Einsatz von elektrischem Strom eine chemische Reaktion hervorrufen, in diesem Fall wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Die Gesamtreaktion ist dabei umgekehrt zu der in Brennstoffzellen:



Wie bei den Brennstoffzellen gibt es bei den Elektrolyseuren unterschiedliche Arten. Sie werden nach dem verwendeten Elektrolyten in drei relevante Verfahren der Wasserelektrolyse unterschieden:

- alkalische Elektrolyse (flüssiger, basischer Elektrolyt)
- PEM-Elektrolyse (protonenleitender, polymerer Festelektrolyt)
- Hochtemperatur-Elektrolyse (Festoxid als Elektrolyt)

⁶ Vgl. Lehmann, Jochen: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff, S.28

⁷ Vgl. Kabza, Alexander, Funktion und Aufbau einer PEMFC, 2002

Die alkalische Elektrolyse ist ein etabliertes Verfahren und wird schon seit mehreren Jahrzehnten industriell eingesetzt. Elektrolyseure sind in vielen unterschiedlichen Größen und Bauformen verfügbar. Sie haben in der Regel einen Elektrolyten aus einer wässrigen KOH-Lauge mit Konzentrationen von 20-40 %. Ihre Betriebstemperaturen liegen um die 80 °C bei Stromdichten von 0,2-0,6 A/cm². Für einen Stack werden Laufzeiten von 90.000 h angegeben.

PEM-Elektrolyseure mit protonenleitenden Membranen werden erst seit etwa zwanzig Jahren entwickelt, weshalb es wenige Produkte auf dem Markt sind. Die Elektroden sind mit Edelmetallen beschichtet. Sie produzieren hochreinen Wasserstoff und erzielen höhere Stromdichten bis etwa 2 A/cm² bei Betriebsdrücken von maximal 30 bar. Die Laufzeiten sind im Gegensatz zur alkalischen Elektrolyse relativ gering mit <20.000 h.

Die Hochtemperatur-Elektrolyse wurde in Deutschland in den Jahren 1975-1987 entwickelt. In Langzeitversuchen konnten Stromdichten bis 0,3 A/cm² erreicht werden, bei Arbeitstemperaturen bis 900 °C. Ein Teil der Reaktionsenthalpie wird als Wärme eingekoppelt, wodurch der Aufwand an elektrischer Energie verringert wird und der Wirkungsgrad steigt. Die Entwicklung befindet sich immer noch im Stadium der Grundlagenforschung.

Tabelle 2 zeigt zusammenfassend Vor- und Nachteile der drei Elektrolysetechniken.⁸

Alkalische Elektrolyse	PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse
Vorteile		
etablierte Technologie, keine Edelmetallkatalysatoren, hohe Langzeitstabilität, relativ niedrige Kosten, Module bis 760 Nm ³ /h (3,4 MW).	Hohe Stromdichten, hoher Spannungswirkungsgrad, einfacher Systemaufbau, gute Teillastfähigkeit, Fähigkeit zur Aufnahme extremer Überlast, extrem schnelle Systemantwort für Netzstabilisierungsaufgaben, kompaktes Stackdesign erlaubt Hochdruckbetrieb.	Wirkungsgrade über 100 % bezogen auf die thermoneutrale Zellspannung, da Wärme eingekoppelt werden kann, keine Edelmetallkatalysatoren.

⁸ Vgl. Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen, (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle Technologien und Marktperspektiven, Elektrolyse-Verfahren, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014, S. 195, S.197, S.199, S.201.

Nachteile		
geringe Stromdichten, geringer Teillastbereich, Systemgröße und Komplexität, Aufwändige Gasreinigung, Korrosiver flüssiger Elektrolyt.	Korrosive Umgebung, Hohe Investitionskosten durch kostenintensive Komponenten, (Katalysatoren/Stromkollektoren/ Separatorplatten).	Labor- und Versuchsstadium, Langzeitstabilität (mechanisch), Wärmemanagement.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Elektrolysetechniken

Hier soll die Elektrolyse nach dem PEM-Prinzip verdeutlicht werden. Der schematische Aufbau eines PEM-Elektrolyseurs entspricht dem der Brennstoffzelle in Abbildung 2. Der Unterschied ist aber, dass Wasser in das System hineinfließt, Wasserstoff und Sauerstoff austreten. Die Funktionsweise ist also genau umgekehrt. In Anlehnung an Abbildung 1 ist der Unterschied in Abbildung 3 dargestellt. Auf der Anodenseite wird destilliertes Wasser zugeführt. Durch das Anlegen einer Spannung an die Elektroden und mit Hilfe der Katalysatoren entstehen direkt gasförmiger Sauerstoff, freie Elektronen und Wasserstoffionen. Die positiv geladenen Wasserstoffionen gelangen durch die protonenleitende Membran zur Kathode und werden mit den Elektronen des angelegten elektrischen Stromes zu Wasserstoffgas. Der Wasserstoff ist direkt nach der Erzeugung wasserdampfgesättigt.⁹

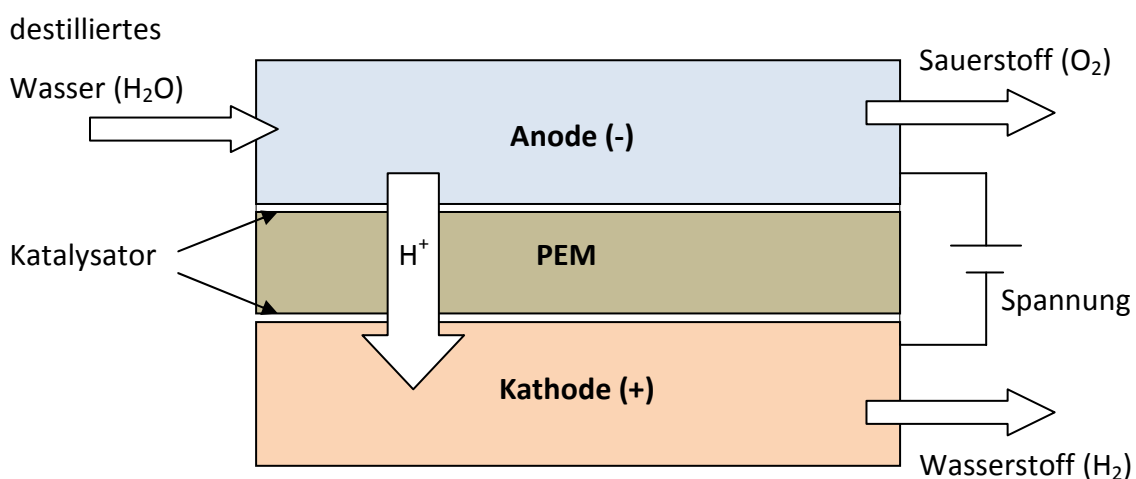


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise eines PEM-Elektrolyseur

⁹ Vgl. wasserstoff-generator.de: Funktionsweise, (28.Jan.2016).

3 Planungen zum Versuchsstand

3.1 Beschreibung und Anforderungen des Versuchsstands

Der Versuchsstand soll nicht nur stationär betrieben werden, sondern auch für den Einsatz an verschiedenen Orten anwendbar sein. Er soll zum einen Studenten für Laborversuche zur Verfügung stehen, zum anderen für Vorführungszwecke vor Ort, eventuell auch außerhalb der Hochschule, dienen. Dafür muss die Brennstoffzelle in verschiedene Räumlichkeiten bewegt und in diesen betrieben werden können. Das erfordert spezielle Anforderungen, im Besonderen was die Mobilität und die Sicherheit betrifft. Zum Versuchsstand gehören alle für den Betrieb der Brennstoffzelle und für die Durchführung der Laborversuche erforderlichen Geräte und Ausrüstungen. Dazu gehören, neben dem Brennstoffzellensystem selbst, Messgeräte für die Versuche sowie weitere technische Geräte und Sicherheitsausrüstungen.

3.2 Konstruktion des Versuchstisches

3.2.1 Anforderungen an den Versuchstisch

Da der Versuchsstand mobil einsetzbar sein soll, ist es notwendig einen verschiebbaren Tisch zu konzipieren. Alle erforderlichen Geräte und Ausrüstungen sollen auf diesen gestellt bzw. angebracht und angeschlossen werden können, so dass nach einem Ortswechsel keine langen Installationszeiten anfallen. Eine weitere Anforderung neben der Mobilität ist die Modularität. Die einzelnen Komponenten des Versuchstisches sollen austauschbar sein und sich unterschiedlich kombinieren lassen, um eine große Flexibilität bei der Planung und Umsetzung zu erreichen. Der Tisch soll jederzeit, neuen Umständen entsprechend, angepasst und erweitert werden können. Damit Elemente leicht ausgetauscht oder hinzugefügt werden können, muss ein Aufbau mit standardisierten Bauteilen nach dem Baukastenprinzip erfolgen.

3.2.2 Planung, Anfrage und Bestellung

Die Montagetechnik des Versuchstisches wird ausschließlich von der Bosch Rexroth AG bezogen. Diese bietet ein umfangreiches Baukastensystem, welches den vorher beschriebenen Anforderungen entspricht. Es basiert aus Aluminiumprofilen mit durchgehenden Längsnuten und unterschiedlichen Querschnitten und Längen nach Wunsch für verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Dazu gibt es eine Vielzahl an Verbindungstechnik und weiteres Zubehör.

Der Tisch wurde zum Teil mit der kostenlosen Planungssoftware MTpro¹⁰ der Bosch Rexroth AG geplant. Mit dieser können Konstruktionen, mit vielen Elementen aus dem Produktkatalog, anwendungsspezifisch zusammenstellt und in diverse CAD-Programme überführt werden. Auch Anfragen und Bestellungen können damit einfach durchgeführt werden. Abbildung 4 zeigt einen ersten Entwurf des Versuchstisches der mit MTpro realisiert wurde.

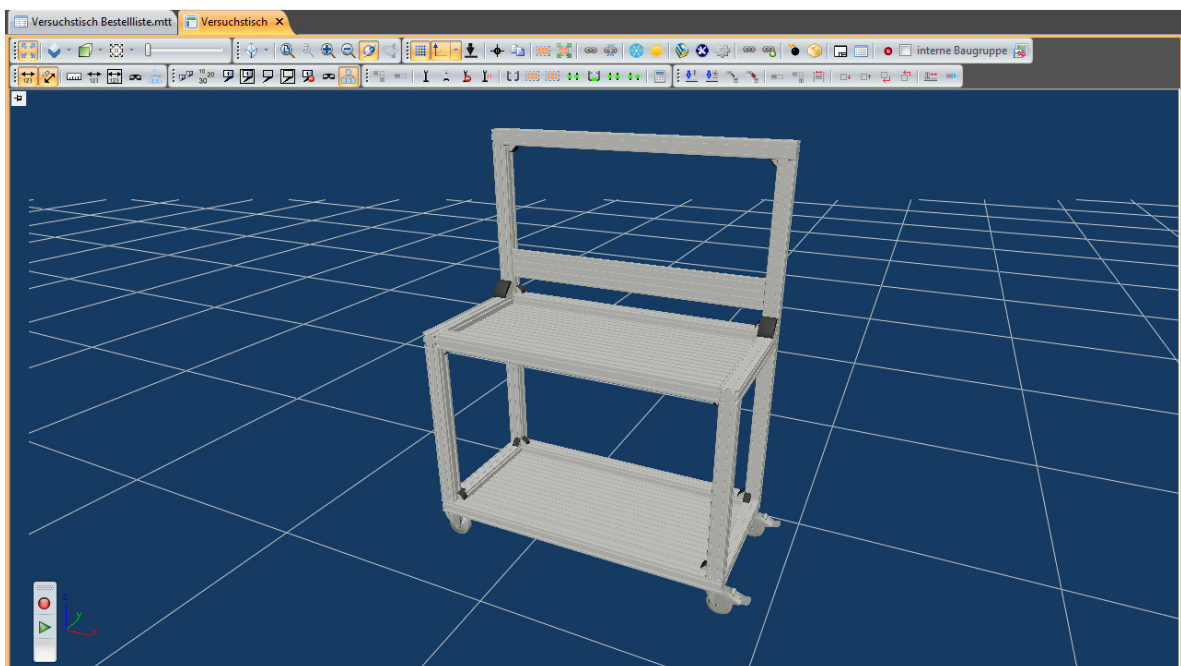


Abbildung 4: erster Entwurf des Versuchstisches

¹⁰ Vgl. www.boschrexroth.com/de/de/produkte/produktgruppen/montagetechnik/engineering-software-mtpro/mt-pro, (25.Jan.2016)

Fast alle in der Abbildung verwendeten sowie zusätzliche Elemente wurden angefragt und bestellt (Anfrageliste siehe Anhang I). Die Abmessungen des Tisches sind 1200mm in der Breite, 600mm Tiefe und 1600mm Höhe. Das Gewicht der in der Abbildung gezeigten Konstruktion beträgt ca. 60Kg. In dem Entwurf waren zunächst zwei Auflageflächen vorgesehen, von welchen nur die obere realisiert wurde. Diese hat eine Höhe von 900mm und ist die Arbeitsfläche mit der Brennstoffzelle. Der untere Bereich soll mit Wänden und Türen geschlossen werden, wobei diese Flächenelemente nicht Bestandteil der Bestellung sind und extra beschafft werden müssen. Im unteren Bereich sollen die Wasserstoffversorgung und der Rechner untergebracht werden. Senkrecht hinter und über der Arbeitsfläche sollten zunächst die SPS an dem dargestellten Nutenprofil und ein Touchscreen angebracht werden. Bei späteren Überlegungen wurde entschieden, die SPS samt Nutenprofil in dem Bereich unter der Arbeitsplatte zu platzieren.

Der Rahmen besteht aus Strebenprofilen mit Querschnitten von 60x60mm und jeweils zwei Nuten von 8mm mit einem Abstand von 30mm auf jeder Längsseite. Diese Profile eignen sich, laut Hersteller, für mittlere Belastungen wie Materialwagen, leichte Vorrichtungen, Gestelle und Trennwände¹¹. Mit Winkeln, wie in der Abbildung erkennbar, aber auch mit Innenwinkeln, die in die Nuten gesteckt werden, können diese aneinander befestigt werden. Der Tisch steht auf Rollen von 100mm Durchmesser.

Für die Anbringung der erwähnten Geräte, für Anbauten, Aussteifungen o.ä. stehen bereits vorhandene 30x30mm Profile mit 2000mm Länge zur Verfügung. Diese haben ebenfalls 8mm Nuten und können nahezu beliebig angebracht werden. Sie werden in der zentralen Laborwerkstatt der HAW entsprechend zugeschnitten.

¹¹ Vgl. Rexroth Bosch AG: Produktkatalog: Mechanik Grundelemente, 2015, http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&objectlang=en-GB&ccat_id=40530&remindCcat=1&publication=1, S. 2-16, (03.Feb.2016)

3.2.3 Montage des Versuchstisches

Ein großer Teil der Verbindungen des Versuchstisches wird durch Kraftschluss, mit Hammermuttern und Schrauben, hergestellt. Dafür werden die Hammermuttern in die Nuten gesteckt und so positioniert, dass sie nicht senkrecht zur Nut rausgezogen werden können. Die zu befestigenden Objekte, beispielsweise die Rollen oder Scharniere, werden dann eingeschraubt. Auch die Winkel werden so an beliebiger Stelle der Nut angeschraubt, wodurch Streben senkrecht zueinander befestigt werden können. Eine andere, für diesen Zweck verwendete Variante ist, die Streben mit Innenwinkeln zu verbinden. Dafür werden diese direkt in die Nuten gesteckt und mit darin befindlichen Schrauben angezogen. Innenwinkel werden besonders dort benötigt, wo kein Platz für Winkel besteht. Neben der Platzersparnis haben diese weitere Vorteile, wie einfachere und schnellere Montage, ein optisch eleganteres Design und größere Belastbarkeit. Allerdings sind die Kosten für diese um fast 30 % höher, weshalb es nicht sinnvoll ist, diese durchgängig zu verwenden.

Der Rahmen, bzw. das Grundgestell, besteht aus Strebenprofilen mit Querschnitten von 60x60 mm. Sie können zum einen größere Kräfte aufnehmen und bieten zum anderen, durch die doppelte Anzahl an Nuten, mehr Optionen für die weitere Planung und Montage. Die unteren vier Horizontalstreben des Grundgestells wurden an den Innenkanten für eine höhere Stabilität mit 60x60 mm Winkeln miteinander verbunden. Diese greifen jeweils in beide Nuten der Profile und können fast die fünffachen Kräfte und Momente der halb so großen 30x30 mm Winkel aufnehmen. Hier sind an der Unterseite der Eckpunkte die Rollen, wovon zwei drehbar sind und Feststeller haben, an jeweils drei Nuten angeschraubt. Die restlichen Strebenprofile des Grundgestells, im Bereich zwischen der Arbeitsplatte und den Rollen, sind über 30x30 mm Winkel verbunden. Die Winkel sind jeweils in der nach innen liegenden der beiden Nuten angebracht. Die äußeren Nuten sind deshalb frei für die Anbringung von Wänden oder Türen. Die oberste Horizontalstrebe wird aus optischen Gründen durch zwei Innenwinkel gehalten. Um das Grundgestell zusätzlich zu versteifen wurden je zwei Diagonalstreben mit 45-Grad-Verbindern im unteren sowie im oberen Bereich montiert.

Bei der weiteren Montage wurden nur noch kleinere Strebenprofile verwendet, größtenteils welche mit Querschnittsflächen von 30x30 mm. Diese eignen sich gut für kleinere Anbauten oder Halterungen, da sie nur ein Viertel des Volumens der größeren einnehmen. Um alle für den Versuchsstand nötigen Geräte sowie die dazugehörige Verkabelung unterzubringen, ist es wichtig diese möglichst platzsparend zu verbauen. Die Strebenprofile wurden entsprechend der in den vorangegangenen Planungen festgelegten Längen zugeschnitten. Auf alle freistehenden Enden der Strebenprofile, auch auf die der 60x60 mm Profile, wurden Abdeckkappen der Größe 30x30 gesetzt.

Die Arbeitsplatte besteht aus vier Nutenprofilen mit den Maßen 15x120x1080 mm. Diese werden jeweils mit drei Winkeln an den oberen horizontalstreben des Grundgestells gehalten. Die Türen bestehen jeweils aus vier Strebenprofilen, welche mit Innenwinkeln verbunden zwei Rahmen bilden. Diese hängen über Scharniere am Grundgestell. Der Touchscreen-Monitor ist mittig unter der obersten Strebe des Grundgestells sowie einer darunter angebrachten Querstrebe befestigt. Dafür wurden in die Strebenprofile Bohrungen gesetzt. Der Rechner sowie die SPS sind direkt unter der Arbeitsplatte so positioniert, dass sie sichtbar und gut erreichbar sind. Der Rechner liegt auf der linken Seite, quer auf zwei Halterungen aus Streben, die jeweils am Grundgestell sowie an der Arbeitsplatte angebracht sind. Die SPS ist auf ein Nutenprofil geschraubt, welches mit Winkeln an drei senkrecht hängenden Streben befestigt ist. An diesen Streben ist unter der SPS ebenfalls ein Kabelkanal befestigt, der die anfallenden Kabel führen soll.

In der Folgenden Stückliste sind die bei der Montage verwendeten Elemente nach Baugruppen aufgelistet. Nicht in dieser Liste enthalten sind Schrauben, Muttern und Abdeckkappen.

Baugruppe	Bezeichnung	Länge [mm]	Anzahl [Stück]
Grundgestell	Strebenprofil 60x60	480	2
		540	2
		680	2
		1080	2
		1200	3

		1355	3
	Strebenprofil 30x30	250	2
		400	2
	Winkel 60x60	-	4
	Winkel 30x30	-	16
	Verbinder 45°	-	8
Arbeitsplatte	Nutenplatte 15x120	1080	4
	Winkel 30x30	-	12
Rollen	Rolle_D100	-	2
	Rolle_D100 mit Feststeller	-	2
Tür	Strebenprofil 30x30	532	4
		597	4
	Scharnier Liftoff L	-	2
	Scharnier Liftoff R	-	2
	Bügelgriff	133	2
	Flächenelemente		2
Halterung	Strebenprofil 30x30	1080	1
Monitor	Innenwinkel	-	2
Halterung	Strebenprofil 30x30	130	2
Rechner	Strebenprofil 30x30	160	2
	Strebenprofil 30x30	294	2
	Winkel 30x30	-	4
	Innenwinkel	-	4
Halterung SPS	Strebenprofil 30x30	210	1
	Strebenprofil 30x30	240	2
	Nutenprofil 15x120	816mm	1
	Winkel 30x30	-	6

Tabelle 3 Stückliste des Grundgestells

3.2.4 CAD-Konstruktion

Unterstützend zu den konstruktiven Planungen und zur Montage wurde der Versuchstisch mit dem CAD-System Catia V5R21 konstruiert. Mit CAD können weitere Vorhaben wie Anbauten oder Erweiterungen des Versuchstisches vorab schnell und übersichtlich konstruiert werden. Zusätzlich zu den bei der Montage verwendeten Elementen wurden bereits weitere Ideen mit eingebracht, die so umgesetzt werden könnten. Auf die Umsetzung und Struktur der Konstruktion mit Catia wird im Folgenden eingegangen.

Der Strukturbaum der Gesamtkonstruktion des Versuchstisches ist in 10 Baugruppen (Produkte) unterteilt, wie in der Abbildung 5 dargestellt. Die gewünschte Baugruppe kann so zur Betrachtung oder Bearbeitung aus dem Zusammenbau rausgezogen werden. Die Baugruppen sind in ihre Bestandteile gegliedert und werden durch Klicken auf das davor stehende Plus-Symbol angezeigt.

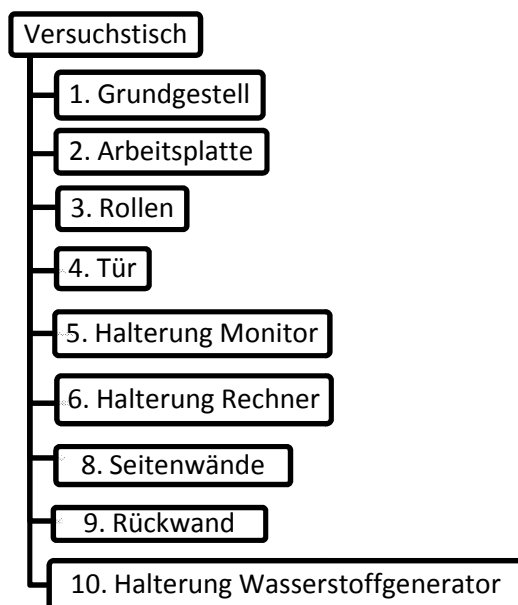


Abbildung 5: Strukturbaum der CAD-Konstruktion

Sämtliche Strebenprofile sowie viele weitere Teile von der Bosch Rexroth AG können auf deren Homepage in gewünschten Maßen oder Größen als CAD-Datei heruntergeladen werden. Auf diese Weise wurden die meisten Elemente aus der Bestellung in die CAD-Konstruktion integriert. Teile, die mit zugehörigem Befestigungsmaterial geliefert werden, werden in digitaler Form im Zusammenbau zur Verfügung gestellt. So beinhalten die Winkel, 45°-

Verbinder und Scharniere bereits die zur Befestigung mitgelieferten Hammermuttern und Schrauben. Die größeren 60x60mm Streben des Grundgestells sowie die Arbeitsplatte wurden ebenfalls auf diese Weise integriert. Die heruntergeladenen Strebenprofile können im CAD-Programm nicht nachträglich in der Länge verändert werden. Deshalb müssen diese für andere Längen stets neu angefordert werden. Für eine schnellere Bearbeitung sind die 30x30 mm Profile im CAD erstellt worden. Schrauben und Unterlegscheiben zur Befestigung der Rollen und der Bügelgriffe der Tür wurden aus dem Normteilkatalog aus Catia eingefügt.

Des Weiteren ist es vorgesehen den kompletten Bereich unter der Arbeitsplatte mit Wänden zu schließen. Eine mögliche Variante dafür wurde mit Catia umgesetzt. Für die Wände werden die aus der Bestellung vorhandenen Einfassprofile in mindestens zwei gegenüberliegende Nuten gesteckt, welche die Flächenelemente aufnehmen. Für eine einfache Montage sowie Demontage dieser, könnten biegsame Scheiben aus Acrylglas eingesetzt werden, ohne dass dafür Strebenprofile gelöst werden müssen. Um Wartungsarbeiten im inneren Bereich schnell und einfach vornehmen zu können, muss dieser auch von der Rückseite gut zugänglich sein. Eine einfache Variante ist es, die Rückwand in drei Flächenelemente aufzuteilen, welche über Einkerbungen leicht entnommen werden können. Die Länge der Flächenelemente zwischen den Einfassprofilen berechnet sich, laut Katalog, für die Nutbreiten mit 8 mm über den Abstand der Strebenprofile addiert mit 14,4 mm. Die Dicke kann zwischen 2 und 6 mm frei gewählt werden. In folgender Tabelle sind die verwendeten Maße der Flächenelemente eingetragen:

	Anzahl	Höhe*Breite*Tiefe [mm]
Türen	2	621,4*475*5
Seitenwände	2	694,4*480*3
Rückwände	3	694,4*360*3

Tabelle 4: Flächenelemente

Eine Halterung für einen Wasserstoffgenerator wurde ebenfalls vorab integriert. Diese ist aus 30x30 mm Profilen und Winkeln zusammengesetzt und kann den Maßen eines Generators, falls einer verwendet werden sollte, entsprechend leicht angepasst werden.

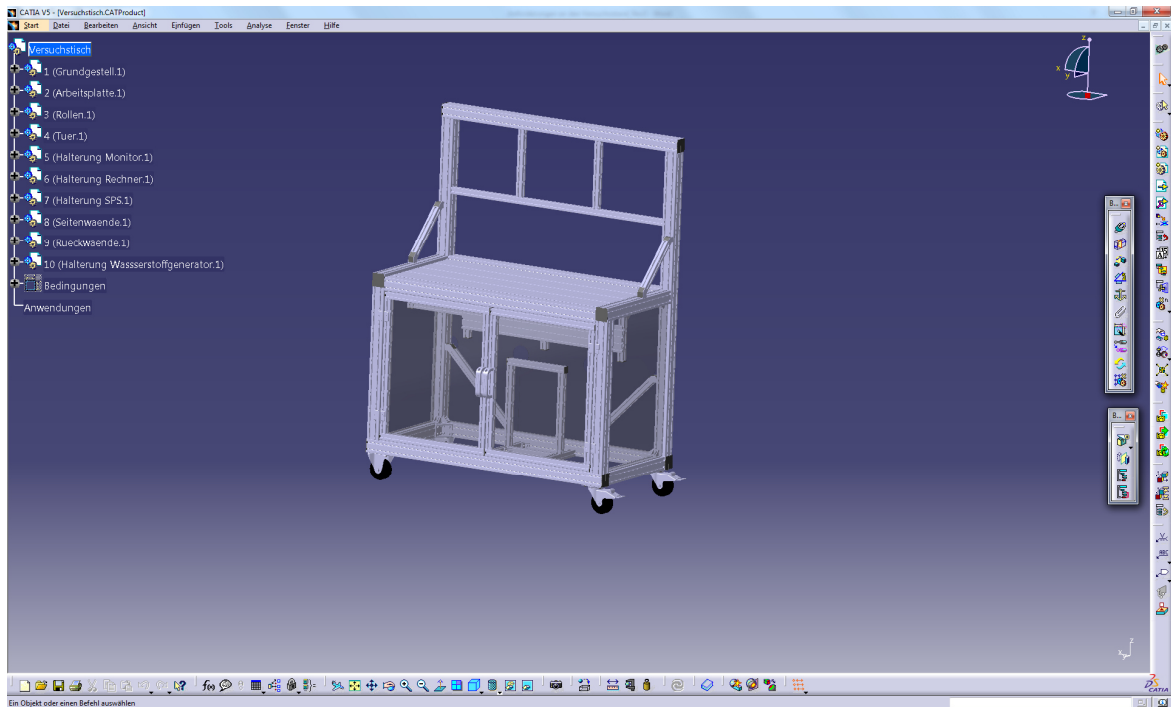


Abbildung 6: CAD-Zusammenbau

3.3 Wasserstoffversorgung

Herkömmlicherweise werden in Laboren Gasflaschen verwendet, welche wegen Brand- oder Explosionsgefährdung oftmals in gesicherten Räumen oder Schränken stehen und das Gas über Leitungen zum Anwender führen. Die geforderte Mobilität des Versuchsstandes macht dieses jedoch nicht ohne weiteres möglich, die Gasquellen müssen dafür idealerweise am Versuchstisch angebracht sein. Deshalb muss ebenfalls eine andere, sichere und trotzdem den Anforderungen entsprechende Wasserstoffquelle in Erwägung gezogen werden. Für die Wasserstoffversorgung der Brennstoffzelle wird hier die Möglichkeit eines Wasserstoffgenerators sowie mögliche Leitungen zum Wasserstofftransport untersucht und dargestellt.

3.3.1 Anforderungen an die Wasserstoffversorgung

Das Hauptkriterium bei der Wahl einer geeigneten Wasserstoffversorgung sollte die Sicherheit sein. Es muss von vornherein darauf geachtet werden, ob und wie die Sicherheit der Anwender bestmöglich gewährleistet und ein Gefährdungspotential minimiert werden kann. Auf das Thema Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff wird in Abschnitt fünf Sicherheit im Labor“ weiter eingegangen.

Die Wasserstoffversorgung muss für die Versuche mit der Brennstoffzelle zudem ausreichend Wasserstoff und Druck liefern können (siehe technische Anforderung im Anhang II). Die Wasserstoffquelle muss demnach der Brennstoffzelle einen Massenstrom von 5,25 mg/s zuführen, was bei Umgebungsbedingungen einen Volumenstrom von ca. 3500 ml/min entspricht. Das Gas soll dabei bis zu einem Überdruck von 3 bar (ü) regelbar sein.¹² Brennstoffzellen benötigen für den Betrieb reinen Wasserstoff, die erforderliche Konzentration wird vom Hersteller angegeben.

Damit die geforderte Mobilität des Versuchsstandes eingehalten werden kann, sollte die Gasversorgung am Tisch angebracht sein, idealerweise im Bereich unter der Tischplatte. Daher sind die maximalen Abmessungen der Wasserstoffquelle durch den Versuchstisch begrenzt. Der dort verfügbare Raum hat eine Höhe von etwas weniger als 500 mm, eine Breite von 1000 mm und eine Tiefe von 480 mm. Möglicherweise muss die Wasserstoffquelle in einem luftdichten Raum mit einem Wasserstoff-Sensor untergebracht werden.

¹² Vgl. Kuhn, Peter: Bachelorarbeit, Erarbeitung eines Brennstoffzellen-Versuchsstands für das Modul „Electro-chemical Energy Conversion – Fuel Cell Systems“, Hamburg, August 2015, S.29

3.3.2 Druckflasche

Die Gasversorgung mittels Druckflaschen ist die übliche Art für Anwendungen mit Gasen. Dafür werden die Gase vom Hersteller bei ca. 200 bar in spezielle Hochdruckflaschen, mit unterschiedlichem Rauminhalt, abgefüllt. So bietet beispielsweise die Linde AG eine 10 Liter- sowie eine 50 Liter-Stahlflasche für Wasserstoff bis Reinheiten von 7.0 an¹³. Die Flaschen werden bei Bestellung an die Kunden ausgeliefert und wieder zurückgenommen wenn sie verbraucht sind. Über einen Druckminderer kann das Gas den Flaschen entnommen werden.

3.3.3 Wasserstoffgenerator/ Elektrolyseur

Wasserstoffgeneratoren (Elektrolyseure) stellen das Gas diskontinuierlich zur Verfügung, sie erzeugen es also erst wenn es benötigt wird. Dafür wird durch Elektrolyse aus demineralisiertem oder destilliertem Wasser vollautomatisch gasförmiger, mit Wasser gesättigter Wasserstoff mit hohen Reinheiten erzeugt. Volumenströme von wenigen 100 ml bis zu vielen Litern pro Minute und Druck weit über 10 bar sind möglich. Dementsprechend gibt es unterschiedliche Größen der Modelle, kleinere etwa für den Laborbereich und größere für die Industrie. Über Displays und Eingabefelder werden die gewünschten Parameter eingegeben und angezeigt.

In Folgender Tabelle sind recherchierte Elektrolyseure aufgelistet:

Firma	ErreDueGas Austria	ACTA	Quintech
Bezeichnung	GLABH 1200	ELS250D	QT-HG-5000
H ₂ -Produktion	1200 ml/min	4166,66 ml/min	5000 ml/min
Gasdruck	bis 10 bar	35 bar	bis 30 bar
Wasserstoffreinheit	99,999 Vol.-%	99,999 Vol.-%	besser 99,99 Vol.-%
Abmessungen (HxBxT)	225 x 390 x 422 mm	489 x 483 x 490	
Gewicht	25 Kg	67 Kg	85 Kg
Preis	14.450,00 €	15.995,00 €	30.500,00 €

Tabelle 5: Elektrolyseure

¹³ Vgl. Linde AG: Wasserstoff 7.0, in: http://produkte.linde-gase.de/reingase_in_druckbehaltern/wasserstoff_7.0.html, (13.Jan.2016).

Die in Tabelle 4 aufgelisteten Elektrolyseure sind für Laboranwendungen mit kleinen Gasmengen geeignet. Anhand der Tabelle wird deutlich, dass mit der Leistung (H_2 -Produktion) die Preise und Abmessungen steigen. Der Druck und Reinheit des jeweils erzeugten Wasserstoffs sind den Anforderungen entsprechend. Der zuerst aufgelistete Elektrolyseur¹⁴ ist relativ klein und leicht und dadurch ideal, um ihn im unteren Bereich des Versuchstisches zu platzieren. Allerdings erreicht der „GLABH 1200“ nicht den geforderten Volumenstrom von 3500 ml/min. Der „QT-HG-5000“ von Quintech liefert mit 5000 ml/min mehr als das 1,5-Fache, wird aber augenscheinlich anhand von Bildern in den Abmessungen zu groß sein, um diesen in den Versuchstisch zu integrieren. Dieser müsste neben dem Versuchstand hergeschoben werden und würde einer geforderten Kompaktheit des Versuchsstandes entgegen sprechen.¹⁵

Die italienische Firma Acta S.P.A. stellt Wasserstoffgeneratoren her, die in das geforderte Anforderungsprofil passen. Der ELS250D¹⁶ ist ein modular aufgebautes System, bestehend aus Modulen für die Elektronik und für die Elektrolysezellen. Ein zusätzliches Modul für die Trocknung des Wasserstoffs kann optional hinzugefügt werden (Datenblatt siehe Anhang II).

3.3.4 Leitungen für Wasserstoff

Um den Wasserstoff sicher von der Quelle an die Brennstoffzelle zu führen, sind entsprechende Leitungen und Verbindungsstücke vorzusehen. Diese müssen zum einen chemisch beständig für Wasserstoff und zum anderen für die geforderten Betriebsbereiche, 3 bar Überdruck und 120 °C, geeignet sein. Für das Leitungssystem des Versuchsstandes können Rohre sowie Schläuche verwendet werden.

Für Wasserstoff können problemlos Rohre aus Kupfer eingesetzt werden¹⁷. Einfache Kupferrohre, etwa vom Baumarkt, sind für Druck bis zu 80 bar und Temperaturen bis 100 °C geeignet. Diese Rohre werden typischerweise durch Hartlötten oder Schweißen verbunden. Eine andere und elegantere Möglichkeit ist die Verbindung mit Pressfittings, bei der die

¹⁴ Preishuber, Alois: ErreDueGas-Austria, Anfrage Wasserstoffgenerator, Pers. Email, (25.Jan.2016).

¹⁵ vgl. Quintech: fumeGen H2 Generator, in:

http://www.quintech.de/deutsch/produkte/forschung_entwicklung/fumaGenH2.php, (01.Feb.2016).

¹⁶ Carpita, Alberto: Heliocentris Energy Solutions AG Group, your Inquiry, Pers. Email, (29.Feb.2016).

¹⁷ Vgl. Deutsches Kupferinstitut, Einsatzbereiche Kupferrohre, Industrie- und Laborgase, in:

<https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/anwendung/bauwesen/rohrinstallation/einsatzbereiche/industrie-und-laborgase.html>, (06.02.2016)

Muffen kraftschlüssig mit einem Presswerkzeug verbunden werden. Der Vorteil bei dieser Verbindungstechnik ist, dass keine Wärmeeinbringung in den Werkstoff stattfindet und dadurch keine Korrosionsgefahr gegeben ist. Die Montage einzelner Rohrabschnitte, beispielsweise mit Bögen oder T-Stücken, kann schnell und einfach an beliebigen Orten durchgeführt werden. Aufgrund von hohen Preisen können entsprechende Presswerkzeuge zur Montage geliehen werden.

Schläuche aus Polytetrafluorethylen (PTFE) sind für nahezu alle flüssigen und gasförmigen Medien geeignet. Sie haben eine Temperaturbeständigkeit bis +260 °C und sind nicht brennbar. Abbildung 7 zeigt den Arbeitsdruck in Abhängigkeit vom Innendurchmesser für unterschiedliche Wandstärken des Schlauches bei 20 °C auf. Bei höheren Temperaturen ist der Druck mit dem Abminderungsfaktor F aus Tabelle 5 zu multiplizieren. Ein PTFE-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 4 mm und einer Wandstärke von 1 mm würde also bei 20 °C einem Arbeitsdruck von ca. 13 bar genügen. Bei einer Fluidtemperatur von 150 °C fällt der Arbeitsdruck durch den Abminderungsfaktor auf etwa den halben Wert.¹⁸

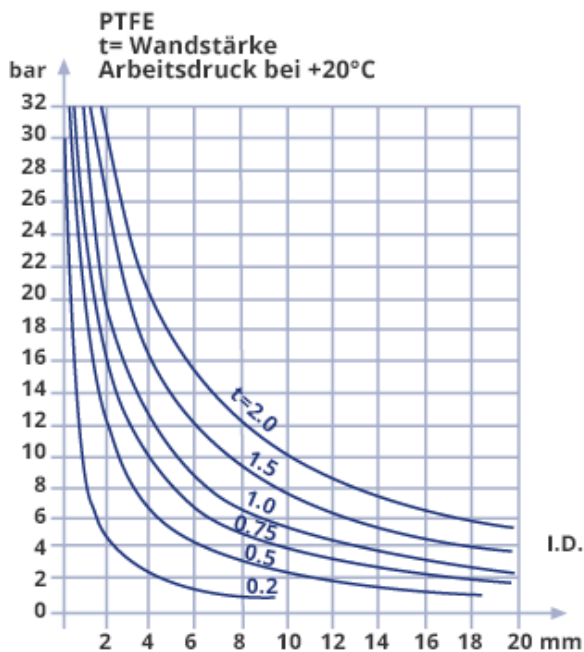


Abbildung 7: Arbeitsdruck in Abhängigkeit vom Innendurchmesser¹⁹

¹⁸ Vgl. Tecno Plast Industrietechnik GmbH, PTFE Schlauch Natur, in: http://www.tecnoplast.de/tp/ptfe_natur.konstruktion.php, (13.März.2015).

¹⁹ <http://www.bemu.de/images/tech-details/bemu-diagramm-abminderungsfaktoren.png>, (13.März.2015).

Temperatur [°C]	Abminderungsfaktor F
50	0,87
75	0,77
100	0,68
150	0,53

Tabelle 6: Abminderungsfaktor F²⁰

3.3.5 Fazit

Die großen Vorteile des Wasserstoffgenerators, im Vergleich zu Druckflaschen, sind die geringeren Mengen und der relativ geringere Druck des Wasserstoffs und das dadurch erheblich kleinere Gefährdungspotential. Aufgrund des hohen Druckes und der großen Menge Gas in Druckflaschen, bergen diese ein wesentlich höheres Gefährdungspotential. Innerhalb kurzer Zeit können große Mengen Gas austreten und ein entzündbares Gemisch mit der Luft bilden. Im Falle eines Brandes kann die Flasche zerbersten und für erheblichen Schaden sorgen. Bei Elektrolyseuren wird der Wasserstoff erst erzeugt wenn er benötigt wird. Außerdem verfügen diese über Sicherheitssysteme, die bei Problemen Meldungen abgeben oder zur Sicherheitsabschaltung führen. Der Wasserstoff ist in der Regel mit Wasser gesättigt. Damit für Laborversuche die Feuchtigkeit geregelt werden kann, sollte im Elektrolyseur eine Trocknung des Wasserstoffs integriert sein.

Für die Leitung des Wasserstoffs sind Schläuche von Vorteil, da sie aufgrund ihrer Flexibilität schnell in den Versuchsaufbau integriert werden können. Dafür könnten PTFE-Schläuche, die den Anforderungen entsprechend sind, verwendet werden.

²⁰ <http://www.bemu.de/images/tech-details/bemu-diagramm-abminderungsfaktoren.png>, (13.März.2015).

4 Kühlung der Brennstoffzelle

4.1 Allgemeines und Anforderungen an die Kühlung

Die Aufgabe des Kühlsystems ist es, die Temperatur der Brennstoffzelle im Betrieb auf eine gewünschte Temperatur bzw. in vorgegebenen Grenzen zu halten. Der Temperaturbereich wurde in vorherigen Planungen mit 60-120°C festgelegt. Bei steigenden Betriebstemperaturen fallen die Zellspannungen von PEM- Brennstoffzellen und somit der Wirkungsgrad.²¹ Um diese im Dauerbetrieb effizient nutzen zu können und vor Schäden zu bewahren, ist es somit unerlässlich, die durch Energieumwandlung entstehende Wärme sinnvoll abzuführen. Dazu muss ein Kühlkreislauf betrieben werden, der diese Wärme aufnimmt und an die Umgebung abgibt. Das wärmeaufnehmende Fluid strömt dafür durch die Brennstoffzelle. Die Temperaturen ergeben sich durch die Massenströme und die stoffspezifischen Eigenschaften des Kühlstromes. Der Einfluss der Betriebstemperatur auf die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle soll einen Teil der Laborversuche darstellen.

4.2 Abzuführende Wärmemenge

Um ein geeignetes Kühlsystem für die Brennstoffzelle zu bestimmen und dessen Dimensionierung abzuschätzen, wird zunächst die abzuführende Wärmemenge untersucht. Abbildung 8 zeigt ein einfaches Energieflussdiagramm für die Brennstoffzelle bei idealer Verbrennung.

²¹ Kuhn, Peter: Erarbeitung eines Brennstoffzellenversuchsstand für das Modul „Electro-chemical Energy Conversion – Fuel Cell Systems, S.19

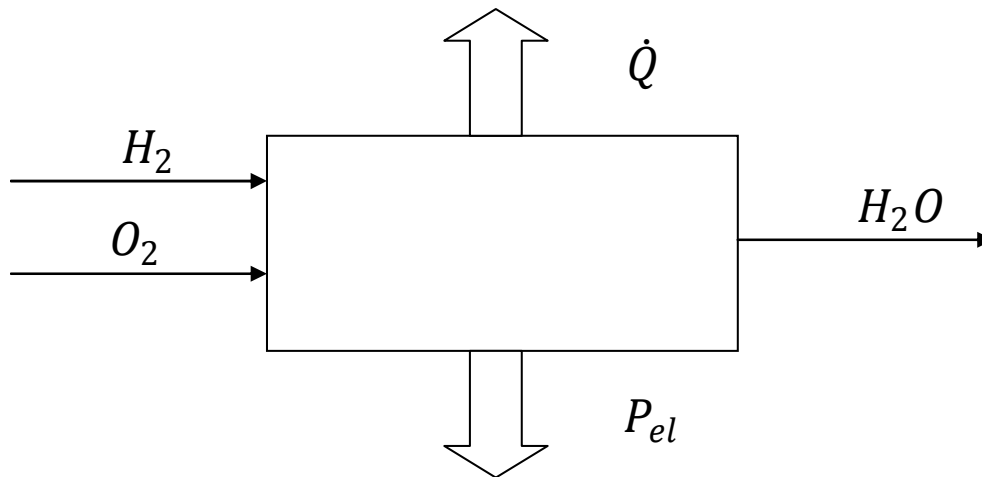


Abbildung 8: Energieflussdiagramm

Die Grafik veranschaulicht was in das System Brennstoffzelle hinein- und hinausfließt. Wasserstoff und Sauerstoff werden dem System zugeführt und reagieren, unter Abgabe von Wärme und elektrischer Leistung, zu Wasser. Die Wärme, die bei dem Prozess entsteht, muss über das Kühlsystem abgeführt werden. Um die Wärme zu bestimmen wird zunächst die Energiebilanz für das System mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik aufgestellt:

$$0 = \sum \dot{Q} + \sum P + \sum (\dot{m} * h)_{ein} - \sum (\dot{m} * h)_{aus} \quad (5)$$

Da Wärme und elektrische Leistung abgegeben werden, erhalten diese ein negatives Vorzeichen. Somit kann die Formel nach

$$\dot{Q} = -P_{el} + \sum (\dot{m} * h)_{ein} - \sum (\dot{m} * h)_{aus} \quad (6)$$

umgestellt werden.

Die Enthalpie-Berechnung muss teilweise abgeschätzt bzw. idealisiert werden, da schwer vorherzusagen ist, wie viel Brennstoff tatsächlich verbrennt und in welchem Phasenverhältnis das Wasser austritt. Je größer die flüssige Phase ist, desto mehr Verdampfungswärme wird freigesetzt.

4.2.1 Junkers Kalorimeter

Beim Junkers Kalorimeter (isobare Verbrennung) wird angenommen, dass der Brennstoff komplett (stöchiometrisch) verbrennt. Das System wird soweit gekühlt, dass die Abgase die gleichen Temperaturen wie die Luft und der Brennstoff haben. Aus der Temperaturerhöhung des Kühlmediums wird die umgesetzte Wärmemenge bestimmt. Wenn das durch die Verbrennung entstandene Wasser in den Abgasen gasförmig vorliegt, wird der Heizwert H_u gemessen. Kondensiert das Wasser vollständig, so wird der um die verdampfungswärme höhere Brennwert H_o gemessen:

$$\dot{m}_{H_2} * H_o = \dot{m}_{H_2} * H_u + \dot{m}_{H_2O} * r_{H_2O} \quad (7)$$

4.2.2 Maximaler Wärmestrom

Die Kühlung muss so dimensioniert werden, dass ein maximal möglicher Wärmestrom problemlos abgeführt werden kann. Um den maximalen Wärmestrom zu erhalten wird angenommen, dass der Wasserstoff, wie bei dem Junkers Kalorimeter, komplett (stöchiometrisch) verbrennt und das Wasser komplett kondensiert. Die Abgastemperatur wird ebenfalls auf die Eingangstemperatur gekühlt. In das System hinein geht der Enthalpiestrom des Wasserstoffes, hinaus die elektrische Leistung. Da die Abgase die gleiche Temperatur wie die Ausgangsstoffe haben, gibt es keine Wärmeverluste.

$$\dot{Q} = -P_{el} + \dot{H}_{H_2} = -P_{el} + \dot{m}_{H_2} * H_o \quad (8)$$

In der vorangegangenen Arbeit wurde der Maximalwert des Massenstromes für Wasserstoff bei einem Wasserstoffüberschuss von $\lambda_{Anode} = 3$ mit $\dot{m}_{H_2,max} = 5,25 \frac{mg}{s}$ berechnet.²² Es werden somit $\dot{m}_{H_2} = 1,75 \frac{mg}{s}$ genutzt, während die doppelte Menge als Überschuss mit den Abgasen entweicht. Der Brennwert H_o bei 25°C und 1,01325 bar beträgt 141,8MJ/kg²³. Der Wärmestrom ergibt sich zu:

$$\dot{Q} = -100W + 248,15W = 148,15W \quad (9)$$

In der Praxis wird sich eine so effiziente Kühlung allerdings nicht realisieren lassen. Bei höheren Temperaturen der Abgase würden diese dem System Wärme entziehen und die aufzubringende Kühlleistung verringern.

4.3 Wärmeübertragung

„In der Thermodynamik bezeichnet man Energie, welche die Grenze eines Systems überschreitet, dann als Wärme, wenn der Energietransport allein durch einen Temperaturunterschied zwischen dem System und seiner Umgebung bewirkt wird“²⁴. Die Wärmeübertragung wird dabei in Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung unterteilt. Wärmeleitung ist ein Energietransport zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines im Material vorhandenen Temperaturgradienten. Sie erfolgt in Festkörpern sowie in Fluiden. Bei der Konvektion wird die Wärmeenergie nicht nur durch Wärmeleitung übertragen, sondern zusätzlich mit der Strömung eines Fluids transportiert. Die Wärmestrahlung ist der Energietransport mittels elektromagnetischer Wellen, welche jeder Körper an seine Umgebung abgibt.²⁵

²² Kuhn, Peter: Erarbeitung eines Brennstoffzellenversuchsstands für das Modul „Electro-chemical Energy Conversion – Fuel Cell Systems“, S.32

²³ Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 24., aktualisierte Auflage, Berlin Heidelberg (Springer-Verlag), 2014, Anh.D10 Tabelle 1.

²⁴ Baehr, H.D., Stephan, Karl: Wärme - und Stoffübertragung, 8. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2013, S.1

²⁵ Vgl. Baehr, H.D.: Wärme- und Stoffübertragung, S.1,S.2,S.11,S.28

4.3.1 Konvektiver Wärmeübergang

Die abzuführende Wärme wird, wie bei einem Wärmeübertrager, von einem Stoffstrom auf einen anderen übertragen, wobei diese durch eine Wand getrennt sind. In dieser Arbeit wird der Wärmeübergang von der Wand auf das Kühlmedium betrachtet. Es handelt sich um eine einphasige, erzwungene Konvektion. Das beförderte Fluid ändert seine Phase nicht, es nimmt die Wärme auf, leitet und transportiert sie weiter. Die Wärmestrahlung wird hier vernachlässigt. Gleichung (10) betrachtet den Wärmeübergang, also nur die Wärmeübertragung zwischen der Wand und dem Fluid.

$$\dot{Q} = \alpha * A * (\vartheta_W - \vartheta_F) \quad (10)$$

Die treibende Kraft ist die Temperaturdifferenz zwischen der Wand mit ϑ_W und dem Fluid mit ϑ_F . Der Kühlstrom muss die niedrigere Temperatur aufweisen und wird von einer Pumpe oder einem Gebläse angetrieben. Daher wird dieser Vorgang als erzwungene Konvektion bezeichnet. Der Wärmeübergangskoeffizient α sowie die Wärmeaustauschfläche A haben ebenfalls Einfluss auf den Wärmestrom.

4.3.2 Wärmestrom

Wird vereinfachend angenommen, dass die im Prozess entstehende und die über das Kühlsystem anzuführende Wärmemenge gleich groß ist,

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{Kühl} \quad (11)$$

kann mit der Grundgleichung für einen Wärmestrom

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p \Big|_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} * (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (12)$$

der erforderliche Massenstrom für die Kühlung bestimmt werden, wenn die Temperaturen des Kühlmediums am Eintritt und Austritt bekannt sind. Die Temperaturdifferenz beschreibt

die Erhöhung der Temperatur des Kühlmediums durch die Wärmeaufnahme und $c_p \Big|_{\vartheta_1}^{\vartheta_2}$ die mittlere spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck für dieses Temperaturintervall. Diese lässt sich aus Tabellenwerken ablesen bzw. interpolieren.

Das Kühlmedium kann so lange Wärme aufnehmen, bis die Temperatur des Mediums gleich der Temperatur der zu kühlenden Oberfläche ist. Es muss also immer für genügend Kühlmittelfluss gesorgt oder ein Kühlmittel mit höherer Wärmekapazität gewählt werden.

4.4 Luftkühlung und Wasserkühlung im Vergleich

Für die Kühlung der Brennstoffzelle werden hier zwei Möglichkeiten betrachtet: die Luftkühlung und die Wasserkühlung. Beide Systeme unterscheiden sich in Punkten wie Kühlleistung, Komplexität, Platzbedarf, Zuverlässigkeit, Installations- und Betriebskosten. Die Vor- und Nachteile sind gegeneinander abzuwägen um eine optimale, auf die Bedürfnisse bezogene Lösung zu finden. Diese Verschiedenartigkeiten werden in diesem Abschnitt dargestellt um eine Vergleichbarkeit zu schaffen und eine Empfehlung abzugeben.

4.4.1 Vergleichsrechnungen

Tabelle einiger Stoffeigenschaften bei 20°C und 1 bar im Überblick²⁶

		Luft (trocken)	Wasser
ρ	$kg\ m^{-3}$	1,189	998,21
c_p	$kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$	1,006	4,185
λ	$10^{-3}\ W\ m^{-1}\ K^{-1}$	25,87	598,01
η	$10^{-6}\ Pa\ s$	18,21	1001,6
ν	$10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$	15,32	1,003
Pr	-	0,7081	7,009

Tabelle 7: Stoffeigenschaften von Luft und Wasser

=>Wasser eine hat bessere Wärmeleitfähigkeit und bessere Wärmekapazität.

=>Luft erwärmt sich nur in unmittelbarer Nähe zur Wand spürbar.

²⁶ Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas, S.176, S.197

Um den in (9) ermittelten Wärmestrom abzuführen, werden mit (12) die dafür erforderlichen Massenströme, für Luft und Wasser, berechnet. Die Temperaturerhöhung des jeweiligen Kühlmediums wird in folgendem Beispiel mit 30K vorgegeben und soll einen annähernd realistischen Wert für die Praxis darstellen.

Beispiel: Massen- und Volumenströme bei $\Delta\vartheta = 30K$

$$\text{Luft: } c_{p,\text{Luft}} \Big|_{20}^{50} = 1,009 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \quad \dot{m}_{\text{Luft}} = 4,894 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad \dot{V} = 14,82 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Wasser: } c_{p,\text{Wasser}} \Big|_{20}^{50} = 4,177 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \quad \dot{m}_{\text{Wasser}} = 1,182 \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad \dot{V} = 0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Die Wärmekapazität von Wasser ist wesentlich größer als die der Luft, weshalb ein kleinerer Massenstrom erforderlich ist um die gleiche Wärmemenge abzuführen. Bei größer werdenden Massenströmen nimmt die Erwärmung des Kühlmediums ab und umgekehrt. Aufgrund des großen Dichteunterschiedes muss bei der Luftkühlung ein erheblich größeres Volumen bewegt werden.

4.4.2 Luftkühlung

Die Kühlung mit Luft benötigt keinen komplizierten Aufbau. Es werden lediglich ein Ventilator und eventuell Luftschläuche benötigt, damit Luft aus der Umgebung angesaugt und in die Brennstoffzelle geleitet werden kann. Für den Luftmassenstrom ist der Systemwiderstand der Anlage zu überwinden. Bei einer reinen Luftkühlung ist die aufzubringende Leistung proportional zum benötigten Kühlluftstrom und dem zu überwindenden Druckverlust. Die erwärmte Luft kann anschließend einfach in die Umgebung geblasen werden. Luft hat eine kleinere Wärmekapazität im Vergleich zu Wasser, kann also beim gleichen Massenstrom nur etwa Halb so viel Wärme abführen. Da bei einer 100W Brennstoffzelle aber relativ wenig Wärme anfällt, sind die Abmessungen des Luftkühlsystems trotzdem klein. Der im Beispiel berechnete Volumenstrom von $\dot{V}_{\text{Luft}} \sim 15 \text{m}^3/\text{h}$ erreichen handelsübliche Axiallüfter für den Einsatz im Elektrobereich. Diese Lüfter sind in den Brennstoffzellensystemen vieler Hersteller für Kleinanwendungen bereits fest integriert.

4.4.3 Wasserkühlung

Für die Wasserkühlung kann entweder ein offener oder ein geschlossener Kreislauf angewendet werden. Bei dem offenen Kreislauf wird das Wasser nach der Wärmeaufnahme in einen Auffangbehälter oder den Abfluss geleitet. Wenn dem Wasser Zusätze beigemischt sind, muss das Wasser eventuell aufbereitet werden und kann nicht einfach entsorgt werden. Der geschlossene Kreislauf erfordert einen komplexeren Aufbau, es benötigt ein System aus Pumpe, Rohren oder Schläuchen und Wärmetauscher. Am Wärmetauscher müssen eventuell Lüfter eingesetzt werden. Die Pumpe bewältigt den Druckverlust der Leitungen und den an der Wärmequelle. Um die Brennstoffzelle vor Schäden, die durch das Wasser verursacht werden könnten, zu schützen und um einen langfristigen und sicheren Betrieb zu gewährleisten, können dem Wasser Zusätze beigemischt werden. Diese haben unterschiedliche Aufgaben wie Korrosionsschutz, Antifouling, Verhinderung von Blasenbildung oder elektrischer Leitfähigkeit und weiteres. Die Zusätze müssen auf die Materialien, auf die sie Wirkung haben sollen und andere, mit denen das Wasser in Berührung kommt abgestimmt werden. So darf es z.B. nicht zu Beeinträchtigungen an Schläuchen/ Rohren usw. kommen.

4.5 Fazit

Wasser hat eine höhere Wärmekapazität als Luft und kann somit mehr Wärme aufnehmen, bzw. benötigt einen geringeren Massenstrom, um die gleiche Wärmemenge abzuführen. Wie gut die Wärme überhaupt auf das Medium übertragen werden kann, hängt maßgeblich vom Wärmeübergangskoeffizienten α ab. Typische Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten bei erzwungener Konvektion sind $25\text{-}250\text{ W/m}^2\text{K}$ bei Gasen und $50\text{-}20000\text{ W/m}^2\text{K}$ bei Flüssigkeiten²⁷. Der Wärmeübergangskoeffizient bei Gasen ist somit erheblich kleiner. Um trotzdem auf ähnliche Wärmeströme für Gase nach (10) zu kommen, wären eine viel größere Kontaktfläche zwischen den Medien und/ oder größere Geschwindigkeiten der Luft nötig. Thermodynamisch betrachtet hat die Wasserkühlung ganz klar Vorteile gegenüber der Luftkühlung. Die Wasserkühlung erfordert aber einen größeren Installationsaufwand mit mehreren Komponenten und ist damit deutlich teurer. Das

²⁷ Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas, B1 22

bedeutet auch, dass das System anfälliger ist, es häufiger zu Leckagen und Ausfällen kommen kann und der Wartungsaufwand steigt. Die Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Installations- und Betriebskosten, Sicherheitsaspekte sowie der benötigte Bauraum und das emittierte Geräusch spielen neben der primären Kühlfunktion eine entscheidende Rolle bei der Auswahl einer Kühlmethode. Auch in Zukunft kommt Lüftern eine zentrale Bedeutung zu, wenn eine effiziente und zuverlässige Kühlung gefordert wird.

5 Sicherheit im Labor

5.1 Einleitung

Dieser Teil der Arbeit behandelt die Sicherheit für den Umgang mit dem Brennstoffzellen-Versuchsstand. Die primären Ziele sind dabei die Sicherheit und Gesundheit von Personen sowie der Schutz der Umwelt. Der Betrieb eines Labors mit Gefahrstoffen und Apparaturen birgt besondere Gefahren für die Gesundheit der dort tätigen Personen. Diese benötigen genaue Kenntnisse über Eigenschaften der verwendeten Stoffe und deren Gefahren, um sicher im Labor arbeiten zu können. Eine absolute Sicherheit ist nicht erreichbar, da immer Gefahren durch unkalkulierbare Risiken bestehen. Diese können z.B. durch menschliches Versagen oder unvorhergesehene, gefährliche Reaktionen hervorgerufen werden. Daher muss im Rahmen des Möglichen versucht werden, diese Risiken zu minimieren.

„Langjährige Untersuchungen des Unfallgeschehens haben eindeutig bewiesen, dass – trotz aller Vorsichtsmaßnahmen – Menschliches Verhalten in der überwiegenden Zahl der Unfälle der auslösende Faktor war.“²⁸

An dem Versuchsstand werden Studenten nur für kurze Zeiten arbeiten. Das bedeutet, dass ständig neue Benutzer tätig sein werden und diese sich nicht über die Zeit, sicheres Verhalten am Arbeitsplatz aneignen können. Daher wird in diesem Abschnitt ein Konzept entwickelt, wie die Studenten für einen sicheren Umgang mit dem Brennstoffzellen-

²⁸ Vgl. Bernabei, Dante; Merck, E, (Hrsg.): Sicherheit – Handbuch für das Labor, Darmstadt (GIT Verlag GmbH), 1991, S.8

Versuchsstand vorbereitet werden können. Es wird unter Beachtung von Gesetzen, Verordnungen und Regeln für Gefahrstoffe untersucht, welche Maßnahmen für die Sicherheit erforderlich sind. Außerdem wird dabei auf mögliche Gefahrenquellen aufmerksam gemacht, wie beim Auftreten einer Gefahr vorgegangen werden sollte und wie eine Gefährdung vermieden werden kann.

5.2 Gesetze, Verordnungen und Regeln

Für die Errichtung von Arbeitsstätten gibt es gesetzliche Vorgaben, welche der Arbeitgeber beachten muss. Viele dienen der Sicherheit und dem Schutz der Beschäftigten.

„Der Arbeitgeber darf eine Tätigkeit mit Gefahrstoffen erst aufnehmen lassen, nachdem eine Gefährdungsbeurteilung nach § 6 durchgeführt und die erforderlichen Schutzmaßnahmen nach Abschnitt 4 ergriffen worden sind.“²⁹

Im Folgenden werden für das Labor relevante Gesetze und Verordnungen sowie Regeln für deren Umsetzung dargestellt.

5.2.1 Arbeitsschutzgesetz

Das „Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG)“ verpflichtet den Arbeitgeber zu bestimmten Maßnahmen. Der Arbeitgeber muss erforderliche Maßnahmen des Arbeitsschutzes treffen und hat von folgenden allgemeinen Grundsätzen³⁰ auszugehen:

1. Die Arbeit ist so zu gestalten, dass eine Gefährdung für das Leben sowie die physische und die psychische Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten wird;
2. Gefahren sind an ihrer Quelle zu bekämpfen;

²⁹ Vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV), 2010, § 7 i. d. F. vom 3.2. 2015, in: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gefstoffv_2010/gesamt.pdf, (03.März.2016).

³⁰ Vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG), 1996, § 4, i. d. F. vom 31.08.2015, <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf>, (05.März.2016).

3. bei den Maßnahmen sind der Stand von Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen;
4. Maßnahmen sind mit dem Ziel zu planen, Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einfluss der Umwelt auf den Arbeitsplatz sachgerecht zu verknüpfen;
5. individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig zu anderen Maßnahmen;
6. spezielle Gefahren für besonders schutzbedürftige Beschäftigtengruppen sind zu berücksichtigen;
7. den Beschäftigten sind geeignete Anweisungen zu erteilen;
8. mittelbar oder unmittelbar geschlechtsspezifisch wirkende Regelungen sind nur zulässig, wenn dies aus biologischen Gründen zwingend geboten ist.

Nach Paragraph 5 des ArbSchG muss der Arbeitgeber durch eine Beurteilung für die Gefährdung der Beschäftigten ermitteln, welche Maßnahmen des Arbeitsschutzes erforderlich sind. Beschäftigte sind im Sinne dieses Gesetzes unter anderem Personen, die zu ihrer Berufsbildung beschäftigt sind und Arbeitgeber sind Personen, die diese beschäftigen.

5.2.2 Betriebssicherheitsverordnung

Die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) gilt für die Verwendung von Arbeitsmitteln. Als Arbeitsmittel gelten demnach Werkzeuge, Geräte, Maschinen oder Anlagen, die für die Arbeit verwendet werden. Das Ziel der Verordnung ist es, die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln zu gewährleisten. Dies soll insbesondere durch die Wahl geeigneter Arbeitsmittel, die für den vorhergesehenen Verwendungszweck geeignete Gestaltung von Arbeitsverfahren und der Qualifikation und Unterweisung von Beschäftigten erreicht werden.³¹

³¹ Vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV), 2015, § 1 u. 2, i. d. F. vom 13.07.2015, in: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/betrsv_2015/gesamt.pdf, (06.März.2016).

5.2.3 Gefahrstoffverordnung

Die „Verordnung zum Schutz vor Gefahrenstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV)“ dient der Umsetzung einer Reihe von Richtlinien und regelt umfassend die Schutzmaßnahmen für Beschäftigte bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen sowie den Schutz der Umwelt. Dafür müssen eine Gefährdungsbeurteilung für Gefahrstoffe und eventuell Schutzmaßnahmen durchgeführt werden. Gefahrstoffe sind gefährliche, explosionsfähige, gesundheits- und sicherheitsgefährdende Stoffe, sowie alle Stoffe denen ein Arbeitsplatzgrenzwert zugewiesen wurde. Als gefährlich werden Stoffe bezeichnet, welche explosionsgefährlich, brandfördernd, hochentzündlich, leichtentzündlich, entzündlich, sehr giftig, giftig, gesundheitsschädlich, ätzend, reizend, sensibilisierend, krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend, erbgutverändernd und/ oder umweltgefährdend sind. Der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) steht für die Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, bis zu dem eine akute oder chronische Schädigung der Gesundheit der Beschäftigten nicht zu erwarten ist.³²

5.2.4 Technisches Regelwerk zur Gefahrstoffverordnung

Das „Technische Regelwerk zur Gefahrstoffverordnung“ enthält technische Regeln für Gefahrenstoffe (TRGS), welche die Regeln und Erkenntnisse der GefStoffV sowie Regelungen aus EG-Vorschriften umfassen. Sie entsprechen dem jeweiligen Stand der Technik und sonstigen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Zur Festlegung von Schutzmaßnahmen hat der Arbeitgeber die für ihn zutreffenden TRGS zu berücksichtigen, oder er muss gleichwertige Schutzmaßnahmen treffen. Der Arbeitgeber hat zu prüfen, ob die Tätigkeiten mit Gefahrstoffen den in der TRGS beschriebenen Vorgaben entsprechen und wie die Vorgaben der TRGS erreicht werden können. Die erforderlichen technischen Schutzmaßnahmen sind entsprechend der aktuellen TRGS festzulegen bzw. anzupassen, wenn kein gleichwertiges Schutzniveau gewährleistet ist.

³² Vgl. Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), § 2 u. § 3, 2010

Im Folgenden ist eine Übersicht der technischen Regeln dargestellt. Die Regeln sowie Änderungen und Ergänzungen werden auf der Internetseite der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin veröffentlicht.³³

TRGS der Reihe 200	Inverkehrbringen von Stoffen, Zubereitungen und Erzeugnissen
TRGS der Reihe 400	Gefährdungsbeurteilung
TRGS der Reihe 500	Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen
TRGS der Reihe 600	Ersatzstoffe und Ersatzverfahren
TRGS der Reihe 700 und 800	Brand- und Explosionsschutz
TRGS der Reihe 900	Grenzwerte, Einstufungen, Begründungen und weitere Beschlüsse

Tabelle 8: Übersicht der TRGS

Die TRGS 400 beschreibt Vorgehensweisen zur Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung nach § 6 GefStoffV. Sie bindet die Vorgaben der GefStoffV in den durch das Arbeitsschutzgesetz (§§ 5 und 6 ArbSchG) vorgegebenen Rahmen ein.

Für Explosionsgefährdungen durch Gefahrstoffe wird die TRGS 720³⁴ herangezogen. Der Anwendungsbereich gilt für die Beurteilung der Gefährdungen sowie für die Auswahl und Durchführung geeigneter Schutzmaßnahmen. Eine explosionsfähige Atmosphäre ist hiernach ein Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen unter atmosphärischen Bedingungen, welches nach Zündung in einer selbstständigen Fortpflanzung der Reaktion verbrennt. Eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre besteht bei großer Menge des Gemisches, so dass besondere Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Dabei bedeutet der Begriff Explosion, dass ein Temperatur- oder Druckanstieg oder beides gleichzeitig stattfindet.

Ein Bereich, in dem eine explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann, gilt als Explosionsgefährdeter Bereich und erfordert besondere Schutzmaßnahmen. Diese Bereiche werden, für den Normalbetrieb, nach Häufigkeit und Dauer in Zonen eingeteilt um geeignete Schutzmaßnahmen festlegen zu können. Zone 0 ist ein Bereich, in der gefährliche

³³ Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Themen von A-Z, Gefahrstoffe, Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), Übersicht über die Bekanntmachung zu Technischen Regeln, in:

<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-Bekanntmachungen.html>, (20.Feb.2016).

³⁴ Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Themen von A-Z, Gefahrstoffe, Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), Übersicht über die Bekanntmachung zu Technischen Regeln, TRGS 720, 2006, in:

http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebsicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152.pdf?__blob=publicationFile&v=3, (20.Feb.2016).

explosionsfähige Atmosphären ständig und lange auftreten. Bei Zone 1 treten diese gelegentlich auf und bei Zone 2 tritt diese nur selten und nur kurzzeitig auf. Für die Beurteilung der Gefährdung und die Festlegung von Maßnahmen gibt es mehrere bedeutsame, sicherheitstechnische Kenngrößen die einbezogen werden sollten:

- Explosionspunkte (UEP und OEP)
- Explosionsgrenzen (UEG und OEG)
- Sauerstoffkonzentration (SGK)
- Mindestzündenergie (MZE)
- Mindestzündtemperatur

Im Rahmen seiner Verpflichtung nach § 5 ArbSchG hat der Arbeitgeber die Gefährdung seiner Beschäftigten durch Explosionen zu ermitteln, zu beurteilen und die notwendigen Schutzmaßnahmen abzuleiten. Dafür werden die TRGS 721 und die TRGS 722 angewendet.

Wenn die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre nicht sicher verhindert werden kann, muss der Arbeitgeber laut BetrSichV Beurteilungen dazu durchführen. Die TRGS 721³⁵ konkretisiert die Anforderungen an die Beurteilung von Explosionsgefährdungen durch explosionsfähige Atmosphären. Für die Beurteilung müssen folgende Punkte beachtet werden:

1. die Wahrscheinlichkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre,
2. Ermittlung der Menge einer explosionsfähigen Atmosphäre,
3. Beurteilung der Explosionsauswirkungen.

³⁵ Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: TRGS 721, 2006, in: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152-Teil-1.pdf?__blob=publicationFile&v=3, (21.Feb.2016).

Die TRGS 722³⁶ konkretisiert die Anforderungen zur Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre. Sie wird Angewendet für Arbeitsmittel, für Überwachungsbedürftige Anlagen und für Tätigkeiten.

Für Brandschutzmaßnahmen kann die TRGS 800³⁷ herangezogen werden. Die Höhe der Brandgefährdung ist von verschiedenen Aspekten abhängig. Dazu zählen vorwiegend Entzündlichkeit (Brennbarkeit), Explosionsgrenzen, Mindestzündenergie, Verbrennungsgeschwindigkeit, Menge und physikalische Randbedingungen (z. B. Temperatur, Luftströmungen, Luftfeuchtigkeit, Raumvolumen, Raumfläche, Raumhöhe). Es werden normale, erhöhte und hohe Brandgefährdungen unterschieden. Eine normale Brandgefährdung liegt vor, wenn nur geringe Mengen an brennbaren Gefahrstoffen vorliegen und die Wahrscheinlichkeit der Brandentstehung sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit gering sind. Eine hohe Brandgefährdung besteht bei größeren Mengen brennbarer Gefahrstoffen, wenn mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem Brand zu rechnen ist und eine schnelle und unkontrollierbare Brandausbreitung oder eine große Rauch- oder Wärmefreisetzung zu erwarten ist. Um erhöhte Brandgefährdung handelt es sich, wenn ein Kriterium der normalen Brandgefährdung nicht erfüllt ist oder nicht alle Kriterien für die hohe Brandgefährdung erfüllt sind.

5.2.5 Zusammenfassung der Gesetze und daraus abgeleitete Vorgehensweisen

Eine Tätigkeit mit Gefahrenstoffen darf erst aufgenommen werden wenn eine Gefährdungsbeurteilung und die erforderlichen Schutzmaßnahmen ergriffen worden sind. Können Gefährdungen der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit Gefahrenstoffen nicht vollständig ausgeschlossen werden, sind diese auf ein Minimum zu reduzieren. Die Rangfolge der Maßnahmen ist wie folgt zu beachten:

³⁶ Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: TRGS 722, 2012, in: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152-Teil-2.pdf?__blob=publicationFile&v=6, (21.Feb.2016).

³⁷ Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: TRGS 800, 2010, in: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-800.pdf?__blob=publicationFile&v=4, (03.März.2016).

1. Substitutionsprüfung
2. technische Schutzmaßnahmen
3. organisatorische Maßnahmen
4. Schutzausrüstung
5. Hinweisende Sicherheitstechnik

5.3 Gefährdungsbeurteilung

Die Gefährdungsbeurteilung für die Handhabung mit Gefahrenstoffen wird im § 6 der GefStoffV in Verbindung mit § 5 des ArbSchG grundsätzlich geregelt. Der Arbeitgeber hat demnach festzustellen, ob bei der Arbeit der Beschäftigten Gefahrstoffe freigesetzt werden können. Wenn dies möglich ist, muss er eine Beurteilung für die Gefährdung und Sicherheit der Beschäftigten durchführen und diese dokumentieren. Dabei sind folgende Punkte³⁸ zu beachten:

1. gefährliche Eigenschaften der Stoffe oder Zubereitungen, einschließlich ihrer physikalisch-chemischen Wirkungen,
2. Informationen des Herstellers oder Inverkehrbringers zum Gesundheitsschutz und zur Sicherheit insbesondere im Sicherheitsdatenblatt,
3. Art und Ausmaß der Exposition unter Berücksichtigung aller Expositionswege;
4. Möglichkeiten einer Substitution,
5. Arbeitsbedingungen und Verfahren, einschließlich der Arbeitsmittel und der Gefahrstoffmenge,
6. Arbeitsplatzgrenzwerte und biologische Grenzwerte,
7. Wirksamkeit der ergriffenen oder zu ergreifenden Schutzmaßnahmen,
8. Erkenntnisse aus arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen nach der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge.

³⁸ Vgl. Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), 2015, § 6

5.3.1 Gefährdung durch Gefahrstoffe

Wasserstoff ist unter Normalbedingungen ein hochentzündliches Gas und somit ein Gefahrstoff. Es ist mit einer Dichte von $0,09 \text{ Kg/m}^3$ das leichteste Gas des Periodensystems. Nach einer Freisetzung steigt es schnell nach oben und verteilt sich dabei. Da es farb- und geruchlos ist, ist es nur mit speziellen Geräten aufzuspüren. In sehr hohen Konzentrationen kann Wasserstoff erstickend wirken. Für den Menschen ist es ungiftig, bei Haut oder Augenkontakt sind keine schädlichen Wirkungen zu erwarten. Wasserstoff schadet nicht der Umwelt und hat keinen Arbeitsplatzgrenzwert (siehe Anhang IV).

Wasserstoff ist für Lehrzwecke zum Betrieb der Brennstoffzelle vorgesehen. Brennstoffzellen können zwar auch mit anderen Gasen betrieben werden, diese sind aber nicht weniger gefährlich als Wasserstoff. Somit entfällt eine Substitution durch andere Stoffe. Es werden nur sehr geringe Mengen Wasserstoff verwendet, jedoch kann ein Austreten des Gases in die Umgebung und damit die Bildung eines brennbaren Gemisches nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Stickstoff ist nicht als Gefahrenstoff klassifiziert, kann jedoch ebenfalls in hohen Konzentrationen erstickend wirken.

5.3.2 Gefährdung durch Brände

Wasserstoff ist im Sinne der TRGS ein brennbarer Gefahrstoff, da es mit der Kennzeichnung H220 versehen ist. Diese Kennzeichnung ist ein Gefahrenhinweis für extrem entzündbare Gase im Rahmen des „Global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS)“. Wasserstoff ist nur im Gemisch mit Luft entzündbar, bei Wasserstoffkonzentrationen im Bereich von 4 – 77 Vol. %. Bei der Mindestzündtemperatur von 560 °C würde sich das Gemisch von selbst entzünden. Bei niedrigeren Temperaturen ist dafür eine Zündquelle erforderlich, die eine Mindestzündenergie von $0,02 \text{ mJ}$ erzeugt. Die elektrostatische Entladung eines menschlichen Körpers setzt bei einem schwachen Funken schon 10 mJ Energie frei und würde damit schon ein Wasserstoff/Luftgemisch entzünden.³⁹ Wasserstoff verbrennt mit unsichtbarer Flamme.

³⁹ Vgl. Töppler, Johannes: Wasserstoff und Brennstoffzelle Technologien und Marktperspektive, S. 8

Aufgrund der geringen Massenströme ist ein Erreichen der Mindestkonzentration für ein brennbares Gemisch in großen Räumen sehr unwahrscheinlich. Die Wasserstoffquelle soll in einem umschlossenen, kleinen Raum von ca. $0,5 \text{ m}^3$ im Versuchstisch untergebracht werden. Würde ein Wasserstoffgenerator eingesetzt werden, der Wasserstoff in der erforderlichen Menge von 3500 ml/min erzeugt und diese komplett in diesen Raum ausgeblasen, bräuchte es weniger als 6 min um die kritische Konzentration von 4 Vol. % zu erreichen. In diesem Bereich sind stromführende Geräte untergebracht, die nicht für den Einsatz in explosionsgefährdeten Zonen geeignet sind. Ein Brand würde zu materiellem Schaden führen und könnte Personen verletzen. Druckbehälter können bei Erwärmung bersten und durch umherfliegende Teile großen Schaden verursachen.

Dass das Gas in der Menge wie im Beispiel in diesen Raum ausströmt, ist relativ unwahrscheinlich. Dass eine kritische Konzentration von 4 Vol. % erreicht wird kann aber nicht ausgeschlossen werden. Der Bereich um den Wasserstoffgenerator ist als Zone 2 zu bewerten.

5.3.3 Gefährdung durch Explosion

Wasserstoff kann in der Luft eine potentielle explosive Atmosphäre bilden. Bei Erreichen einer Wasserstoffkonzentration von 18 Vol. % ist bei einer Entzündung mit einer Explosion zu rechnen. Um diese Konzentration in einem Raum von $0,5 \text{ m}^3$ wie im vorherigen Beispiel zu erreichen, würde es fast 25 min dauern. Eine Explosion ist eine sehr schnelle Verbrennung mit einer Druckerhöhung. Durch umherfliegende Teile könnte diese zu noch größerem Schaden führen.

5.3.4 Zusammenfassung der Beurteilung

Die Gefährdung durch Brand- und Explosionsgefahren ist als sehr hoch einzustufen. Dies ergibt sich durch die mögliche Freisetzung des Gefahrstoffes Wasserstoff, der als extrem entzündbares Gas gekennzeichnet ist. Zusätzlich gibt es durch stromführende Geräte mögliche Zündquellen. In einem explosionsgefährdeten Bereich dürfen nur Geschützte Geräte verwendet werden. Dementsprechend müssen Maßnahmen ergriffen werden, die das Risiko von Gefährdungen minimieren.

5.3.5 Zu ergreifende Schutzmaßnahmen

Grundsätzlich muss versucht werden jede ungewollte Mischung von Wasserstoff und Luft zu vermeiden. Daher sollte vor dem Einleiten von Wasserstoff das System luftfrei gespült werden und wasserstoffführende Komponenten sollten regelmäßig auf Dichtigkeit untersucht werden. Da ein Austreten von Wasserstoff nicht mit Sicherheit vermieden werden kann, müssen verschiedene technische sowie organisatorische Maßnahmen getroffen werden, die die Bildung oder Zündung eines explosiven Gemisches sowie deren Auswirkungen verhindern können. So sollte eine Gaswarnanlage installiert werden, die bei kritisch werdenden Luftkonzentrationen Alarm schlägt und im Idealfall durch automatische Regelungen die Gas- oder Stromzufuhr stoppt. Der Lagerraum sowie der Durchführungsraum müssen gut durchlüftet und mögliche Zündquellen beseitigt oder geschützt werden. Stromführende oder leitende Teile sollten möglichst geerdet werden. Um das Risiko von Gefährdungen durch fehlerhafte Anwendung zu minimieren, sollen die Beschäftigten vor der Benutzung der Brennstoffzelle eine Sicherheitsbelehrung bekommen. Dabei muss auf mögliche Gefahren hingewiesen werden sowie auf korrektes Verhalten bei Gefährdung. Zusätzlich soll der Versuchsstand eine Hinweistafel erhalten, auf der die wichtigsten sicherheitsrelevanten Informationen für die Beschäftigten jederzeit ablesbar sind. Die Inhalt der Sicherheitsbelehrung und der Hinweistafel sowie weitere dafür nötige Sicherheitsausrüstungen werden im weiteren Verlauf eingehend behandelt.

5.4 Sicherheitstechnische Anlagen und Ausrüstungen

Nach der GefStoffV §7 ist der Arbeitgeber für die Schutzausrüstung der Beschäftigten verantwortlich. Diese müssen die bereitgestellte Schutzausrüstung verwenden, solange eine Gefährdung besteht. Außerdem hat der Arbeitgeber die Funktion und die Wirksamkeit der technischen Schutzmaßnahmen regelmäßig, mindestens jedoch jedes dritte Jahr, zu überprüfen. Das Ergebnis der Prüfungen ist aufzuzeichnen und vorzugsweise zusammen mit der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung aufzubewahren.

Im Folgenden wird der Einsatz von möglichen Schutzmaßnahmen untersucht.

5.4.1 Raumluftechnische Anlage oder Abzugshaube

Da es sich nicht um ein stationäres Labor handelt, ist eine raumluftechnische Anlage nicht zu realisieren. Bei der Brennstoffzelle handelt es sich um einen sehr kleinen Maßstab für Laborzwecke, deshalb wird nur mit relativ geringen Volumenströmen der Gase gearbeitet. Eine Belüftung durch geöffnete Fenster sollte aber trotzdem stattfinden. Eine Abzugshaube ist nicht erforderlich, da keine toxikologischen Wirkungen der Gase bekannt sind.

5.4.2 Konstruktive Maßnahmen

Da sich die Wasserstoffversorgung mit nicht explosionsgeschützten, elektrischen Geräten in einem geschlossenen Raum unter dem Versuchstisch befinden soll, sind konstruktive Maßnahmen erforderlich, die die Bildung eines explosiven Gemisches verhindern oder erschweren sollen. So könnten in die Wände Aussparungen gesetzt werden, damit das Wasserstoffgas leicht entweichen kann. Zusätzlich sollte die Wasserstoffquelle von einem gesonderten, gasdichten Gehäuse umschlossen werden, in dem sich austretendes Gas sammeln würde. Druckflaschen für Sauerstoff oder Stickstoff sollten räumlich möglichst getrennt von der Wasserstoffversorgung untergebracht werden. Im Falle eines Brandes sollten diese schnell zu Entfernen oder zu Kühlen sein können.

5.4.3 Gassensoren

Gassensoren ermitteln Gaskonzentrationen in der Umgebungsluft und wandeln diese Information in ein elektrisches Signal um. Dabei wird die Konzentration in der Regel in über einen Strom von 4 bis 20 mA zur weiteren Verarbeitung ausgegeben. So könnte das Signal bei Entstehung einer gefährlichen Wasserstoffkonzentration dazu verwendet werden, die Stromversorgung des Versuchsstandes abzuschalten. An Gassensoren können zusätzlich Grenzwertmelder angeschlossen werden, welche bei Erreichen bestimmter Grenzwerte visuelle oder akustische Alarme auslösen. Da Wasserstoff sehr leicht ist und schnell nach oben steigt, bilden sich gefährliche Konzentrationen eher in höheren Bereichen. Daher sollten Gassensoren für Wasserstoff möglichst weit oben angebracht werden.

5.4.4 Gaslecksuchgeräte

Gaslecksuchgeräte werden mobil eingesetzt um das Vorhandensein von brennbaren Gasen zu identifizieren. Dabei handelt es sich um handliche Geräte mit langen, flexiblen Schlauchsonden, um auch an unzugängliche Stellen zu kommen. Sie ermöglichen es, sehr geringe Gaskonzentrationen in Bereichen von wenigen ppm aufzuspüren. Ein Gaslecksuchgerät kann verwendet werden, um das Wasserstoffsystem regelmäßig und schnell auf Dichtheit zu untersuchen.

5.4.5 Lecksuchspray

Eine weitere Möglichkeit zum Auffinden von undichten Stellen ist die Verwendung eines Lecksuchsprays. Dafür wird eine Prüfflüssigkeit auf die zu prüfende Fläche mit einer Sprühdose aufgebracht. An Leckagen bildet die Flüssigkeit sichtbare Schaumblasen. Das Gas kann zu schweren Augenreizungen führen und sollte daher nur mit Schutzkleidung verwendet werden. Der Druckbehälter stellt ebenfalls eine Gefahr dar, deshalb wird hier von einem Lecksuchspray abgeraten.

5.4.6 Schutzkleidung

Wasserstoff ist für den Menschen ungiftig, weshalb kein Atemschutz verwendet werden muss. Allerdings wird im Sicherheitsdatenblatt für Wasserstoff darauf hingewiesen, dass Opfer nach Einatmen unter Benutzung eines umluftunabhängigen Atemgerätes in frische Luft zu bringen sind. Der Kontakt mit Haut und Augen ist unbedenklich. Da jedoch mit großem Druck gearbeitet wird, ist das Tragen von Schutzbrillen durch die Beschäftigten sinnvoll.

5.4.7 Löschmittel

Laut dem Sicherheitsdatenblatt im Anhang III sind trockenes Pulver, Wasser als Sprühstrahl oder als Nebel geeignete Löschmittel. Ungeeignet dagegen sind Kohlendioxid und Wasser als Strahl. Mit dem Wassersprühstrahl oder Wassernebel können effektiv der Rauch bei Bränden niedergeschlagen und gefährdete Druckbehälter gekühlt werden, sollten diese nicht

aus dem Wirkungsbereich des Brandes entfernt werden können. Ausströmendes brennendes Gas sollte nur gelöscht werden, wenn es unbedingt notwendig ist, da die Gefahr einer explosionsartigen Wiederentzündung möglich ist.

5.5 Sicherheitsinformationen für Anwender

Nach § 14 der Gefahrstoffverordnung hat der Arbeitgeber bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen auftretenden Gefahren und die erforderlichen Schutzmaßnahmen sowie Verhaltensregeln in einer Betriebsanweisung festzulegen. Diese Betriebsanweisung muss den Beschäftigten in verständlicher Form und Sprache schriftlich sowie mündlich nahegelegt werden. Bei maßgeblichen Veränderungen der Arbeitsbedingungen muss diese aktualisiert werden. Die Beschäftigten müssen zudem Zugang zu Informationen, wie Sicherheitsdatenblätter über die gefährlichen Stoffe haben, mit denen sie Tätigkeiten ausüben.

5.5.1 Hinweistafel

Den Anwendern des Versuchsstandes soll eine Betriebsanweisung in Form einer Hinweistafel zugänglich gemacht werden, die der Gefährdungsbeurteilung Rechnung trägt. Die Betriebsanweisung muss Informationen über die am Arbeitsplatz vorhandenen oder entstehenden Gefahrstoffe und die dadurch möglichen Gefährdungen der Gesundheit und der Sicherheit enthalten. Zum Schutz der Beschäftigten müssen Informationen zu Maßnahmen aufgezeigt werden, die am Arbeitsplatz durchzuführen sind. Dazu zählen insbesondere Hygienevorschriften, Informationen die zum Verhindern einer Exposition zu ergreifen sind und Informationen zum Tragen und Verwenden von Schutzausrüstungen und Schutzkleidung. Die Betriebsanweisung muss ebenfalls Informationen über Maßnahmen im Gefahrenfall enthalten. Im Anhang IV befindet sich eine für den Versuchsstand ausgearbeitete Hinweistafel.

5.5.2 Sicherheitsbelehrung

Anhand der Betriebsanweisung sind die Beschäftigten mündlich, in verständlicher Form und Sprache, über alle auftretenden Gefährdungen und entsprechenden Schutzmaßnahmen zu unterweisen. Zu der Unterweisung gehört eine allgemeine arbeitsmedizinisch-toxikologische

Beratung. Die Unterweisung muss vor Aufnahme der Beschäftigung und danach mindestens jährlich arbeitsplatzbezogen durchgeführt werden. Inhalt und Zeitpunkt der Unterweisung sind schriftlich festzuhalten und von den Unterwiesenen durch Unterschrift zu bestätigen.

Die schriftliche Dokumentation kann formlos geschehen und sollte folgende Angaben⁴⁰ enthalten:

- Inhalt/ Themen
- Teilnehmer
- Name des Unterweisenden
- Datum der Unterweisung

Ein vorgefertigtes Formular für die Unterweisung befindet sich im Anhang V.

5.6 Sicherheitsprüfungen

Die Prüfung von Arbeitsmitteln und überwachungsbedürftigen Anlagen wird in § 14 und § 15 der Betriebssicherheitsverordnung vorgeschrieben. Die Funktion und Wirksamkeit technischer Schutzmaßnahmen soll nach der Gefahrstoffverordnung regelmäßig, mindestens jedoch jedes dritte Jahr, überprüft werden. Ausgehend von der Gefährdungsbeurteilung sind Art, Umfang und Prüffristen selbst festzulegen. Es muss sichergestellt werden, dass Prüfungen nur von fachlich geeignetem Personal durchgeführt werden und Schäden rechtzeitig entdeckt werden. Die Prüfungen sind zu dokumentieren und zusammen mit der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung aufzubewahren.

5.6.1 Vorbereitungen

Zur Sicherstellung der regelmäßigen Prüfungen ist eine vollständige Erfassung aller zu prüfenden Arbeitsmittel und Einrichtungen notwendig sowie eine Festlegung von Prüffristen und Prüfumfang. Dabei sind Herstellerinformationen wie Betriebsanleitungen, EG-Konformitätserklärungen oder ähnliches sowie Wartungsverträge zu berücksichtigen.

⁴⁰ Vgl. VBG.de: Gesetze/Vorschriften. Unterweisung, in: <https://www.vbg.de/apl/tr/trgs555/5.htm>, (15.März.2016).

5.6.2 Durchführung

Vor der erstmaligen Inbetriebnahme des Laboratoriums sollte eine sehr umfassende Prüfung durchgeführt werden. Dabei sollten besonders die wasserstoffführenden Komponenten und die Wirksamkeit der technischen Schutzmaßnahmen geprüft werden:

- **Sichtprüfung:**
Mit der Sichtprüfung können oberflächliche und grobe Mängel identifiziert und beseitigt werden. Geprüft werden muss außerdem, ob alle für den Versuchsstand und die Prüfung benötigten Arbeitsmittel und Einrichtungen vorhanden sind.
- **Funktionsprüfung:**
Alle technischen Geräte müssen auf Funktion und Wirksamkeit getestet werden.
- **Prüfung mit Mess- und Prüfmitteln:**
Wasserstoffführende Komponenten und Schutzeinrichtungen müssen auf Dichtheit untersucht werden.

Prüfungen sollten regelmäßig durchgeführt werden. Sichtprüfungen sollten dabei immer durchgeführt werden. So kann vor jedem Betrieb der Brennstoffzelle die Vollständigkeit der erfassten, zum Versuchsstand gehörenden Arbeitsmittel und Schutzausrüstungen gezählt werden. Halbjährlich könnten die Dichtheitsprüfungen gemacht werden. Dabei sollten geringe Wasserstoffmengen durch die vorgesehenen Leitungen geführt und elektrische Geräte, soweit möglich, ausgeschaltet werden. Mit einem Gaslecksuchgerät sind die Leitungen und Armaturen auf Undichtigkeiten zu untersuchen. Um die Dichtheit des Schutzgehäuses des Wasserstoffgenerators sowie die Funktion der Gaswarnanlage zu überprüfen, kann darin eine geringe Menge Wasserstoff freigesetzt werden. Das Gehäuse kann ebenfalls mit einem Gaslecksuchgerät auf Dichtheit getestet werden.

5.6.3 Dokumentation

Die Dokumentation der Prüfung von Arbeitsmitteln muss mindestens bis zur nächsten Prüfung ausbewahrt werden. Der Inhalt der Dokumentation muss mindestens Auskunft geben über⁴¹:

1. Art der Prüfung
2. Prüfumfang
3. Ergebnis der Prüfung

Zusätzlich ist es sinnvoll, das Datum der aktuellen sowie der nächsten Prüfung in die Dokumentation einzufügen.

5.7 Fazit

Um eine möglichst hohe Sicherheit für den Brennstoffzellenversuchsstand zu ermöglichen, wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit verschiedene Maßnahmen zur Prävention von Schäden an Personen untersucht. So soll durch ein gasdichtes Gehäuse um die Wasserstoffquelle der Kontakt von Wasserstoff zu elektrischen Geräten verhindert werden. Zur zusätzlichen Sicherheit soll eine Gaswarnanlage zur direkten Messung der Wasserstoffkonzentration in dem Gehäuse sowie der Raumluft installiert werden. Diese kann im Gefahrenfall Alarm melden und Schaltungen aktivieren, die zum Abschalten der Gas- oder Stromversorgung führen. Schutzkleidung für den persönlichen Schutz der Anwender sowie Brandlöschmittel sollen Bestandteil des mobilen Labors sein. Regelmäßige Prüfungen gewährleisten die Funktion und Wirksamkeit aller Schutzmaßnahmen.

⁴¹ Vgl. Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), 2015, § 14

Quellenverzeichnis

Baehr, H.D., Stephan, Karl: Wärme - und Stoffübertragung, 8. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2013.

Bernabei, Dante; Merck, E, (Hrsg.): Sicherheit – Handbuch für das Labor, Darmstadt (GIT Verlag GmbH), 1991.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Themen von A-Z, Gefahrstoffe, Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), Übersicht über die Bekanntmachung zu Technischen Regeln, in: <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-Bekanntmachungen.html>, (20.Feb.2016).

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: TRGS 720, 2006, in: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152.pdf?__blob=publicationFile&v=3, (20.Feb.2016).

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: TRGS 721, 2006, in: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152-Teil-1.pdf?__blob=publicationFile&v=3, (21.Feb.2016).

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: TRGS 800, 2010, (v. 31.01.2011), in: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-800.pdf?__blob=publicationFile&v=4, (03.März.2016).

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: TRGS 722, 2012, in: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TRBS/pdf/TRBS-2152-Teil-2.pdf?__blob=publicationFile&v=6, (21.Feb.2016).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG), 1996, i. d. F. vom 31.08.2015, <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf>, (05.März.2016).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Verordnung zum Schutz vor Gefahrenstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV), 2010, i. d. F. vom 3.2. 2015, http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gefstoffv_2010/gesamt.pdf, (03.März.2016).

Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz: Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG - 2014, 01.08.2014, http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf (15.Jan.2016).

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV), 2015, § 4, i. d. F. vom 13.07.2015, <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf>, (06.März.2016).

Chemgapedia.de; Lexikon – Brennstoffzelle, <http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/brennstoffzelle.glos.html>

Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 24., aktualisierte Auflage, Berlin Heidelberg (Springer-Verlag), 2014.

Kabza, Alexander: Funktion und Aufbau einer PEMFC, 2002, (letzte Änderung am 2.04.2015), <http://www.pemfc.de/pemfc.html>, (20.Jan.2016).

Kuhn, Peter: Erarbeitung eines Brennstoffzellen-Versuchsstands für das Modul „Electrochemical Energy Conversion – Fuel Cell Systems“, Bachelorarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, August 2015.

Lehmann, Jochen; Lauschtinetz, Thomas: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014.

Rexroth Bosch AG: Produktkatalog: Mechanik Grundelemente, 2015, http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&objectlang=en-GB&ccat_id=40530&remindCcat=1&publication=1, (03.Feb.2016).

Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen, (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle Technologien und Marktperspektiven, Elektrolyse-Verfahren, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014.

Verein Deutscher Ingenieure - Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, 11., bearbeitete und erweiterte Auflage, Düsseldorf (Springer Vieweg), 2013.

VBG.de: Gesetze/Vorschriften. Unterweisung, in: <https://www.vbg.de/apl/tr/trgs555/5.htm>, (15.März.2016).

Wasserstoff-generator.de; Funktionsweise, <http://www.wasserstoff-generator.de>, (28.Jan.2016).

Anhangverzeichnis

Anhang I	Bestellliste.....	A1
Anhang II	Technische Anforderungen der Brennstoffzelle	A2
Anhang III	Datenblätter	A3
Anhang IV	Sicherheitsdatenblatt für Wasserstoff	A11
Anhang V	Betriebsanweisung gem. GefStoffV § 14.....	A22
Anhang VI	Formular für die Sicherheitsunterweisung.....	A24

Anhang I

Bestellliste

Lfd. Nr.	Menge pro Einheit	Gegenstand Art der Leistung	Preis in EUR pro Einheit (ohne MwSt.)	Gesamtpreis in EUR (ohne MwSt.)
		3842993669 STREBENPROFIL 60x60 N8, folgende Zuschnitte:		
1	3	3 x L = 1200 mm	27.01 €	81.03 €
2	2	2 x L = 540 mm	14.79 €	29.58 €
3	2	2 x L = 1080 mm	24.98 €	49.96 €
4	2	2 x L = 680 mm	16.84 €	33.68 €
5	2	2 x L = 480 mm	12.76 €	25.52 €
6	2	2 x L = 1355 mm	31.09 €	62.18 €
		3842993684 STREBENPROFIL 15x120 N8, folgender Zuschnitt:		
7	5	5 x 1200 mm	29.54 €	147.70 €
8	2	3842259792 ROLLE D100	8.90 €	17.80 €
9	2	3842259790 ROLLE D100 festst.	16.97 €	33.94 €
10	50	3842523528 Winkel 30x30 N8/8	2.58 €	129.00 €
11	2	3842543325 SCHARNIER 30/30 lifto L	8.77 €	17.54 €
12	2	3842543332 SCHARNIER 30/30 lifto R	8.77 €	17.54 €
13	20	3842523549 WINKEL 60x60 N8/8	5.98 €	119.60 €
14	4	3842518426 VERBINDER 45GRD 30x30	7.84 €	31.36 €
15	15	3842518347 EINFASSPROFIL N8	3.76 €	56.40 €
16	30	3842535578 INNENWINKEL 8	3.57 €	107.10 €
17	10	3842525480 Bügelgriff 133mm	1.88 €	18.80 €
18	100	3842526565 KABELTRÄGER N8	0.66 €	66.00 €
19	100	3842501232 ABDECK 30x30 black	0.56 €	56.00 €
20	20	3842518375 ABDECKPROF N8 grau	1.87 €	37.40 €
			Gesamt	1,138.13 €
			19% MwSt.	216.24 €
			Gesamt inkl. MwSt.	1,354.37 €

Anhang II

Technische Anforderungen der Brennstoffzelle

Bauart:	PEM
Medien:	H ₂ , H ₂ -N ₂ -Gemisch, Luft
Leistungsbereich:	30 – 100 W
Spannung:	max. 42 V
Stromstärke:	0 – 30 A
Temperaturbereich:	60 – 120 °C, regelbar
Druckbereich:	bis 3 bar (ü)
Kühlung	Luft, regelbarer Ventilator
Befeuchtung:	Selbst befeuchtend, geregelt

Anhang III
Datenblätter

Datenblatt ELS250D



Electrolyzer Systems

Cost-effective pure hydrogen production. Safe and reliable.

FUEL CELL & ELECTROLYZER SOLUTIONS



powered by nature

High purity of directly compressed hydrogen.

Our Electrolyzers produce clean and dry hydrogen, directly compressed to 35 bar, powered by the grid or intermittent renewables. The Anion Exchange Membrane (AEM) Electrolyzer stack technology combines the benefits of cost-efficient alkaline electrolysis with those of the flexible (polymer electrolyte membrane) PEM electrolysis.

With a capacity of up to 2,000 litres of hydrogen per hour the rack-mountable Electrolyzers are ideally suited for on-site hydrogen generation to store surplus energy for industrial applications.

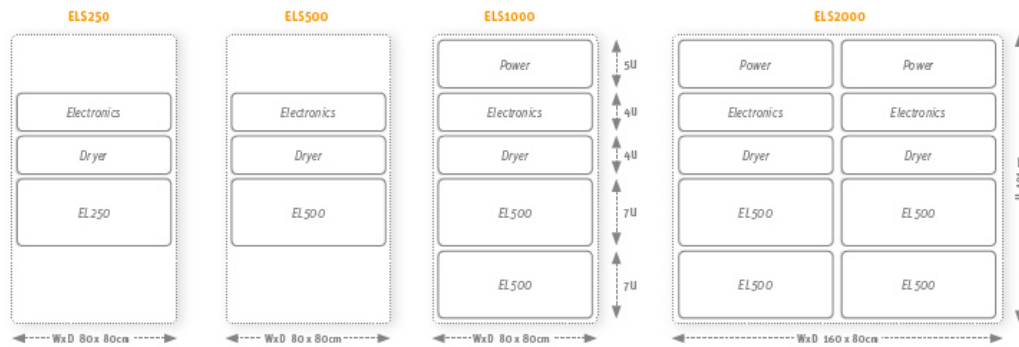
Key Features

- » Output pressure of up to 35 bar
- » Hydrogen purity of 99.94% (measured @ 33 bar stack pressure and full load)
- » Purity of 99.999% with optional purification system
- » High efficiency (up to 66%_{LHV} / 79%_{H₂})
- » Touchscreen display with system status
- » Automatic pressure release during shut down
- » Use of filtered rainwater possible
- » Low maintenance operation

ELS250
ELS500
ELS1000
ELS250
ELS500
ELS1000
ELS250

Cabinet Configurations

The ELS250 and ELS500 modules are available within a complete modular system including optional hydrogen purification and water storage. Systems bigger than ELS2000 available on demand.



Technical Data (Modules and Systems)		ELS250	ELS500	ELS1000	ELS2000	
H ₂ production rate	Nl/h	250	500	1,000	2,000	
Working pressure	Bar	35	35	35	35	
Water consumption	l/h	0,2	0,4	0,8	1,6	
Water specification	µS/cm	<10 (at 25°C)	<10 (at 25°C)	<10 (at 25°C)	<10 (at 25°C)	
Power supply options		AC 100-240 Vac 50-60Hz DC option on request	AC 100-240 Vac 50-60Hz DC option on request	AC 100-240 Vac 50-60Hz DC option on request	AC 230-400 Vac 3-phase 50-60Hz DC option on request	
Operative power consumption (at standard conditions)	kW	1,3 (1,5 with Dryer)	2,4 (2,6 with Dryer)	4,5 (4,7 with Dryer)	9,0 (9,4 with Dryer)	
Modules Dimensions (WxDxH)	Power module	mm	-	-	2x 440 x 490 x 218 (5U)	
	Electronic module	mm	483 x 490 x 178 (4U)	483 x 490 x 178 (4U)	2x 483 x 490 x 178 (4U)	
	Stack module	mm	EL250 module 483 x 490 x 311 (7U)	EL500 module 483 x 490 x 311 (7U)	2x EL500 modules 483 x 490 x 311 (7U)	4x EL500 modules 483 x 490 x 311 (7U)
	Dryer module (optional)	mm	483 x 490 x 178 (4U)	483 x 490 x 178 (4U)	483 x 490 x 178 (4U)	2x 483 x 490 x 311 (7U)
Modules Weight (without water)	Power module	Kg	-	-	2x 25	
	Electronic module	Kg	21	21	10,5	2x 10,5
	Stack module	Kg	46	54	2x 54	4x 54
	Dryer module (optional)	Kg	20	20	20	2x 20
Ambient temp.	°C	5-45	5-45	5-45	5-45	
Ambient humidity	%	20-95	20-95	20-95	20-95	
Cabinet (excl.modules)	Kg	195	195	195	380	
IP marking	IP	54	54	54	54	

As HMI actually our system is equipped with TCP/IP Modbus, a local web interface, touch screen display 3.5" with command and information.



Heliocentris Italy Srl
Via di Lavoria, 56/G
56040 Crespina (PI), Italy
T + 49 (0) 30 340 601 500
www.heliocentris.com

Heliocentris Fuel Cell Solutions GmbH
Bahnhofstraße 82
73240 Wendlingen a. N., Germany

© Heliocentris Italy Srl, 2016. Subject to modification.



Datenblatt PTFE Schlauch

PTFE SCHLAUCH NATUR

PTFE SCHLAUCH NATUR

Beschreibung / Konstruktion

PTFE nimmt unter den Fluorkunststoffen aufgrund seiner außergewöhnlichen chemischen, thermischen und dielektrischen Eigenschaften einen herausragenden Stellenwert ein. Diese Eigenschaften ermöglichen vielseitige Problemlösungen im chemischen und medizinischen Bereich, sowie der Lebensmittelindustrie. Durch die stabile Verbindung von Fluor und Kohlenstoffatomen und die nahezu vollständige Abschirmung der Kohlenstoffkette durch die Fluoratome besitzt PTFE eine fast universelle Chemikalienbeständigkeit.

Chemische Reaktionen zwischen PTFE und anderen Stoffen beschränken sich auf wenige Ausnahmen: Alkalimetalle greifen in geschmolzener oder gelöster Form das Polymerisat unter Braunfärbung an. Weiterhin beeinflussen elementares Fluor und Chlortrifluorid PTFE bei höheren Temperaturen und Drücken.

Die unten genannten Eigenschaften tragen entscheidend dazu bei, dass PTFE-Schläuche in nahezu allen Bereichen der Industrie, bis hin zur Medizin-, Pharma- und Biotechnologie, aber auch in der Lebensmittelindustrie mit steigender Tendenz Anwendung finden.

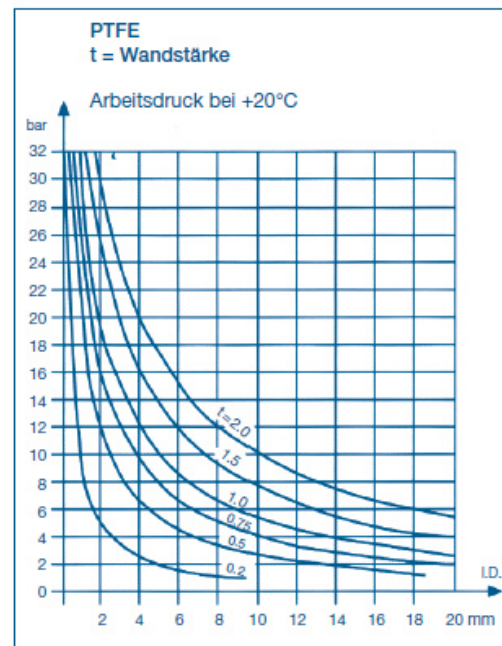
Eigenschaften

Standard Schlauch Eigenschaften	Normen	Einheiten	PTFE
mechanisch			
Dichte	DIN 5349	g/cm ³	2.15-2.1
Reißfestigkeit		kp/cm ²	200-250
bei 23°C			30-40
bei 200°C			8-10
Reißdehnung	DIN 53455	%	200-500
Zug E-Modul 23°C	DIN 53457	N/mm ²	400-800
Härte Shore D	DIN 53505		55
Reibungskoeffizient			0.02-0.2
Schmelzpunkt	DIN 53736	°C	327
Obere Einsatztemperatur		°C	260
Untere Einsatztemperatur		°C	-200
Brandklasse	UL 94		V-0
elektrisch			
Oberflächenwiderstand	DIN 53482	Ω	10 ¹⁷
Durchgangswiderstand	DIN 53482	Ω cm	10 ¹⁶
Durchschlagfestigkeit, Folie 100 µm	DIN 53481	KV/mm	105
allgemein			
Wasseraufnahme	DIN 53495	%	0
Brennbarkeit			unbrennbar

Technische Daten

Die PTFE-Schläuche sind für Temperaturen von -190°C bis +260°C geeignet.

Arbeitsdruck



Bei Temperaturen über 20°C sind die im Diagramm erfassten Drücke mit folgenden Abminderungsfaktoren zu multiplizieren.

Temperatur C°	Abminderungsfaktor F
50	0.87
75	0.77
100	0.68
150	0.53
200	0.39
250	0.28

Der Sicherheitsfaktor Arbeits- und Betriebsdruck zu Berstdruck ist 1:4.

Die genannten Nutzungseinschränkungen sind stets nur als Richtlinie zu verstehen. In solch einer Liste kann niemals (allen möglichen Faktoren) der großen Vielfalt unterschiedlicher Anwendungen Rechnung getragen werden.

Ableitfähige Ausführung

Für eine industrielle Anwendung, bei der die Gefahr einer statischen Aufladung besteht, ist eine schwarze, antistatische Ausführung auf Anfrage lieferbar.

PTFE SCHLAUCH NATUR

Standardabmessungen

Metrische Schlauchabmessungen reichen von 1x2 bis 30x33 mm (Innen- x Außendurchmesser). Die Standardabmessung sind metrisch – Sonderabmessungen auf Anfrage.

Innendurchmesser	Wandstärken		
	mm	mm	mm
2.0	0.50	0.75	1.00
3.0	0.50	0.75	1.00
3.5	0.50	0.75	1.00
4.0	0.50	0.75	1.00
4.5	0.50	0.75	1.00
5.0	0.50	0.75	1.00
5.5	0.50	0.75	1.00
6.0	0.50	0.75	1.00
6.5	0.50	0.75	1.00
7.0	0.50	0.75	1.00
7.5	0.50	0.75	1.00
8.0	0.50	0.75	1.00
8.5	0.50		1.00
9.0	0.50	0.75	1.00
9.5		0.75	1.00
10.0			1.00
11.0			1.00
12.0			1.00
13.0			1.00
14.0			1.00
15.0			1.50
16.0		1.00	1.50
18.0			1.50
19.0			1.50
20.0			1.50
22.0			1.50
25.0			1.50



Pharmazie / Biotechnologie

Aufgrund der hohen Anforderungen für diese Einsatzgebiete wird das Produkt nur aus einem spezifischen Rohstoff hergestellt, der der FDA-Richtlinie 21 CFR 177.1550 entspricht.

Prüfungen wurden nach USP-Class VI - 121°C für Kunststoffe durchgeführt:

USP <87> Biological Reactivity - In VITRO

USP <88> Biological Reactivity - In VIVO

sowie angelehnt an die ISO-Normen 10993-5, -6, -10 und -11.

Desweiteren wurde eine **Extractables-Studie** durchgeführt.

Ein entsprechendes Validierungspaket können Sie bei TECNO PLAST anfordern.

Toleranzen für Standardabmessungen

Innendurchmesser (mm) ± Toleranz (mm)

3 bis 5 ± 0,2

über 5 bis 7 ± 0,25

über 7 bis 10 ± 0,3

über 10 bis 15 ± 0,35

über 15 bis 20 ± 0,4

Wanddicke (mm) ± Toleranz (mm)

0,5 bis 1,0 ± 0,15

über 1,0 bis 2,0 ± 0,2

über 2,0 bis 4,0 ± 0,4

über 4,0 bis 6,0 ± 0,5

Eingeschränkte Toleranzen sind auf Anfrage möglich.

(z.B. wenn der PTFE-Schlauch mit Druckluftverschraubungen montiert wird)



TECNO PLAST
INDUSTRIE-TECHNIK GMBH

Willstätterstr. 5 · 40549 Düsseldorf · Tel. 02 11/537 433-0 · Fax 02 11/59 39 14 www.tecnoplast.de

Daten Messfühler



Produkte Anwendungen Service Wissensbasis Unternehmen

Startseite · Produkte · Messfühler · für explosive Gase & Dämpfe · MF420-Ex-2.1

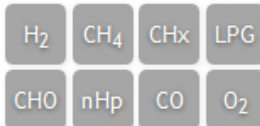
MF420-Ex-2.1



Der Messfühler MF420-Ex-2.1 ist für den Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen der Zone 1 und Zone 2 zugelassen und besitzt eine EG-Baumusterprüfbescheinigung gemäß der Richtlinie 94/9/EG (ATEX) mit folgendem Zertifikat und Kennzeichnung:

IBExU 12 ATEX 1080 X
Ex II 2G Ex de IIC T6/T4 Gb
Umgebungstemperaturbereich:
T4: -40° C bis +60° C / T6: -40° C bis +50° C

Der modulare Aufbau des Messfühlers erlaubt, ihn mit einem katalytischen Sensor (Pellistor) zur Bestimmung der Konzentration explosiver Gase und Dämpfe oder mit einem elektrochemischen Sensor für toxische Gase je nach Variante zu bestücken. Die Konzentration wird über die 4..20 mA Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung ausgegeben.



Produktvorteile	Produktsortiment	Technische Daten	Zubehör & Ersatzteile
Messprinzip	katalytischer (Pellistor) oder elektrochemischer Sensor		
Stromversorgung	Versorgungsspannung	18 V bis 30 V DC	
	Strom	ca. 105 mA bei 24 V	
Umgebungstemperatur	-40° C bis +60° C	für die Temperaturklasse T4	
	-40° C bis +50° C	für die Temperaturklasse T6	
Luftdruck	700 hPa bis 1300 hPa		
zulässige Feuchte	10 bis 95% relative Feuchte	nicht kondensierend	
Ausgang	4..20 mA	max. Bürde 500 Ω (Fehlerstatus bei I<2,5 mA)	
Gehäuse	Aluminiumlegierung/Edelstahl		
	Schutzklasse	IP 65	
	Gewicht	ca. 1100 g	
	Größe (D x H)	ca. Ø84 x H78 mm	
Anschlussleitung	3-adriges, abgeschirmtes Kabel	Empfehlung Leitungsquerschnitt min. 1,5 mm ²	
Zulassung	EG-Baumusterprüfbescheinigung gemäß Richtlinie 94/9/EG (ATEX)	IBExU 12 ATEX 1080 X Ex II 2G Ex de IIC T6/T4 Gb	

Daten Grenzwertmelder



[Produkte](#) [Anwendungen](#) [Service](#) [Wissensbasis](#) [Unternehmen](#)

[Startseite](#) > [Produkte](#) > [Zentralen](#) > [Grenzwertmelder](#) > [GWZ-S2.1/-S4.1](#)



GWZ-S2.1 / GWZ-S4.1

Die programmierbaren, selbstüberwachenden Grenzwertmelder von J. Dittrich werden zur Überwachung der Konzentration von Gasen und Dämpfen eingesetzt.

Beim Über- bzw. Unterschreiten eines bestimmten Grenzwertes wird ein Alarm ausgelöst.

Ebenso kann man über potentialfreie Relaisausgänge Geräte, wie z.B. Magnetventile, Lüfter und akustische Signalgeber ansteuern.

Das Gerät gibt es zur Wandmontage mit 12 V DC, 24 V DC oder 230 V AC Spannungsversorgung.

Produktvorteile

Produktsortiment

Technische Daten

Zubehör & Ersatzteile

Allgemeines

Stromversorgung	Spannung	12VDC, 24VDC oder 230VAC
	Nennleistung	ca. 13 W (ohne Messfühler)
Umgebungstemperatur	-10 °C bis +50 °C	
zulässige Feuchte	15% bis 95% relative Feuchte	nicht kondensierend
Gehäuse	Kunststoff, grau	Wandmontage
	Schutzart	IP 65
	Gewicht	ca. 1.000 g
	Abmessungen (B x H x T)	240 x 120 x 190 mm



- SOFORTIGES AUFSPÜREN VON GASLECKS
- TRI-MODE DETECTION™
- AUTOMATISCHE KALIBRIERUNG & AUSWECHSELBARER SENSOR

micro CD-100 Gaslecksuchgerät für brennbare Gase

Das RIDGID® micro CD-100 erlaubt ein einfaches und schnelles Aufspüren von brennbaren Gasen. Die 41cm lange Schlauchsonde erlaubt die Suche nach z.B. Methan, Propan, Kohlenmonoxid, Ammoniak, Hydrogene und vielen weiteren brennbaren Gasen im Bereich 0-6400ppm (Methan), aus einer sicheren Entfernung.

Die einstellbare Empfindlichkeit, die automatische Kalibrierung, der austauschbarer Sensor (31948) und die Robustheit ergeben ein zuverlässiges Gerät, das bereits geringe Aufkommen an Gas anzeigt. Die Tri-Mode Detection™ ermöglicht dem Anwender mit visueller, akustischer oder vibrierender Alarmfunktion zu arbeiten.

HÄNDLER

Übersicht Produktlinie Bestellinformationen

Bestell-Nr.	Modell	Beschreibung	Gewicht (kg)	Std. Pack
37423	micro DM-100	Digital-Multimeter	0,38	1
37428	micro CM-100	Digital-Messzange	0,30	1
37438	micro HM-100	Temperatur & Feuchtigkeitsmesser	0,20	1
36153	micro IR-100	Infrarot-Thermometer	0,30	1
36158	micro LM-100	Laser-Entfernungsmesser	0,20	1
36163	micro CD-100	Gaslecksuchgerät	0,45	1
38758	micro CL-100	Selbstnivellierender Kreuzlinienlaser	0,54	1

Die komplette Auswahl an RIDGID Produkten finden Sie im Ridge Tool Katalog oder unter www.RIDGID.eu.

*Unverbindliche Preisempfehlung, gültig bis 31.12.2015, zzgl. ges. MwSt.

Technische Änderungen und Irrtümer vorbehalten. RIDGID® behält sich das Recht vor Änderungen ohne Ankündigung vorzunehmen. Vertrieb über den Fachhandel.



Ridge Tool GmbH & Co. oHG
Haßlinghauser Str. 150
58285 Gevelsberg
Deutschland

Tel.: D: 0800 5888076 / A: 0800 677221
Fax: D: 0800 5888077 / A: 0800 677222
ridgid.germany@emerson.com
www.RIDGID.eu



P13 629M_DE

Anhang IV

Sicherheitsdatenblatt für Wasserstoff

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 1 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 1. Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und Firmenbezeichnung
1.1. Produktidentifikator

Handelsname	: Wasserstoff (verdichtet) , WASSERSTOFF (N50, N55, N60), WASSERSTOFF HG
Sicherheitsdatenblatt-Nr.	: 067A
Chemische Bezeichnung	: Wasserstoff CAS-Nr. :1333-74-0 EG-Nr. :215-605-7 Index-Nr. :001-001-00-9
Registrierungs-Nr.	: Aufgeführt in Anhang IV / V REACH, von der Registrierung ausgenommen.
Chemische Formel	: H ₂

1.2. Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird

Relevante identifizierte Verwendungen	: Industriell und berufsmäßig. Vor Anwendung Gefährdungsbeurteilung durchführen. Prüfgas / Kalibriergas. Chemische Reaktion / Synthese. Laborzwecke. Kontaktieren Sie Ihren Lieferanten für weitere Informationen über Verwendungen. Verwendung als Brennstoff. Schutzgas für Schweißprozesse. Zur Herstellung von Komponenten in der Elektronik- / Photovoltaikindustrie. Lasergas.
Verwendungen von denen abgeraten wird	: Nicht für Luftballons verwenden.

1.3. Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt

Bezeichnung des Unternehmens	: AIR LIQUIDE Deutschland GmbH Hans-Günther-Sohl-Straße 5 D-40235 Düsseldorf GERMANY Telefon: +49 (0)211 6699-0 - Fax: +49 (0)211 6699-222
E-Mail-Adresse (der sachkundigen Person)	: Info.SDB@AirLiquide.de

1.4. Notrufnummer

Notfall-Telefonnummer	: +49 (0)2151 398668
- Verfügbarkeit	: (24 / 7)

ABSCHNITT 2. Mögliche Gefahren
2.1. Einstufung des Stoffs oder Gemischs
Gefahrenklasse, Gefahrenkategorie und Gefahrenkodierung, Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP)

• Physikalische Gefahren	: Entzündbare Gase - Kategorie 1 - Gefahr - (CLP : Flam. Gas 1) - H220 Unter Druck stehende Gase - verdichtete Gase - Achtung - (CLP : Press. Gas) - H280
--------------------------	--

Einstufung nach EG 67/548 oder EG 1999/45.

Einstufung	: F+; R12
------------	-----------

2.2. Kennzeichnungselemente
Kennzeichnung nach Verordnung EG 1272/2008 (CLP).

- Gefahren Piktogramm(e)



- Gefahrenpiktogramm Code : GHS02 - GHS04

AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
Hans-Günther-Sohl-Straße 5 D-40235 Düsseldorf GERMANY
Telefon: +49 (0)211 6699-0 - Fax: +49 (0)211 6699-222

Im Notfall : +49 (0)2151 398668

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 2 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 2. Mögliche Gefahren (Forts.)

- **Signalwort** : Gefahr
- **Gefahrenhinweise** : H220 - Extrem entzündbares Gas.
H280 - Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.
- **Sicherheitshinweise**
 - **Prävention** : P210 - Von Hitze, Funken, offener Flamme, heißen Oberflächen fernhalten. Nicht rauchen.
 - **Reaktion** : P377 - Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.
P381 - Alle Zündquellen entfernen, wenn gefahrlos möglich.
 - **Lagerung** : P403 - An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.

2.3. Sonstige Gefahren

- Sonstige Gefahren : Keine.

ABSCHNITT 3. Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

3.1. Stoff / 3.2. Gemisch

Stoff.

Stoffbezeichnung	Inhalt [Vol-%]	CAS-Nr. EG-Nr. Index-Nr. Registrierungs-Nr.	Einstufung(DSD)	Einstufung(CLP)
Wasserstoff	100 %	1333-74-0 215-605-7 001-001-00-9 * 1	F+; R12	Flam. Gas 1 (H220) Pres. Gas (H280)

Enthält keine anderen Komponenten oder Verunreinigungen, die die Einstufung dieses Produktes beeinflussen.

- * 1: Aufgeführt in Anhang IV / V REACH, von der Registrierung ausgenommen.
 - * 2: Registrierungszeitraum noch nicht abgelaufen.
 - * 3: Registrierung nach REACH nicht erforderlich: Stoff wird importiert < 1t/a.
- Volltext der R-Sätze siehe Abschnitt 16. Volltext der Gefahrenhinweise siehe Abschnitt 16.

ABSCHNITT 4. Erste-Hilfe-Maßnahmen

4.1. Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen

- **Einatmen** : Das Opfer ist unter Benutzung eines umluftunabhängigen Atemgerätes in frische Luft zu bringen. Warm und ruhig halten. Arzt hinzuziehen. Bei Atemstillstand künstliche Beatmung.
- **Hautkontakt** : Schädliche Wirkungen dieses Produktes werden nicht erwartet.
- **Augenkontakt** : Schädliche Wirkungen dieses Produktes werden nicht erwartet.
- **Verschlucken** : Verschlucken wird nicht als möglicher Weg der Exposition angesehen.

4.2. Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen

- : Hohe Konzentrationen können Ersticken verursachen. Symptome können Verlust der Bewegungsfähigkeit und des Bewusstseins sein. Das Opfer bemerkt das Ersticken nicht.

4.3. Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung

- : Keine.

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 3 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung

5.1. Löschmittel

- Geeignete Löschmittel : Trockenes Pulver.
Wassersprühstrahl oder Wassernebel.
- Ungeeignete Löschmittel : Kohlendioxid.
Wasserstrahl zum Löschen ungeeignet.

5.2. Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren

- Spezielle Risiken : Einwirkung von Feuer kann Bersten / Explodieren des Behälters verursachen.
- Gefährliche Verbrennungsprodukte : Keine.

5.3. Hinweise für die Brandbekämpfung

- Spezifische Methoden : Behälter aus dem Wirkungsbereich des Brandes entfernen, wenn dies gefahrlos möglich ist.
Ausströmendes brennendes Gas nur löschen, wenn es unbedingt nötig ist. Eine spontane explosionsartige Wiederentzündung ist möglich. Jedes andere Feuer löschen.
Wenn möglich, Gasaustritt stoppen.
Maßnahmen der Brandbekämpfung auf den Brand in der Umgebung abstimmen.
Druckbehälter können bersten, wenn sie direktem Feuer bzw. Wärmestrahlung durch Feuer ausgesetzt sind. Gefährdete Druckbehälter mit Wassersprühstrahl aus geschützter Position kühlen. Schadstoffbelastetes Löschwasser nicht in Abläufe und die Kanalisation gelangen lassen.
Wassersprühstrahl oder Wassernebel einsetzen, um Rauch niederzuschlagen.
- Spezielle Schutzausrüstung für die Feuerwehr : In geschlossenen Räumen umluftunabhängiges Atemgerät benutzen.
Standard EN 137 - Umluftunabhängige Atemschutzgeräte mit Vollgesichtsmaske.
Standard EN 469 - Schutzkleidung für die Feuerwehr. Standard EN 659 - Schutzhandschuhe für die Feuerwehr.

ABSCHNITT 6. Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

6.1. Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren

- : Versuchen, den Gasaustritt zu stoppen.
Gebiet räumen.
Beim Betreten des Bereiches umluftunabhängiges Atemgerät benutzen, sofern nicht die Ungefährlichkeit der Atmosphäre nachgewiesen ist.
Für ausreichende Lüftung sorgen.
Das Risiko explosionsfähiger Atmosphäre ist zu berücksichtigen.
Zündquellen beseitigen.
Örtlichen Alarmplan beachten.
Auf windzugewandter Seite bleiben.

6.2. Umweltschutzmaßnahmen

- : Versuchen, den Gasaustritt zu stoppen.

6.3. Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung

- : Umgebung belüften.

6.4. Verweis auf andere Abschnitte

- Verweis auf andere Abschnitte : Siehe auch Abschnitte 8 und 13.

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 4 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 7. Handhabung und Lagerung

7.1. Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung

- Sicherer Umgang mit dem Stoff** :
- Gas nicht einatmen.
 - Produktaustritt an die Atmosphäre vermeiden.
 - Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladungen treffen.
 - Von Zündquellen, einschließlich elektrostatischen Entladungen, fernhalten.
 - Nur solche Ausrüstung verwenden, die für dieses Produkt und den vorgesehenen Druck und Temperatur geeignet ist. Im Zweifelsfall den Gaslieferanten konsultieren.
 - Vor dem Einleiten von Gas Ausrüstung luftfrei spülen.
 - Beim Umgang mit dem Produkt nicht rauchen.
 - Nur erfahrene und entsprechend geschulte Personen sollten unter Druck befindliche Gase handhaben.
 - Stellen Sie sicher, dass das gesamte Gassystem vor dem Gebrauch (und danach regelmäßig) auf Lecks geprüft wurde (wird).
 - Die Möglichkeit der Bildung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre und der Einsatz von explosions sicherer Ausrüstung sind zu bewerten.
 - Den Einsatz von nicht funkenerzeugenden Werkzeugen in Betracht ziehen.
 - Umgang mit dem Produkt im Einklang mit allgemeinen Arbeitsschutzmaßnahmen und Sicherheitsanweisungen.
 - Sicherheitsventil(e) in Gasanlagen vorsehen.
- Sicherer Umgang mit dem Druckgasbehälter** :
- Eindringen von Wasser in den Gasbehälter verhindern.
 - Bedienungshinweise des Gaslieferanten beachten.
 - Rückströmung in den Gasbehälter verhindern.
 - Setzen Sie die Auslasskappen oder -stöpsel und die Ventilschutzkappe wieder auf, sobald der Behälter von der Anlage getrennt wird.
 - Gasflaschen vor mechanischer Beschädigung schützen; nicht ziehen, nicht rollen, nicht schieben, nicht fallen lassen.
 - Das Produktetikett dient der Identifizierung des Inhalts der Gasflasche und darf nicht entfernt oder unkenntlich gemacht werden.
 - Für den Transport von Gasflaschen, selbst auf kurzen Strecken, immer einen Flaschenwagen oder anderen geeigneten Handwagen benutzen.
 - Ventilschutzkappe nicht entfernen bevor die Flasche an einer Wand oder einen Labortisch oder auf einen Flaschenständer gestellt wurde, und zum Gebrauch bereit ist.
 - Falls der Benutzer irgendwelche Schwierigkeiten bei der Bedienung des Flaschenventils bemerkt, den Gebrauch unterbrechen und Kontakt mit dem Lieferanten aufnehmen.
 - Das Ventil des Behälters nach jedem Gebrauch und nach der Entleerung schließen, auch wenn er noch immer angeschlossen ist.
 - Versuchen Sie nie, Ventile oder Sicherheitsdruckentlastungseinrichtungen am Behälter zu reparieren.
 - Ventilanschlüsse des Behälters sauber und frei von Verunreinigungen halten, insbesondere frei von Öl und Wasser.
 - Versuchen Sie nicht, das Gas von einer Gasflasche oder Behälter in einen anderen umzufüllen.
 - Benutzen Sie nie Flammen oder elektrische Heizgeräte zur Druckerhöhung im Behälter.
 - Beschädigungen an diesen Einrichtungen müssen umgehend dem Lieferanten mitgeteilt werden.

7.2. Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten

- Behälter bei weniger als 50°C an einem gut gelüfteten Ort lagern.
- Bei der Lagerung von oxidierenden Gasen und anderen brandfördernden Stoffen fernhalten.
- Die Behälter sollten an einem Ort ohne Brandgefahr und entfernt von Wärme- und Zündquellen gelagert werden. Gelagerte Flaschen sollten regelmäßig auf Leckagen und korrekte Lagerbedingungen geprüft werden.
- Alle Vorschriften und örtlichen Erfordernisse an die Lagerung von Behältern müssen eingehalten werden.
- Die Behälter nicht unter Bedingungen lagern, die die Korrosion beschleunigen. Behälter aufrecht stehend lagern und gegen Umfallen sichern. Ein Ventilschutzring sollte vorhanden sein oder die Ventilschutzkappe angebracht werden. Die elektrische Ausrüstung in Lagerbereichen sollte auf das Risiko der Bildung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre abgestimmt sein. Von brennbaren Stoffen fernhalten.

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 5 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 7. Handhabung und Lagerung (Forts.)
7.3. Spezifische Endanwendungen

: Keine.

ABSCHNITT 8. Begrenzung und Überwachung der Exposition/Persönliche Schutzausrüstungen
8.1. Zu überwachende Parameter
DNEL: Abgeleiteter Nicht Effekt Level (Beschäftigte)

: Es liegen keine Angaben vor.

PNEC: Predicted no effect concentration

: Es liegen keine Angaben vor.

8.2. Begrenzung und Überwachung der Exposition
8.2.1. Geeignete technische Steuerungseinrichtungen

 : Allgemeine und lokale Absaugung vorsehen.
 Anlagen, die unter Druck stehen, sollten regelmäßig auf Dichtheit geprüft werden.
 Gas Detektoren einsetzen, falls entzündbare Gase/Dämpfe freigesetzt werden können.
 Arbeitserlaubnisverfahren z.B. bei Wartungsarbeiten in Betracht ziehen.

8.2.2. Individuelle Schutzmaßnahmen, z.B. Persönliche Schutzausrüstung

 : Eine Gefährdungsbeurteilung sollte für alle Arbeitsbereiche erstellt und dokumentiert sein, in der alle Risiken der Verwendung des Produktes erfasst sind und die erforderliche persönliche Schutzausrüstung abgeleitet wird. Die folgenden Empfehlungen sollten in Betracht gezogen werden:
 Persönliche Schutzausrüstung auswählen, die in Übereinstimmung mit EN / ISO-Normen steht.

 • **Augen- / Gesichtsschutz**

 : Schutzbrille mit Seitenschutz tragen.
 Standard EN 166 - Persönlicher Augenschutz.

 • **Hautschutz**

 - **Handschutz**

 : Bei der Handhabung von Druckbehältern / Druckgasflaschen Arbeitshandschuhe tragen.
 Standard EN 388 - Schutzhandschuhe gegen mechanische Risiken.

 - **Sonstige Schutzmaßnahmen**

 : Beim Umgang mit Druckgasflaschen / Druckbehältern Sicherheitsschuhe tragen.
 Die Verwendung von flammensicherer anti-statischer Schutzkleidung in Betracht ziehen.
 Standard EN ISO 20345 - Persönliche Schutzausrüstung - Sicherheitsschuhe.
 Standard EN ISO 14116 - Flammenhemmende Materialien.
 Standard EN ISO 1149-5 - Schutzkleidung: Elektrostatische Eigenschaften.

 • **Thermische Gefahren**

: Keine erforderlich.

8.2.3. Begrenzung und Überwachung der Umweltexposition

: Außer allgemein anzuwendender Arbeitsschutzmaßnahmen für Gefahrstoffe sind keine weiteren besonderen Sicherheitsmaßnahmen erforderlich.

ABSCHNITT 9. Physikalische und chemische Eigenschaften
9.1. Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften
Aussehen
Physikalischer Zustand bei 20°C / 101.3kPa : Gas.

Farbe

: Farblos.

Geruch

: Geruchlos.

pH-Wert

: Nicht anwendbar.

Molmasse [g/mol]

: 2

Schmelzpunkt [°C]

: -259

 AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
 Hans-Günther-Sohl-Straße 5 D-40235 Düsseldorf GERMANY
 Telefon: +49 (0)211 6699-0 - Fax: +49 (0)211 6699-222

Im Notfall : +49 (0)2151 398668

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 6 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 9. Physikalische und chemische Eigenschaften (Forts.)

Siedepunkt [°C]	: -253
Kritische Temperatur [°C]	: -240
Flammpunkt [°C]	: Nicht anwendbar auf Gase und Gasgemische
Verdampfungsgeschwindigkeit (Äther=1)	: Nicht anwendbar auf Gase und Gasgemische
Zündgrenzen [Vol.% in Luft]	: 4 bis 77
Dampfdruck [20°C]	: Nicht anwendbar.
Relative Dichte, Gas (Luft=1)	: 0,07
Relative Dichte, flüssig (Wasser=1)	: 0,07
Löslichkeit in Wasser [mg/l]	: 1,6
Verteilungskoeffizient n-Oktanol/Wasser [log Kow]	: Nicht anwendbar auf anorganische Gase
Zündtemperatur [°C]	: 560
Viskosität bei 20°C [mPa.s]	: Nicht anwendbar.
Explosive Eigenschaften	: Nicht anwendbar.
Oxidierende Eigenschaften	: Keine.

9.2. Sonstige Angaben

Sonstige Angaben	: Brennt mit unsichtbarer Flamme.
------------------	-----------------------------------

ABSCHNITT 10. Stabilität und Reaktivität
10.1. Reaktivität

: Keine Gefahren durch Reaktivität außer denen, die in den nachfolgenden Unterabschnitten beschrieben sind.

10.2. Chemische Stabilität

: Stabil unter normalen Bedingungen.

10.3. Möglichkeit gefährlicher Reaktionen

: Kann mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch bilden.
Kann mit brandfördernden Stoffen heftig reagieren.

10.4. Zu vermeidende Bedingungen

: Von Hitze/Funken/offener Flamme/heißen Oberflächen fernhalten. Nicht rauchen.

10.5. Unverträgliche Materialien

: Luft, Oxidationsmittel.
Weitere Informationen zur Materialverträglichkeit: siehe ISO11114.

10.6. Gefährliche Zersetzungsprodukte

: Unter normalen Bedingungen bei Verwendung und Lagerung werden gefährliche Zersetzungsprodukte nicht erzeugt.

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 7 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 11. Toxikologische Angaben

11.1. Angaben zu toxikologischen Wirkungen

Akute Toxizität	: Toxische Wirkungen des Produkts sind nicht bekannt.
Ätz-/Reizwirkung auf die Haut	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
schwere Augenschädigung/-reizung	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
Sensibilisierung der Atemwege/Haut	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
Kanzerogenität	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
Mutagenität	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
Reproduktionstoxizität	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
Spezifische Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
Spezifische Zielorgan-Toxizität bei wiederholter Exposition	: Keine Wirkungen des Produktes bekannt.
Aspirationsgefahr	: Nicht anwendbar auf Gase und Gasgemische

ABSCHNITT 12. Umweltbezogene Angaben

12.1. Toxizität

Bewertung : Das Produkt verursacht keine Umweltschäden.

12.2. Persistenz und Abbaubarkeit

Bewertung : Das Produkt verursacht keine Umweltschäden.

12.3. Bioakkumulationspotenzial

Bewertung : Das Produkt verursacht keine Umweltschäden.

12.4. Mobilität im Boden

Bewertung : Das Produkt verursacht keine Umweltschäden.

12.5. Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

: Nicht als PBT oder vPvB klassifiziert.

12.6. Andere schädliche Wirkungen

Wirkung auf die Ozonschicht	: Keine.
Auswirkung auf die globale Erwärmung	: Keine.

ABSCHNITT 13. Hinweise zur Entsorgung

13.1. Verfahren der Abfallbehandlung

: Nicht in Bereichen ablassen, wo das Risiko der Bildung eines explosionsfähigen Gas/Luft-Gemisches besteht. Nicht verbrauchtes Gas mit einem geeigneten Brenner mit Flammenrückschlagsicherung verbrennen.
Nicht in die Kanalisation, Keller, Arbeitsgruben und ähnliche Plätze, an denen die Ansammlung des Gases gefährlich werden könnte, ausströmen lassen.
Für weitere Information über die Abfallbeseitigung siehe den EIGA-Code of practice (Doc. 30/10 "Disposal of gases" verfügbar unter <http://www.eiga.org>)
Sicherstellen, dass Emissionswerte lokaler Regelwerke oder Betriebsgenehmigungen eingehalten werden.

Verzeichnis gefährlicher Abfälle (Entscheidung der Kommission EG 2001/118) : 16 05 04: Gase in Druckbehältern (einschließlich Halone), die gefährliche Stoffe enthalten.

AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
Hans-Günther-Sohl-Straße 5 D-40235 Düsseldorf GERMANY
Telefon: +49 (0)211 6699-0 - Fax: +49 (0)211 6699-222

Im Notfall : +49 (0)2151 398668

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 8 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 13. Hinweise zur Entsorgung (Forts.)
13.2. Zusätzliche Information

: Keine.

ABSCHNITT 14. Angaben zum Transport
14.1. UN-Nummer

UN-Nummer : 1049
 Gefahrzettel) Nr. nach ADR/RID,
 Kennzeichnung nach IMDG, IATA



: 2.1 : Entzündbare Gase.

14.2. Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung

Transport im Straßen-/
 Eisenbahnverkehr (ADR/RID) : WASSERSTOFF, VERDICHET
 Transport im Luftverkehr (ICAO-TI /
 IATA-DGR) : HYDROGEN, COMPRESSED
 Transport im Seeverkehr (IMDG) : HYDROGEN, COMPRESSED

14.3. Transportgefahrenklassen

Transport im Straßen-/
 Eisenbahnverkehr (ADR/RID)
 Klasse : 2
 ADR/RID Klassifizierungscode : 1 F
 Nummer zur Kennzeichnung der
 Gefahr : 23
 Tunnel Beschränkungscode : B/D : Beförderung in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien B, C, D und E.
 Sonstige Beförderungen: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E.
 Transport im Luftverkehr (ICAO-TI /
 IATA-DGR)
 Transport im Seeverkehr (IMDG)
 Emergency Schedule (EmS) - Fire : F-D
 Emergency Schedule (EmS) - Spillage : S-U

14.4. Verpackungsgruppe

Transport im Straßen-/
 Eisenbahnverkehr (ADR/RID) : Nicht anwendbar.
 Transport im Luftverkehr (ICAO-TI /
 IATA-DGR) : Nicht anwendbar.
 Transport im Seeverkehr (IMDG) : Nicht anwendbar.

14.5. Umweltgefahren

Transport im Straßen-/
 Eisenbahnverkehr (ADR/RID) : Keine.
 Transport im Luftverkehr (ICAO-TI /
 IATA-DGR) : Keine.
 Transport im Seeverkehr (IMDG) : No

14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender

AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
 Hans-Günther-Sohl-Straße 5 D-40235 Düsseldorf GERMANY
 Telefon: +49 (0)211 6699-0 - Fax: +49 (0)211 6699-222

Im Notfall : +49 (0)2151 398668

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 9 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 14. Angaben zum Transport (Forts.)

Verpackungsanweisung(en)	
Transport im Straßen-/ Eisenbahnverkehr (ADR/RID)	: P200
Transport im Luftverkehr (ICAO-TI / IATA-DGR)	
Passenger and Cargo Aircraft	: DO NOT LOAD IN PASSENGER AIRCRAFT.
Cargo Aircraft only	: Allowed
Packing instruction / Cargo Aircraft only	: 200
Transport im Seeverkehr (IMDG)	: P200
Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender	: - Ausreichende Lüftung sicherstellen. Der Fahrer muß die möglichen Gefahren der Ladung kennen und er muß wissen, was bei einem Unfall oder Notfall zu tun ist. Vor dem Transport : - Behälter sichern. - Das Flaschenventil muß geschlossen und dicht sein. - Die Ventilverschlußmutter oder der Verschlußstopfen (soweit vorhanden) muß korrekt befestigt sein. - Die Ventilschutzeinrichtung (soweit vorhanden) muß korrekt befestigt sein. Möglichst nicht in Fahrzeugen transportieren, deren Laderaum nicht von der Fahrerkabine getrennt ist.

14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens 73/78 und gemäß IBC-Code

massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens 73/78 und gemäß IBC-Code : not applicable.

ABSCHNITT 15. Rechtsvorschriften
15.1. Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch
EG-Gesetzgebung

Verwendungsbeschränkung(en)	: Keine.
Seveso Richtlinie 96/82/EG	: Angeführt.

Nationale Gesetzgebung


	: Alle nationalen/örtlichen Vorschriften beachten.
- 4. BImSchV	: Angeführt.
- Wassergefährdungsklasse WGK	: NWG - Nicht wassergefährdend.
- Sonstige Gesetze und Technische Regeln (Nicht vollständig)	: BetriebssicherheitsV mit TRBSen insbesondere TRBS 3145 / TRGS 725 "Ortsbewegliche Druckgasbehälter", TRGS 2141, BGR 500 Teil 2.33: "Umgang mit Gasen", GefahrstoffV mit Technischen Regeln Gefährliche Stoffe TRGS insbesondere TRGS 407 "Tätigkeiten mit Gasen - Gefährdungsbeurteilung", TRGS 400, 500, 510, 900, BGR 104 "Explosionsschutz-Regeln", TRBS 2152 mit Teilen 1 bis 4 "Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre".

15.2. Stoffsicherheitsbeurteilung

: Eine Stoffsicherheitsbeurteilung (CSA) muß für dieses Produkt nicht erstellt werden.

AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
Hans-Günther-Sohl-Straße 5 D-40235 Düsseldorf GERMANY
Telefon: +49 (0)211 6699-0 - Fax: +49 (0)211 6699-222

Im Notfall : +49 (0)2151 398668

	SICHERHEITSDATENBLATT gemäß RL 1907/2006/EG (REACH)	Seite : 10 / 10
		Versions-Nr. : 2 - 02
		Datum : 26 / 2 / 2015
		Ersetzt : 28 / 8 / 2012
Wasserstoff (verdichtet)		067A

ABSCHNITT 16. Sonstige Angaben

Änderungen	: Überarbeitetes Sicherheitsdatenblatt in Übereinstimmung mit der Verordnung (EU) Nr. 453/2010.
Schulungshinweise	: Das Risiko des Erstickens wird oft übersehen und muß bei der Unterweisung der Mitarbeiter besonders hervorgehoben werden. Es ist sicherzustellen, daß die Mitarbeiter das Brandrisiko beachten.
Weitere Angaben	: Dieses Sicherheits-Datenblatt wurde im Einklang mit geltenden europäischen Richtlinien erstellt. Es gilt für alle Länder, die diese Richtlinien in ihre nationale Gesetzgebung übernommen haben.
Volltext der R-Sätze in Abschnitt 3.	: R12 : Hochentzündlich.
Volltext der Gefahrenhinweise in Abschnitt 3.	: H220 - Extrem entzündbares Gas. H280 - Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.
HAFTUNGSAUSSCHLUSS	: Bevor das Produkt in irgendeinem neuen Prozeß oder Versuch benutzt wird, sollte eine sorgfältige Untersuchung über die Materialverträglichkeit und die Sicherheit durchgeführt werden. Die Angaben in diesem Dokument sind keine vertraglichen Zusicherungen von Produkteigenschaften. Sie stützen sich auf den heutigen Stand der Kenntnisse.

Ende des Dokumentes

Anhang V

Betriebsanweisung gem. GefStoffV § 14

Gasförmiger Wasserstoff unter Druck

Bei dem Betrieb der Brennstoffzelle kann gasförmiger Wasserstoff austreten.

GEFAHREN FÜR MENSCH UND UMWELT



H220

- Extrem entzündbares Gas,
- Explosionsartige Verbrennungen möglich,
- Kann in hohen Konzentrationen erstickend wirken, Symptome können Verlust der Bewegungsfähigkeit und des Bewusstseins sein,
- Feuer kann vorhandene Druckbehälter zum Bersten bringen, dadurch Gefahr von umherfliegenden Teilen.



H280

SCHUTZMAßNAHMEN UND VERHALTENSREGELN



- Räume für Betrieb und Lagerung gut durchlüften,
- Hitze, heiße Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellenarten fernhalten,
- Nicht rauchen,
- Gasüberwachung aktivieren,
- Schutzkleidung tragen: Schutzbrille und ESD-Handschuhe,
- Löschmittel bereitstellen.

VERHALTEN IM GEFAHRFALL

Bei unkontrolliertem Gasaustritt muss die Wasserstoffzufuhr sofort gestoppt werden, der Raum so gut wie möglich durchlüftet und Zündquellen entfernt werden.

Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann oder Wasserstoffzufuhr gestoppt wurde. Druckbehälter aus dem Wirkungsbereich des Brandes Entfernen, wenn dies gefahrlos möglich ist. Gefährdete Druckbehälter aus geschützter Position kühlen. Geeignete Löschmittel: Trockenes Pulver, Wassersprühstrahl oder Wassernebel.

ERSTE HILFE

Notruf:



Bei Jeder Erste-Hilfe-Maßnahme: Selbstschutz beachten und umgehend Arzt verständigen

Nach Einatmen: Das Opfer ist unter Benutzung eines umluftunabhängigen Atemgerätes in frische Luft zu bringen. Warm und ruhig halten. Arzt hinzuziehen. Bei Atemstillstand künstliche Beatmung.

Bei Haut- oder Augenkontakt: Schädliche Wirkungen werden nicht erwartet.

SACHGERECHTE ENTSORGUNG

Bei Austritt von Wasserstoff Raum gut durchlüften.

Unverbrauchten Wasserstoff ins Freie führen oder verbrennen.

Schadstoffbelastetes Löschwasser nicht in Abläufe oder die Kanalisation gelangen lassen.

Datum:

Unterschrift:

eigene Darstellung in Anlehnung an TRGS 505, 2007, Anlage 3: Muster Betriebsanweisung
Piktogramme aus Symbolbibliothek der BG Bau: <http://www.bgbau-medien.de/site/sb/index.htm>, [letzter Zugriff 26.02.2016].

Anhang VI

Formular für die Sicherheitsunterweisung



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Lange

Vorname: Felix

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

Detailplanung und Realisierung eines modularen PEM-Brennstoffzellen-Versuchsstands

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

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

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

Norderstedt

Ort

29.03.2016

Datum

Unterschrift im Original