

Energieprojekt Brennstoffzelle

Projektdokumentation

Projektwebseite: <https://brennstoffzelle.labs.fhv.at/>

Fachhochschule Vorarlberg
Studiengang Energietechnik und Energiewirtschaft

Betreut von
Bettina Friedel

Vorgelegt von
Thomas Drozdik (tdr9288@students.fhv.at)
Florian Stemer (fst7325@students.fhv.at)
Manuel Madlener (mma8246@students.fhv.at)

Dornbirn, 22.01.2020

Inhaltsverzeichnis

1. PROJEKTEINFÜHRUNG	3
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	4
3. AUFBAU UNSERER ZELLE	5
3.1 BIPOLARPLATTE	5
3.2 GASDIFFUSIONSSCHICHT	6
3.3 KATALYSATOR	7
3.4 MEMBRAN	8
3.5 ZUSAMMENBAU	8
4. KONZEPT DES VERSUCHSTANDES.....	12
4.1 ELEKTROTECHNIK	13
4.2 GASSPEICHER	17
4.3 WASSERSPEICHER	19
4.4 MESSTECHNIK	20
4.5 VERROHRUNG	22
4.6 GESAMTAUFBAU	22
5. VERSUCHE	25
6. FAZIT	27
7. AUSBLICK	28
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	29
REFERENCES	31
ANHANG.....	32

1. Projekteinführung

Im Rahmen des Energieprojekts der Fachhochschule Vorarlberg hat sich ein Team aus drei Studenten zusammengefunden, um eine Brennstoffzelle zu realisieren. Die Motivation hinter dem Projekt ist, das immer stärkere aufkommen der Technologie im Zusammenhang von erneuerbaren Energien. Eine Brennstoffzelle kann aus Wasserstoff und Sauerstoff elektrischen Strom erzeugen, wobei lediglich Wasser als Reaktionsprodukt entsteht. Gleichzeitig kann sie als Elektrolyseur betrieben werden und aus Wasser unter Zufuhr von Strom wieder die Ausgangsstoffe erzeugen.

Die ursprüngliche Idee des Projektes war es eine reversible Brennstoffzelle zu bauen, die Studenten als mobile Ladestation für Laptops dient. Im Elektrolysebetrieb könnte diese am Netz wieder aufgeladen werden. Da die Herausforderungen einer solchen Einheit allerdings sehr hoch sind, nicht zuletzt aufgrund der Sicherheitsanforderungen, haben wir beschlossen, eine Einzelzelle zu fertigen und dies im kleinen Maßstab zu testen. Auf Basis dieser Dokumentation, soll es nachfolgenden Studenten ermöglicht werden, an das Projekt anzuknüpfen.

Das Projektteam besteht aus den Studenten:

- Thomas Drozdzik
- Florian Stemer
- Manuel Madlener

2. Theoretische Grundlagen

Eine Brennstoffzelle produziert, wie der Name schon sagt, mit einem Brennstoff elektrische Energie. Jedoch findet keine Verbrennung statt. Die Energie wird durch eine elektrochemische Redoxreaktion gewonnen. Es können verschiedene Brennstoffe verwendet werden. Häufig wird Wasserstoff, Methanol oder Methan verwendet. Je nach verwendetem Brennstoff und Elektrolyt können verschiedene Brennstoffzellentypen betrieben werden. In Tabelle 1 sind die bis heute wichtigsten Typen dargestellt.

Typ	Kürzel	Betriebstemperatur	Elektrolyse
Alkalische Brennstoffzelle	AFC	60 – 80 °C	möglich
Polymermembran-Brennstoffzelle	PEM	60 – 70 °C	möglich
Direktmethanol-Brennstoffzelle	DMFC	60 - 130 °C	nicht möglich
Phosphorsäure Brennstoffzelle	PAFC	160 - 220 °C	nicht möglich
Schmelzelektrolyt-Brennstoffzelle	MCFC	620 – 650 °C	nicht möglich
Festoxid-Brennstoffzelle	SOFC	800 °C – 1000 °C	möglich

Tabelle 1: Übersicht Brennstoffzellentypen [6]

Im Falle von Wasserstoff als Brennstoff sieht die Redoxreaktion folgendermaßen aus:

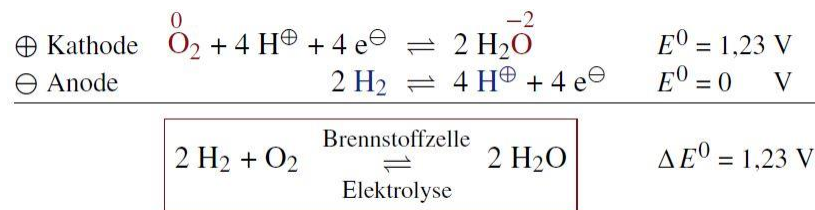


Abbildung 1: Redoxreaktion einer Wasserstoff-Sauerstoffzelle [6]

Die Wasserstoffelektrode bildet den Minuspol (Anode) und die Sauerstoffelektrode bildet den Pluspol (Kathode) [6]. An der Anode wird Wasserstoff in Wasserstoffionen und Elektronen aufgespalten, welche über einen Elektrolyten zur Kathode wandern. An der Kathode wird aus Sauerstoff, Wasserstoffionen und Elektronen Wasser gebildet. Dabei wird Sauerstoff reduziert, wodurch eine Spannung von 1,23 V entsteht. Umgekehrt kann beim Anlegen von mindestens 1,23 V die Reaktion umgedreht werden (Elektrolyse). Dadurch kann die Brennstoffzelle zum Produzieren des Brennstoffes, in diesem Fall Wasserstoff, verwendet werden. Elektrolyse funktioniert jedoch nicht mit allen Brennstoffzellen (siehe Tabelle 1).

3. Aufbau unserer Zelle

Für den Zellaufbau haben wir uns für eine Polymerelektrolytmembran (PEM) Brennstoffzelle entschieden. Damit ist ein Elektrolysebetrieb möglich. Die Betriebstemperatur liegt dabei recht niedrig bei ca. 70 °C. Der allgemeine Aufbau einer PEM Brennstoffzelle ist in Abbildung 2: dargestellt. Im Folgenden werden die Verwendeten Komponenten und deren Funktion kurz erklärt.

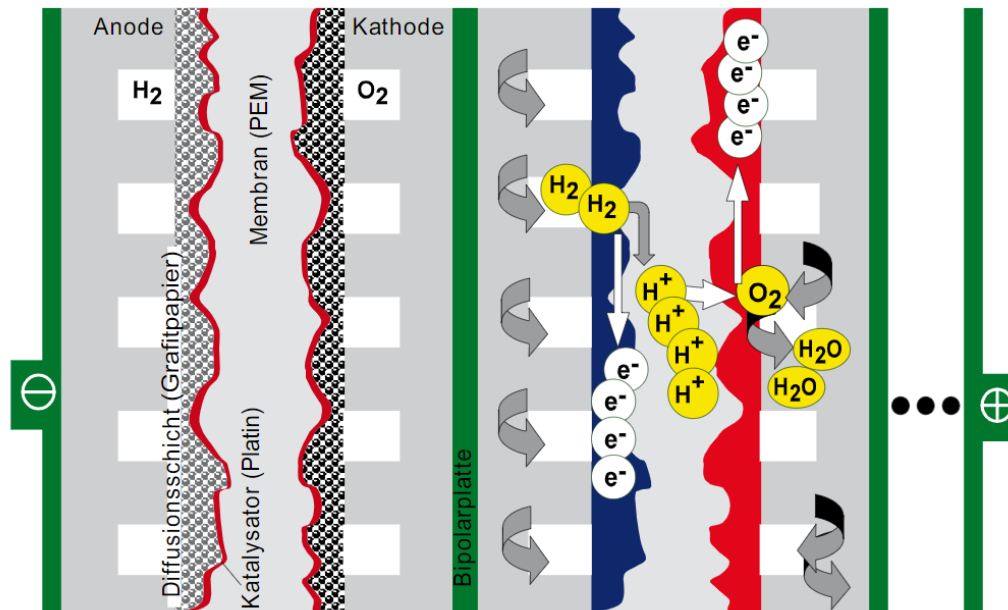


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau einer PEM Brennstoffzelle im Schnitt [6]

3.1 Bipolarplatte

Die Bipolarplatten sind der äußerste Teil der Zelle. Durch sie wird das Gas des Gasspeichers im Brennstoffzellenbetrieb durch schmale Kanäle und Serpentinaufbauten auf die Gasdiffusionsschicht verteilt. Im Elektrolysebetrieb wird das Gas über die Bipolarplatten in den Gasspeicher geleitet. Wichtig ist, dass korrosionsfreie Materialien verwendet werden. Beim Elektrolysebetrieb werden die Stromzuleitungen des Netzteiles ebenfalls dort angeschlossen. Wir haben eine Bipolarplatte aus Aluminium verwendet, welche selbst konstruiert und in der FH Vorarlberg gefräst wurde. Die Außenmaße sind 130 mm x 130 mm x 5 mm. Die innere Fläche mit den Kanälen und Zuleitungen für die Gase ist 100 mm x 100 mm groß. Die Kanäle haben eine Breite von 1,5 mm und eine Tiefe von 1 mm. Eine turbulente Strömung ist gewährleistet. Zur Befestigung wurde immer an zwei gegenüberliegenden Seiten ein M5-Gewinde gefertigt. An den anderen Seiten wurden Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von 8 mm gebohrt. An den Enden der Kanäle wurde je ein M6-Gewinde für die Gas- bzw. Wasserzufuhr gefertigt.

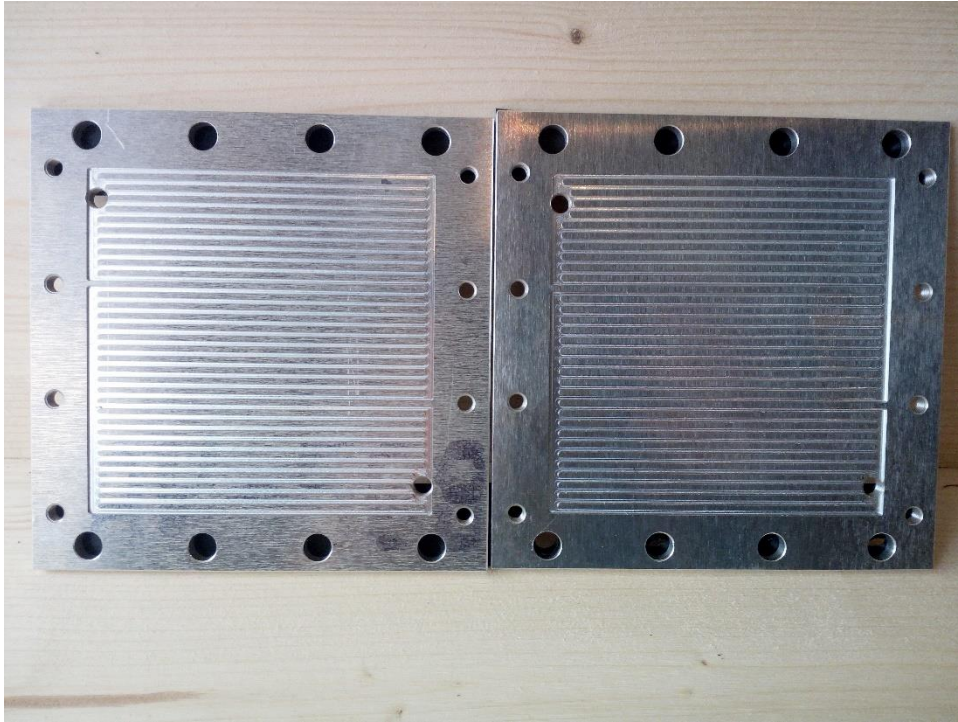


Abbildung 3: Bipolarplatten aus Aluminium (130 mm x 130 mm x 5 mm)

3.2 Gasdiffusionsschicht

Die Gasdiffusionsschicht (GDL) hat die Aufgabe die einströmenden Gase von den Einströmkanälen zur Membran zu leiten. Auf der Kathodenseite muss sie zudem das Wasser abführen im Brennstoffzellenbetrieb, bzw. Das Wasser im Elektrolysebetrieb zur Membran leiten. Gleichzeitig führt die GDL den Strom ab und muss somit elektrisch leitend sein. Üblicherweise werden Kohlepapiere verwendet.

Für unseren Versuchsaufbau verwendeten wir ebenfalls Kohlepapier für die GDL. Diese ist einseitig mit einer mikroporösen Schicht (MPL) beschichtet. Diese feinporige Schicht sorgt für eine noch bessere Gasverteilung in Richtung der Membran. Die Kontaktfläche wird erhöht und die Druckverteilung ausgeglichen. Ein wesentlicher Vorteil der MPL ist, dass sie zudem den Wasserhaushalt optimiert. Das Produktwasser, welches an der Katalysatorschicht entsteht, wird durch die feinen Poren besser abtransportiert. Ohne diese Schicht kommt es durch den sprunghaften Anstieg der Porengröße zu Wasseransammlungen an der Katalysatorschicht. Die folgende Abbildung veranschaulicht den Wassertransport mit und ohne MPL im Brennstoffzellenbetrieb [1].

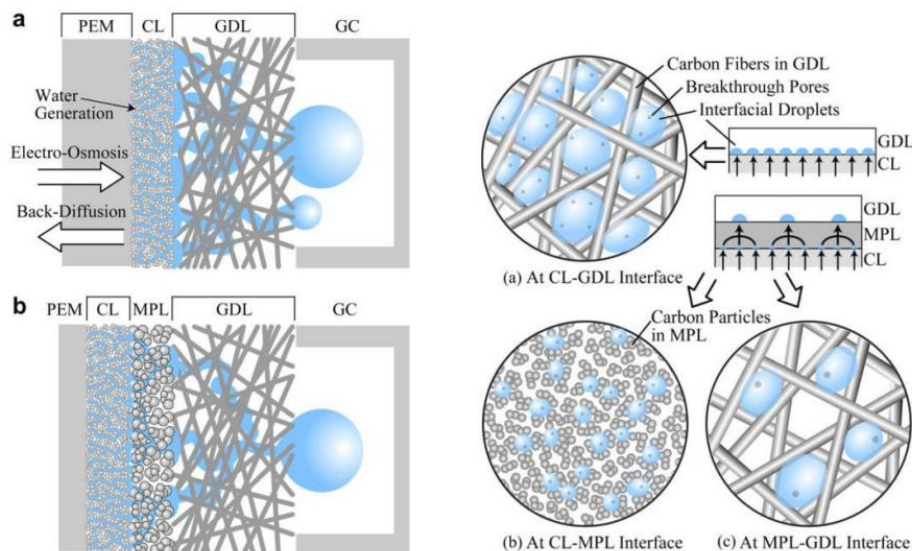


Abbildung 4: Wassertransport durch die GDL [1]

Für unsere Brennstoffzelle verwenden wir eine GDL der Firma Freudenberg mit MPL [3]. Die Spezifikationen lauten wie folgt:

- Produkt H23 I3 C1
- 270 μm Dicke
- Hydrophobe Ausführung
- 13 $\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ Durchgangswiderstand

3.3 Katalysator

Ein Katalysator ist ein Stoff, welcher die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion, ohne selbst dabei verbraucht zu werden, beeinflusst. Hierfür wird die – zum Start der Reaktion benötigte – Aktivierungsenergie verringert. Die selektive Wirkung von Katalysatoren führt dazu, dass jede Reaktion bestimmte Katalysatoren benötigt. Diese wirken somit auf die Kinetik chemischer Reaktionen und nicht auf die Thermodynamik [10]. In der Brennstoffzelle dient der Katalysator der Reaktion zwischen Wasser- und Sauerstoff. Ohne diesen würde die Reaktion nicht stattfinden. Gewöhnlich wird für die PEM-Brennstoffzelle Platin, Kohlenstoff oder Verdünnungen der jeweiligen Stoffe benutzt. Für diese Brennstoffzelle wird ein Katalysator der Firma QuinTech (Deutschland) des Typs PT C 10 verwendet. Dieser ist eine Mischung und ist mit 10 %-Masse Platin auf Vulcan zusammengesetzt. Eine wichtige Eigenschaft von Katalysatoren ist ihre spezifische Oberfläche. Umso größer die spezifische Oberfläche, umso größer die Reaktionsfläche. Somit sind Katalysatoren sehr porös. Siehe Abbildung 5.

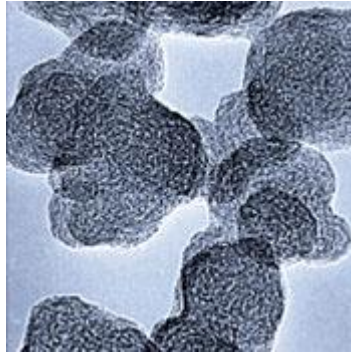


Abbildung 5: Katalysator in wässriger Lösung [8]

3.4 Membran

Eine Membran ist eine Trennschicht, welche Stoffgemische separieren kann (semipermeabel). Bestes Beispiel hierfür wäre die Zellmembran oder auch die Haut. Das Trennverfahren einer Membran beruht auf dem Transport durch Poren (Filtration), Löslichkeit, Diffusion (Gasseparation) und Ladungsunterschied. Es wird immer eine treibende Kraft benötigt [5]. Für den Transport durch die Membran einer Brennstoffzelle ist das elektrochemische Potenzial verantwortlich. Im Falle einer Elektrolyse wird das benötigte Potenzial mit einer gespeisten Spannung überwunden. Im Brennstoffzellenbetrieb ist der Ladungsunterschied der einzelnen Komponenten die treibende Kraft. Für die hier erwähnte Brennstoffzelle wird eine Nafion Membran NM115 von QuinTech verwendet (siehe Abbildung 6).

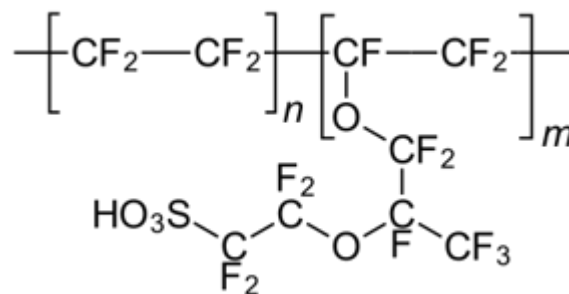


Abbildung 6: Chemische Struktur von Nafion [13]

Nafion ist hierbei das Monomer der Polymermembran und hat Ähnlichkeit mit Teflon. Durch diese Membran können nur Protonen diffundieren. Somit ist die Trennung in der Brennstoffzelle gewährleistet, jedoch der Elektronenfluss nicht inhibiert. Eine weitere wichtige Kenngröße für eine Membran ist die Dicke. Die verwendete Membran hat eine Dicke von 127 µm. Weitere Informationen zur Membran können in der angehängten Beschreibung gefunden werden.

3.5 Zusammenbau

Für den Zusammenbau der Zelle muss zuerst die Nafionmembran auf ca. 105 mm x 105 mm zugeschnitten werden. Wichtig dabei ist mit Laborhandschuhen zu arbeiten, da die Membran

nicht direkt berührt werden sollte. Anschließend sollte die Membran ca. einen Tag vor Verwendung in destilliertem Wasser eingelegt werden.

Für die Beschichtung des Kohlepapiers mit dem Katalysator, sollte dieser zuerst in Ethanol dispergiert werden. Wir haben dazu 99,9 % Ethanol zur Synthese verwendet. Auf einer Laborwaage wurden dann 3,1 g des Katalysators abgewogen und in ca. 80 ml Ethanol gegeben. Die Dispersion enthielt sehr viel Katalysatormaterial, welches sich sehr schnell absetzte. Vor dem Beschichten mussten zwei Kohlepapiere auf 95 mm x 95 mm zugeschnitten werden. Auch hier sollten Handschuhe verwendet werden, um die mikroporöse Schicht nicht zu berühren. Das Aufbringen des Katalysators auf die mikroporöse Schicht des Kohlepapiers funktionierte am besten mit einem feinen Pinsel. Wichtig dabei ist, die Flasche mit der Dispersion gut zu durchmischen, bevor man den Pinsel hineingibt. Es sollte so gleichmäßig wie möglich genügend Katalysator auf das Kohlepapier gebracht werden. Nach dem Aufbringen des Katalysators sollte man noch ca. 10 min warten, bis das restliche Ethanol auf dem Kohlepapier verdampft ist.

Es wurde eine Dichtung aus Teflon verwendet. Diese sollte außen 130 mm x 130 mm haben und innen mit 100 mm x 100 mm ausgeschnitten werden. Die Löcher für die Schrauben wurden mit einer Lochzange gemacht. Es wurden 2 Stück davon benötigt.

Vor dem Zusammenbau der Zelle wurde noch ein Großteil der Fläche an der Rückwand der Bipolarplatten mit schwarzem Isolierband abgeklebt. Dies betraf vor allem die Bohrungen und Gewinde, bis auf jene 2 an denen die Anschlüsse des Netzgerätes befestigt wurden.

Zuerst musste die erste Dichtung und das erste Kohlepapier auf die Innenseite der ersten Bipolarplatte gelegt werden. Dabei sollte das Kohlepapier so zentral wie möglich mit der unbeschichteten Seite zur Bipolarplatte gelegt werden. Danach kann man die Membran vorsichtig auf ein Zellstofftuch legen und diese vorsichtig abtupfen, damit der Großteil des Wassers entfernt wird. Anschließend wird die Membran ebenfalls vorsichtig zentral auf die Platte gelegt, ohne das Kohlepapier zu verschieben. Die Membran sollte etwas auf der Dichtung aufliegen damit die beiden Kohlepapiere komplett voneinander abgetrennt sind. Als nächstes wurde das zweite Kohlepapier mit der beschichteten Seite zur Membran vorsichtig aufgelegt. Zum Schluss wurde noch die zweite Bipolarplatte so aufgelegt, dass die Strömungskanäle zur ersten Bipolarplatte überkreuzt sind. Die nun zusammengesetzte Zelle sollte vorest mit 2 Schrauben fixiert werden damit sich nichts mehr verschieben kann. Anschließend kann die Zelle über 2 Winkel am Versuchsstand befestigt werden. Die restlichen Schrauben konnten danach ebenfalls angebracht werden. Für alle Schrauben sollten Plastikscheiben zur Isolation verwendet werden. Auf beiden Seiten sollte an einer Schraube der Anschluss des Netzgerätes mit einer Mutter befestigt werden. Drei selbstgefertigte Aluminium-Drehteile können in die M6-Gewinde geschraubt werden. Zwei befinden sich auf der Kathoden- und eines auf der Anodenseite. Der Anschluss des Wasserspeichers muss an der Kathodenseite unten befestigt werden. Die

Anschlüsse der Gase müssen oben befestigt werden (Sauerstoff an der Kathoden- und Wasserstoff an der Anodenseite).

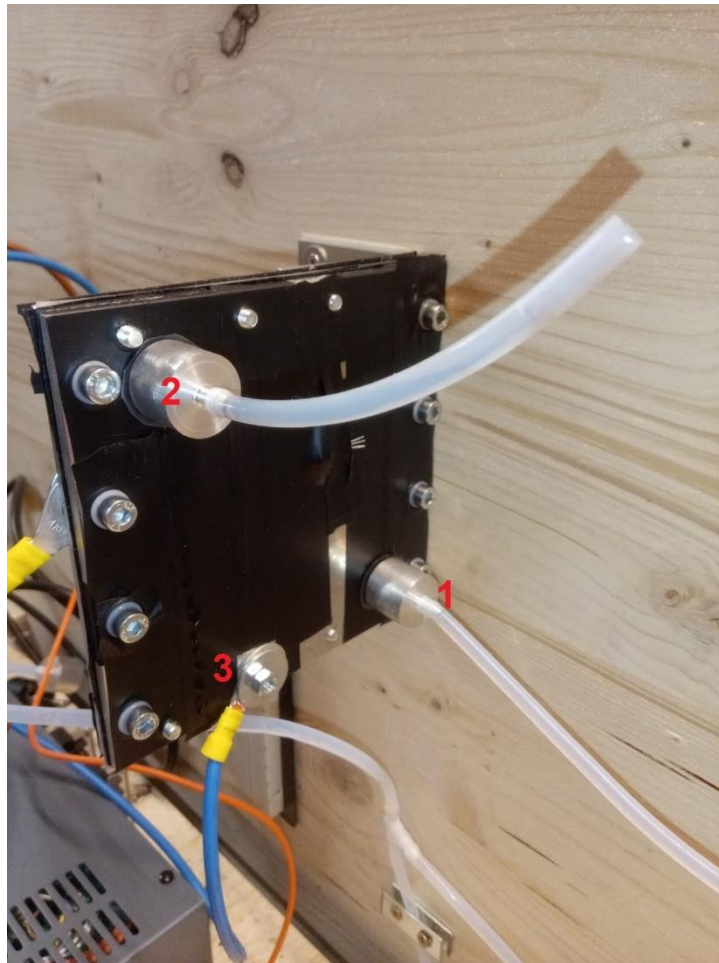


Abbildung 7: Aufbau der Brennstoffzelle (Kathodenseite)



Abbildung 8: Aufbau der Brennstoffzelle (Anodenseite)

In Abbildung 7 und 8 sind kann man die Zu-/ Ableitungen und Anschlüsse sehen:

- 1 Leitung des Wasserspeichers (Kathodenseite)
- 2 Leitung des Sauerstoffs (Kathodenseite)
- 3 Anschluss des Netzgerätes (Kathodenseite)
- 4 Leitung des Wasserstoffs (Anodenseite)
- 5 Anschluss des Netzgerätes (Anodenseite)
- 6 Ablassschraube für eventuelle Wasseransammlungen (Anodenseite)

4. Konzept des Versuchstandes

Neben der eigentlichen Zelle benötigt es für den Betrieb einer Brennstoffzelle eine gewisse technische Peripherie. Die Aufbereitung von Luft zu reinem Sauerstoff, sowie die Speicherung und Lagerung sind zu kostspielig, aufwendig und sicherheitstechnisch nicht realisierbar. Daher wird entschieden die benötigten Gase O_2 und H_2 selbst herzustellen. Dies erfordert ebenfalls gewisse technische Voraussetzungen. In Abbildung 9 Ist der Gesamtversuchsaufbau dargestellt.

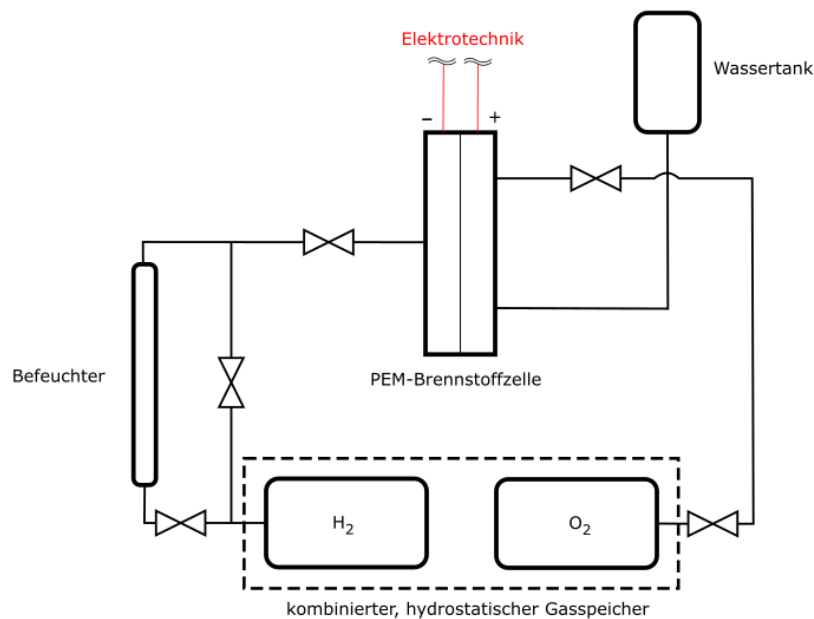


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Brennstoffzellen-Anlage

Über die Spannungsquelle wird die benötigte Spannung an die Zelle geführt, welche über den Wasserspeicher mit destilliertem Wasser versorgt wird. Wird genügend Spannung aufgebracht, um die Aktivierungsenergie der Reaktion zu überwinden beginnt die Elektrolyse, in welcher Wasser in die Gase O_2 und H_2 umgewandelt wird. Über gasdichte Schläuche werden die Gase in die hydrostatischen Gasspeicher geleitet, welche selbst konzipiert werden. Ist genügend Gas vorhanden bzw. wird der Brennstoffzellenbetrieb benötigt, wird das Gas über die Schläuche wieder zur Zelle geleitet. Klemmen (gezeichnet Ventile) verhindern ein Zurückströmen des Wassers in die Zelle. Im Brennstoffzellenbetrieb muss zudem die Spannungsversorgung getrennt und der Strom über einen Verbraucher geleitet werden. Die gespeicherten Gase müssen die Brennstoffzelle feucht erreichen um ein Austrocknen –und somit die Funktionsunfähigkeit– der Membran zu verhindern.

Der beschriebene Prozess kann in verschiedene Bestandteile des Gesamtprozesses untergliedert werden.

- Elektrotechnik
- Gasspeicher und Befeuchtung
- Wasserspeicher
- Messtechnik
- Verrohrung

Die Messtechnik wird benötigt, um Rückschlüsse auf die Effizienz des Prozesses zu schließen und ggf. Anpassungen am System vorzunehmen. Das Gesamtsystem wird auf einem eigens konstruierten Messstand aufgebaut.

4.1 Elektrotechnik

Die Elektrotechnik einer Brennstoffzelle umfasst mehrere Einzelbestandteile.

- Netzgerät
- Verkabelung
- Schaltung
- Sicherung
- Verbraucher

Netzgerät

Für die Spannungsversorgung wird ein spezielles Netzgerät (N1) benötigt. Da das österreichische Netz eine Spannung von 230 V Wechselstrom liefert, muss das Netzgerät in der Lage sein die Spannung auf wenige Volt zu transformieren und Gleichstrom zu liefern. Die Energie, welche für den Elektrolysebetrieb benötigt wird, beträgt 1,23 V. Eine solch geringe Spannung ist anspruchsvoll zuzuführen, da mit einer kleinen Spannung ein großer Spannungsabfall (je nach Querschnitt und Länge der Leitung) einhergeht. Daher muss das Netzgerät im mV-Bereich adjustierbar sein. Solch ein Netzgerät wird von der FH-Vorarlberg ausgeliehen (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Netzgerät N1

Das Netzgerät von VOLTcraft es Typs VSP2410 kann Gleichspannungen im geringen Volt Bereich liefern und ist über Drehknöpfe beliebig regelbar. Es können die Sensibilität der zu regelnden Größe, die Spannung und der Strom angepasst werden.

Verkabelung

Im Gegensatz zur geringen Spannung ist mit hohen Strömen im Brennstoffzellenbetrieb zu rechnen. Um große Ströme transportieren zu können, muss der Leiterquerschnitt vergrößert werden, was sich –aufgrund des steigenden Widerstandes der Leitung- auf den Spannungsabfall auswirkt. Eine Brennstoffzelle dieser Größe kann im Optimum einen Strom von knapp 90 A liefern [11, 12]. Für so eine Stromstärke wird ein Querschnitt von 16 mm² vorausgesetzt (laut OVE E8101 Elektrizitätsnorm). Auch wenn der Wirkungsgrad der Zelle nur halb so groß ist, wird ein Querschnitt von 6 mm² benötigt (Grenzwert bei 54 A).

Verkabelt wird die Zelle anhand folgenden Abbildung 11.

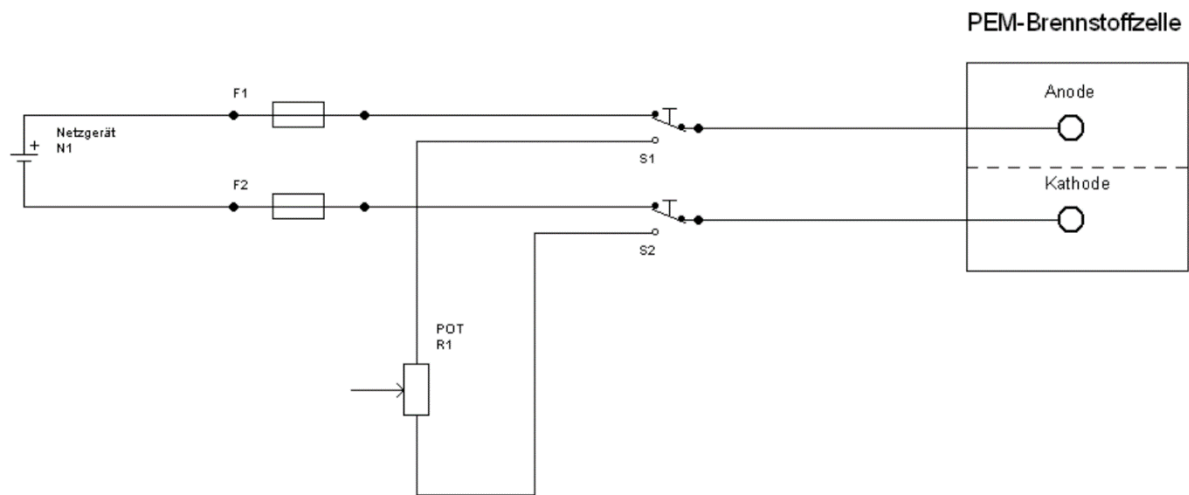


Abbildung 11: Darstellung Verkabelung Elektrotechnik

Die Schaltung mit S1 und S2 wird im Abschnitt Schaltung genauer erläutert, da sie hier nur schematisch dargestellt ist. Für die Elektrolyse wird weniger Strom der Zelle zugeliefert, die Spannung allerdings muss konstant sein. Im Brennstoffzellenbetrieb entstehen hingegen die oben genannten hohen Ströme. Daher ist ein rascher Schaltvorgang zwischen Elektrolyse- und Brennstoffzellenbetrieb vonnöten, um einen Überstrom am Netzgerät (N1) zu verhindern (das Netzgerät ist für maximal 10 A ausgelegt). Um Kosten zu sparen wird entschieden zuerst ein Versuch der Brennstoffzelle zu fahren und den Kurzschlussstrom zu messen. Anhand dieses Wertes kann der genaue Leiterquerschnitt definiert werden. Je nach Höhe der auftretenden Ströme muss auch die Schaltung angepasst werden.

Schaltung

Treten niedrige Ströme auf kann die Schaltung über einen handelsüblichen Drehschalter oder verriegelbare Ausschalter erfolgen. Bei hohen Stromstärken ist diese Schaltung jedoch nicht möglich, da der große Elektronenfluss zu Stromüberschlägen im Schaltvorgang führen kann und dies im schlimmsten Fall den Schalter zerstört. Für dies ist eine Schaltung mit Leistungsschützen zu wählen welche sich gegenseitig verriegeln (siehe Abbildung 12).

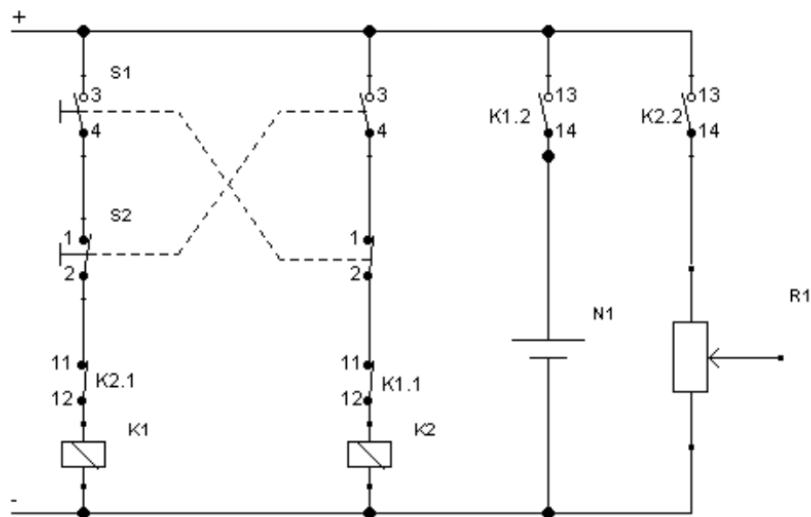


Abbildung 12: Verdrahtungsschema einer Schützschtaltung mit gegenseitiger Verriegelung

Die Verriegelung ist notwendig, um das Netzgerät vor Überstrom zu schützen. Wird der Schalter S1 betätigt schließt sich dessen Kontakt 3-4 und öffnet 1-2. Die Stromzufuhr zu Schütz K1 ist gewährleistet. Zieht Schütz K1 an öffnet sich der interne Schützkontakt 11-12 und Schützkontakt 13-14 schließt. Somit schließt sich die Verbindung zum Netzgerät, bzw. Spannung wird vom Netzgerät bereitgestellt. Bei Betätigung von S2 wird der Schütz für den Verbraucher geschaltet und das Netzgerät wird getrennt. Die Plus-Minus Anspeisung erfolgt einerseits vom Netzgerät (für den Elektrolysebetrieb) andererseits seitig der Brennstoffzelle. Das Netzgerät hat zwei Kanäle. Um die Schütze anzusteuern muss über einen Ausgangskanal eine Spannung angelegt werden, um die Verbindung zum anderen Kanal des Netzgerätes herzustellen. Ist diese Verbindung vorhanden wird die Stromzufuhr auf den zweiten Kanal übertragen und der erste Kanal ausgeschaltet. Diese Vorgehensweise ist beim ersten Inbetriebnehmen nötig. Wird vor dem Abschalten des Stromes, am Versuchsende, auf Elektrolysebetrieb geschaltet, bleiben die Kontaktstellungen der Schütze auch im stromlosen Zustand in dieser Position. Somit ist die Verbindung mit dem Netzgerät bei erneutem Einschalten der Anlage gewährleistet. Im Brennstoffzellenbetrieb wird die benötigte Spannung zum Anziehen der Schützkontakte von der Zelle selbst geliefert. So ist, bei richtiger Verdrahtung, die Funktion einer Schützverriegelung sichergestellt.

Sicherung

Im Falle einer Fehlfunktion oder Falschverdrahtung werden nach dem Netzgerät noch Schmelzsicherungen (F1 und F2) eingebaut, die bei einer Stromstärke von 10 A auslösen (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: 10 A Neozed Schmelzsicherungen [9]

Dies bedeutet der –in der Sicherung befindliche- Draht, über welchen der Strom fließt, schmilzt. Somit ist das Netzgerät ausreichend geschützt.

Verbraucher

Um die produzierte Leistung abführen zu können, muss ein Verbraucher angeschlossen werden. Je nach Stromhöhe wird hier ein Potentiometer (POT R1) verwendet, welches von der FH-Vorarlberg ausgeliehen wird. Mit einem Potentiometer können auch verschiedene Lastfälle simuliert werden. Bei hohen Strömen wird eine Parallelschaltung kleinerer Verbraucher aufgebaut, da sich bei einer Parallelschaltung der Strom teilt. Somit können 3 oder 4 kleinere Potentiometer verwendet werden, um Lastfälle zu simulieren.

Anmerkung:

Aufgrund der COVID-19 Pandemie war es über einige Wochen nicht möglich am Aufbau weiterzuarbeiten oder Versuche zu fahren. Somit ist das Konzept für die Elektrotechnik ausgearbeitet, die Umsetzung jedoch noch nicht erfolgt. Da es nicht möglich war den Kurzschlussversuch zu fahren wurde mit der Finalisierung der Auslegung (welche Schaltung, Verbraucher, Querschnitt) nicht fortgefahren, da es sich um erheblichen finanziellen Unterschied handelt. Ein verriegelbarer Schalter kostet um die 20 – 30 €, Ein Leistungsschütz ca. 300-400 €.

4.2 Gasspeicher

Die Gase Wasserstoff und Sauerstoff die bei der Elektrolyse entstehen, werden in einem Hydrostatischen Speicher geleitet. Im Brennstoffzellenbetrieb werden diese wieder verstromt. Als Gastank dienen umgedrehte Flaschen, die in einem Wasserbad stehen. Der Umgekehrte Einbau der Flaschen wurde gewählt, damit mögliche Undichtigkeiten an der Öffnung umgangen werden. An der untenstehenden Öffnung ist ein Gasschlauch aus PTFE bis oben geführt. Im leeren Zustand sind die Flaschen bis knapp unter den Gasschlauch mit Wasser aus dem Wasserbad gefüllt. Das Verhältnis von Wasserstoff zu Sauerstoff muss 3/2 (siehe Reaktionsgleichung) sein, um alles Gas vollständig zu verstromen. Zur Befeuchtung des Wasserstoffs ist zusätzliche ein Befeuchter vorgesehen. Eine Befeuchtung des Wasserstoffs im Brennstoffzellenbetrieb ist

erforderlich, damit die Membran nicht austrocknet und somit für Ionen leitfähig bleibt. Die relative Feuchte des Wasserstoffs soll ca. 70 % betragen und die des Sauerstoffs ca. 20 % [4]. Sie darf nicht zu hoch sein, damit die Zelle nicht geflutet wird. Anhand der folgenden Abbildung soll die Funktionsweise des hydrostatischen Gasspeichers erläutert werden.

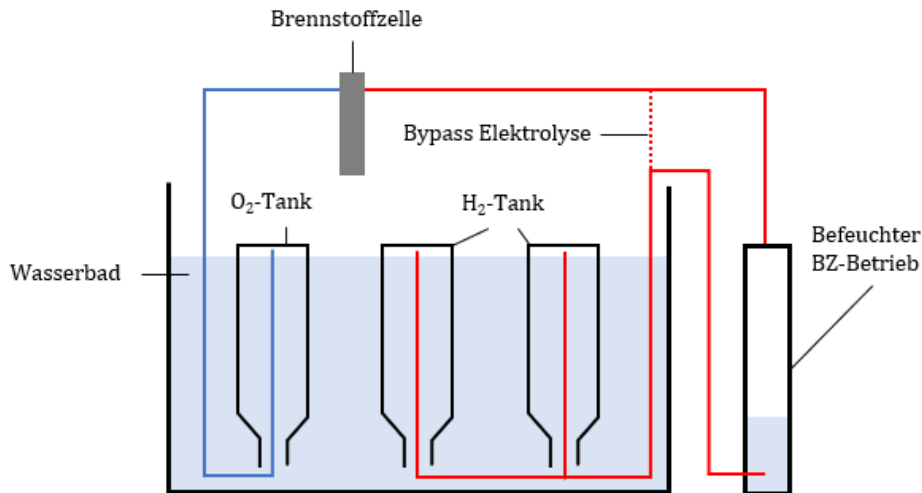


Abbildung 14: Schematische Aufbau des hydrostatischen Gasspeichers

Beim Befüllen des Speichers (Elektrolyse) Wird der Wasserstoff direkt über den Bypass in den Tank geleitet. Das Wasser wird aus den Flaschen verdrängt und es entsteht gleichzeitig ein hydrostatischer Druck. Während des Brennstoffzellenbetriebs strömen die Gase durch einen leichten hydrostatischen Überdruck in die Brennstoffzelle. Der Wasserstoff wird nun allerdings über den Befeuchter geleitet. Dies ist ein einfacher Blubbere. Darin befindet sich ein Feucht- und Temperatursensor. Zum Umleiten des Wasserstoffs werden zwei Einfache Klemmen verwendet. Die Verzweigungen der Schläuche wurden mit T-Stücken realisiert. Der verwendete Schlauch befindet sich im Anhang.



Abbildung 15: Gasbefeuchter (links) aus einem Acrylglaszylinder und der hydrostatische Gasspeicher bestehend aus 6 PET-Flaschen je 1 l

4.3 Wasserspeicher

Für den Elektrolysebetrieb wird auf der Kathodenseite eine Wasserzufuhr benötigt. Aufgrund der sehr geringen Wassermenge, die benötigt wird, wurde als Wasserspeicher eine Trinkflasche verwendet. Am Deckel wurde an der Öffnung ein Teflonschlauch mit Heißkleber wasserdicht verklebt. Der Boden der Flasche wurde entfernt, um Wasser nachfüllen zu können. Die Flasche wurde umgedreht befestigt (Abbildung 16). Im Elektrolysebetrieb wurde darauf geachtet, dass der Wasserstand etwas höher als der oberste Punkt der Brennstoffzelle ist.



Abbildung 16: Wasserspeicher und -zufuhr auf der Kathodenseite

4.4 Messtechnik

Um Versuche auszuwerten sollen folgende Messwerte mit einem Arduino Nano aufgezeichnet werden:

- Strom (ACS712 30A)
- Zellspannung (ARCELI DC0-25V)
- Zelltemperatur (DS18B20)
- Temperatur des Wasserstoffs (DHT22)
- Relative Feuchte des Wasserstoffs (DHT22)

Das Programm wurde so geschrieben, dass die Messwerte alle zwei Sekunden protokolliert. Das Programm befindet sich bereits auf dem Arduino. Damit dies funktioniert müssen die Sensorausgänge (Digital- bzw. Analogausgang) wie in Tabelle 2: an den Arduino angeschlossen werden. Zudem müssen sie für die Stromversorgung mit 5 V und Ground (GRD). Ein Pull-up Widerstand ist beim Temperatursensor zu beachten.



Anschluss	Sensor	Kommentar
D1	DS18B20	4,7 k Widerstand zwischen 5V und D1 (Pull-up)
D8	DHT22	
A0	ACS712 30A	Stromsensor 1
A1	ACS712 30A	Stromsensor 2
A2	ACS712 30A	Stromsensor 2
A3	ARCELI DC0-25V	Zu messende Spannung richtigerum an Sensor anschließen

Tabelle 2: Die im Programm festgelegten Anschlüsse der Sensoren

Es können die drei Stromsensoren parallel geschlossen werden, um gegebenenfalls Ströme bis zu 90 A zu messen. Um die Daten aufzuzeichnen muss der Arduino Nano mit einem PC verbunden werden, auf dem die entsprechende Arduino Software installiert ist [10]. Nun müssen unter „Werkzeuge → Bibliotheken verwalten“ folgende Bibliotheken installiert werden (siehe Abbildung 17, um eventuelle Änderungen am Programm vorzunehmen:

- DHT sensor library
- DallasTemperature
- OneWire

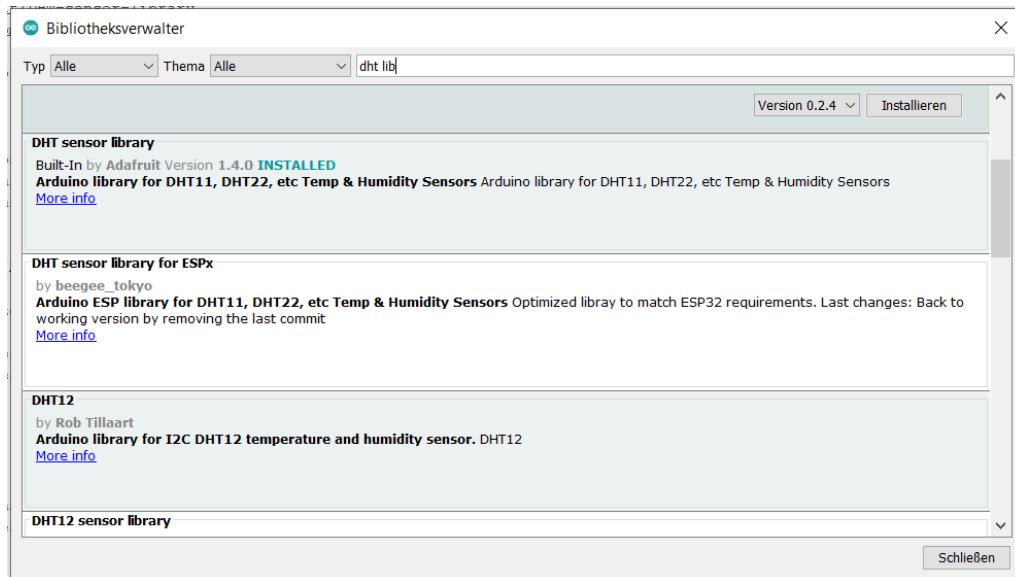


Abbildung 17: Arduino Bibliotheksverwalter

Unter „Werkzeuge → Board“ muss nun der „Arduino Nano“ ausgewählt werden, als Prozessor der „ATmega328P (Old Bootloader)“ sowie der richtige Port an dem der Arduino am PC angeschlossen ist.

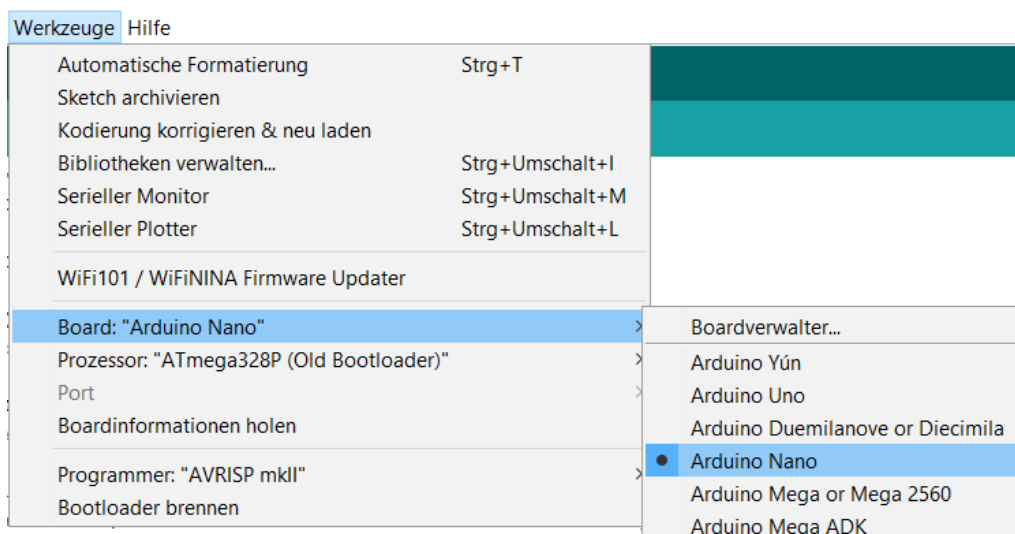


Abbildung 18: Voreinstellungen für Board, Prozessor und Port auswählen

Nun sollte die Kommunikation zwischen dem Arduino Nano und dem PC funktionieren. Unter „Werkzeuge → Serieller Monitor“ sollten die Sensorwerte nun geplottet werden. Dieses Anzeigefenster ist aber lediglich dafür da, um zu sehen, was auf dem Arduino läuft. Damit die Daten nun auch als File abgespeichert werden können, muss nun das Programm PuTTY installiert werden [9]. In diesem Programm müssen nun einige Voreinstellungen getroffen werden, wie im Anhang beschrieben. Die Voreinstellungen können gespeichert werden, sodass sie nur einmalig zu treffen sind. Klickt man nun auf den Button „open“ werden die geplotteten Sensordaten vom

Arduino in einer txt-Datei auf dem vordefinierten Pfad abgelegt. Das Arduino Programm (siehe Anhang) ist so geschrieben, dass die txt-Datei als auch als csv-Datei umgespeichert werden kann. Nun sind die Messdaten einfach zu handhaben.

4.5 Verrohrung

Ein weiterer wesentlicher Punkt für die Anlagenauslegung ist die Verrohrung. Da es sich bei H_2 um ein Gas mit sehr kleinen Molekülen handelt, müssen für die Verrohrung Schläuche eingebaut werden, die eine entsprechende Gasdurchlässigkeit aufweisen. Eine geringe Gasdurchlässigkeit bedeutet eine hohe Vernetzung des Polymerkunststoffes was wiederum zur Gasdichtheit aber auch geringerer Elastizität des Kunststoffes führt. Für die Verrohrung dieser Brennstoffzelle werden Polypropylen-Schläuche von THOMAFLUID, mit einem Innendurchmesser von 4 mm verwendet. Diese werden in der chemischen Industrie häufig angewendet. Exakte Informationen befinden sich im Datenblatt im Anhang.

4.6 Gesamtaufbau

Der Gesamtaufbau erfolgt auf einem selbst gefertigten Stand. Dieser hat zwei Ebenen, Rückplatten auf denen Komponenten montiert werden können und Räder zur Fortbewegung.

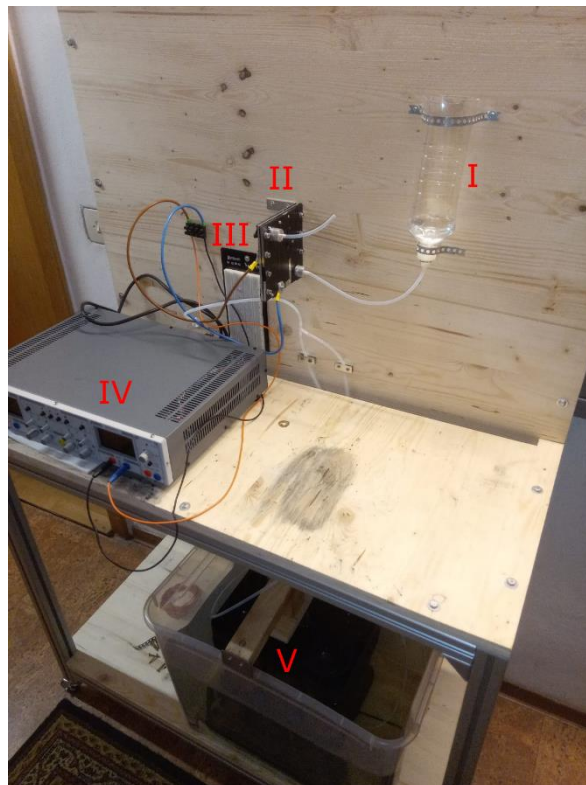


Abbildung 19: Bisheriger Versuchsaufbau auf dem Versuchsstand

In Abbildung 19 sind die bereits montierten Bauteile ersichtlich.

- I Wasserspeicher für destilliertes Wasser
- II PEM Brennstoffzelle
- III Schnittstelle Messtechnik
- IV Netzgerät N1
- V Hydrostatischer Speicher

Die Elektrotechnik befindet sich noch im provisorischen Aufbau, da zuerst Messungen erfolgen müssen, um die genaue Dimensionierung festzulegen. Es ist jedoch schon der Elektrolysebetrieb möglich. Es gilt einige Dinge beim Betrieb des Systems zu beachten.

Momentan kann mit der Anlage nur Elektrolyse betrieben werden. Vor jedem Start der Anlage ist die Kathode und Anode auf Durchgängigkeit zu prüfen. Hierzu wird ein Multimeter verwendet, welches diese Funktion beinhaltet. Ist eine Verbindung zwischen Anode und Kathode vorhanden sind die Schraubverbindungen zu prüfen. Vor jeder Inbetriebnahme ist zudem die Dichte der Zelle zu überprüfen. Hierzu wird destilliertes Wasser in den Tank gegeben und auf etwaige Austrittsspuren geachtet. Der Füllstand muss nicht hoch sein (2-3 cm) da wenige Milliliter schon für eine ausreichende Gasproduktion genügen. Bestenfalls ist immer destilliertes Wasser im Tank, um die Membran feucht zu halten. Des Weiteren sind optisch Schlauchanschlüsse auf Undichtheiten zu überprüfen. Für die Inbetriebnahme wird über das Messgerät eine Spannung von 1,23-2 V eingestellt. Die Spannung soll an der Zelle selbst mindestens 1,23 Volt betragen. Daher ist an der Zelle die Spannung zu messen und ggf. das Netzgerät zu adjustieren (aufgrund des Spannungsabfalles). Liegt genügend Spannung an, wird am hydrostatischen Gasspeicher ein Unterdruck erzeugt (Zentralstück des Speichers mit Flaschen wird angehoben). Dies fördert die Gaseinspeisung in den Speicher. Beim ersten Befüllen des Speichers muss der Tank überfüllt werden da der restliche Sauerstoff in der Anlage entweichen muss. Mittels Schlauchklemmen wird der Weg des Gases bestimmt (Ob durch Befeuchter oder direkt in den Speicher).

Der Betrieb über die finalisierte Zelle ist leicht geändert vorgesehen.

Elektrolysebetrieb

Vor dem Betrieb sind die Dichtheit und Isolation des Systems, wie oben erwähnt, zu überprüfen. Ist die Elektrotechnik vollendet wird über das Netzgerät eine Spannung angelegt und bei der Zelle auf 1,23 V überprüft. Wobei beim ersten Anlauf ein zweiter Kanal des Netzgerätes als Hilfe für die Schützkontakte dient (siehe Elektrotechnik Schaltung). Für die Messtechnik wird ein Laptop mit der entsprechenden Software an der Arduino-Schnittstelle verknüpft. Wenn nötig

wird die Anlage ebenfalls mittels Unterdrucks entlüftet. Nun kann beliebig Gas produziert werden, wobei eine optische Kontrolle der Anlagendichtheit zu empfehlen ist.

Brennstoffzellenbetrieb

Wird der Brennstoffzellenbetrieb benötigt, wird die Spannung etwas gedrosselt (jedoch nicht ausgeschaltet). Die Gasproduktion soll angehalten werden, ohne dass die Zelle eigenständig Spannung erzeugt. Vor dem Umschalten werden die oder das Potentiometer auf den höchstmöglichen Widerstand adjustiert. Anschließend wird auf den Brennstoffzellenbetrieb geschaltet (Laut Abbildung 12 S2). Die Produktion von Spannung und Strom beginnt. Eine Erhöhung des Verbraucher-Widerstandes reduziert die Leistung des Verbrauchers. Ein Schaltvorgang unter hohen Leistungen verringert die Lebenszeit des Schalters oder der Schaltung. Nach dem Schaltvorgang wird der Verbraucher wie gewünscht eingestellt. Zum zusätzlichen Schutz des Netzgerätes werden die Sicherungen hinter desselben entfernt. Somit ist das Netzgerät auch bei einer Fehlfunktion der Schaltung geschützt. Mittels Schlauchklemmen wird der Weg des Wasserstoffes durch den Gasspeicher geleitet und die Einspeiseleitung zum Speicher geschlossen. Die Brennstoffzelle liefert jetzt Strom und kann beliebig gefahren werden. Das entstehende Wasser wird wieder in den ursprünglichen Wassertank geführt.

Bei Beendigung des Versuches sollte das gesamte Gas aus dem Speicher verbraucht sein. Es wird der Verbrauchswiderstand erhöht und die Zelle auf den Elektrolysebetrieb geschaltet (Einsetzen der Sicherungen nicht vergessen). Die Wege des Gases werden mittels Schlauchklemmen ebenfalls angepasst. Dies bedeutet der Befeuchter wird verschlossen und Wasserstoff wieder direkt zum Gasspeicher geleitet. Bei Unterbrechung der Spannungsversorgung bleiben die Kontakte des Schützes in der eingestellten Position. Somit ist ein sofortiger Elektrolysebetrieb bei erneutem Einschalten gewährleistet. Bei nicht Benutzung der Anlage ist darauf zu achten, die Membran feucht zu halten. Dazu wird einfach Wasser im Wasserbehälter gelassen.

5. Versuche

Für die ersten Versuche mit der Brennstoffzelle versuchten wir zunächst einen Elektrolysebetrieb gestartet, um die Prinzipielle Funktion der Zelle zu überprüfen. Dafür muss der Minuspol (Anode) des Netzteils auf der Seite angeschlossen werden, auf der das destillierte Wasser eingeführt wird. Anschließend drehten wir die Spannung Schrittweise nach oben, und maßen den Strom. Ab eine angelegte Spannung von ca. 2 V begann signifikant Strom zu fließen. Ab dann wurden auch die Gase Wasserstoff und Sauerstoff gebildet. Dies war zu erkennen, weil ein Teil des Schlauchs an Sauerstoffausgang mit Wasser gefüllt war. Mit zunehmender Spannung stieg auch der Gasvolumenstrom. Diese Erkenntnis beruht auf qualitativer Ebene (visuell beobachtet).

Es wurden insgesamt zwei solcher Messungen durchgeführt. Einmal mit angeschlossenen Gasschläuchen an den hydrostatischen Gasspeicher und einmal mit offenen Gasauslässen. Die zweite Messung wurde durchgeführt, um das Zellverhalten ohne Gegendruck zu untersuchen. Im ersten Versuch wurden die Schläuche zum Gasspeicher teils mit Wasser geflutet, wodurch nicht klar war, welchen Widerstand dies für den Gasfluss darstellte. Zudem quellte ab einer Spannung von ca. 9 V auf der Kathode Schaum heraus. Die Membran hat also Wasser durchgelassen. In der sind die Ergebnisse der Messungen grafisch dargestellt.

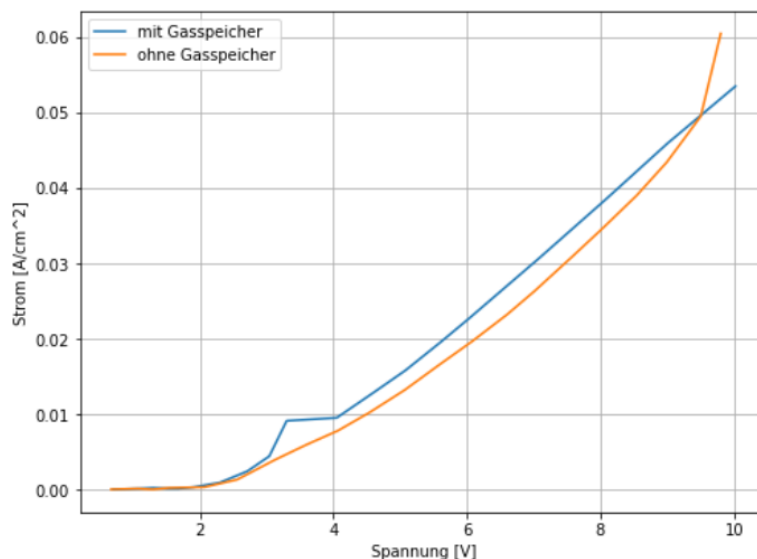


Abbildung 20: Ergebnisse der Elektrolyseversuche

Der erste Versuch zeigt eine lineare Steigung der flächenspezifischen Stromstärke mit einem Ausreißer bei 3,5 V welcher vermutlich auf einen Messfehler zurückzuführen ist. Der zweite Versuch mit offenen Gasausgängen zeigt einen leicht bauchigen Verlauf, wobei die Stromkurve überraschenderweis unterhalb der ersten Messung verläuft (bis auf den Letzten Messwert). Eine eindeutige Interpretation der Verläufe ist uns nicht möglich. Es könnte die Zelltemperatur eine

Rolle spielen. Da der Erste Versuch kalt (Umgebungstemperatur 8 °C) stattgefunden hat und der zweite Versuch direkt im Anschluss, nachdem sich die Zelle durch den ersten Versuch leicht erwärmt hatte. Da der Temperatursensor zu diesem Zeitpunkt noch nicht an der Zelle befestigt war, können wir dazu keine genauere Aussage machen.

Die Versuche lieferten allerdings eine wichtige Erkenntnis: Die PEM Elektrolyse funktioniert offensichtlich auch mit einer MPL auf der Gasdiffusionsschicht. Bisher haben wir zu dieser Methode keine Literatur gefunden. In Papers zur PEM Elektrolyse, die im Zusammenhang mit „MPL“ zu finden¹ waren handelte es sich laut Nomenklatur immer um eine *Macro*-porous Layer [2, 7]. Die anfängliche Befürchtung war, dass die Mikroporöse Schicht, die dafür optimiert ist, das Wasser im Brennstoffzellenbetrieb von der Membran abzuleiten (siehe Kapitel 3.2), im Umkehrprozess das Wasser nicht zur Membran weiterleitet. Ein Elektrolyseversuch mit dem Zelldesign ist möglicherweise neuartig.

¹ Gesucht wurde auf Google Scholar mit „PEM electrolysis MPL“. Es wurden überwiegend Artikel von ScienceDirect untersucht.

6. Fazit

Das Ziel, eine elektrolysefähige PEM Brennstoffzelle zu bauen wurde erreicht. Trotz großer Herausforderungen in Corona-Zeiten konnten wir uns um die Beschaffung der Hardware und der Fertigung sowie dem Zusammenbau aller Teile kümmern. Es wurde mit dem Projekt ein großes Verständnis zur Funktionsweise einer Brennstoffzelle, sowie den dazugehörigen Anforderungen an die Zellkomponenten geschaffen. Mit dem mobilen Versuchsstand wurde eine flexible Einheit realisiert, mit der es möglich ist, die Zelle zu untersuchen und die wichtigsten Parameter zu messen. Mit dem Versuch bewiesen wir, dass eine PEM Elektrolyse mit einer MPL möglich ist. Leider konnten wir die Zelle nicht mehr im Brennstoffzellenbetrieb testen. Die Ergebnisse wären wichtig, um das gesamte Zellverhalten zu verstehen, und den Wirkungsgrad genauer zu untersuchen.

7. Ausblick

Der Aufbau der Zelle hat für Elektrolyse funktioniert. Jedoch konnte nicht getestet werden, ob diese auch im Brennstoffzellenbetrieb funktioniert. Daher kann man auch nicht sagen, ob der Katalysator auf dem Kohlepapier richtig aufgebracht wurde. Vermutlich könnte der Verbrauch des Katalysatormaterials noch stark reduziert werden. Da wir die Membran und das Kohlepapier nicht unnötig beschädigen wollten, wurde die Zelle nach der erfolgreichen Elektrolyse nicht mehr geöffnet. Daher konnten wir nicht sehen, ob die Bipolarplatte aus Aluminium für diese Versuche korrosionsbeständig war. Wenn dies nicht der Fall ist, müsste man diese mit einem anderen Material, z. B. Carbon verwenden. Grundsätzlich kann man jedoch optimistisch sein, dass auch die Brennstoffzellenversuche funktionieren würden.

Das Grundprinzip der Elektrotechnik ist konzipiert. Für die Detailkonzipierung wird jedoch noch ein Kurzschlussversuch im Brennstoffzellen-Aufbau benötigt. Die Anschaffung von Gleichstrom Relais (Schützen) kann sehr kostspielig sein. Daher wird bei der Elektrotechnik darauf geachtet die Bauteile und Leiter nicht zu überdimensionieren, um Kosten zu sparen. Der Aufbau selbst sollte möglichst von einer elektrischen Fachkraft, oder eingeschulten Personen unternommen werden.

Die Sensoren für die Spannungs- und Strommessung sowie für die Feuchte- und Temperaturmessungen müssen in die Elektrotechnik integriert bzw. an der Zelle angebracht werden. Lediglich der Feuchtesensor ist bereits fix mit dem Befeuchter verbaut.

Anhand der Erkenntnisse können zukünftige Studenten einen Sinnvollen Anwendungsfall für die Brennstoffzelle finden. Dies könnte möglicherweise eine autarke Outdoor Stromversorgung sein, welche über ein kleines PV-Modul geladen wird. Der Stand könnte aber auch weiter für Versuchszwecke dienen.

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1:	REDOXREAKTION EINER WASSERSTOFF-SAUERSTOFFZELLE [6]	4
ABBILDUNG 2:	PRINZIPIELLER AUFBAU EINER PEM BRENNSTOFFZELLE IM SCHNITT [6].....	5
ABBILDUNG 3:	BIPOLARPLATTEN AUS ALUMINIUM (130 MM X 130 MM X 5 MM)	6
ABBILDUNG 4:	WASSERTRANSPORT DURCH DIE GDL [1]	7
ABBILDUNG 5:	KATALYSATOR IN WÄSSRIGER LÖSUNG [8].....	8
ABBILDUNG 6:	CHEMISCHE STRUKTUR VON NAFION [13].....	8
ABBILDUNG 7:	AUFBAU DER BRENNSTOFFZELLE (KATHODENSEITE)	10
ABBILDUNG 8:	AUFBAU DER BRENNSTOFFZELLE (ANODENSEITE)	11
ABBILDUNG 9:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER BRENNSTOFFZELLEN-ANLAGE	12
ABBILDUNG 10:	NETZGERÄT N1	14
ABBILDUNG 11:	DARSTELLUNG VERKABELUNG ELEKTROTECHNIK	15
ABBILDUNG 12:	VERDRAHTUNGSSCHEMA EINER SCHÜTZSCHALTUNG MIT GEGENSEITIGER VERRIEGELUNG 16	
ABBILDUNG 13:	10 A NEOZED SCHMELZSICHERUNGEN [9]	17
ABBILDUNG 14:	SCHEMATISCHE AUFBAU DES HYDROSTATISCHEN GASSPEICHERS	18
ABBILDUNG 15:	GASBEFEUCHTER (LINKS) AUS EINEM ACRYLGLASZYLINDER UND DER HYDROSTATISCHE GASSPEICHER BESTEHEND AUS 6 PET-FLASCHEN JE 1 L.....	19
ABBILDUNG 16:	WASSERSPEICHER UND –ZUFUHR AUF DER KATHODENSEITE.....	19
ABBILDUNG 17:	ARDUINO BIBLIOTHEKSVERWALTER.....	21
ABBILDUNG 18:	VOREINSTELLUNGEN FÜR BOARD, PROZESSOR UND PORT AUSWÄHLEN	21
ABBILDUNG 19:	BISHERIGER VERSUCHSAUFBAU AUF DEM VERSUCHSSTAND	22
ABBILDUNG 20:	ERGEBNISSE DER ELEKTROLYSEVERSUCHE	25

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1:	ÜBERSICHT BRENNSTOFFZELLENTYPEN [6]	4
TABELLE 2:	DIE IM PROGRAMM FESTGELEGTE ANSCHLÜSSE DER SENSOREN	20

References

- [1] Egetenmeyer, A.-K. 2017. *Elektrochemische Verfahren zur Herstellung von Brennstoffzellenkatalysatoren auf Gasdiffusionselektroden*. DOI=10.22028/D291-26968.
- [2] Gago, A. S., Lettenmeier, P., Stiber, S., Ansar, A. S., Wang, L., and Friedrich, K. A. 2018. Cost-Effective PEM Electrolysis: The Quest to Achieve Superior Efficiencies with Reduced Investment. *ECS Trans.* 85, 13, 3–13.
- [3] 2020. *Gas Diffusion Layers*. <https://fuelcellcomponents.freudenberg-pm.com/Products/gas-diffusion-layers>. Accessed 27 December 2020.
- [4] Ji, M. and Wei, Z. 2009. A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Energies* 2, 4, 1057–1106.
- [5] Kemman Kai. *Membran*. <https://www.chemie.de/lexikon/Membran.html>. Accessed 15 January 2021.
- [6] Kurzweil, P. 2016. *Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [7] Lettenmeier, P., Kolb, S., Burggraf, F., Gago, A. S., and Friedrich, K. A. 2016. Towards developing a backing layer for proton exchange membrane electrolyzers. *Journal of Power Sources* 311, 153–158.
- [8] QuinTech. *C-10-PT*. <https://www.quintech.de/produkte/komponenten/katalysatoren/c-10-pt/>. Accessed 15 January 2021.
- [9] SL, U. T. 2020. *PuTTY (Windows)*. <https://putty.de.uptodown.com/windows>. Accessed 27 December 2020.
- [10] 2020. *Software / Arduino*. <https://www.arduino.cc/en/software>. Accessed 27 December 2020.
- [11] Strasser, P. 2009. Nanostrukturierte Kern-Schale-Katalysatoren für PEM-Brennstoffzellen - Hochaktive Materialien durch partielle Entlegierung. *Chemie Ingenieur Technik* 81, 5, 573–580.
- [12] Thanasilp, S. and Hunsom, M. 2010. Effect of MEA fabrication techniques on the cell performance of Pt-Pd/C electrocatalyst for oxygen reduction in PEM fuel cell. *Fuel* 89, 12, 3847–3852.
- [13] Wikipedia. 2019. *Nafion*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Nafion&oldid=194564071>. Accessed 22 January 2021.

Anhang

Arduino Programm

```
#include "DHT.h" //DHT Sensor
#include <OneWire.h> //DS18B20
#include <DallasTemperature.h> //DS18B20

#define DHTPIN 8 //DHT Sensor
#define ONE_WIRE_BUS_1 2 //Temperatursensor 1 (DS18B20)
//#define ONE_WIRE_BUS_2 4 //Temperatursensor 2 (DS18B20)

// Uncomment whatever type you're using!
#define DHTTYPE DHT22 //DHT 22 (AM2302), AM2321

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //Initialize DHT sensor.

OneWire oneWire_in(ONE_WIRE_BUS_1); //Initialisierung Temperatursensor 1 (DS18B20)
//OneWire oneWire_out(ONE_WIRE_BUS_2); //Initialisierung Temperatursensor 2 (DS18B20)

DallasTemperature Zelltemperatur_1(&oneWire_in); //Initialisierung Temperatursensor 1
(DS18B20)
//DallasTemperature Zelltemperatur_2(&oneWire_out); //Initialisierung Temperatursensor 2
(DS18B20)

//Strommesssensor 1
const int StromSensor1 = A0; //Stromsensor 1 an diesen Eingang anschließen
const int Amax1 = 30; //maximaler Strom
float Voltage1;
float Strom1;

//Strommesssensor 2
const int StromSensor2 = A1; //Stromsensor 2 an diesen Eingang anschließen
const int Amax2 = 30; //maximaler Strom
float Voltage2;
float Strom2;

//Strommesssensor 3
const int StromSensor3 = A2; //Stromsensor 3 an diesen Eingang anschließen
const int Amax3 = 30; //maximaler Strom
float Voltage3;
float Strom3;
```



```

//Spannungsmesssensor: https://arduino-lessons.nl/les/voltage-sensor-uitlezen-met-arduino
const int voltageSensorPin = A3;          //Spannungssensor an Pin A3 anschließen
float vIn;                               //gemessene Spannung (5V = max 25 V)
float vOut;                               //Spannung am Pin
float voltageSensorVal;
const float factor = 4.092;              //reduzierungsfaktor der Spannungsabschirmung
(nicht selbst gemessen)
const float vCC = 5.00;                  //Sensor bei Arduino an 5V anschließen

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  dht.begin();
  Zelltemperatur_1.begin();
  //Zelltemperatur_2.begin();

  Serial.print(F("Zeit [s]; "));
  Serial.print(F("rel. Feuchte H2 [% / 100]; "));
  Serial.print(F("Temperatur H2 [°C / 100]; "));
  Serial.print(F("Zelltemperatur 1 [°C / 100]; "));
  //Serial.print(F("Zelltemperatur 2 [°C / 100]; "));
  Serial.print(F("Strom [A/ 100]; "));
  Serial.print(F("Zellstannung [V/ 100]; "));
  Serial.println(F("Leistung [W/ 100]; "));

}

int i = 0;                               // Zeitschritt initialwert
int Delay = 2000;                         // Messzyklus (* 0.001s)

void loop() {
  delay(Delay);                           // Wait a few seconds between measurements.

  // Reading temperature or humidity takes about 250 milliseconds!
  // Sensor readings may also be up to 2 seconds 'old' (its a very slow sensor)
  float h = dht.readHumidity();           // Read humidity (DHT)
  float t = dht.readTemperature();        // Read temperature as Celsius
(DHT)
  //if (isnan(h) || isnan(t)) {           // Check if any reads failed
(DHT) and exit early (to try again).
  // Serial.println(F("Failed to read from DHT sensor!"));
  // return;
  //}

```

```

//Zelltemperaturen
Zelltemperatur_1.requestTemperatures();           // abfrage Zelltemperatur 1
(DS18B10)
//Zelltemperatur_2.requestTemperatures();         // abfrage Zelltemperatur 2
(DS18B10)
float Z1 = Zelltemperatur_1.getTempCByIndex(0);   // Read Zelltemperatur 1 (DS18B10)
//float Z2 = Zelltemperatur_2.getTempCByIndex(0); // Read Zelltemperatur 2 (DS18B10)

//Berechnung Strom
Voltage1 = analogRead(StromSensor1);              // Analogwerte Sensor 1(0...1023)
entspricht (-30...30 A)
Strom1 = (Voltage1 -512) * (Amax1 / 1024);        // gemessene Spannung an Sensor
1
Voltage2 = analogRead(StromSensor2);              // Sensor 2...
Strom2 = (Voltage3 -512) * (Amax2 / 1024);
Voltage3 = analogRead(StromSensor3);             // Sensor 3...
Strom3 = (Voltage3 -512) * (Amax3 / 1024);
float StromGes = Strom1 + Strom2 + Strom3;        // Gesamter Strom aller Sensoren

//Berechnung Spannung
voltageSensorVal = analogRead(voltageSensorPin); // lesen Pin
vOut = (voltageSensorVal / 1023) * vCC;          // gemessene Spannung an Pin
vIn = vOut * factor;                             // gemessene Spannung an Sensor

//Berechnung Leistung
float P = vIn * StromGes;

Serial.print(i);
Serial.print(F("; "));
Serial.print(int(h * 100));
Serial.print(F("; "));
Serial.print(int(t * 100));
Serial.print(F("; "));
Serial.print(int(Z1 * 100));                       //Schreiben der Zelltemperatur
1, wenn zweiter Sensor aktiv, "println" ändern zu "print"
//Serial.print(F("; "));                          //aktivieren, wenn zweiter
Temperatursensor aktiv
//Serial.print(int(Z2 * 100));                     //Schreiben der Zelltemperatur
2
Serial.print(F("; "));
Serial.print(StromGes * 100);                       // Schreiben Strom
Serial.print(F("; "));
Serial.print(vIn * 100);                           //Schreiben der Zellspannung
Serial.print(F("; "));

```

```

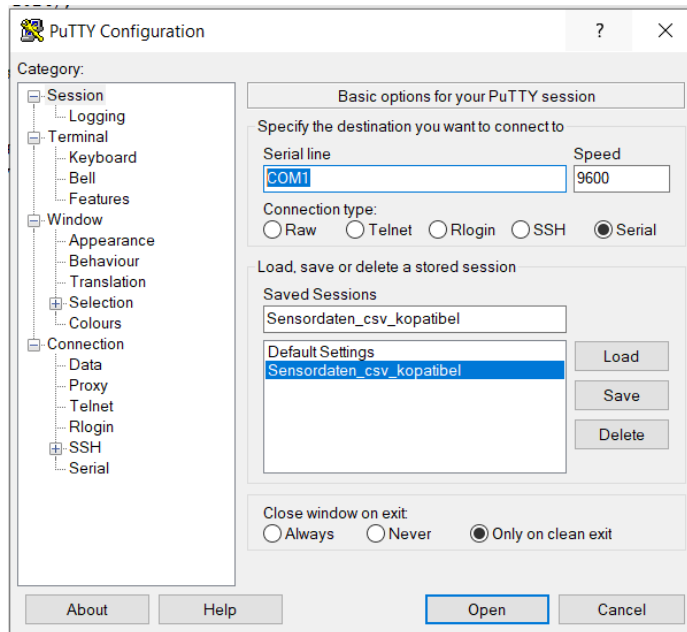
Serial.println(P * 100);

i = i + (Delay/1000);
}

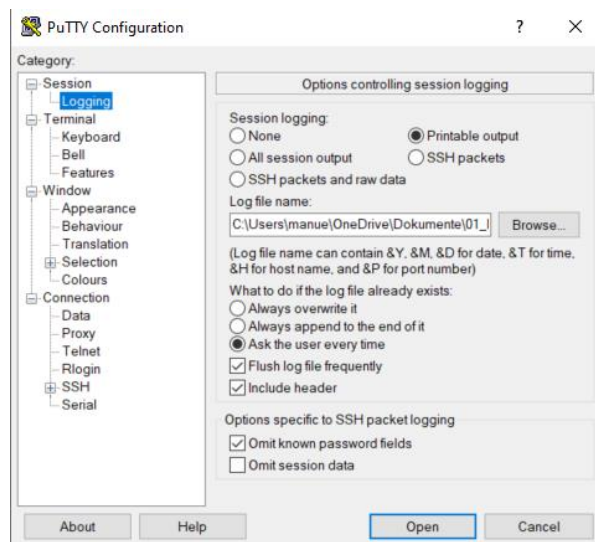
```

PuTTY Voreinstellungen

- Entsprechender COM-Port wählen



- Wählen wo txt-Datei abgelegt wird



Verwendeter Komponenten

FREUDENBERG GAS DIFFUSION LAYERS

TECHNICAL DATA

PROPERTIES	UNIT	H14	H23	H23I2	H14C10	H15C13	H15C14	H14CX483	H14CX653	H23C2	H23CX653	H23C9	H24CX483	H23C8	H23C3	H24C5
HYDROPHOBIC TREATMENT				•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	
MICROPOROUS LAYER					•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Thickness @ 0.025MPa (Internal*)	µm	150	210	222	170	195	190	180	185	255	250	250	250	230	290	270
Thickness @ 1MPa (Internal*)	µm	115	170	187	141	155	150	142	145	215	210	210	210	200	230	215
Area Weight (DIN EN ISO 29073-1)	g/m ²	65	95	114	97	93	91	87	94	135	130	135	135	135	150	130
Compression Set @ 1MPa (Internal*)	µm	1.5	2	6	3	10	11	11	11	8	13	8	11	3	25	15
TP Electrical Resistance @ 1 MPa (Internal*)	mΩ·cm ²	4	4.5	6	5	9	7	6	6	10	7	8	8	8	9	9
IP Electrical Resistance (Internal*)	Ω	1.1	0.8	-	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7
TP Air Permeability** (DIN EN ISO 9237)	l / m ² ·s	570	400	179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TP Air Permeability acc. to Gurley (ISO 5636-5)	s	-	-	-	70	27	0.6	1	15	70	10	30	2	90	35	40
IP Air Permeability @ 1 MPa (Internal*)	µm ²	4.0	4.2	2.2	1.4	2.7	3.1	1.2	1.0	2.5	1.4	2.0	1.5	1.5	1.5	2.5
Tensile Strength (DIN EN ISO 29073-3).	N/50mm	> 20	> 25	> 35	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70	> 80	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70
Dry Diffusion Length (Internal*)	µm	-	-	-	640	560	510	540	730	800	950	800	700	770	1,400	1,000

* Freudenberg internal measurement standard

** @ 200 Pa pressure drop

TP = through-plane

IP = in-plane

(Rev. 12 – 15.08.2020)

All values represent averages, which are subject to usual production tolerances. The values do not represent specifications.

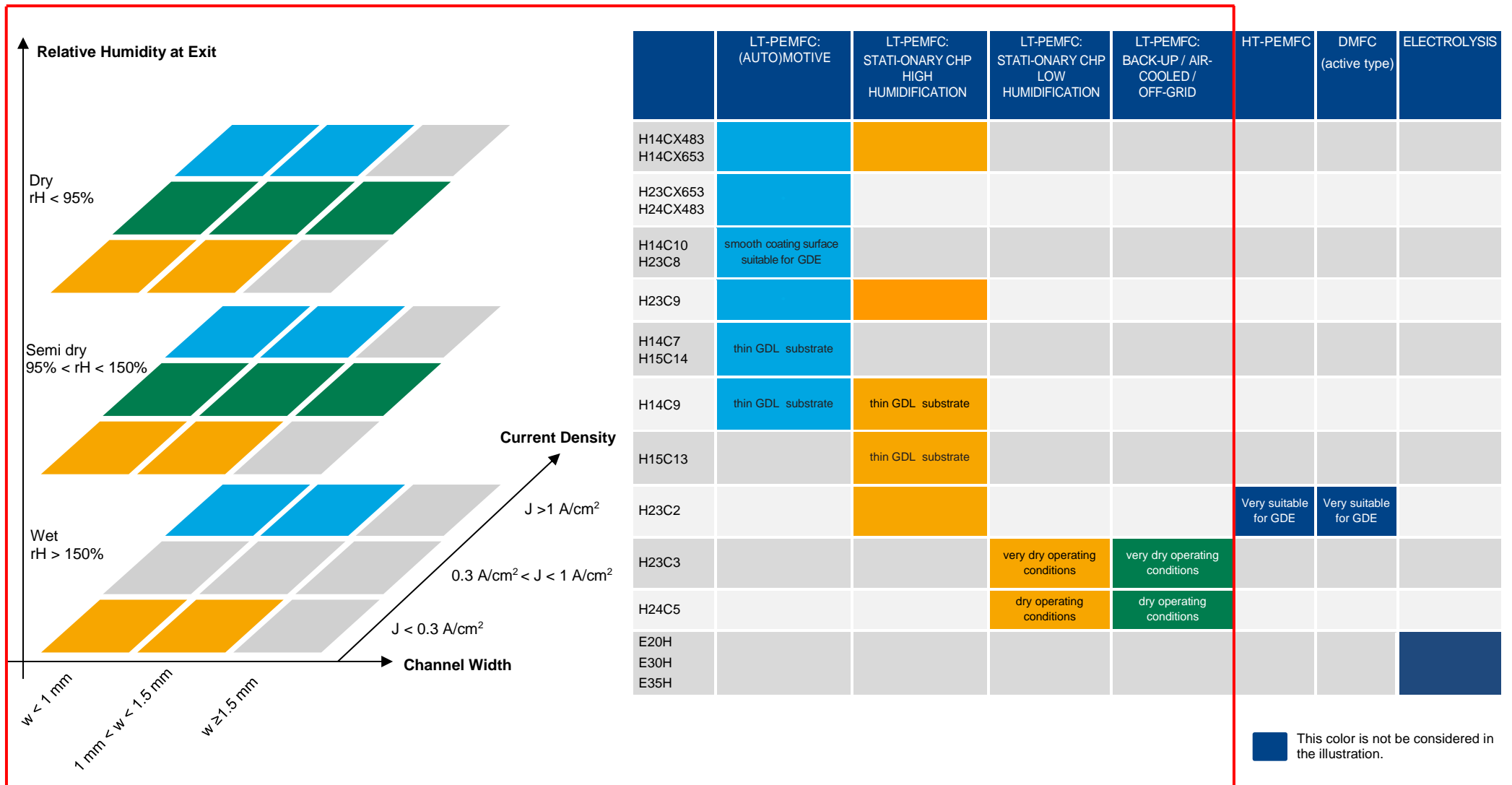
Any warranty and liability is subject to Freudenberg Performance Materials SE & Co. KG's General Terms of Delivery and Payment applicable at the date of delivery.

For info, please contact us: fuelcell@freudenberg-pm.com

Freudenberg Performance Materials SE & Co. KG · Hoehnerweg 2-4 · 69465 Weinheim, Germany · <https://fuelcellproduct.freudenberg-pm.com>

FREUDENBERG GAS DIFFUSION LAYERS

GDL RECOMMENDATION FOR LT-PEMFC APPLICATIONS



Freudenberg Performance Materials SE & Co. KG · Hoehnerweg 2-4 · 69465 Weinheim, Germany · <https://fuelcellproduct.freudenberg-pm.com>

THOMAFLUID®-High-Tech-PP-Chemieschlauch - kalibriert**Einsatzgebiet**

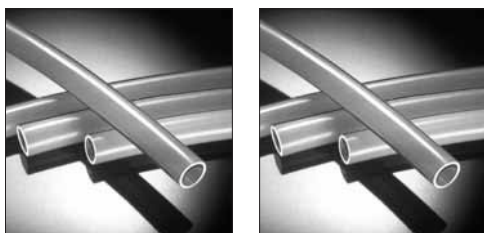
- Prozesschemie, Verfahrenstechnologie, Wasseraufbereitung, Wärmeaustauscher, Schutz- und Isolierleitungen

Produktspezifikation

- Gute chemische Beständigkeit
- Hohe Temperaturbeständigkeit
- Hydrolysebeständigkeit
- Sehr gute dielektrische Eigenschaften
- Höhere Härte und Steifigkeit sowie besseres Rückstellvermögen als PE
- Geringste Wasseraufnahme (gering hygroskopisch)
- Physiologische Unbedenklichkeit
- Geeignet für den Kontakt mit Lebensmitteln nach FDA

Technische Spezifikation

- **Werkstoff:** PP (Polypropylen)
- **Farbe:** natur
- **Shore-Härte D:** 72° (DIN 53505)
- **Temperaturbereich:** -25 bis +90 °C, kurzzeitig +120 °C
- **Dichte:** 0,905 g/cm³ (DIN 53479)
- **Reißdehnung:** 600 % (ISO 527)
- **Zugfestigkeit:** 36 MPa (ISO 527)
- **Biegefestigkeit:** 1.450 MPa (ASTM D790)
- **Erweichungstemperatur:**
 - bei 10 N (VST/A): +152 °C (ISO 306/A)
 - bei 50 N (VST/A): +87 °C (ISO 306/B)
- **Regelwerk:** FDA 21 CFR 177.1520
- **Toleranz Außen-Ø:** ±0,10 mm

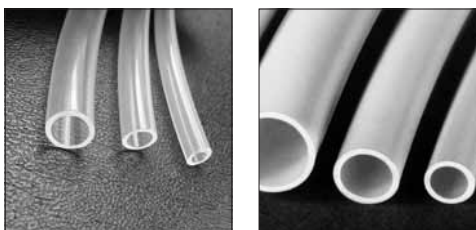


Artikel	Innen-Ø mm	Außen-Ø mm	max. Betr.- Druck ¹ bar	min. Biege- radius mm	Einheit m	Preis EURO
330085	2	4	33	60	5	120,00
330086	2	4	33	60	15	300,00
330087	4	6	20	75	5	122,00
330088	4	6	20	75	15	307,00
330089	6	8	14	85	5	125,00
330090	6	8	14	85	15	311,00
330091	8	10	11	100	5	131,00
330092	8	10	11	100	15	321,00
330093	10	12	9	125	5	140,00
330094	10	12	9	125	15	347,00

¹ bei +20 °C

PTFE-Schläuche**THOMAFLUID®-PTFE-Schläuche****Allgemeine Information**

- Einsetzbar in der chem. Verfahrenstechnik, Mikroelektronik, Analysetechnik, Prozesstechnik, Biotechnologie und Medizintechnik.
- Zum Fördern von Säuren, Laugen, Salzlösungen, auch stark chloridhaltigen, und Lösungsmitteln, auch halogenierten. Für den Einsatz im Niederdruckteil von HPLC-Systemen, insbesondere in metallfreien Anlagen, und für die Niederdruck-Flüssig-Chromatographie.
- Förderschlauch
- Sehr gute chemische Beständigkeit
- Sehr hohe Temperaturbeständigkeit
- Sehr guter Gleitreibungskoeffizient
- Antiadhäsive Oberfläche
- Sehr gute dielektrische Eigenschaften
- Geringe mechanische Festigkeitswerte (sofern ohne Füllstoffe)
- Höchste Gasdichtigkeit
- Biigsam, schlagzäh und alterungsbeständig
- Frei von extrahierbaren Stoffen, physiologisch unbedenklich und bioverträglich.
- PTFE ist ein Fluoroplast mit ausgezeichneter Beständigkeit gegen Säuren, Laugen, Lösungsmittel und Gase. Je nach mechanischer und chemischer Beanspruchung ist das Material thermisch bis +260 °C beständig. PTFE ist nicht beständig gegen Fluorverbindungen und geschmolzene Alkalimetalle bei höheren Temperaturen.
- **Werkstoff:** PTFE (Polytetrafluorethylen)
- **Farbe:** milchig, schwach durchscheinend
- **Temperaturbereich:** -200 bis +260 °C, kurzzeitig +280 °C
- **Toleranz Innen-Ø:**
 - 0 - 0,9 mm: ±0,07 mm
 - 1 - 2,9 mm: ±0,15 mm
 - 3 - 5 mm: ±0,20 mm
 - 5 - 7 mm: ±0,25 mm
 - 7 - 10 mm: ±0,30 mm
 - 15 - 20 mm: ±0,40 mm
- **Toleranz Wandstärke:**
 - 0,1 - 0,3 mm: ±0,07 mm
 - 0,3 - 0,6 mm: ±0,10 mm
 - 0,6 - 1,0 mm: ±0,15 mm
 - 1,0 - 2,0 mm: ±0,20 mm

THOMAFLO-PTFE-Chemieschlauch - mikro-dünnwandig

Artikel	Innen-Ø mm	Außen-Ø mm	Einheit m	Preis EURO
25295	0,4	0,68	3	19,00
25296	0,4	0,68	9	37,00
25297	0,4	0,68	15	48,00

Schläuche - PTFE-Schläuche

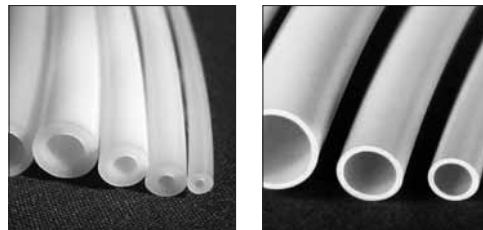
Harte Kunststoffschläuche / Kunststoffrohre

Artikel	Innen-Ø mm	Außen-Ø mm	Einheit m	Preis EURO	Artikel	Innen-Ø mm	Außen-Ø mm	Einheit m	Preis EURO
25298	0,5	0,76	3	19,00	25259	0,3	0,76	3	24,00
25299	0,5	0,76	9	38,00	25260	0,3	0,76	9	60,00
25300	0,5	0,76	15	49,00	25261	0,3	0,76	15	84,00
25301	0,6	0,86	3	19,00	25262	0,6	1,06	3	24,00
25302	0,6	0,86	9	40,00	25263	0,6	1,06	9	60,00
25303	0,6	0,86	15	51,00	25264	0,6	1,06	15	84,00
25304	0,7	1,01	3	20,00	25265	0,7	1,19	3	24,00
25305	0,7	1,01	9	42,00	25266	0,7	1,19	9	60,00
25306	0,7	1,01	15	55,00	25267	0,7	1,19	15	84,00
25307	0,9	1,16	3	27,00	25268	0,9	1,46	3	24,00
25308	0,9	1,16	9	54,00	25269	0,9	1,46	9	60,00
25309	0,9	1,16	15	69,00	25270	0,9	1,46	15	84,00
25310	1,07	1,37	3	28,00	25271	1,1	1,67	3	30,00
25311	1,07	1,37	9	55,00	25272	1,1	1,67	9	78,00
25312	1,07	1,37	15	71,00	25273	1,1	1,67	15	107,00
25313	1,5	1,8	3	36,00	25274	1,5	2,1	3	34,00
25314	1,5	1,8	9	71,00	25275	1,5	2,1	9	85,00
25315	1,5	1,8	15	91,00	25276	1,5	2,1	15	117,00
25316	1,7	2,08	3	38,00	25277	2,2	2,76	3	41,00
25317	1,7	2,08	9	74,00	25278	2,2	2,76	9	103,00
25318	1,7	2,08	15	96,00	25279	2,2	2,76	15	144,00
25319	2,2	2,56	3	48,00	25280	2,7	3,3	3	45,00
25320	2,2	2,56	9	94,00	25281	2,7	3,3	9	116,00
25321	2,2	2,56	15	113,00	25282	2,7	3,3	15	161,00
25322	2,4	2,81	3	49,00	25283	3,4	4,28	3	65,00
25323	2,4	2,81	9	97,00	25284	3,4	4,28	9	167,00
25325	2,7	3,09	3	49,00	25285	3,4	4,28	15	232,00
25326	2,7	3,09	9	97,00	25286	5,3	6,06	3	78,00
25328	3,4	3,78	3	60,00	25287	5,3	6,06	9	186,00
25329	3,4	3,78	9	120,00	25288	5,3	6,06	15	263,00
25331	3,8	4,16	3	60,00	25289	6,7	7,58	3	98,00
25332	3,8	4,16	9	120,00	25290	6,7	7,58	9	224,00
25334	5,3	5,78	3	71,00	25291	6,7	7,58	15	312,00
25335	5,3	5,78	9	142,00	25292	7,5	8,37	3	110,00
25337	6,7	7,18	3	101,00	25293	7,5	8,37	9	240,00
25338	6,7	7,18	9	162,00	25294	7,5	8,37	15	325,00
25340	7,5	7,98	3	101,00					
25341	7,5	7,98	9	162,00					
25343	8,4	8,98	3	122,00					
25344	8,4	8,98	9	220,00					

THOMAFLON-PTFE-Chemieschlauch - dünnwandig



THOMAFLON-PTFE-Chemieschlauch - standard



Artikel	Innen-Ø mm	Außen-Ø mm	Einheit m	Preis EURO
92520	0,3	0,8	3	11,00
92521	0,3	0,8	9	25,00
92522	0,3	1,75	3	15,00
92523	0,3	1,75	9	36,00