



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Peter Kuhn

Erarbeitung eines Brennstoffzellen-Versuchsstands  
für das Modul „Electro-chemical Energy Conversion –  
Fuel Cell Systems“



**Peter Kuhn**

**Erarbeitung eines Brennstoffzellen-  
Versuchsstands für das Modul  
„Electro-chemical Energy Conversion –  
Fuel Cell Systems“**

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: Professor Dr.-Ing Achim Schmidt

Zweitprüfer: Dipl.-Ing Alexander v. Stryk

Abgabedatum: 28.08.2015



## KURZFASSUNG

Um Studierenden das thermodynamische Verhalten und die elektrochemischen Zusammenhänge einer PEM-Brennstoffzelle nahezubringen und die Inhalte des Moduls "*Electro-chemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems*" zu vertiefen, wurde in dieser Bachelorarbeit ein Brennstoffzellen-Versuchsstand geplant.

Neben einer Beschreibung der Brennstoffzellentechnik, wurde der Einfluss der Temperatur und Gasbereitstellung auf die Zellspannung, sowie der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung herausgearbeitet. Dazu wurden Laborversuche vorgeschlagen, mit denen diese Zusammenhänge veranschaulicht dargestellt werden können.

Ein flexibler Versuchsstand wurde entworfen, an dem die Versuche durchgeführt werden können. Dazu wurde eine Anforderungsliste angefertigt, welche die nötigen Parameter der Brennstoffzelle, Mess- und Regelungstechnik und der Gasversorgung festlegt. Mit dieser Liste als Grundlage, wurde ein Anlagenschema entworfen und der Versuchsstand technisch ausgelegt. Erste Angebote zu essentiellen Komponenten wurden zu einer groben Kostenanalyse eingeholt und verglichen. Ein Brennstoffzellen-Versuchsstand trägt dazu bei, Studierenden eine Intuition für die Prinzipien dieser Zukunftstechnologie zu vermitteln. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, wie solch ein Versuchsstand praktisch umsetzbar und preislich einzuordnen ist.

## ABSTRACT

In this Bachelor's thesis, a fuel cell test station was designed in order to give students an understanding of the thermodynamic performance and the electrochemical relations of a proton exchange membrane fuel cell, as well as to deepen the content of the module "*Electro-chemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems*".

Alongside a description of fuel cell technology, the influence of temperature and gas supply on the cell voltage and the relation between current and voltage were worked out. For this purpose, laboratory experiments that can illustrate these relations were proposed.

A flexible test station, which can accommodate these experiments, was designed. A list of requirements was developed which determines the necessary parameters of the fuel cell, measurement and control technology, and gas supply. A process flow diagram of the station was designed based on this list. First quotations for essential components were obtained, compared, and drafted into a rough cost analysis.

A fuel cell test station contributes to providing students with insights into this future technology. In this thesis a possibility to realize such a test station is shown and an estimate of the price is given.

# INHALTSVERZEICHNIS

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                   | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Grundlagen</b>                      | <b>9</b>  |
| 2.1      | Brennstoffzelle . . . . .                           | 9         |
| 2.1.1    | Aufbau und Komponenten . . . . .                    | 10        |
| 2.1.1.1  | Elektrode . . . . .                                 | 11        |
| 2.1.1.2  | Elektrolyt . . . . .                                | 12        |
| 2.1.2    | Funktionsprinzip . . . . .                          | 13        |
| 2.1.3    | Brennstoffzellentypen . . . . .                     | 14        |
| 2.1.4    | Thermodynamik der Brennstoffzelle . . . . .         | 15        |
| 2.1.4.1  | Elektrodenpotentiale und Leerlaufspannung . . . . . | 15        |
| 2.1.4.2  | Reaktionsenthalpie . . . . .                        | 15        |
| 2.1.4.3  | Gibbs'sche Freie Reaktionsenthalpie . . . . .       | 16        |
| 2.1.4.4  | Gibbs-Helmholz-Gleichung . . . . .                  | 17        |
| 2.1.4.5  | Temperaturabhängigkeit der Zellspannung . . . . .   | 18        |
| 2.1.4.6  | Druckabhängigkeit der Zellspannung . . . . .        | 19        |
| 2.1.4.7  | Nernstgleichung . . . . .                           | 20        |
| 2.1.4.8  | Wirkungsgrade . . . . .                             | 20        |
| 2.1.5    | Betriebscharakteristika . . . . .                   | 22        |
| 2.1.5.1  | Strom-Spannungs Kennlinie . . . . .                 | 22        |
| 2.2      | Elektrolyse . . . . .                               | 24        |
| 2.3      | PEM-Brennstoffzelle . . . . .                       | 25        |
| 2.3.1    | Anwendung . . . . .                                 | 25        |
| 2.3.2    | Elektrolyt . . . . .                                | 26        |
| 2.3.3    | Betrieb . . . . .                                   | 26        |
| 2.3.3.1  | Wasserhaushalt und Befeuchtung . . . . .            | 26        |
| 2.3.3.2  | Purging . . . . .                                   | 26        |
| 2.3.3.3  | Air-Bleeding . . . . .                              | 27        |
| <b>3</b> | <b>Planung des Versuchsstands</b>                   | <b>28</b> |
| 3.1      | Mögliche Laborversuche . . . . .                    | 28        |
| 3.2      | Formulierung der Anforderungen . . . . .            | 29        |
| 3.2.1    | Brennstoffzelle . . . . .                           | 29        |
| 3.2.2    | Sicherheit . . . . .                                | 29        |
| 3.2.3    | Gasversorgung . . . . .                             | 30        |
| 3.2.4    | Befeuchtung . . . . .                               | 32        |
| 3.2.5    | Mess- und Regelgenauigkeit . . . . .                | 33        |
| 3.2.6    | Anforderungsliste . . . . .                         | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4 Technische Realisierung</b>                          | <b>35</b> |
| 4.1 Systementwurf . . . . .                               | 35        |
| 4.2 Gasversorgung . . . . .                               | 37        |
| 4.2.1 Wasserstoff-Versorgung . . . . .                    | 37        |
| 4.2.2 Luft-Versorgung . . . . .                           | 38        |
| 4.2.3 Befeuchtung . . . . .                               | 39        |
| 4.2.4 Wasserstoff-Stickstoff-Gemisch . . . . .            | 40        |
| 4.3 Kühlung . . . . .                                     | 40        |
| 4.4 Elektronische Last . . . . .                          | 42        |
| 4.5 Fließschema und Stückliste . . . . .                  | 43        |
| <b>5 Komponentenauswahl</b>                               | <b>45</b> |
| 5.1 Brennstoffzellenstack . . . . .                       | 45        |
| 5.2 Elektronische Last . . . . .                          | 47        |
| 5.3 Befeuchtung . . . . .                                 | 47        |
| 5.4 Massendurchflussregler (MFC) . . . . .                | 48        |
| 5.5 Druckregler . . . . .                                 | 50        |
| 5.6 Durchflussmesser . . . . .                            | 51        |
| 5.7 Mischventil . . . . .                                 | 52        |
| 5.8 Kostenanalyse . . . . .                               | 53        |
| <b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>                     | <b>55</b> |
| <b>Literatur</b>  | <b>57</b> |
| <b>Anhang</b>   | <b>I</b>  |
| <b>A Anhang</b>   | <b>I</b>  |
| A.1 Nutzwertanalyse Wasserstoffversorgung . . . . .       | II        |
| A.2 Nutzwertanalyse Wasserstoffversorgung . . . . .       | III       |
| A.3 Nutzwertanalyse Wasserstoffversorgung . . . . .       | IV        |
| A.4 Nutzwertanalyse Luftversorgung . . . . .              | V         |
| A.5 Nutzwertanalyse Luftversorgung . . . . .              | VI        |
| A.6 Nutzwertanalyse Luftversorgung . . . . .              | VII       |
| A.7 Fließschema . . . . .                                 | VIII      |
| A.8 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . .  | IX        |
| A.9 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . .  | X         |
| A.10 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XI        |
| A.11 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XII       |
| A.12 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XIII      |

---

|   |         |
|---|---------|
| A.13 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XIV     |
| A.14 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XV      |
| A.15 Brennstoffzellen: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XVI     |
| A.16 Elektronische Lasten: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XVII    |
| A.17 Elektronische Lasten: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XVIII   |
| A.18 Elektronische Lasten: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XIX     |
| A.19 Elektronische Lasten: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XX      |
| A.20 Elektronische Lasten: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XXI     |
| A.21 Elektronische Lasten: Angebote u. Datenblätter . . . . . | XXII    |
| A.22 Befeuchtung: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXIII   |
| A.23 Befeuchtung: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXIV    |
| A.24 Befeuchtung: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXV     |
| A.25 Befeuchtung: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXVI    |
| A.26 Befeuchtung: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXVII   |
| A.27 Befeuchtung: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXVIII  |
| A.28 Befeuchtung: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXIX    |
| A.29 Durchflussregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XXX     |
| A.30 Durchflussregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XXXI    |
| A.31 Durchflussregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XXXII   |
| A.32 Durchflussregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XXXIII  |
| A.33 Durchflussregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XXXIV   |
| A.34 Druckregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXXV    |
| A.35 Druckregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXXVI   |
| A.36 Druckregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXXVII  |
| A.37 Druckregler: Angebote u. Datenblätter . . . . .          | XXXVIII |
| A.38 Durchflussmesser: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XXXIX   |
| A.39 Durchflussmesser: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XL      |
| A.40 Durchflussmesser: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XLI     |
| A.41 Durchflussmesser: Angebote u. Datenblätter . . . . .     | XLII    |
| A.42 Mischeinheiten: Angebote u. Datenblätter . . . . .       | XLIII   |
| A.43 Mischeinheiten: Angebote u. Datenblätter . . . . .       | XLIV    |



# FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

## FORMELZEICHEN

| Formelzeichen       | Einheit   | Bezeichnung   |
|---------------------|---|---|
| a                   | $\frac{\text{mol}}{\text{min}}$   | katalytische Aktivität                                    |
| E                   | V   | Elektrodenpotenzial                                       |
| E <sup>0</sup>      | V   | Standartelektrodenpotetial                                |
| F                   | $\frac{\text{C}}{\text{mol}}$   | Faraday-Konstante F = 96485 $\frac{\text{C}}{\text{mol}}$ |
| H <sub>o</sub>      | $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  | Brennwert, oberer Heizwert                                |
| H <sub>u</sub>      | $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  | Heizwert, unterer Heizwert                                |
| I                   | A   | Stromstärke   |
| l <sub>n</sub>      |   | Liter eines Mediums bei 0 °C und 1,013 bar                |
| ṁ                  | $\frac{\text{mol}}{\text{s}}, \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \frac{\text{mg}}{\text{s}}$ | Massenstrom   |
| P                   | W   | Leistung  |
| P <sub>el</sub>     | W   | elektrische Leistung                                      |
| p                   | Pa, bar   | Druck   |
| Q                   | C   | elektrische Ladung  |
| Q                   | W   | Wärmeleistung   |
| Q <sub>rev</sub>    | W   | Wärmeleistung einer reversiblen Brennstoffzelle           |
| R                   | $\frac{\text{J}}{\text{molK}}$  | universelle Gaskonstante                                  |
| R                   | Ω   | elektrischer Widerstand                                   |
| R <sub>i</sub>      | Ω   | Innenwiderstand   |
| S                   | $\frac{\text{J}}{\text{mol}}$   | Entropie  |
| t                   | °C  | Temperatur  |
| T                   | K   | absolute Temperatur                                       |
| U                   | V   | elektrische Spannung                                      |
| u                   | %   | Gasumsatz   |
| U <sub>Nernst</sub> | V   | max. Zellspannung, Nernstspannung                         |

|              |                  |  |
|--------------|------------------|--|
| $U_{th}$     | V                | thermoneutrale Spannung, Heizwertspannung            |
| $U_{rev}^0$  | V                | reversible Zellspannung                              |
| $U_z$        | V                | Zellspannung   |
| V            | $m^3$            | Volumen  |
| z            | -                | Anzahl ausgetauschter Elektronen pro Molekül         |
| $\Delta G$   | $\frac{kJ}{mol}$ | Gibbs'sche Freie Reaktionsenthalpie, Freie Enthalpie |
| $\Delta H^0$ | $\frac{kJ}{mol}$ | Reaktionsenthalpie, Bildungsenthalpie                |
| $\eta_{el}$  |                  | elektrischer Wirkungsgrad                            |
| $\eta_{FC}$  |                  | Brennstoffzellen-Wirkungsgrad                        |
| $\eta_H$     |                  | Heizwert-Wirkungsgrad                                |
| $\eta_I$     |                  | Stromwirkungsgrad                                    |
| $\eta_{th}$  |                  | thermodynamischer Wirkungsgrad                       |
| $\eta_U$     |                  | Spannungswirkungsgrad                                |
| $\lambda$    |                  | Stöchiometrie  |

## ABKÜRZUNGEN

---

| Abkürzungen | Bedeutung  |
|-------------|--|
| AFC         | Alkalische Brennstoffzelle, Alkaline Fuel Cell                   |
| fl          | flüssig  |
| F           | Forderung  |
| FC          | Fuel Cell  |
| g           | gasförmig  |
| KWK         | Kraft-Wärme-Kopplung   |
| MCFC        | Carbonatschmelzen-Brennstoffzelle, Molten Carbonate Fuel Cell    |
| MFC         | Mass-Flow-Controller, Massenstromregler                          |
| Mol         | $6,022 \cdot 10^{24}$ Moleküle                                   |
| Ox          | Oxidation  |
| PAFC        | Phosphorsaure Brennstoffzelle, Phosphoric Acid Fuel Cell         |
| PEFC        | Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle, Polymer Electrolyte Fuel Cell |
| PEM         | Proton Exchange Membrane   |
| PM          | Protonenleitende Membran   |
| Red         | Reduktion  |
| SOFC        | Festoxid-Brennstoffzelle, Solid Oxide Fuel Cell                  |
| W           | Wunsch   |

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich mit getrennter Strom- und Wärmeerzeugung[7]                        | 8  |
| 2.1  | Stromerzeugung bei konventioneller Vorgehensweise und bei Brennstoffzellen[10]                       | 9  |
| 2.2  | Schema einer $H_2-O_2$ -Brennstoffzelle[6]   | 10 |
| 2.3  | Drei-Phasen-Grenze[4]  | 11 |
| 2.4  | Schema eines Füllelements[4]   | 12 |
| 2.5  | Brennstoffzellentypen verschiedener Bauart[4]  | 14 |
| 2.6  | Einfluss der Temperatur auf die reversible Zellspannung einer PEM-Brennstoffzelle[2]                 | 19 |
| 2.7  | Druckeinfluss auf $U_{rev}$ einer PEM-Brennstoffzelle[2]   | 20 |
| 2.8  | Vergleich des thermodynamischen Wirkungsgrades einer Brennstoffzelle mit dem Carnot-Wirkungsgrad [8] | 21 |
| 2.9  | U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle  | 23 |
| 2.10 | Funktionsprinzip der unterschiedlichen Elektrolysearten[5]   | 24 |
| 4.1  | Darstellung der Funktionsstruktur des Gesamtsystems und der Teilsysteme                              | 35 |
| 4.2  | Morphologischer Kasten zur Wasserstoffversorgung und Befeuchtung                                     | 37 |
| 4.3  | Schema der Wasserstoffversorgung   | 38 |
| 4.4  | Morphologischer Kasten zur Luftversorgung und Befeuchtung  | 38 |
| 4.5  | Schema des Bubblers  | 39 |
| 4.6  | Fließschema des Teststands   | 43 |

# TABELLENVERZEICHNIS

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Thermodynamische Werte einer H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> -Brennstoffzelle . . . . . | 18 |
| 3.1  | Technische Anforderungen der Brennstoffzelle . . . . .                                 | 29 |
| 3.2  | Mess- und Regelungstechnik . . . . .   | 33 |
| 3.3  | Anforderungsliste . . . . .  | 34 |
| 4.1  | Die Kriterien und ihre Gewichtungen . . . . .  | 36 |
| 4.2  | Stückliste . . . . .   | 44 |
| 5.1  | Vergleich möglicher Brennstoffzellen . . . . .   | 45 |
| 5.2  | Vergleich möglicher elektronischer Lasten . . . . .                                    | 47 |
| 5.3  | Mögliche Komponenten zum Bau des Bubblers . . . . .                                    | 48 |
| 5.4  | MFC für Wasserstoff . . . . .  | 49 |
| 5.5  | MFC für Luft . . . . .   | 49 |
| 5.6  | MFC für Stickstoff . . . . .   | 49 |
| 5.7  | Vordruckregler für Wasserstoff . . . . .   | 50 |
| 5.8  | Vordruckregler für Luft . . . . .  | 50 |
| 5.9  | Durchflussmesser Wasserstoff . . . . .   | 51 |
| 5.10 | Durchflussmesser Luft . . . . .  | 51 |
| 5.11 | Angefragte Komponenten mit netto Preisen . . . . .                                     | 53 |
| 5.12 | Komponenten die noch angefragt werden müssen . . . . .                                 | 54 |



# 1 EINLEITUNG

Mit dem beschlossenen Atomausstieg und den Umwelt- und Klimaschutzzielen der Bundesregierung ist es nötig, dass neue effizientere und saubere Energiequellen in Deutschland entwickelt und standardisiert werden. Um die nötigen Rahmenbedingungen zu schaffen, ist es seitens der Regierung wichtig, über gesetzliche Vorschriften (CO<sub>2</sub>-Emission, Förderung erneuerbarer Energien, Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK)) die Wirtschaft dahingehend zu lenken.

Photovoltaik- oder Windenergieanlagen sind in diesem Zusammenhang die bekanntesten der sogenannten "regenerativen" Technologien. Da sie abhängig von den Wetterverhältnissen und somit für eine Deckung des Grundstrombedarfs nur mit großen Speicherkapazitäten und landesweitem Netzausbau zu realisieren sind, sind diese umstritten.

Der aktuelle Stand der Speichertechnologie erlaubt keine Abdeckung der Grundlast. Daher sind andere innovative Technologien erwünscht, um die Klimaeinflüsse fossiler Brennstoffe so klein wie möglich zu halten.

Momentan machen Kohlekraftwerke (Stein und Braunkohle) noch knapp 50% des deutschlandweiten Strommixes aus. Nachteile dieser Technologie sind Umweltbelastung durch CO<sub>2</sub>-Emissionen, ein zentralisiertes, unflexibles Stromnetz und elektrische Wirkungsgrade von nur ca. 38%. Da der Strom über einen thermodynamischen Kreisprozess erzeugt wird, ist der Wirkungsgrad durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt. (Der Carnot Wirkungsgrad des verwendeten thermodynamischen Kreisprozesses beschränkt den theoretisch erreichbaren maximalen Wirkungsgrad eines Kohlekraftwerks auf ca. 55%)

Um den Gesamtwirkungsgrad zu verbessern und die Nutzung der Primärenergie effizienter zu machen, hat die Bundesregierung 2002 das KWK-Gesetz eingeführt. Mit der Förderung, der Modernisierung und dem Neubau von KWK-Anlagen (s. §1 Zweck des Gesetzes) soll die entstehende Abwärme der Kraftwerke verstärkt in Fernwärmenetze eingespeist werden und für industrielle Prozesse und Heizung von Haushalten Wärme liefern. Da jedoch in unmittelbarer Nähe zu Großkraftwerken meist wenige Abnehmer sind, ist dies nur bedingt sinnvoll. Besser ist der Bau kleiner KWK-Anlagen in unmittelbarer Nähe zu Abnehmern. Dadurch entstehen weniger Verluste bei der Wärmelieferung und ein dezentrales Stromnetz, welches durch die Vielzahl an Anlagen sehr genau auf Netzschwankungen reagieren und auch Solar- und Windkraft effektiv in den Strommix einbeziehen kann. In Abbildung 1.1 wird das Prinzip und die erwartete Einsparung von Primärenergie mit KWK-Anlagen dargestellt.

Ein Nachteil liegt darin, dass das Kernstück klassischer KWK-Anlagen Verbrennungskraftmaschinen sind und diese noch größtenteils mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Dem wird momentan mit der Biogastechnologie entgegengewirkt. Was jedoch dennoch bestehen bleibt, sind Schadstoffemissionen, die bei einer Verbrennung im klassischen Sinne nicht verhindert werden können.

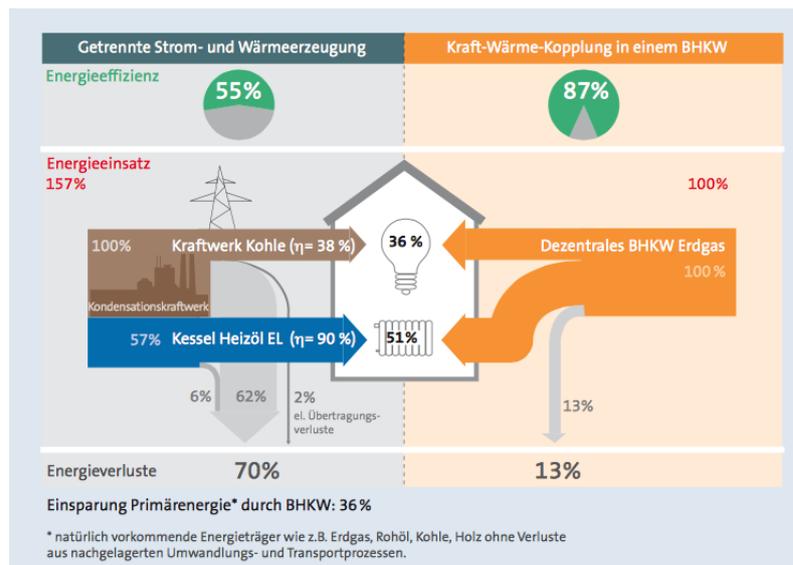


ABBILDUNG 1.1: Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich mit getrennter Strom- und Wärmeerzeugung[7]

Eine Brennstoffzelle stellt eine Lösung dar, ohne Schadstoffemissionen Strom und Wärme zu generieren. Mit einem elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 83% wird in einer Brennstoffzelle die chemisch gebundene Energie von Wasserstoff mit Sauerstoff in Strom und Wärme gewandelt. Lediglich Wasser verlässt die Brennstoffzelle als Abfallprodukt.

Dass großes Potential in dieser Technologie steckt, zeigt, dass deren Markteinführung mit dem KWK-Gesetz gefördert wird (vgl. [7]; §1 Zweck des Gesetzes).

1839 von C.F. SCHÖNBEIN entdeckt, zählt die Brennstoffzelle zu einer Entdeckung der Industriellen Revolution. Aufgrund starker Konkurrenten, wie Dampfmaschine und Verbrennungsmotor, rückte sie damals jedoch nicht in den Mittelpunkt der Forschung und Entwicklung. Erst mit der prognostizierten Knappheit von fossilen Energieträgern, einem steigenden Umweltschutzbewusstsein der Bevölkerung und dem erfolgreichen Einsatz in Raumfähren und U-Booten, rückte die Brennstoffzelle immer mehr ins Rampenlicht. Die Stärken der Brennstoffzellentechnologie liegen unter anderen in einem hohen elektrischen Wirkungsgrad, geräuscharmen Betrieb und einem sehr guten Teillastverhalten.[4]

Da die Brennstoffzellentechnologie das Potenzial birgt, in der zukünftigen Energiebereitstellung allgemein eine sehr große Rolle zu spielen, ist es wichtig, dass die Hochschulen die Brennstoffzellentechnologie behandeln. Mit dem Modul *‘Electrochemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems’* werden die Studierenden der HAW Hamburg in die Thematik der Brennstoffzelle eingeführt. In dieser Bachelorarbeit wurde ein Brennstoffzellen-Versuchsstand entwickelt und ausgelegt, um Studierenden das thermodynamische Verhalten und die elektrotechnischen Zusammenhänge einer PEM-Brennstoffzelle nahezubringen und die Inhalte des Moduls zu vertiefen.

## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 2.1 BRENNSTOFFZELLE

Um nutzbare Energie – in Form von elektrischem Strom – aus fossilen Energieträgern (Kohle, Gas) zu generieren, wird in konventionellen Kraftwerken die chemisch gebundene Energie in einem thermodynamischen Kreisprozess erst in thermische und dann in mechanische Energie umgewandelt. Jeder Wandlungsschritt in eine andere Energieform ist aber mit einem Wirkungsgrad behaftet. Werden mehrere Wandlungsschritte vollzogen, gehen deren Wirkungsgrade alle in die Bilanz ein und der Gesamtwirkungsgrad verschlechtert sich (s. Abb. 2.1). Zudem sind thermodynamische Kreisprozesse durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt.

Bei einer Brennstoffzelle handelt es sich um eine galvanische Zelle. Sie wandelt die chemische Energie des Brennstoffs direkt – ohne Umweg über thermische und mechanische Energie – in elektrische Energie um. Durch diesen direkteren Weg können im Idealfall Wirkungsgrade bis 83% erzielt werden.

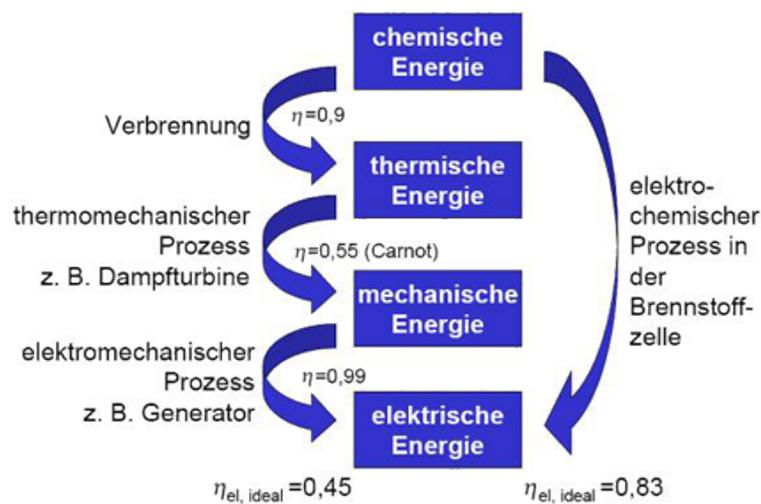


ABBILDUNG 2.1: Stromerzeugung bei konventioneller Vorgehensweise und bei Brennstoffzellen[10]

Jede galvanische Zelle besteht aus zwei Elektroden getrennt durch einen Elektrolyten. Durch räumliche Trennung einer Redoxreaktion (Reaktion bei der ein Reaktionspartner Elektronen an einen anderen überträgt), wird ein elektrisches Potenzial geschaffen, durch das ein Stromfluss erzeugt werden kann. Das Besondere einer galvanischen Zelle ist, dass die Redoxreaktion (Stromerzeugung) spontan und ohne Energieeinsatz abläuft.

Gruppieren werden sie in Primärzellen, Sekundärzellen und Tertiärzellen.

- Bei Primärzellen handelt es sich um Batterien, welche nach einmaliger Entladung nicht mehr wiederverwendet werden können.

- Sekundärzellen – besser bekannt als Akkumulatoren – sind wiederaufladbare galvanische Zellen, welche für eine begrenzte Zyklenanzahl wiederverwendet werden können. Aufgeladen werden diese durch Anlegen einer Stromquelle und Umkehr der Stromrichtung, wodurch die stromerzeugende chemische Reaktion umgekehrt wird.
- Tertiärzellen sind Brennstoffzellen und stellen die dritte Gruppe der galvanischen Zellen dar. Hier werden die Reaktionsedukte kontinuierlich zugeführt und die Produkte abgeführt. So ist ein zeitlich unbegrenzter Betrieb möglich.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird aufgrund der thematischen Eingrenzung nur noch auf die Brennstoffzelle eingegangen.

### 2.1.1 AUFBAU UND KOMPONENTEN

Die Kernstücke einer jeden Brennstoffzelle stellen zwei Elektroden (Anode und Kathode), bestehend aus Trägermaterial beschichtet mit katalytisch aktiven Metallen, dar. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich der Elektrolyt. An den Grenzflächen zwischen Elektrolyt und Elektroden läuft die Redoxreaktion ab, die eine elektrische Spannung zwischen den Elektroden erzeugt. Die Elektroden müssen ständig von Brennstoff umspült werden. Verbindet man die Elektroden mit einem Verbraucher, kommt ein Stromfluss zustande.(s. Abb. 2.2)

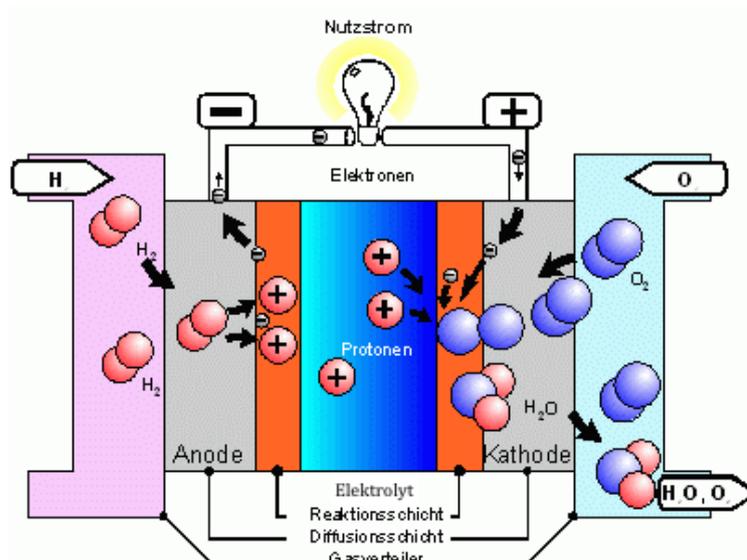


ABBILDUNG 2.2: Schema einer  $H_2$ - $O_2$ -Brennstoffzelle[6]

Mehrere der in Abb.2.2 dargestellten Brennstoffzellen werden zu Brennstoffzellenaggregaten, sog. Stacks, zusammengeschaltet. Dadurch kann jeder Brennstoffzellenstack durch Reihen- und Parallelschaltung einzelner Zellen, modular an die benötigte Spannung und Stromstärke angepasst werden. Um die Reaktionsgase zu trennen und die im Stack enthaltenen Zellen elektrisch zu verbinden, sind zwischen den Einzelzellen korrosionsbeständige Bipolarplatten verbaut. Zusätzlich

sorgen ausgeklügelte Strömungskanäle, welche in die Platten eingelassen sind, für eine optimale Brenngasversorgung der Elektroden.[3]

### 2.1.1.1 ELEKTRODE

Die sogenannte Gasdiffusionselektrode ist der fundamentale Teil der Brennstoffzelle. Sie muss gewährleisten, dass die Reaktionsedukte (Reaktant einer Reaktion: Edukt + Edukt → Produkt) ständig und im richtigen Maß zur Verfügung stehen, die Produkte abgeführt werden und die Redoxreaktion stets mit der maximal möglichen Effektivität abläuft.

Maßgebend für die Effektivität ist die sogenannte Drei-Phasen-Grenze. Sie besteht aus Elektrodenmaterial (fest), Elektrolyt (flüssig) und Brenngas (gasförmig). Da die Reaktion erst einen nennenswerten Stromfluss erzeugt, wenn genug Brenngas im Elektrolyt gelöst an der Oberfläche der Elektrode vorliegt, ist es nötig einen möglichst dünnen Elektrolytfilm zwischen Brenngas und Elektrode zu erzeugen. Wasserstoff und Sauerstoff lösen sich in wässrigen Lösungen sehr schlecht, somit bedeutet ein kurzer Diffusionsweg durch das Elektrolyt mehr Brenngas an der Elektrode.[10]

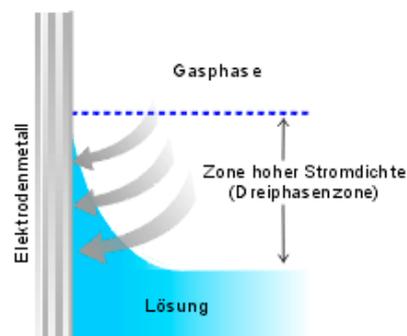


ABB. 2.3: Drei-Phasen-Grenze[4]

Um diese Drei-Phasen-Grenze zu erzeugen, bestehen die Elektroden aus porösem Material. Es muss jedoch gewährleistet sein, dass sie sich nicht durch Kapillarkräfte vollständig mit Elektrolyt vollsaugen oder durch zu großen Brenngasdruck der Elektrolyt aus der Elektrode verdrängt wird. Dies gewährleisten zwei verschiedene Arten von Gasdiffusionselektroden.

#### *Doppelporenelektrode*

Hier wird die Drei-Phasen-Grenze mittels zwei Schichten unterschiedlicher Porengröße erzeugt. Eine feinporige Schicht auf der Elektrolytseite saugt sich mittels Kapillarkräften mit Elektrolyt voll. An der Grenze zur grobporigen Schicht wird der Elektrolyt fixiert, da in den größeren Poren die Kapillarkräfte nicht mehr ausreichen. Lediglich ein dünner Elektrolytfilm kriecht in die großporige Schicht, die mit Brenngas geflutet ist. Dieser Elektrolytfilm bildet somit die Drei-Phasen-Grenze zwischen Brenngas und Elektrode.

#### *Hydrophobierte Elektrode*

Diese bestehen aus einer hydrophoben (wasserabweisenden) Nickelschicht, auf der mehrere abnehmend hydrophobierte Kohleschichten aufgetragen sind. Elektrolytseitig befindet sich

eine benetzbare Kohleschicht. Der Elektrolyt wird so kontrolliert im richtigen Maß an die Nickelschicht herangeführt.

### 2.1.1.2 ELEKTROLYT

Der Elektrolyt ist ein fester oder flüssiger Ionenleiter. Je nach Brennstoffzellentyp kann es sich um eine Säure, Lauge oder auch semipermeable (halbdurchlässige) Membran handeln. Die Hauptaufgabe des Elektrolyts ist es, ein Trägermedium für die Ionen, die aus der Oxidation an der Anode entstehen, darzustellen. Die Ionen bewegen sich durch den Elektrolyten von einer Elektrode zur anderen.

Des weiteren finden die beiden Teilreaktionen, Oxidation und Reduktion im Elektrolyten statt, da sich das Brenngas und der Sauerstoff im Elektrolyt lösen und zur katalytischen Oberfläche der Elektroden diffundieren (Drei-Phasen-Grenze).

Zusätzlich muss der Elektrolyt als Separator bzw. Isolator zwischen den Elektroden wirken. Es dürfen keine Elektronen durch den Elektrolyt fließen, da die Elektroden sonst kurzgeschlossen werden.

Bei Luft-atmenden Brennstoffzellen und regenerativen Zellen können die Brennstoffe bereits im Elektrolyten gelöst sein. Somit dient hier der Elektrolyt gleichzeitig als Brennstoffspeicher. Diese sogenannten Füllelemente bestehen aus einer Zweiphasenanode, welche sich in dem Elektrolytbehälter befindet und einer Luftp Kathode, welche im Kontakt mit dem Elektrolyten und der Umgebungsluft steht.[4].

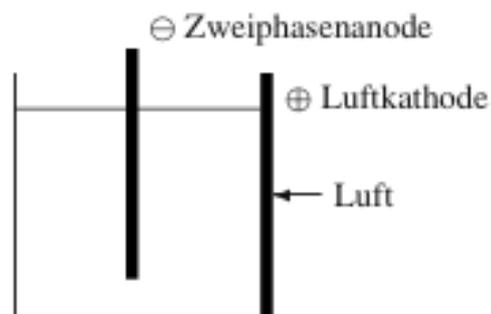


ABB. 2.4: Schema eines Füllelements[4]

### 2.1.2 FUNKTIONSPRINZIP

Das allgemeine Funktionsprinzip der Brennstoffzelle soll an einer H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Brennstoffzelle dargestellt werden.

Wie erwähnt, findet die für den Stromfluss verantwortliche chemische Reaktion auf der katalytischen Oberfläche der Elektroden statt. Bei der Reaktion handelt es sich um eine sogenannte Redoxreaktion oder Reduktion-Oxidations-Reaktion, was bedeutet, dass bei der Reaktion ein Reaktionsedukt oxidiert (Elektronen abgibt) und folglich das andere Reaktionsedukt reduziert wird (Elektronen aufnimmt).

Sorgt man für eine lokale Trennung der beiden Teilreaktionen (Oxidation und Reduktion) und verbindet diese mit einem elektrischen Leiter über einen Verbraucher, wird dieser mit Strom durchflossen. Die lokale Trennung der beiden Teilreaktionen wird durch den Elektrolyten bewerkstelligt.

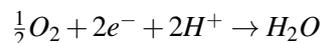
#### *Anode*

Bei der H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Brennstoffzelle wird die Anode ständig mit Wasserstoff versorgt. Das H<sub>2</sub>-Molekül trifft auf die Drei-Phasen-Grenze, diffundiert in das Elektrolyt und zerfällt auf der Katalysatorschicht der Elektrode in je zwei H<sup>+</sup>-Ionen und zwei Elektronen. Die H<sup>+</sup>-Ionen bleiben im Elektrolyt, während die Elektronen in die Elektrode übergehen. Da sich in der Anode die Elektronen ansammeln, bildet diese den Minuspol der Zelle.

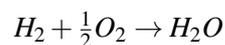


#### *Kathode*

An der Kathode wird folglich der Sauerstoff reduziert. Das O<sub>2</sub>-Molekül gelangt durch den Elektrolyt an der Drei-Phasen-Grenze an den Ort der Reaktion. Dort wird das O<sub>2</sub>-Molekül gespalten und jedes O-Atom nimmt 2 Elektronen aus der Elektrode auf. Diese sog. Oxidionen bilden dann mit den H<sup>+</sup>-Ionen, welche sich von der Anode durch den Elektrolyt zur Kathode bewegen, sehr schnell Wasser.



Somit ergibt die Gesamtreaktion der Zelle:



Wasserstoff und Sauerstoff reagieren unter Abgabe von elektrischer und thermischer Energie zu Wasser.

### 2.1.3 BRENNSTOFFZELLENTYPEN

Die Brennstoffzellentypen können über ihre jeweiligen Betriebstemperaturen grob kategorisiert werden. Niedertemperaturbrennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen bis ca. 200 °C. Hochtemperaturbrennstoffzellen erreichen Betriebstemperaturen von bis zu 1000°C.

Eine präzisere Einteilung kann nach dem jeweilig verwendeten Elektrolyten vorgenommen werden. Abb. 2.5 zeigt eine Auflistung der verschiedenen Brennstoffzellentypen. Da sich diese Arbeit auf die Proton-Exchange-Membrane (PEMFC) oder protonenleitende Membran (PEFC)-Brennstoffzelle beschränkt, wird auf die anderen Brennstoffzellentypen nicht weiter eingegangen. Für weitere Informationen zu den verschiedenen Typen siehe [4] und [3].

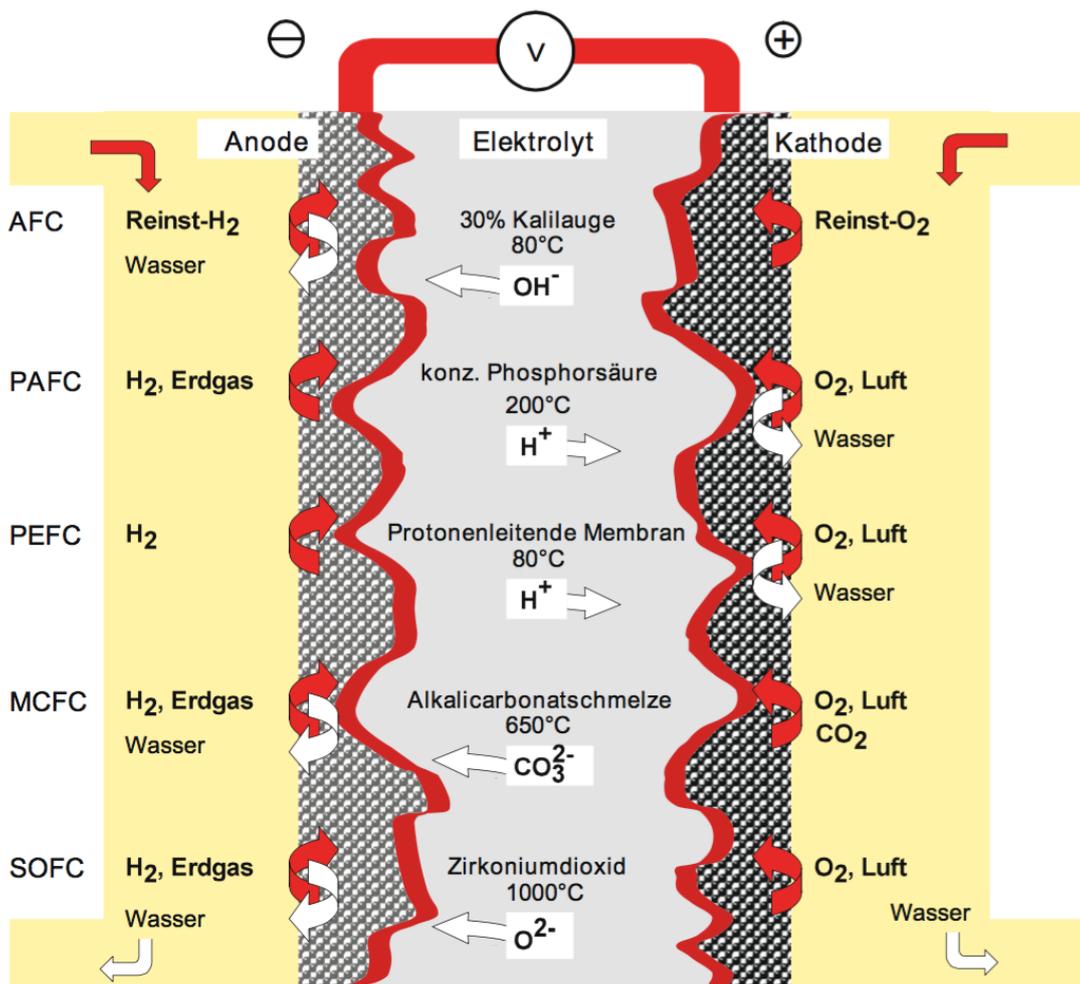


ABBILDUNG 2.5: Brennstoffzellentypen verschiedener Bauart[4]

### 2.1.4 THERMODYNAMIK DER BRENNSTOFFZELLE

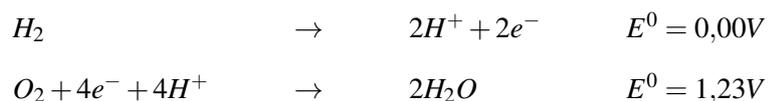
#### 2.1.4.1 ELEKTRODENPOTENTIALE UND LEERLAUFSPANNUNG

Jede galvanische Zelle generiert eine sogenannte Leerlaufspannung  $U^0$ . Diese ergibt sich aus der Differenz der beiden Elektrodenpotentiale  $E$  bei nicht geschlossenem Stromkreis. Die Potentiale bilden sich an Elektroden aufgrund der elektrochemischen Eigenschaften der Stoffe.

Wasserstoff und Sauerstoff bilden mit einem Katalysator Ionen. Beispielsweise nimmt der Sauerstoff an der Kathode die Elektronen aus der Elektrode auf. Dabei entsteht ein Elektronenmangel in der Kathode. Die negativ geladenen Oxidionen im Elektrolyt und die positiv geladene Kathode erzeugen eine elektromagnetische Kraft, die dem Übergang der Elektronen zum Sauerstoff entgegenwirkt, weshalb sich mit der Zeit ein Gleichgewicht einstellt. Dann ist das Potential – welches man sich auch als Elektronendruck (negatives Potential) oder Elektronenunterdruck (positives Potential) vorstellen kann – maximal. In Form einer hochohmigen Spannungsmessung kann dieses Potential gemessen werden.

Wird dieses Potential bei 25 °C und 101325 Pa mit einer Normalwasserstoffelektrode als Referenz gemessen, erhält man das Normalpotential oder Standard-Elektrodenpotential  $E^0$  einer Elektrode. Das Normalpotential einer Normalwasserstoffelektrode wurde dafür als 0,00V definiert und dient als internationales Bezugssystem für Elektrodenpotentiale. Aus der chemischen Spannungsreihe sind diese Normalpotentiale ablesbar. Je größer das Normalpotential einer Elektrode, desto stärker ist also die Oxidationskraft des Elements (Kraft mit der das Element seinen Reaktionspartner oxidiert – sprich, dessen  $e^-$  aufnimmt).

Bei der  $H_2$ - $O_2$ -Brennstoffzelle ergeben sich folgende Normalpotentiale:



Aus der Differenz ergibt sich nun die reversible Zellspannung  $U_{rev}^0$

$$U_{rev}^0 = E_{Kathode}^0 - E_{Anode}^0 = 1,23V - 0,00V = 1,23V \quad (2.1)$$

#### 2.1.4.2 REAKTIONSENTHALPIE

Bei der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser handelt es sich um eine Verbrennung, die kontrolliert die chemisch gebundene Energie direkt in elektrische und thermische Energie umwandelt. Diese Art von Energiewandlung wird auch 'stille Verbrennung' genannt. Für die thermodynamische Beschreibung der Anfangszustände des Systems können jedoch die selben Wertigkeiten benutzt werden, wie bei einer Wasserstoffverbrennung im klassischen Sinne.

Bei der Reaktion(oder Verbrennung)



wird – bei Standardbedingungen (25°C, 101325 Pa; durch Index “0” gekennzeichnet) – die Reaktionsenthalpie  $\Delta H^0$  von Wasser  $-285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  freigesetzt ( $\rightarrow$ negativ). Dieser Wert entspricht dem Brennwert  $H_o$  von Wasserstoff. Er berücksichtigt die freigesetzte Enthalpie des Brennstoffs, sowie die freigesetzte Enthalpie durch die Kondensation des im Brennstoff und Reaktionsprodukt enthaltenen Wassers.

Liegt das Wasser nach der Reaktion gasförmig vor, ist die freigesetzte Energie geringer, da ein Teil der Energie dafür verwandt wurde, das Wasser zu verdampfen. In diesem Fall, würde die Reaktionsenthalpie  $\Delta H^0$  des Wassers dem Heizwert  $H_u$  ( $=-241,82 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ ) von Wasserstoff entsprechen. Die Reaktionsenthalpie stellt die maximal theoretisch wandelbare Energie des Systems dar.

#### 2.1.4.3 GIBBS'SCHE FREIE REAKTIONSENTHALPIE

Da bei der Zellreaktion Elektronen ausgetauscht werden, lässt sich die elektrische Ladung  $Q$  berechnen, welche bei der Verbrennung von einem Mol  $H_2$ -Molekülen ausgetauscht wurde. Die Faraday-Konstante  $F$  beschreibt die Ladung, welche beim Austausch von einem Mol Elektronen ausgetauscht wird.

$$F = 96485 \frac{C}{mol} \quad (2.3)$$

Da im Beispielfall oben 2 Elektronen pro  $H_2$ -Molekül ausgetauscht werden, muss die Faraday Konstante mit dem Faktor

$$z = \frac{n_{e^-}}{n_M} = \frac{2}{1} = 2 \quad (2.4)$$

multipliziert werden, um die ausgetauschte Ladung pro Mol  $H_2$  zu erhalten.

$$Q = zF = 2 \cdot 96485 \frac{C}{mol} = 192970 \frac{C}{mol} \quad (2.5)$$

“Die elektrische Ladung von 1 Coulomb erzeugt für die Dauer von einer Sekunde (s) einen elektrischen Stromfluss von einem Ampère (A). 1C entspricht also 1As”[3]. Somit ergibt sich aus der in 2.1 ermittelten reversiblen Zellspannung  $\Delta U_{rev}^0$  und der Ladungsmenge  $Q$  die Energiemenge  $\Delta G$ .

$$\Delta G^0 = \Delta U_{rev}^0 Q = 1,23V \cdot 192970 \frac{C}{mol} = 237,3 \frac{kJ}{mol} \quad (2.6)$$

Dieser Wert wird auch als Gibbs'sche Freie Reaktionsenthalpie (oder Freie Enthalpie)  $\Delta G^0$  bezeichnet und beschreibt die maximale elektrische Nutzenergie pro Mol Brenngas. Da sie bei der Reaktion frei wird, ist sie negativ.

$$\Delta G = -zFU_{rev} \quad (2.7)$$

$\Delta G^0$  und die Heiz- bzw. Brennwerte sind für die Standardbedingungen aus entsprechenden Tabellen ablesbar.

Somit ergibt sich die Leerlaufspannung  $U_{rev}^0$  einer Zelle aus

$$U_{rev}^0 = -\frac{\Delta G^0}{zF} = 1,23V \quad (2.8)$$

#### 2.1.4.4 GIBBS-HELMHOLZ-GLEICHUNG

Würde gelten  $\Delta G = \Delta H$ , würde die gesamte chemisch gebundene Energie des Brennstoffs in elektrische Energie umgewandelt und der elektrische Wirkungsgrad bei 100% liegen. Setzt man  $\Delta H$  in 2.8 ein erhält man die "thermoneutrale Spannung  $U_{th}$ ".

Dies ist die theoretisch höchste Zellspannung, die erreicht werden könnte, wenn es sich um eine Energiewandlung ohne Entstehung von Wärme handeln würde.

$$-\Delta H^0 = zFU_{th} \Rightarrow U_{th} = 1,48V \quad (2.9)$$

Bei der Reaktion werden jedoch aus zwei gasförmigen Medien ein flüssiges Medium gebildet. Bei gasförmigen Medien ist mehr Entropie vorhanden als bei flüssigen, was bedeutet, dass während der Reaktion die Entropie  $S$  reduziert wird. Der Zusammenhang zwischen Entropie und Enthalpie beschreibt die Gibbs-Helmholz-Gleichung:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.10)$$

$T\Delta S$  stellt den entstandenen Wärmeanteil der Reaktion dar.

Wenn  $\Delta G < 0$  ist, läuft eine Reaktion spontan ab (Brennstoffzelle, Batterie). Ist  $\Delta G = 0$  bedeutet das, dass sich das System im chemischen Gleichgewicht befindet – es fließt kein Strom und kein Brennstoff wird umgesetzt. Wird  $\Delta G > 0$  muss Energie aufgewandt werden, um die Reaktion ablaufen zu lassen (Elektrolyse).

Zur Übersicht und Zusammenfassung sind in Tabelle 2.1 die thermodynamischen Werte einer H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Brennstoffzelle unter Standardbedingungen dargestellt.

| Zustand des entstandenen Wassers |                               | flüssig<br>t < 100°C                   | dampfförmig<br>t > 100°C               |
|----------------------------------|-------------------------------|--|--|
| Ausgetauschte e <sup>-</sup>     | z                             | 2                                      | 2                                      |
| Reaktionsenthalpie               | ΔH <sup>0</sup>               | -285,83 $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ | -241,82 $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ |
| Entropie                         | ΔS <sup>0</sup>               | -163,34 $\frac{\text{J}}{\text{mol}}$  | -44,2 $\frac{\text{J}}{\text{mol}}$    |
| Freie Enthalpie                  | ΔG <sup>0</sup>               | -237,3 $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  | -228,57 $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ |
| themoneutrale Spannung           | U <sub>th</sub> <sup>0</sup>  | 1,48V                                  | 1,25V                                  |
| reversible Spannung              | U <sub>rev</sub> <sup>0</sup> | 1,23V                                  | 1,18V                                  |

TABELLE 2.1: Thermodynamische Werte einer H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Brennstoffzelle

#### 2.1.4.5 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER ZELLSPANNUNG

Die Temperaturabhängigkeit der Zellspannung ergibt sich durch Differenzieren der Gleichung 2.8 bei konstantem Druck p.

$$\left(\frac{\rho U}{\rho T}\right)_p = -\frac{1}{zF} \left(\frac{\rho \Delta G}{\rho T}\right) = \frac{\Delta S}{zF} \quad (2.11)$$

Anschließendes Integrieren liefert dann:

$$U(T) = U^0 + \frac{\Delta S}{zF}(T - T_0) \quad \text{mit} \quad T_0 = 298,15\text{K} \quad (2.12)$$

Da das ΔS bei den Reaktionen in Brennstoffzellen negativ ist, wirkt sich eine Temperaturerhöhung ebenfalls negativ auf die Zellspannung aus. Der Einfluss der Temperatur beträgt bei einer H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Brennstoffzelle  $-0,85 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$  wenn das Wasser in flüssiger Form vorliegt und  $-0,23 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$  wenn Wasserdampf erzeugt wird.

Abbildung 2.6 zeigt die Abnahme der Spannung bei steigender Betriebstemperatur.

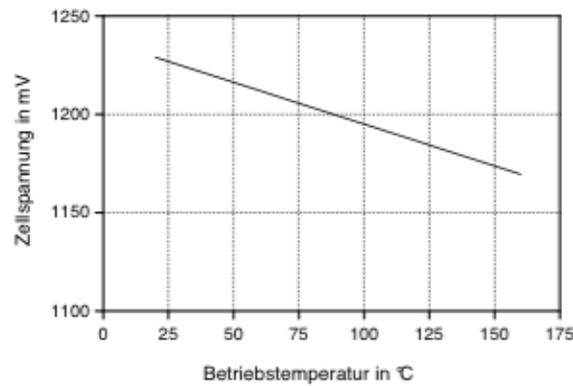


ABBILDUNG 2.6: Einfluss der Temperatur auf die reversible Zellspannung einer PEM-Brennstoffzelle[2]

#### 2.1.4.6 DRUCKABHÄNGIGKEIT DER ZELLSPANNUNG

Um die Druckabhängigkeit der Zellspannung zu erhalten, muss Gleichung 2.8 bei konstanter Temperatur differenziert werden.

$$\left(\frac{\rho U}{\rho p}\right)_T = -\frac{1}{zF} \left(\frac{\rho \Delta G}{\rho p}\right) = -\frac{\Delta V}{zF} \quad (2.13)$$

Mit der Annahme, Wasserstoff und Sauerstoff seien ideale Gase, gilt die ideale Gasgleichung

$$\Delta V = \sum_i \frac{n_i RT}{p_i} \quad (2.14)$$

Integriert man 2.13 und kombiniert sie mit 2.14 erhält man

$$U(p) = U^0 - \sum_i \frac{n_i RT}{zF} \ln p_i \quad (2.15)$$

Eine Druckerhöhung führt somit zu einer Erhöhung der Zellspannung. Dies erhöht zwar den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle, jedoch muss Energie aufgebracht werden, um die Gase  $H_2$  und  $O_2$  auf ein höheres Druckniveau zu bringen, weshalb sich der Systemwirkungsgrad nicht unbedingt verbessern muss.

Abbildung 2.7 zeigt den typisch logarithmischen Anstieg der reversiblen Zellspannung bei stetiger Druckerhöhung.[2]

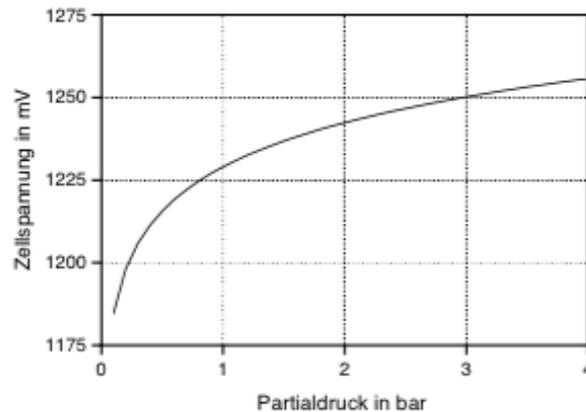
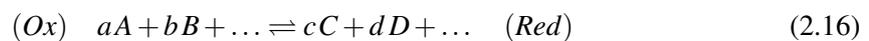


ABBILDUNG 2.7: Druckeinfluss auf  $U_{\text{rev}}$  einer PEM-Brennstoffzelle[2]

#### 2.1.4.7 NERNSTGLEICHUNG

Mit Hilfe der Nernstgleichung lässt sich die maximale Zellspannung  $U$  (kein Stromfluss) unter Berücksichtigung der Stoffkonzentrationen ( $\text{H}_2$  und  $\text{O}_2$ ) und der in 2.1.4.5 dargestellten Einflüsse der Temperatur direkt berechnen. Sie wird aus der van't Hoff'schen Reaktionsisotherme abgeleitet, welche zur Berechnung der freien Enthalpie einer Redoxreaktion



bei von Standardbedingungen abweichenden Zuständen (Konzentrationen der Reaktanten, Temperatur) dient.

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \left( \frac{a_C^c a_D^d (Ox)}{a_A^a a_B^b (Red)} \right) \quad (2.17)$$

Setzt man 2.7 in 2.17 ein, folgt die allgemeine Form der Nernstgleichung für die Zellspannung  $U$  (oft auch Nernstspannung  $U_{\text{Nernst}}$ ).

$$U_{\text{Nernst}} = U^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left( \frac{a_C^c a_D^d (Ox)}{a_A^a a_B^b (Red)} \right) \quad (2.18)$$

Die Aktivität  $a$  (Maß dafür, wie schnell ein Katalysator Edukte zu Produkten umsetzt) kann bei Gasen vereinfacht durch den jeweilige Partialdruck der Reaktanten ersetzt werden. Die Nernstgleichung ist die wichtigste Gleichung zur Bestimmung der Spannung einer galvanischen Zelle und dient oft als Ausgangspunkt zur mathematischen Beschreibung von elektrochemischen Vorgängen.

#### 2.1.4.8 WIRKUNGSGRAD

Im Folgenden werden Wirkungsgrade aufgezählt, welche zur Charakterisierung von Brennstoffzellen verwendet werden können.

### Thermodynamischer Wirkungsgrad $\eta_{th}$

Der thermodynamische Wirkungsgrad ergibt sich aus der Reaktionsenthalpie als aufgebrachter Aufwand und der maximalen, durch die Reaktion umsetzbare freie Enthalpie als Nutzen.

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2.19)$$

Dieser Wirkungsgrad liegt bei niedrigen Temperaturen weit über dem Carnot-Wirkungsgrad. Da er jedoch mit steigenden Temperaturen sinkt, wird er in Bereichen von ca. 900 °C vom Carnot-Wirkungsgrad – welcher mit steigender Temperatur steigt – übertroffen (s. Abb. 2.8). Das Verhältnis von reversibler Spannung  $U_{rev}$  zur thermoneutralen Spannung  $U_{th}$  ergibt, aufgrund der direkten Abhängigkeiten zu den Enthalpien ebenfalls den thermodynamischen Wirkungsgrad. Da es sich hier um ausschließlich ideale Werte handelt, wird auch vom idealen Wirkungsgrad gesprochen.[4]

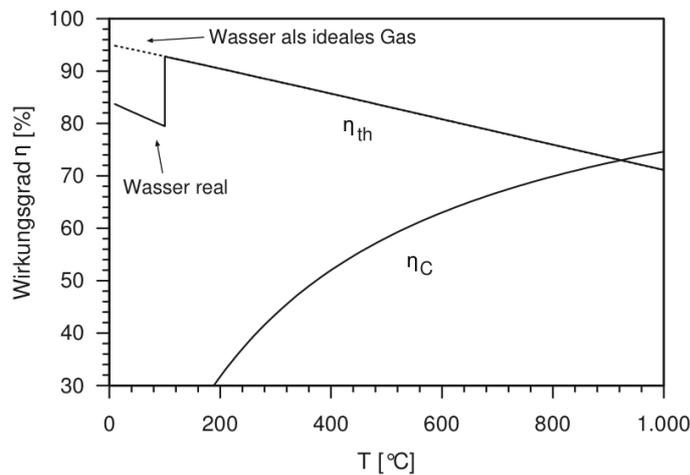


ABBILDUNG 2.8: Vergleich des thermodynamischen Wirkungsgrades einer Brennstoffzelle mit dem Carnot-Wirkungsgrad [8]

### Spannungs- und Stromwirkungsgrad

Der Spannungswirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von tatsächlicher Klemmenspannung  $U(I)$  zur reversiblen Spannung  $U_{rev}$ . Analog dazu beschreibt der Stromwirkungsgrad das Verhältnis von tatsächlichem Zellstrom  $I$  zum theoretischen Zellstrom  $I_{max}$

$$\eta_U = \frac{U(I)}{U_{rev}} \quad (2.20)$$

$$\eta_I = \frac{I}{I_{max}} \quad (2.21)$$

Aus dem Produkt von Spannungs- und Stromwirkungsgrad ergibt sich der elektrische Wirkungs-

grad  $\eta_{el}$ .

$$\eta_{el} = \eta_U \cdot \eta_I \quad (2.22)$$

Die Spannungs- und Stromwirkungsgrade sind interessant, da sie die tatsächlich erreichten elektrischen Werte mit den theoretisch möglichen vergleichen. Aus dem Spannungswirkungsgrad ist somit abzulesen, wie viel der Exergie tatsächlich in nutzbare Energie umgewandelt wird. Der Stromwirkungsgrad beschreibt die Verluste aufgrund von bspw. Verunreinigungen.

#### Weitere Wirkungsgrade

Das Verhältnis von zugeführter zu umgesetzter Brennstoffmenge (hier Wasserstoff) beschreibt der Brenngasnutzungsgrad  $\eta_u$

Liegt ein Brenngasgemisch vor, wird der Heizwert des darin enthaltenen Wasserstoff ins Verhältnis mit dem Heizwert des gesamten Gemisches gesetzt.

$$\eta_H = \frac{H_{u,H_2} \cdot x_{u,H_2}}{\sum H_{u,i} \cdot x_i} \quad (2.23)$$

#### Brennstoffzellen-Wirkungsgrad

Aus den oben aufgezählten Teilwirkungsgraden ergibt sich der Brennstoffzellen-Wirkungsgrad  $\eta_{FC}$

$$\eta_{FC} = \eta_{rev} \cdot \eta_U \cdot \eta_I \cdot \eta_u \cdot \eta_H \quad (2.24)$$

Dieser lässt sich auch aus der erzeugten elektrischen Gleichstrom-Leistung und dem Brenn- bzw. Heizwert des eingespeisten Brenngases direkt berechnen.

$$\eta_{FC} = \frac{P_{el}}{\Delta H_u} \quad (2.25)$$

## 2.1.5 BETRIEBSCHARAKTERISTIKA

### 2.1.5.1 STROM-SPANNUNGS KENNLINIE

In Abbildung 2.9 ist eine Strom-Spannungs Kennlinie einer Brennstoffzelle dargestellt. Der charakteristische Verlauf entsteht aufgrund des von der Stromstärke abhängigen Innenwiderstands  $R_i$ .

Der erste – bei offenem Stromkreis ( $I = 0A$ ) – markante Wert der Kennlinie ist die thermoneutrale Spannung (Heizwertspannung)  $U_{th}$  als die maximale theoretisch erzeugbare Spannung der Brennstoffzelle.

Aus der Gibb'schen freien Enthalpie ergibt sich die reversible Zellspannung (Standartpotential)  $U_{rev}$ .

Werden die Einflüsse von Konzentrationsunterschieden und Temperatur berücksichtigt (Nernstglei-

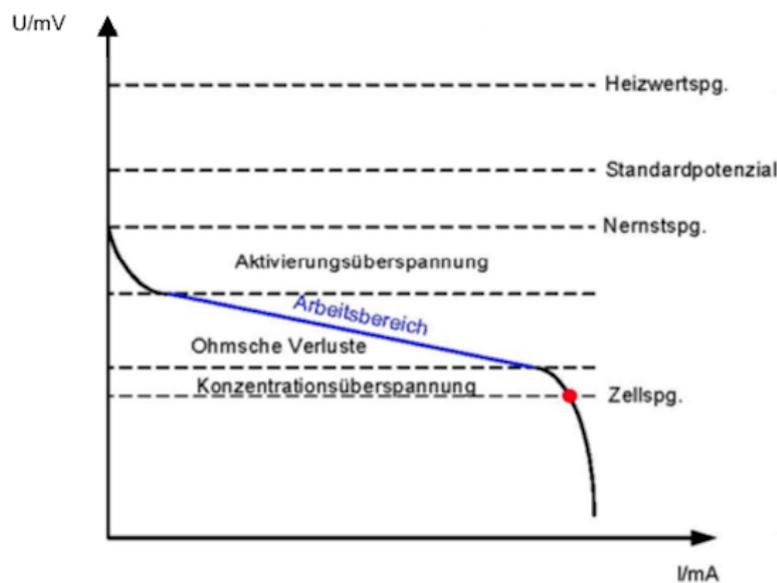


ABBILDUNG 2.9: U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle

chung), erhält man die von den Standardbedingungen auf die vorhandenen (realen) Bedingungen hochgerechnete Zellspannung, auch Nernstspannung genannt. Sie ist die höchste messbare Spannung, die an einer Brennstoffzelle gemessen werden kann. Aufgrund von Nebenreaktionen, wie beispielsweise die Oxidation von Verunreinigungen, liegt dieser Wert meist leicht unter der berechneten Nernstspannung.

Wird nun der Stromkreis geschlossen, ist der Übergang der Elektronen in die Elektrode bzw. aus der Elektrode heraus (Durchtrittsreaktion) die Ursache für den ersten Spannungsabfall (Aktivierungsspannung). Die Durchtrittsreaktion auf der Kathodenseite ( $O_2$ -Reduktion) beeinflusst diese am stärksten. Des Weiteren ist der Spannungsverlust stark temperaturabhängig.

Im Arbeitsbereich der Brennstoffzelle steigt der ohmsche Spannungsabfall proportional zur Stromstärke. Die wesentlichen Widerstände bilden der Elektrolyt und die Elektrode. In diesem Spannungs-Stromstärken-Verhältnis sollte die Brennstoffzelle idealerweise betrieben werden.

Der lineare Spannungsabfall wird durch die endliche Geschwindigkeit der Stoffumsetzung beschränkt. Die Zellreaktionen können ab einem gewissen Punkt nicht mehr ausreichend mit Reaktanten versorgt und das entstehende Produkt nicht schnell genug abtransportiert werden. Dieses Phänomen wird auch "verhungern" der Brennstoffzelle genannt.

## 2.2 ELEKTROLYSE

Da im Zusammenhang mit Brennstoffzellen schnell der Begriff Elektrolyse fällt, wird diese Thematik im Folgenden kurz aufgearbeitet.

Die bisher aufgezählten Zellreaktionen sind freiwillig ablaufende Redoxreaktionen, bei denen chemisch gebundene Energie des Brennstoffs in elektrische Energie umgewandelt wird. Die zugehörigen Umkehrreaktionen kommen jedoch nur zustande, wenn eine elektrische Energie aufgewendet wird. Diese Umkehr der Zellreaktion unter Aufwendung elektrischer Energie wird Elektrolyse genannt.

Die Elektrolyse wird beispielsweise zum Beschichten (Galvanisieren), Erzeugen von schützenden Oxidschichten, oder Raffinieren von gelösten Metallen verwendet. Die für diese Arbeit relevante Anwendung der Elektrolyse stellt die Synthese von Stoffen dar.[11]

Speziell die Wasserelektrolyse spielt eine große Rolle. Dabei wird Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff synthetisiert, was im Zusammenhang mit Brennstoffzellen interessante Überlegungen zulässt. So gibt es unter anderem Konzepte wie "Power to Gas", wo mittels regenerativer Energiequellen (Wind o. Sonne) ein Elektrolyseur betrieben und Wasserstoff erzeugt werden soll. So kann die Energie chemisch gespeichert und bei Bedarf in einer Brennstoffzelle wieder verstromt werden.

Es gibt drei Elektrolysearten, welche sich für die Wasserelektrolyse weitestgehend durchgesetzt haben. Sie unterscheiden sich in den Temperaturbereichen und den Elektrolyten. Technisch wird die Elektrolyse in einem Elektrolyseur realisiert. Der Aufbau und die jeweiligen Elektrodenreaktionen sind in Abbildung 2.10 dargestellt.

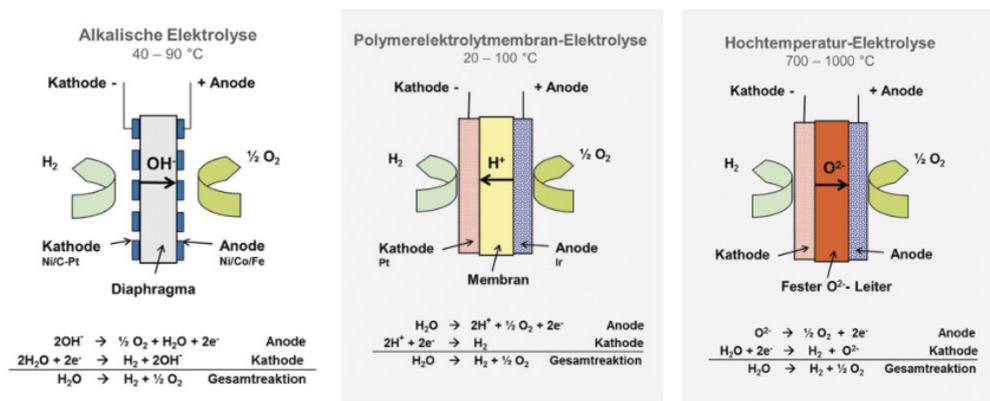


ABBILDUNG 2.10: Funktionsprinzip der unterschiedlichen Elektrolysearten[5]

### Chemische Grundlagen

Um die Energie bzw. die Spannung zu berechnen, welche die Spannungsquelle aufbringen muss, um die Elektrolyse zu betreiben, geht man wie folgt vor (Beispiel gilt für Standardbedingungen)

Da es sich hier um die Umkehrreaktion der Wasserentstehung aus Wasserstoff und Sauerstoff handelt, gilt laut dem erstem Hauptsatz, dass zur Wasser "Spaltung" die selbe Energiemenge hinzugefügt werden muss, welche bei der Entstehung von Wasser frei wird. Dies wäre die Bildungsenthalpie von Wasser. Sie beträgt  $\Delta H^0 = 285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ .

Da bei der Bildung von Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff auch thermische Energie frei wird, kann diese von der aufzuwendenden Energie abgezogen werden. Die thermische Energie resultiert aus dem Produkt der Temperatur  $T$  und der Reaktionsentropie  $\Delta S$ . Die Gibbs-Helmholz-Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Energieformen dieser Reaktion.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.26)$$

Somit ist die Gibbs'sche freie Reaktionsenthalpie  $\Delta G$  die minimal nötige elektrische Energiemenge, welche aufgewendet werden muss, um 1 Mol Wasser in seine Bestandteile aufzuteilen. Aus Gleichung 2.7 lässt sich somit auch die nötige Spannung  $U_{\min} = 1,23\text{V}$  berechnen. Arbeitet man mit dieser Spannung, muss man die Differenz der freien Enthalpie zur Bildungsenthalpie als thermische Energie hinzufügen. Da dies im Normalfall nicht gemacht wird, wird diese Energie ebenfalls elektrisch hinzugefügt, was die benötigte Spannung erhöht.

Einsetzen der Bildungsenthalpie in 2.7 ergibt die thermoneutrale Spannung  $U_{\text{th}} = 1,48\text{V}$  und somit die minimal nötige Spannung, um einen Elektrolyseur zur Herstellung von Wasserstoff und Sauerstoff zu betreiben.

Wie oben schon gesagt, gelten diese Werte für Standardbedingungen. Eine Temperaturerhöhung des Prozesses setzt die nötige Spannung zur Elektrolyse herunter, jedoch muss die thermische Energie als Prozesswärme hinzugefügt werden.

Zusätzlich wird der Ablauf des realen Prozesses durch die selben Eigenschaften gehemmt, die bei der Brennstoffzelle die Zellspannung heruntersetzen. Zum einen entstehen durch Durchtrittshemmungen an den Elektroden Überspannungen, zum anderen machen ohmsche Widerstände der Bauteile und des Elektrolyts eine Erhöhung der realen Spannung erforderlich.[5]

## 2.3 PEM-BRENNSTOFFZELLE

Da in dieser Arbeit ein Versuchstand mit einer Proton Exchange Membrane (PEM) Brennstoffzelle ausgearbeitet werden soll, wird dieser Zelltyp noch einmal gesondert behandelt.

### 2.3.1 ANWENDUNG

Diese Variante der Brennstoffzelle wird von allen namhaften Automobilfirmen erforscht, um sie für den Antrieb von Automobilen zu nutzen. Beispielsweise werden in mehreren Großstädten Busse

mit PEM-Brennstoffzellen als Kraftquelle im Linienbetrieb erprobt. Die Möglichkeiten diese als BHKWs zu nutzen, besteht ebenfalls und befindet sich in der Probephase.

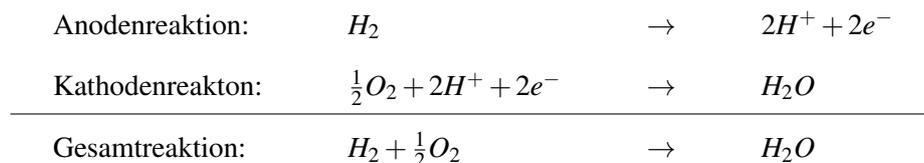
### 2.3.2 ELEKTROLYT

Als Elektrolyt wird eine Protonenaustauschmembran aus Flourethylenen als Basismaterial eingesetzt. Am bekanntesten ist Nafion, eine Weiterentwicklung des Teflons der Firma Du Pont. Die Membran lässt nur die entstandenen Wasserstoffprotonen diffundieren, während die Elektronen nur über die Leiter von der Anode über die Last zur Kathode fließen können. Dadurch entsteht der elektrische Stromfluss. Durch Befeuchtung und Temperierung der Membran, ist es möglich die Protonenleitfähigkeit und damit die Leistung der Zelle zu beeinflussen.

### 2.3.3 BETRIEB

Die PEM-Brennstoffzelle kann mit reinem Wasserstoff als Anodengas und Sauerstoff oder Luft als Kathodengas betrieben werden.

Die Reaktionen, die in der Brennstoffzelle ablaufen, lautet:



#### 2.3.3.1 WASSERHAUSHALT UND BEFEUCHTUNG

Da die Leistungsabgabe stark von der Befeuchtung der Membran abhängt, ist der Wasserhaushalt einer PEM-Brennstoffzelle ein wichtiges Thema. Das Wasser wird über die Befeuchtung der Reaktionsgase zugeführt. Ist die Membran nicht ausreichend befeuchtet, geht die Protonenleitfähigkeit zurück und die Leistungsabgabe verringert sich. Wird zuviel Feuchtigkeit zugeführt, lagert sich Wasser auf der Elektrode ab und die aktive Reaktionsfläche verkleinert sich, was ebenfalls zu einem Leistungsrückgang führt.

Erfahrungsgemäß werden gute Leistungen erzielt, wenn der Wasserstoff auf 100 % und die Luft auf 80% rel. Feuchte befeuchtet wird. Da an der Kathode auch Produktwasser anfällt, kann dort weniger zugeführt werden.

#### 2.3.3.2 PURGING

Um Wasser, welches sich an der Anode festsetzt und so die aktive Reaktionsfläche reduziert (Leistungsrückgang), zu entfernen, wird die Anode 'gepurged'. Dabei handelt es sich um ein kurzes Durchspülen der Anode mit Wasserstoff. Dazu wird ein Purge-Ventil kurzzeitig geöffnet, das Wasser wird durch den erhöhten Wasserstoffstrom ausgeblasen und die Reaktionsfläche gereinigt. Es wird

ein erhöhter Wasserstoffverbrauch in Kauf genommen, um die Leistung der Brennstoffzellen auf einem konstanten Niveau zu halten. Wichtig ist, dass so wenig wie möglich gepurged wird, weshalb eine ständige Überwachung der Einzelzellspannung ratsam ist. Unterschreitet eine Zelle eine festgelegte Spannung, wird gepurged.

#### 2.3.3.3 AIR-BLEEDING

Eine weitere Schwierigkeit bei der PEM-Brennstoffzelle ist die sog. Vergiftung der Elektroden. Durch CO-Moleküle welche sich an dem Brennstoffzellenkatalysator der Anode ablagern, wird die aktive Oberfläche der Elektrode verringert, was die Leistung der Brennstoffzelle reduziert.

Durch kontinuierliche oder stoßweise Zugabe von Sauerstoff oder Luft soll dem entgegengewirkt werden. Der Sauerstoff oxidiert die CO-Moleküle zu  $\text{CO}_2$  und die Vergiftung wird verhindert. Überschüssiger Sauerstoff, welcher durch den Air-Bleed übrig bleibt, reagiert mit dem Wasserstoff an der Anode zu Wasser. Dieser Wasserstoff steht nun nicht mehr zur Energieerzeugung zur Verfügung, weshalb auch hier darauf geachtet werden muss, dass nur so viel Sauerstoff wie nötig verwendet wird.[1].

Wird reiner Wasserstoff aus Flaschen oder Elektrolyseuren verwendet, kann von einer sehr hohen Reinheit ausgegangen werden und auf ein Air-Bleeding verzichtet werden.

## 3 PLANUNG DES VERSUCHSSTANDS

Um den Versuchsstand zu planen und dazu eine Anforderungsliste erstellen zu können, müssen als erstes die Versuche entworfen werden, welche mit dem Versuchsstand durchgeführt werden sollen. Darauf aufbauend kann dann eine Anforderungsliste und eine Planung des Versuchsstands erfolgen.

### 3.1 MÖGLICHE LABORVERSUCHE

Aufgrund der in Kapitel 2.1.4 dargestellten Charakteristiken und Verhältnisse, sind die folgenden Ideen für mögliche Laborversuche entstanden.

1. U/I Kennlinie und P/I Kennlinie aufzeichnen.  
Die Spannung soll bei vorgegebener, schrittweise erhöhter Stromstärke erfasst werden. Die Temperatur der Zelle soll dabei konstant bleiben. Zusätzlich kann eine Leistungskennlinie entweder über LabView direkt aufgezeichnet oder von den Studierenden berechnet werden. Des Weiteren können diverse Wirkungsgrade ermittelt werden.
2. Einfluss der Temperatur und des Drucks auf die U/I-Kennlinie.  
Bei einem festgelegten Betriebspunkt soll der Einfluss einer Temperatur- und Druckänderung auf Strom und Spannung untersucht werden (U-T Diagramm bzw. I-T-Diagramm).
3. Temperatureinfluss auf die reversible Zellspannung.  
Die reversible Zellspannung soll bei schrittweise steigender Zelltemperatur aufgenommen und mit rechnerisch ermittelten Werten verglichen werden.
4. Einfluss der Bereitstellungsart der Brennstoffe.  
Der Unterschied zwischen dem Betrieb mit reinem Wasserstoff zu einem Wasserstoff-Inertgas-Gemisch soll untersucht werden.
5. Einfluss der Befeuchtung auf die Leistungsparameter.  
Durch variieren der Brennstoffzellenbefeuchtung, soll die Abhängigkeit der Leistung von der Membranfeuchtigkeit untersucht werden.
6. Einfluss von unterschiedlichen Katalysatormaterialien, Elektrodengrößen und Elektrolyten auf das Betriebsverhalten und die Leistungsdaten der Brennstoffzelle.  
Mittels einer modularen Brennstoffzelle könnten die Komponenten Elektrode und Elektrolyt variiert und die Eigenschaften und Einflüsse der Komponenten erkannt und verglichen werden.

Durch Überlegungen bezüglich der Realisierbarkeit mit den gegebenen Mitteln und der Eingrenzung des Themas dieser Arbeit, soll im Folgenden eine Anlage entworfen werden, mit der die Versuche 1 bis 5 durchgeführt werden können. Versuch 6 erfordert einen zu speziellen Versuchsaufbau, weshalb auf ihn verzichtet wird.

## 3.2 FORMULIERUNG DER ANFORDERUNGEN

### 3.2.1 BRENNSTOFFZELLE

Den Kern des Versuchsstandes bildet die PEM-Brennstoffzelle. Entsprechen müssen alle Parameter für diesen Zelltyp ausgelegt werden. Zuerst wird der Leistungsbereich abgesteckt.

Um für die Versuche einen repräsentativen Leistungs- und Temperaturbereich abfahren zu können und anschauliche Werte zu erzeugen, wird für die Brennstoffzelle ein Leistungsbereich von  $P_{el}=30-100$  Watt festgelegt. Die Spannung des Brennstoffzellenstacks darf aus Sicherheitsgründen 42 Volt nicht überschreiten. Die maximale Stromstärke soll bei 30 A liegen. Die Brennstoffzelle und die sonstigen Komponenten sollen für einen Druck von bis zu 3 bar (ü) ausgelegt sein. Die Brennstoffzelle soll sowohl mit reinem  $H_2$  als auch mit einem  $H_2-N_2$ -Gemisch betrieben werden können. Als Oxidationsmittel wird Luft verwendet. Die Befeuchtung soll mit dem entstehenden Wasser und über die Befeuchtung der zugeführten Gase geschehen. Die Temperatur der Brennstoffzelle soll über eine Luftkühlung geregelt werden, wobei darauf zu achten ist, dass Luftkühlung und Luftzufuhr (als Edukt) getrennt sind.

Zusammengefasst sind die technischen Anforderungen an die Brennstoffzelle in Tabelle 3.1 dargestellt.

|                    |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| Bauart:            | PEM                              |
| Medien:            | $H_2$ , $H_2-N_2$ -Gemisch, Luft |
| Leistungsbereich:  | 30-100W                          |
| Spannung:          | max. 42V                         |
| Stromstärke:       | 0 - 30 A                         |
| Temperaturbereich: | 60-120 °C, regelbar              |
| Druckbereich:      | bis 3bar (ü)                     |
| Kühlung:           | Luft, regelbarer Ventilator      |
| Befeuchtung:       | selbst-befeuchtend, geregelt     |

TABELLE 3.1: Technische Anforderungen der Brennstoffzelle

### 3.2.2 SICHERHEIT

Da die Brennstoffzelle mit reinem Wasserstoff betrieben wird, muss die Anlage, vor allem jedoch die wasserstoffführenden Komponenten, aufgrund der Wasserstoffeigenschaften sicherheitstechnisch richtig ausgelegt werden.

Wasserstoff ist ein brennbares Gas. Es gehört zur Explosionsgruppe II C und Temperaturklasse  $T_1$ . Es besitzt demzufolge eine verhältnismäßig hohe Zündtemperatur von über 450 °C (540 °C). Dies bedeutet, dass keine Kontaktoberfläche heißer als 450 °C werden darf, was in der zu planenden

Anlage voraussichtlich nicht der Fall sein wird. Die Zündenergie von Wasserstoff ist jedoch sehr gering und gemischt mit Luft entsteht das hochexplosive Knallgas. Da im Normalbetrieb lediglich reiner Wasserstoff oder ein Wasserstoff-Stickstoff Gemisch durch die anodenseitige Gasversorgung fließt, kann möglicherweise von Geräten mit speziellen Zündschutzarten abgesehen werden. Dies ist jedoch spätestens bei der praktischen Realisierung noch einmal genau abzuwägen.[9]

Außerdem muss bedacht werden, dass austretender Wasserstoff sicher entfernt wird (bspw. Laborabzug).

Die Anlage muss auf den Betriebsdruck ausgelegt werden und an sinnvollen Stellen gegen Überdruck gesichert sein (z.B. Berstscheibe, Überdruckventil etc.). Da in der Anlage möglicherweise mehrere Wärmequellen verbaut sind, muss sichergestellt werden, dass durch mögliche Fehlfunktion von Ventilen keine abgesperrten Volumina entstehen, welche durch Wärmeeinwirkung in einen kritischen Druckbereich kommen.

Eine weitere Gefahr besteht durch heiße Bauteile oder Medien, an denen sich der Benutzer möglicherweise verbrennen bzw. verbrühen kann. Um dies zu verhindern, sind entsprechende Vorkehrungen zu treffen.

Da es sich bei der Brennstoffzelle auch um ein stromerzeugendes Bauteil handelt, ist ebenfalls eine Gefahr durch elektrischen Strom gegeben. Darum wurde die maximale Spannung auf 42 V begrenzt. Durch Schutzmaßnahmen gegen Überstrom, Überspannung und Überlast müssen Personen- und Sachschäden verhindert werden.

### 3.2.3 GASVERSORGUNG

Abgesehen von der Förderung der Eduktgase, ist es die Aufgabe der Gasversorgung die Edukte mit der nötigen Qualität (Sauberkeit, Reinheit etc.) an die Brennstoffzelle zu liefern.

#### *Luft-/Sauerstoffqualität*

Bei der Sauerstoffversorgung, welche über die Umgebungsluft bzw. eine Druckluftleitung erfolgen kann, muss abgewägt werden, ob diese gefiltert werden muss. Gerät zu viel Staub oder andere Schwebeteilchen in die Brennstoffzelle, kann dies zum Versagen führen.

#### *Wasserstoffqualität*

Da der Wasserstoff entweder in Flaschen mit der nötigen Qualität angeschafft oder per Elektrolyse hergestellt wird, ist hier im Normalfall keine gesonderte Reinigung nötig. Jedoch muss sichergestellt werden, dass keine Verunreinigung durch die wasserstoffführenden Komponenten erfolgen kann und die Reinheit, die vom Hersteller empfohlen wird, eingehalten wird.

#### *Erforderliche Massenströme*

Aus der Leistung der Brennstoffzelle kann der nötige Mindestmassenstrom für  $H_2$  und  $O_2$  wie folgt

berechnet werden. Aus der Anodenreaktion einer Knallgasbrennstoffzelle



lässt sich folgern, dass – unter der Annahme eines 100 % Gasumsatz u – aus 1 Mol Wasserstoffmoleküle, 2 Mol Elektronen entstehen.

Dies bedeutet, es werden

$$6,022 \cdot 10^{23} \cdot 2 = 1,2044 \cdot 10^{24} \quad (3.2)$$

Elektronen frei.

Ein Elektron besitzt die Ladung  $Q=1,602 \cdot 10^{-19}C$ . Hochgerechnet auf die frei werdende Elektronenanzahl, entsteht aus einem Mol Wasserstoff eine Ladung von

$$1,2044 \cdot 10^{24} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 1,92 \cdot 10^5 C \quad (3.3)$$

Mit der Zellspannung  $U_z$  multipliziert, ergibt sich die Arbeit, die die Brennstoffzelle – gespeist mit einem Mol Wasserstoff – generieren kann. Da Leistung, Arbeit pro Zeit ist, gilt für den Wasserstoffverbrauch einer Brennstoffzelle:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{InU_z}{1,92 \cdot 10^5 U_z} = \frac{P_{el}}{1,92 \cdot 10^5 U_z} \left[ \frac{mol}{s} \right] \quad (3.4)$$

Um auf einen Massenstrom zu kommen, muss man das Gewicht der Wasserstoffmoleküle ( $2,02 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$ ) mit einbeziehen.

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{2,02 \cdot 10^{-3} \cdot P_{el}}{1,92 \cdot 10^5 U_z} = 1,05 \cdot 10^{-8} \frac{P_{el}}{U_z} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (3.5)$$

Mit der selben Überlegung kann man eine Formel für den Sauerstoffverbrauch einer Brennstoffzelle herleiten.



Da bei der Umsetzung von 1 Mol Sauerstoff an der Kathode 4 Elektronen ausgetauscht werden, wird pro Mol umgesetztem Sauerstoff die doppelte elektrische Ladungsmenge frei, als bei der Umsetzung von 1 Mol Wasserstoff. Arbeitet man diesen Sachverhalt in Gleichung 3.4 ein, ergibt sich der Molmassenstrom für Sauerstoff.

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{InU_z}{2 \cdot 1,92 \cdot 10^5 U_z} = \frac{P_{el}}{3,84 \cdot 10^5 U_z} \left[ \frac{mol}{s} \right] \quad (3.7)$$

Mit dem Sauerstoffgewicht ( $32 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$ ) resultiert

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{32 \cdot 10^{-3} \cdot P_{el}}{3,84 \cdot 10^5 U_z} = 8,33 \cdot 10^{-8} \frac{P_{el}}{U_z} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (3.8)$$

Wird die Brennstoffzelle mit Luft betrieben, muss durch dem Masseanteil von Sauerstoff in der Luft (23 %) geteilt werden.[3]

Diese Werte stellen den theoretischen Gasverbrauch einer Brennstoffzelle dar. Jedoch kann eine Brennstoffzelle nicht den gesamten Wasserstoff umsetzen. Der Gasumsatz  $u$  beschreibt, wie viel Prozent des zugeführten Gases an der Elektrode zur Stromerzeugung umgesetzt wird.

Um dennoch die Nennleistung zu generieren, muss mehr Wasserstoff bzw. Sauerstoff zugeführt werden als berechnet. Das Verhältnis von bereitgestelltem Brennstoff zu theoretisch benötigtem Brennstoff wird auch Stöchiometrie  $\lambda$  genannt. Eine stöchiometrische Verbrennung – also  $\lambda = 1$  entspricht einem Gasumsatz  $u$  von 100 % ( $\lambda = \frac{1}{u}$ ). Je größer der Gasumsatz  $u$  an der Anode (Wasserstoff) ist, desto höher ist der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Reale Werte für die Stöchiometrie einer PEM-Brennstoffzelle sind  $\lambda_{\text{Anode}} = 1,5$  für den Wasserstoff und  $1,5 \leq \lambda_{\text{Kathode}} \leq 4$  für Luft.

Der Massenstrom, den die Gasversorgung liefern muss, errechnet sich somit anodenseitig nach Gleichung 3.5 und kathodenseitig nach Gleichung 3.8. Zur Berechnung des Leistungsbereichs der Gasversorgung wird als Mindestgrenze eine Brennstoffzelle mit  $P_{el} = 30\text{W}$  gewählt, die Stöchiometrie auf  $\lambda = 1$  und eine durchschnittliche Zellspannung von  $U_z = 0,6\text{V}$  festgelegt. Daraus ergeben sich ein Wasserstoffbedarf von  $\dot{m}_{\text{H}_2, \text{min}} = 0,525 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$  und ein Sauerstoff- bzw. Luftbedarf von  $\dot{m}_{\text{O}_2, \text{min}} = 4,165 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$  bzw.  $\dot{m}_{\text{Luft}, \text{min}} = 18,10 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$

Für die Berechnung des Maximalwerts, wird eine Brennstoffzelle mit  $P_{el} = 100\text{W}$  gewählt. Um eine Flexibilität der Gasbereitstellung zu erzeugen, wird mit einem Wasserstoffüberschuss von  $\lambda_{\text{Anode}} = 3$  und einem Luftüberschuss von  $\lambda_{\text{Kathode}} = 4$  gerechnet. Hieraus ergeben sich ein Wasserstoffbedarf von  $\dot{m}_{\text{H}_2, \text{max}} = 5,25 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$  und ein Sauerstoff- bzw. Luftbedarf von  $\dot{m}_{\text{O}_2, \text{max}} = 55,5 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$  bzw.  $\dot{m}_{\text{Luft}, \text{max}} = 241,5 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$

#### *Erforderlicher Druck*

Eine weitere Anforderung, welche die Gasversorgung betrifft, stellt die Druckbeaufschlagung der Brennstoffzelle dar. Der Betriebsdruck der Brennstoffzelle soll über die Gaszufuhr eingestellt und über einen Bereich von  $p_u = 0\text{bar (ü)}$  -  $p_{\text{max}} = 4\text{bar (ü)}$  geregelt werden können.

#### 3.2.4 BEFEUCHTUNG

Da für die Leistung einer PEM-Brennstoffzelle der geregelte Wasserhaushalt eine ausschlaggebende Rolle spielt, ist ein System zur Befeuchtung der Edukte  $\text{H}_2$  und Luft angedacht. Es sollen verschiedene Feuchtigkeitszustände in der Brennstoffzelle abgefahren werden können, um den Einfluss des Wasserhaushalts auf die Leistung der Brennstoffzelle abbilden zu können. Mindestanforderung ist die Befeuchtung der Edukte auf die aus entsprechender Literatur recherchierten Feuchtigkeitsgehalte für PEM-Brennstoffzellen. Es wird eine Befeuchtung des Wasserstoffs auf 100-110% und der Luft auf 70-80% empfohlen[4].

Eine Regulierung des Feuchtigkeitsgrades der Edukte ist ebenfalls erwünscht. So dass einerseits die Reaktion der Brennstoffzelle auf Austrocknen bzw. Überwässerung dargestellt werden kann, andererseits die gewünschte Flexibilität des Systems erreicht wird, um möglicherweise andere Brennstoffzellen damit zu betreiben.

### 3.2.5 MESS- UND REGELGENAUIGKEIT

Um die Auflösung der Spannungsmessung festzulegen, wird mit der Gleichung 2.12 die Spannungsänderung pro Kelvin Temperaturerhöhung berechnet. Da diese in Versuch 2 ermittelt werden soll, muss diese gemessen werden können.

Die Entropieänderung  $\Delta S$  wurde aus dem Tabellenwerk für Standardbedingungen (25°C, 101325 Pa) abgelesen. Dabei ergab sich ein  $U(T) = -0,83 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ . Da diese Spannungsänderung eine sehr hohe Messauflösung erfordert, wird die Spannungsmessung so ausgelegt, dass die Spannungsänderung aufgrund einer Temperaturänderung um 5K (= 4,15mV) messbar wird. Somit wurde die Auflösung für die Spannungsmessung auf 0,001 V festgelegt.

Für die Messung der Stromstärke, welche zur Einstellung der Betriebspunkte benötigt wird, wird eine Auflösung von 0.01 A gewählt. Dies wird damit begründet, dass zur Aufzeichnung des Aktivierungsbereichs der Brennstoffzelle kleine Ströme eingestellt werden müssen, weshalb die Regelgenauigkeit ebenfalls auf 0,01 A festgelegt wird.

Die Druckregelung und -messung soll an die Maximalwerte der verwendeten Zelle angepasst werden. Da diese noch nicht bekannt ist, wird er auf einen Bereich von 0-4 bar (ü) festgelegt. Um einen ausreichenden Druckbereich abfahren zu können, wird die Regelgenauigkeit auf 0,1 bar festgelegt.

| Messung         | Messbereich   | Auflösung        |
|-----------------|---------------|------------------|
| Stackspannung   | 1-40 V        | 0,001 V          |
| Zellspannung    | 0,01 - 2 V    | 0,001 V          |
| Stromstärke     | 0,01 - 30 A   | 0,01 A           |
| Stacktemperatur | -20 - 200 °C  | 0,01°C           |
| Druck           | 0 - 4 bar (ü) | 0,1 bar          |
| Regelung        | Regelbereich  | Regelgenauigkeit |
| Stromstärke     | 0,1 - 30 A    | 0,1 A            |
| Druck           | 0 - 4 bar (ü) | 0,1 bar          |

TABELLE 3.2: Mess- und Regelungstechnik

### 3.2.6 ANFORDERUNGSLISTE

Die formulierten Anforderungen sind in Tabelle 3.3 als Anforderungsliste dargestellt.

| F/W | Anforderungen an den Laborversuchsstand   |
|-----|---|
| F1  | Die Komponenten des Versuchsstands sind auf die Parameter für die Brennstoffzelle in Tab. 3.1 abzustimmen.  |
| F2  | Das System muss Modular aufgebaut sein, sodass eine hohe Flexibilität für Erweiterungen oder andere Anwendungen gegeben ist.  |
| F3  | Das System muss eine Anbindung der Mess- und Regelungstechnik an einen Computer besitzen und über LabView gesteuert werden können.  |
| F4  | Die elektronische Last muss so ausgelegt sein, dass alle Betriebspunkte zwischen offenem Stromkreis und Kurzschluss mit einer Genauigkeit von 0,1 A angefahren und gehalten werden können   |
| F5  | Die Gasversorgung muss die entsprechenden Massenströme $\dot{m}$ liefern, welche aufgrund der Nennleistung der Brennstoffzelle errechnet wurden.<br>$0,525 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \leq \dot{m}_{\text{H}_2} \leq 5,25 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$ $18,10 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \leq \dot{m}_{\text{Luft}} \leq 241,5 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$ |
| F6  | Ein System zum Erzeugen von Wasserstoff-Inertgas-Gemisch mit vorgegebener Wasserstoffkonzentration muss in die Brenngaszufuhr integriert sein.  |
| F7  | Die Feuchtigkeit von Wasserstoff und Luft muss in einem praktikablen Bereich geregelt werden können.  |
| F8  | Zur Bilanzierung sollen die Gase, welche ungenutzt die Brennstoffzelle verlassen, erfasst werden können.  |
| F9  | Die Luftzufuhr und die Brennstoffzellenkühlung sollen durch getrennte Systeme erfolgen.   |
| F10 | Die Sicherheit der Anlage und des Benutzers ist zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten.  |

TABELLE 3.3: Anforderungsliste

# 4 TECHNISCHE REALISIERUNG

## 4.1 SYSTEMENTWURF

Um das Gesamtsystem auslegen zu können und die formulierten Forderungen zu berücksichtigen, wird das Gesamtsystem "Brennstoffzellen-Versuchsstand" in einzelne Teilsysteme unterteilt. Abbildung 4.1 stellt die Anordnung der Teilsysteme mit möglichen Energie- und Stoffströmen dar. Je nach ausgewählter Art der technischen Realisierung, sind Änderungen, vor allem bezüglich der Antriebsleistungen der Teilsysteme, vorbehalten, da es für einige Teilsysteme technische Realisierungen gibt, die keine Antriebsleistung benötigen.

Mit dieser Funktionsstruktur als Grundlage werden nun die einzelnen Teilsysteme betrachtet und

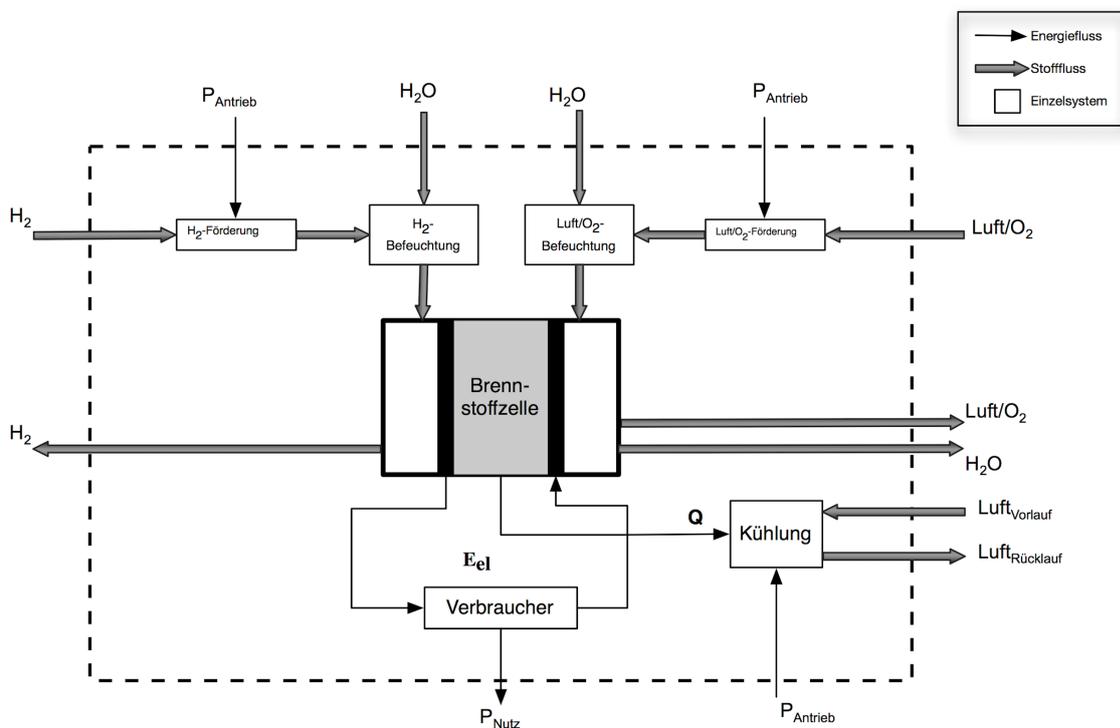


ABBILDUNG 4.1: Darstellung der Funktionsstruktur des Gesamtsystems und der Teilsysteme

deren Funktionen im Gesamtsystem beschrieben. Dabei wird einerseits festgelegt, welche Parameter bekannt sein müssen, damit das Teilsystem seine Funktionen realisieren kann, andererseits wird zu umfangreichen Teilsystemen ein morphologischer Kasten angefertigt. Damit werden verschiedene Möglichkeiten erarbeitet, bewertet und verglichen, um die bestmögliche technische Lösung zu finden. Die in Tabelle 3.3 formulierten Anforderungen müssen in den morphologischen Kasten eingearbeitet werden.

### *Morphologischer Kasten*

In einem morphologischen Kasten werden Teilsysteme, wie sie beispielsweise in Abbildung 4.1 als Kästen dargestellt sind, einzeln betrachtet. Das Teilsystem muss, um seine ihm zugeordnete Aufgabe (z.B. Gasversorgung) zu erfüllen, verschiedene Arbeitsschritte nacheinander durchführen. Im morphologischen Kasten werden die Arbeitsschritte nacheinander aufgelistet und für jeden Arbeitsschritt verschiedene technische Lösungen erarbeitet.

Anschließend wird jede Lösung einem Bewertungsverfahren (Nutzwertanalyse) unterzogen. Hierzu werden Kriterien formuliert, welchen eine normierte Gewichtung zugeordnet wird. Nun wird jede technische Lösung nach den einzelnen Kriterien bewertet (Skala von 1-5). Das Produkt aus Bewertung und Gewichtung ergibt eine Einzelpunktzahl, die die zu bewertende Lösung erhält. Die Summe aus den Einzelpunktzahlen ergibt die Gesamtpunktzahl. Die Lösung mit der höchsten Punktzahl ist demnach die geeignetste. Die Kombination der besten technischen Lösungen ergibt das Wirkprinzip des Teilsystems.

| Kriterien                                | Gew.     | Erklärung   |
|--|----------|---|
| Anschaffungskosten                       | 0,3      | Je teurer die Komponente/n in der Anschaffung desto schlechter  |
| Unterhaltungskosten                      | 0,2      | Je teurer/aufwendiger die Komponente/n bei der Instandhaltung desto schlechter                                  |
| Päd. Wertigkeit                          | 0,1      | Je näher an realen BZ-Systemen desto besser   |
| Sicherheit                               | 0,2      | Je höher die Sicherheit desto besser  |
| Komplexität                              | 0,2      | Je weniger komplex das System desto besser  |
| <b>Summe</b>                             | <b>1</b> |   |
| Genauigkeit ( nur bei Messanforderungen) | 0,2      | Je genauer gemessen werden kann desto besser (Unterhaltungskosten und Komplexität werden dann um 0,1 reduziert) |

TABELLE 4.1: Die Kriterien und ihre Gewichtungen

## 4.2 GASVERSORGUNG

Im folgenden wird dargestellt, wie die Gasversorgung der Brennstoffzelle realisiert werden soll.

### 4.2.1 WASSERSTOFF-VERSORGUNG

Die Gasversorgung hat die Aufgabe, den vom Benutzer definierten Gasmassenstrom bei ebenfalls definiertem Druck in die Brennstoffzelle zu leiten. Zusätzlich muss es möglich sein, ein definiertes N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-Gemisch zu erzeugen und zu fördern. Die am Ausgang der Brennstoffzelle austretende Gasmenge muss gemessen werden können. Zudem muss das Spülen der Anode (Purging) möglich sein. Zur Realisierung der Versorgung wurde der folgende morphologische Kasten erstellt. (Nutzwertanalyse s.A.3)

| Teilfunktionen                           | 1                          | 2                           | 3                          | 4                           |
|--|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Speicherung                              | Druckflasche<br>4,4        | Elektrolyseur<br>3          | Reformer<br>2              | Metallhydridspeicher<br>4,4 |
| Druck aufbauen/einstellen                | Verdichter<br>3,5          | Druckflasche/-regler<br>4,2 | Wassersäule/Gewicht<br>2,8 |                             |
| Massenstrom einstellen                   | Verdichterdrehzahl<br>3    | MFC<br>3,6                  | Stromregelventil<br>3,2    |                             |
| Befeuchten                               | Verdampfen<br>3            | Bubbler<br>3,4              | Membranbefeuchter<br>3,3   |                             |
| N <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> -Mischung | Beimischen                 |                             |                            |                             |
| Überschuss erfassen                      | Auffangen/Füllstand<br>2,9 | Durchflussmessung<br>3,4    |                            |                             |
| Gegendruck halten                        | MFC<br>3,3                 | Druckregler<br>3,9          | Rückführen<br>3,7          |                             |

ABBILDUNG 4.2: Morphologischer Kasten zur Wasserstoffversorgung und Befeuchtung

Aus dem morphologischen Kasten hat sich ein Lösungsprinzip ergeben (s. Abb. 4.3), bei dem der Wasserstoff aus Druck- oder Metallhydridflaschen über einen Massenstromregler (MFC) in die Brennstoffzelle geleitet wird. Über einen selbst gebauten Bubbler wird das Gas befeuchtet. Zur Bilanzierung wird am Ausgang der Überschuss, der die Brennstoffzelle ungenutzt verlässt, über eine Durchflussmessung erfasst. Ein Vordruckregler, hinter der Durchflussmessung hält den Druck im System und regelt über eine Druckmessung am Eingang der Brennstoffzelle den Eingangsdruck. So kann über den MFC der Massenstrom und über den Druckregler der Eingangsdruck in die Brennstoffzelle geregelt werden.

Zum Purging muss entweder wie in Abb. 4.3 ein weiteres Regelventil verbaut werden, oder die Druckregelung so beeinflusst werden, dass das Ventil kurz öffnet und die Anode so mit Wasserstoff gespült werden kann.

Da die Durchflussmessung auf reines Gas kalibriert ist, muss vorher ein Wasserabscheider verbaut werden. Denn in dem Gasstrom, welcher die Brennstoffzelle verlässt, ist aufgrund der Gasbefeuchtung Wasserdampf enthalten. Um das Wasser ebenfalls in die Bilanzierung mit einzubeziehen, soll die abgeschiedene Wassermenge über eine Waage bestimmt werden.

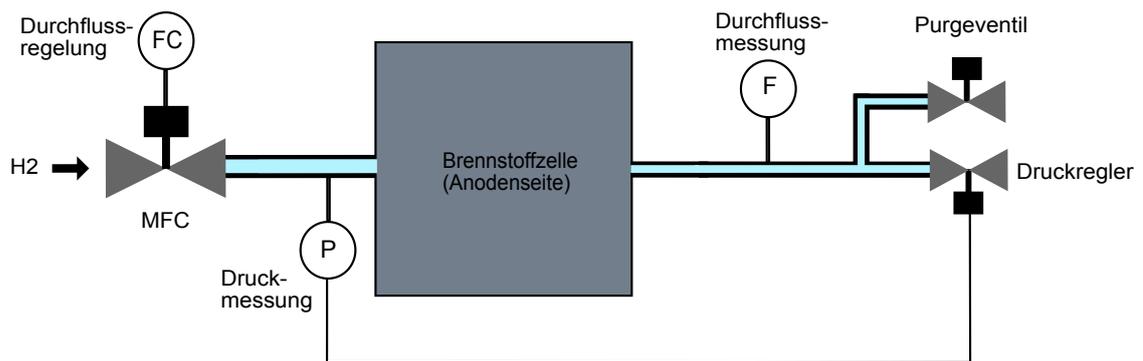


ABBILDUNG 4.3: Schema der Wasserstoffversorgung

#### 4.2.2 LUFT-VERSORGUNG

Aufgabe der Luftversorgung ist es, die Luft bzw. den Sauerstoff bei vorgegebenem Druck und Gasmassenstrom in die Brennstoffzelle zu leiten.

Auch hierzu wurde ein morphologischer Kasten erstellt. (Nutwertanalyse s. A.6)

| wirkpr.                   | 1                          | 2                           | 3                        |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Teilfunktionen            |                            |                             |                          |
| Speicherung               | Umgebung<br>3,8            | Druckflasche<br>3,7         | Druckluftleitung<br>4    |
| Druck aufbauen/einstellen | Verdichter<br>3,2          | Druckflasche/-regler<br>4,3 |                          |
| Massenstrom einstellen    | Verdichterdrehzahl<br>3    | MFC<br>3,6                  | Stromregelventil<br>3,2  |
| Befeuchten                | Verdampfen<br>3            | Bubbler<br>3,4              | Membranbefeuchter<br>3,3 |
| Überschuss erfassen       | Auffangen/Füllstand<br>2,9 | Durchflussmessung<br>3,4    |                          |
| Gegendruck halten         | MFC<br>3,3                 | Druckregler<br>3,9          | Rückführung<br>3,7       |

ABBILDUNG 4.4: Morphologischer Kasten zur Luftversorgung und Befeuchtung

Die Luftversorgung ist grundsätzlich gleich wie die Wasserstoffversorgung realisiert (vgl. Abb. 4.3). Der Luftbezug findet über eine im Labor vorhandene Druckluftleitung statt. So wird hier ebenfalls durch einen MFC der Massenstrom reguliert und über einen Vordruckregler der Eingangsdruck der Luft geregelt.

Am Luftausgang der Brennstoffzelle befindet sich die gleiche Anordnung zur Regelung des Drucks und Erfassung des Überschusses wie bei der Wasserstoffversorgung. Lediglich das Purgeventil ist hier nicht nötig.

### 4.2.3 BEFEUCHTUNG

Das Befeuchtungssystem der Anlage hat die Aufgabe, den Wasserstoff und die Luft zu befeuchten, um den Wasserhaushalt der Brennstoffzelle zu regeln. Dabei soll vom Benutzer die relative Feuchte der Gase eingestellt werden können. Um die Brennstoffzelle auch ohne externe Befeuchtung betreiben zu können, wird um das Befeuchtungssystem ein Bypass gelegt.

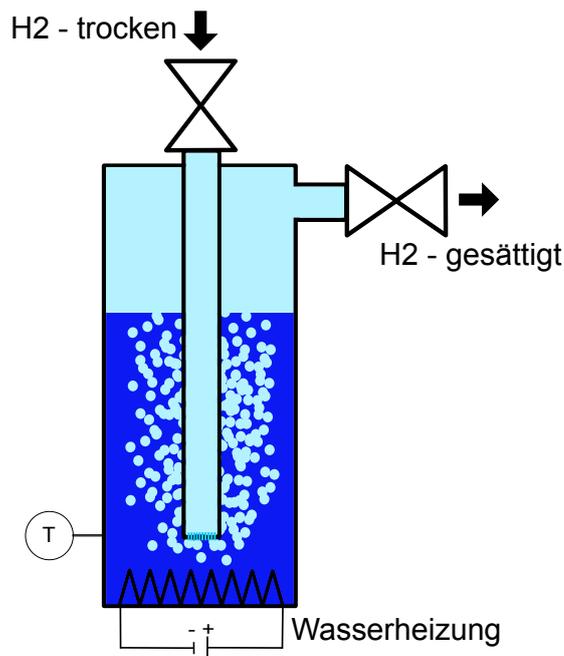


ABBILDUNG 4.5: Schema des Bubblers

Realisiert werden soll die Befeuchtung über einen sog. Bubbler (Waschflasche), welcher selbst gebaut werden soll. Dabei handelt es sich um einen mit deionisiertem (hochreinem) Wasser gefüllten Behälter, bei dem das Gas durch eine Düse (Fritte) eingeleitet wird (s. Abb. 4.5). Mit der Düse sollen möglichst kleine Gasbläschen erzeugt werden, welche durch das Wasser aufsteigen. Ist die Wassersäule hoch genug und die Gasdurchflussgeschwindigkeit nicht zu schnell, kann man näherungsweise davon ausgehen, dass das Gas am Austritt vollständig gesättigt ist und die Temperatur des Wassers angenommen hat.

Wird das Wasser auf eine bestimmte Temperatur stabilisiert, kann man davon ausgehen, dass das Gas bei dieser Temperatur vollständig mit Wasserdampf gesättigt vorliegt (100% rel. Feuchte). Damit kann man den Zustand des Gases klar bestimmen. Jedoch ist zu empfehlen, dass das Konzept in Hinblick auf die nötige Wassersäule und die maximale Fließgeschwindigkeit vor dem Einbau erprobt wird.

Um ein Kondensieren des Wassers zu verhindern, muss die Gasleitung von Bubbler zur Brennstoffzelle beheizt werden. Indem das gesättigte Gas nach dem Bubbler weiter aufgeheizt wird, kann die

relative Feuchte des Gases mit ausreichender Genauigkeit geregelt werden.

Für den Eigenbau wird eine Waschflasche verwendet. Dabei handelt es sich um Behälter, meist aus Glas, die im Prinzip so aufgebaut sind, wie in Abbildung 4.5 dargestellt.

Um das Wasser in der Waschflasche aufzuheizen, ist eine eigens entworfene Lösung nötig, da sich aus der Recherche nach passenden Systemen herausgestellt hat, dass das Beheizen des Mediums in einer Waschflasche selten vorgesehen ist. Es wurden drei mögliche Varianten erarbeitet, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden:

- Variante 1: Das Wasser im Bubbler kann über eine speziell gefertigte elektrische Heizmanschette aufgeheizt werden, welche von aussen über die Waschflasche gestülpt wird. So kann die Wassertemperatur einfach und schnell eingestellt werden. Zu berücksichtigen ist die Beständigkeit des Bubbler-Gefäßes auf Temperaturänderungen, da diese in den meisten Fällen aus Glas sind.
- Variante 2: Es wurde eine Waschflasche gefunden, welche als temperierbar angeboten wird. Diese ist doppelwandig, so dass ein Wärmeträgermedium (Wasser) in die äussere Wandung gepumpt werden kann. So ist die eigentliche Waschflasche mit dem Wärmeträgermedium umgeben und wird darüber temperiert. Eine Umwälzpumpe fördert das temperaturgeregelt Wärmeträgermedium ständig durch die äussere Wandung der Waschflasche.
- Variante 3: Die Waschflaschen werden in ein Wasserbad gegeben, welches auf die gewünschte Temperatur aufheizt und diese hält.

#### 4.2.4 WASSERSTOFF-STICKSTOFF-GEMISCH

Um ein definiertes Wasserstoff-Stickstoff Gemisch herzustellen, wird an die Wasserstoffleitung über ein T-Stück eine Stickstoffleitung angeschlossen. So kann über einen MFC ein definierter Stickstoffmassenstrom zum Wasserstoffmassenstrom beigemischt werden. Möglicherweise führt das Beimischen über ein einfaches T-Stück nicht zur erwünschten Homogenität des Gasgemisches. Deshalb wird empfohlen, die Anordnung mit T-Stück zu testen und alternativ eine Mischeinheit zu verwenden.

### 4.3 KÜHLUNG

Die Kühlung ist sehr stark abhängig von der ausgewählten Brennstoffzelle.

In dem Leistungsbereich 30-100 W (siehe 3.3) werden die Stacks in den häufigsten Fällen luftgekühlt. Eine endgültige Dimensionierung der Kühlleistung und letztendlich des Kühlers/Verdichters kann somit erst nach der Auswahl der Brennstoffzelle erfolgen.

Aufgrund des festgelegten Leistungsbereichs der Brennstoffzelle in der Anforderungsliste, kann jedoch überschlägig ein Bereich abgesteckt werden, in dem die Wärmeleistung der Brennstoffzelle zu erwarten ist.

Arbeitet eine Brennstoffzelle reversibel, produziert sie am wenigsten Wärme, da lediglich die Wärme aus der Entropieänderung anfällt (vgl. 2.1.4). Somit eignet sich dieser Fall gut, um die Untergrenze des Bereichs festzulegen.

Die gesamte Wärme steckt im reversiblen Fall in der Entropieänderung  $T\Delta S$ . Mit der Gibbs-Helmholz-Gleichung 2.10 lässt sich diese wie folgt errechnen:

$$T \cdot \Delta S = \Delta H_{\text{Wasser,fl}} - \Delta G_{\text{fl}} = 48,477 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4.1)$$

Um auf eine Wärmeleistung schließen zu können, muss mit dem Molmassenstrom des Produktwassers multipliziert werden. Mit den Überlegungen in 4.2 zur Berechnung der nötigen Gasmassenströme, kann der entstehende Wassermassenstrom errechnet werden. Über die Anzahl an Elektronen bzw. der entsprechenden Ladung, welche in der Redoxreaktion ausgetauscht werden, kann so mit der elektrischen Leistung und der Zellspannung ein Zusammenhang mit den Massenströmen hergestellt werden (s.4.2).

Addiert man Formel 3.5 und 3.8 so erhält man die Formel für den Wassermassenstrom.

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 1,05 \cdot 10^{-8} \frac{P_{el}}{U_z} + 8,33 \cdot 10^{-8} \frac{P_{el}}{U_z} = 9,34 \cdot 10^{-8} \frac{P_{el}}{U_z} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (4.2)$$

Dividiert durch die molare Masse von Wasser ( $18,01528 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ ) erhält man den Molmassenstrom des produzierten Wassers. Für eine Brennstoffzelle mit der kleinsten geforderten elektrischen Nennleistung (30 W) im reversiblen Fall ( $U_z = 1,18\text{V}$ ) ergibt sich ein Wassermassenstrom von:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 9,34 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{30\text{W}}{1,23\text{V}} = 2,375 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.3)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{7,593 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{18,01528 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 1,318 \cdot 10^4 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \quad (4.4)$$

Somit resultiert eine minimale Wärmeleistung der Anlage von

$$Q_{rev} = 48,477 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot 4,215 \cdot 10^4 = 6,39\text{W} \quad (4.5)$$

Für die Berechnung der Wärmeleistung einer realen Brennstoffzelle wird die Überlegung zugrunde gelegt, dass eine Brennstoffzelle die chemische Energie des Brenngases nur in elektrische und thermische Energie umwandeln kann. Im Fall der thermoneutralen Brennstoffzelle (keine Wärmeproduktion) wird die gesamte Enthalpie der Brenngase in elektrische Energie umgewandelt, was einem Wirkungsgrad von 1 entspricht. Je nachdem ob gasförmiges oder flüssiges Wasser entsteht, liegt eine Zellspannung von 1,25 V (Gas) oder 1,48 V (Flüssigkeit) vor. Da in den meisten Fällen gasförmiges Wasser entsteht, werden 1,25 V Zellspannung für eine Beziehung zwischen Wärmeleistung und elektrischer Leistung zugrunde gelegt.[3]

Je mehr die Zellspannung von diesem Wert abweicht, desto mehr Wärme entsteht. Folgende Beziehung zwischen elektrischer Leistung und Wärmeleistung kann formuliert werden:

$$Q = P_{el} \frac{(1,25 - 1)}{U_z} \quad (4.6)$$

Zur Überprüfung wurde mit dieser Formel die Wärmeleistung der im vorherigen Beispiel verwendeten reversiblen Brennstoffzelle berechnet:

$$Q_{rev} = 30W \frac{(1,25 - 1)}{1,23} = 6,36W \quad (4.7)$$

Das Ergebnis weicht um ca. 0,5 % von dem obigen ab, womit eine hinreichende Genauigkeit der Formel gegeben ist.

Die maximal zu erwartende Wärmeleistung wird mit der maximalen Brennstoffzellenleistung 100W und einer durchschnittlichen Zellspannung von 0,6V berechnet.

$$Q_{max} = 100W \frac{(1,25 - 1)}{0,6} = 41,67W \quad (4.8)$$

Somit liegt die Wärmeleistung der Brennstoffzelle zwischen

$$Q_{min} = 6,39W \quad \text{und} \quad Q_{max} = 41,67W.$$

Damit kann über

$$\dot{m}_{Luft} = \frac{Q}{c_p(\Delta T)} \quad (4.9)$$

Die nötige Fördermenge des Luftverdichters errechnet werden. Hierzu wird als Umgebungstemperatur  $T_U = 25^\circ\text{C}$  und als Stacktemperatur  $T_S = 65^\circ\text{C}$  angenommen. Daraus ergibt sich ein Fördermengenbereich für den Ventilator, je nach Brennstoffzellenleistung und Wirkungsgrad von  $0,3 \frac{\text{g}}{\text{s}} - 1,1 \frac{\text{g}}{\text{s}}$  Luft.

Um auch hier eine Möglichkeit zur Bilanzierung zu schaffen, muss die Temperatur der Luft am Kühlingseingang und am -ausgang, sowie der Luftmassenstrom gemessen werden.

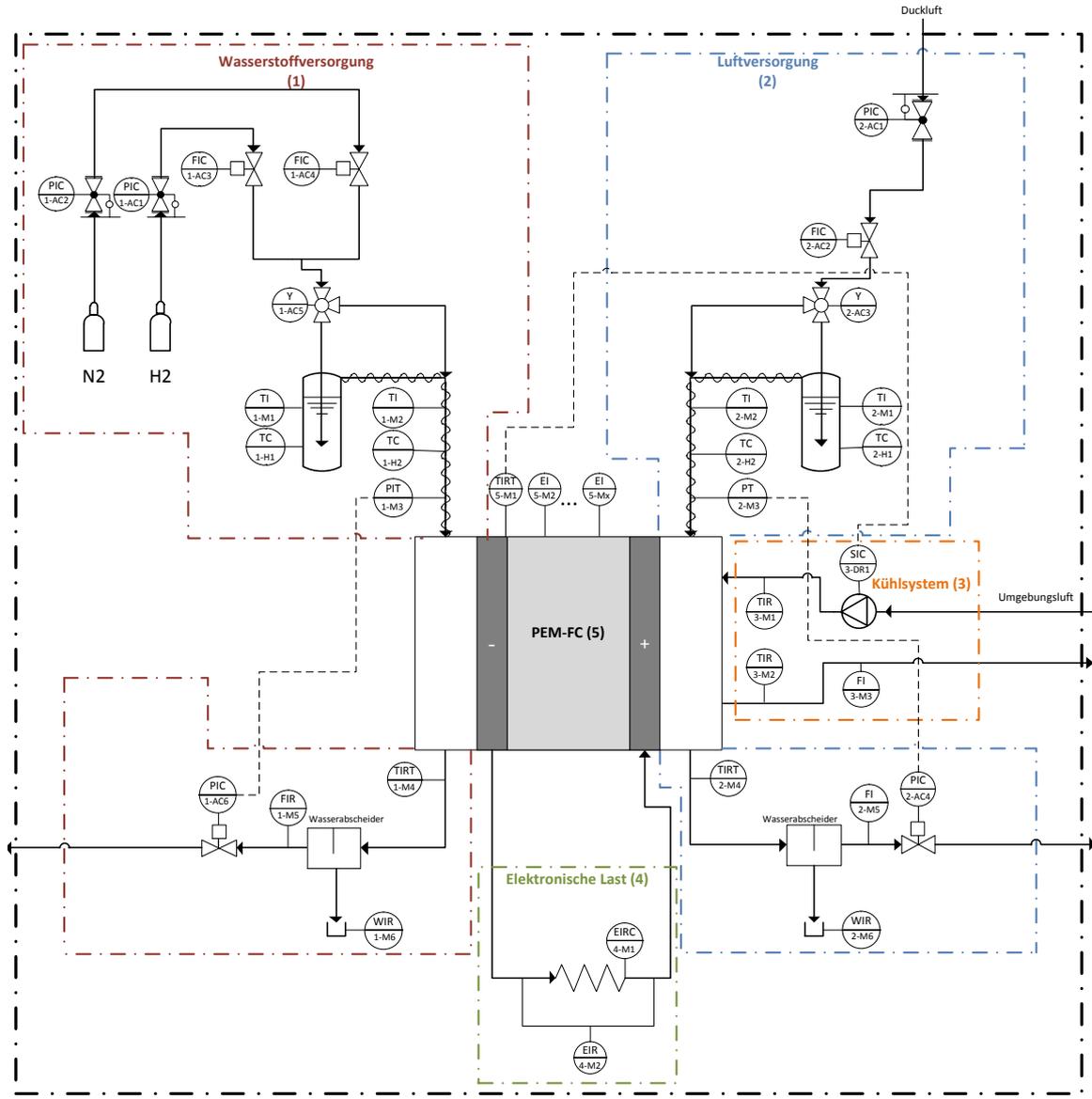
Dies kann über ein wärmeisoliertes Gehäuse mit zwei Öffnungen für die Brennstoffzelle realisiert werden. An einer Seite saugt der Ventilator die Umgebungsluft ( $T_1$ ) an und führt sie gezielt an die Brennstoffzelle heran. Aus einer zweiten Öffnung tritt die warme Luft wieder aus, deren Temperatur gemessen wird ( $T_2$ ). Zur Messung des Luftmassenstroms, kann in einem definierten Querschnitt die Fließgeschwindigkeit der Luft über ein Anemometer bestimmt werden.

#### 4.4 ELEKTRONISCHE LAST

Da die abgegebene Spannung der Brennstoffzelle variabel ist und ein konstanter Stromfluss einstellbar sein soll, wird eine elektronische Last eingesetzt. Diese ist über den Steuercomputer programmierbar.

### 4.5 FLIESSSCHEMA UND STÜCKLISTE

Aus den vorangegangenen technischen Überlegungen ergibt sich die Stückliste und das Fließschema (in DIN A3 s. A.7) für den Teststand.



Bezeichnungen nach EN 62424

**Nomenklatur der Gerätebezeichnung**  
 Bsp.: 1-AC1  
 Die erste Ziffer beschreibt den Anlagenteil (1)  
 Danach folgt das Kürzel, welches den Gerätetypen festlegt (AC für Actuator)  
 Fortlaufende Nummer (1)

**Anlagenteile:**  
 1 = Wasserstoffversorgung  
 2 = Luftversorgung  
 3 = Kühlsystem  
 4 = Elektronische Last  
 5 = Brennstoffzelle

**Kürzel für Gerätetypen:**  
 AC = Actuator (Stellglied)  
 DR = Drive (Antrieb)  
 H = Heater (Heizung)  
 M = Measurement (Messung)

ABBILDUNG 4.6: Fließschema des Teststands

| <b>Anlagenteil</b>         | <b>Komponente</b>                                | <b>Anzahl</b>   |
|----------------------------|--|-----------------|
| <b>Brennstoffzelle:</b>    | Stack  | 1               |
|                            | Zellspannungsmessung                             | 1 pro Zelle     |
| <b>Elektronische Last:</b> | Inklusive Stackspannungs- und Stromstärkemessung | 1               |
| <b>Gaszufuhr:</b>          | Wasserstoffflasche                               | 1               |
|                            | Stickstoffflasche                                | 1               |
|                            | Flaschendruckminderer                            | 2               |
|                            | MFC Wasserstoff                                  | 1               |
|                            | MFC Luft   | 1               |
|                            | MFC Stickstoff                                   | 1               |
| <b>Befeuchtung:</b>        | Befeuchtergefäß                                  | 2               |
|                            | Laborwasserbad                                   | 1               |
|                            | Beheizte Gaszuführung                            | 2               |
|                            | Dreiwegeventil (Bypass)                          | 2               |
| <b>Gasabfuhr:</b>          | Wasserabscheider                                 | 2               |
|                            | Wasserbehälter                                   | 2               |
|                            | Waage  | 2               |
|                            | Durchflussmesser Wasserstoff                     | 1               |
|                            | Durchflussmesser Luft                            | 1               |
|                            | Vordruckregler Wasserstoff                       | 1               |
|                            | Vordruckregler Luft                              | 1               |
| <b>Kühlung:</b>            | Luftverdichter(Ventilator)                       | 1               |
|                            | Luftführung (Gehäuse)                            | 1               |
|                            | Massenstrommessung (Anemometer)                  | 1               |
| <b>Allgemeines:</b>        | Verrohrung/Fittinge                              | nach Bedarf     |
|                            | Temperaturfühler Anlage + Einzelzellen           | 9+ Zellenanzahl |

TABELLE 4.2: Stückliste

## 5 KOMPONENTENAUSWAHL

Im Folgenden werden mögliche Komponenten zum Bau der Anlage vorgeschlagen. Dazu wurden von verschiedenen Herstellern Angebote eingeholt, tabellarisch gegenübergestellt und diskutiert. Die vollständigen Angebote und Datenblätter zu den Komponenten befinden sich im Anhang.

### 5.1 BRENNSTOFFZELLENSTACK

Die technischen Eigenschaften der zur Auswahl stehenden Brennstoffzellenstacks, sind in der folgenden Tabelle zum Vergleich dargestellt. (Angebote und Datenblätter s. A.15)

|                        |                              |                          |   |
|------------------------|------------------------------|--------------------------|---|
| Firma                  | Quintech                     | Dreibein GmbH            | Zentrum für Brennstoffzellen-Technik ZBT GmbH |
| Bezeichnung            | EFC-50-02-7-ST               | FC 50                    | ZBT Brennstoffzelle                           |
| Nominale Leistung      | 50 W                         | 40 W                     | ca. 100 W                                     |
| Nominale Stackspannung | 4,55 V                       | 5 V                      | ca. 3 V                                       |
| Nominale Stromstärke   | 11 A                         | 8,0 A                    | 30 A  |
| Betriebsdruck          | 3,45 bar (ü)                 | 0,4-1 bar (ü)            | Umgebungsdruck (3 bar(ü) unter Vorbehalt)     |
| Befeuchtung            | abhängig von Leistungsdichte | selbstbefeuchtend        | abhängig von Leistung                         |
| Größe                  | 13,5x13,5x13,5 cm            | 12,0x10,3x13,5 cm        | 8,0x8,4x16,8 cm                               |
| Gewicht                | 4,0 kg                       | 1,15 kg                  | 1,8 kg  |
| Einzelzellüberwachung  | Spannung und Temperatur      | Speziallösung (Eigenbau) | Spannung und Temperatur                       |
| Preis                  | 6.784,- €                    | 2.310,- €                | 2.700,- €<br>(4.800,- € bei Druckbetrieb)     |

TABELLE 5.1: Vergleich möglicher Brennstoffzellen

Bei dem EFC-50-02-7-ST handelt es sich um einen PEM-Brennstoffzellenstack der Firma 'Electro-Chem', deren europäischer Vertrieb durch die Firma Quintech erfolgt.

Der Stack erzeugt eine elektrische Nennleistung von 50 W im Normalbetrieb und kann 100 W maximale Leistung liefern. Er ist speziell für Laboranwendungen entwickelt, um verschiedene Betriebsweisen zu erforschen. Jede der 7 Einzelzellen des Stacks besitzt je einen Anschluss für eine Temperatur und Spannungsüberwachung. Sowohl der Leistungsbereich, als auch der Druckbereich der Brennstoffzelle erfüllt die Anforderungen, welche in der Arbeit festgelegt werden. Deshalb ist dieser Stack ein sehr guter Kandidat für den Teststand.

Der FC 50 Brennstoffzellenstack ist ein PEM-Brennstoffzellenstack der Firma Heliocentris Energiesysteme GmbH. Er ist Teil eines Instructorsets, welches zur Ausbildung an Brennstoffzellen in Hochschulen und Berufsschulen zusammengestellt wurde(s. Anhang). Mit einer Nennleistung von 40 W und einer maximalen Leistung von 50 W erfüllt er die Leistungsanforderungen. Jedoch ist der Betriebsdruck auf 1 bar (ü) begrenzt und steht in Konflikt mit der festgelegten Druckanforderung. Außerdem ist der Stack Teil eines vorkonfigurierten Sets, wodurch es schwieriger ist, eine eigene Konfiguration zu realisieren. Dennoch ist das System hier aufgeführt, da das Set schon viele der benötigten Komponenten beinhaltet und preislich interessant ist. Bis auf den Druckbereich, lässt sich die Konfiguration laut Aussage des Herstellers auch für eigene Zwecke anpassen.

Das Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT GmbH Duisburg stellt maßgeschneiderte Brennstoffzellen her. Hier wurde eine PEM-Brennstoffzelle für Laborbetrieb angefordert, welche auf die Anforderungen des geplanten Teststandes zugeschnitten ist. Sie besteht aus 5 Zellen und liefert unter Normalbetriebsbedingungen ca. 100 W. Eine Konfiguration für einen Druckbetrieb wird derzeit noch erprobt, weshalb das Angebot für einen Betrieb bis 3 bar (ü) vorerst unter Vorbehalt besteht. Aufgrund des preislichen Vorteils gegenüber der Brennstoffzelle von Quintech und der höheren Flexibilität im Vergleich zur Brennstoffzelle von Heliocentris, wird die Brennstoffzelle vom ZBT GmbH favorisiert.

## 5.2 ELEKTRONISCHE LAST

Die folgenden elektronischen Lasten wurden angefragt.(Angebote und Datenblätter s. A.21)

|                            |                                |                                     |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Firma                      | ET System electronic GmbH      | Gossen Metrawatt                    |
| Bezeichnung                | ELP/DCM 9711                   | KONSTANTER Series<br>32 EL 150 R 30 |
| Leistung                   | 150 W                          | 150 W                               |
| Lasteingangsspannung       | 0 - 150 V                      | 0 - 350 V                           |
| Laststrom                  | 0 - 30 A                       | 0 – 30 A                            |
| Schnittstellen             | RS 232/RS485/USB je<br>105,- € | RS233/RS485/USB je<br>120,- €       |
| Preis (inkl Schnittstelle) | 736,- €                        | 820,- €                             |

TABELLE 5.2: Vergleich möglicher elektronischer Lasten

Die beiden elektronischen Lasten unterscheiden sich kaum. Beide sind mit einem Überspannungs-, Überstrom- und Überlastschutz ausgestattet. Deshalb wird die preisgünstigere Variante von ET System electronic empfohlen.

## 5.3 BEFEUCHTUNG

Eine Auswahl möglicher Waschflaschen und Temperiersysteme ist in folgender Tabelle aufgeführt. (Angebote und Datenblätter s. A.28)

Wegen des anlagentechnischen Aufwandes und des deutlich höheren Gesamtpreises, ist Variante 2 im Vergleich zu den anderen Lösungen nicht zu empfehlen.

Bei Variante 1 ist aufgrund der spezifisch gefertigten Heizmanschette der Preis erst bei klarer Auftragslage berechenbar. Eltherm grenzte den Preis auf ca. 400,- bis 600,- € ein. Zuzüglich der Waschflasche würde man also auf einen Preis von 500,- bis 700,- € für diese Lösung kommen.

Empfohlen wird Variante 3. Sie ist sehr sicher und außerdem am leichtesten zu realisieren. Der Preis ist mit 400,- bis 600,- € akzeptabel.

| Variante        | 1   | 2                                | 3                              |
|-----------------|---|----------------------------------|--------------------------------|
| Waschflasche    |   |                                  |                                |
| Firma           | M&C Tech-Group                                  | Neubert Glas                     |                                |
| Bezeichnung     | Befeuchtergefäß FP-BF                           |                                  |                                |
| Betriebsdruck   | bis 4 bar (ü)                                   | bis 4 bar (ü)(laut Neubert Glas) |                                |
| Temperaturbest. | bis 80 °C                                       | bis 80 °C                        |                                |
| Preis           | 199,50,- €                                      | 140 bis 180,- €                  |                                |
| Temperiersystem |   |                                  |                                |
| Firma           | eltherm GmbH                                    | Huber Kältemaschinen GmbH        | PCE Deutschland GmbH           |
| Bezeichnung     | elektrische Heizmanschette (Spezialanfertigung) | MPC-104A Umwälzthermostat        | Labor-Wasserbad Wise Bath WB-6 |
| Preis           | 400 bis 600,- €                                 | 1140,- €                         | 470,- €                        |

TABELLE 5.3: Mögliche Komponenten zum Bau des Bubblers

## 5.4 MASSENDURCHFLUSSREGLER (MFC)

Für die Regelung des Gasdurchflusses werden thermische Durchflussmesser eingesetzt. Diese nutzen die Abhängigkeit der Wärmeabfuhr zur Strömungsgeschwindigkeit einer Strömung.

Zwei Heizungen mit Temperatursensor werden in Reihe in der Strömung angeordnet. Steht das Medium still, zeigen beide Sensoren die gleiche Temperatur an. Fließt das Medium jedoch, wird von der Strömung Wärme abgeführt. Da die Sensoren in Reihe angeordnet sind, misst der zweite Sensor eine höhere Temperatur als der Erste. Dadurch driften die beiden gemessenen Temperaturen auseinander. Dieser Temperaturunterschied ist proportional zum Massendurchfluss. Die interne Elektronik hat die Daten der Medien, für die die Regler konfiguriert sind gespeichert. Sie kann so den Massenstrom errechnen und ihn mit einem Regelventil regeln.

Die Massendurchflussregler für die Medien Wasserstoff, Luft und Stickstoff wurden angefragt und sind in den folgenden Tabellen zum Vergleich gegenübergestellt. (Angebote und Datenblätter s. A.33)

Die Angebote unterscheiden sich kaum. Die Unterschiede in den Regelbereichen entstanden dadurch, dass die Anfragen im laufenden Entwicklungsprozess gestellt wurden und immer wieder kleine Änderungen vorgenommen wurden. Da die Regler von HTK-Hamburg billiger sind, werden deren MFC's favorisiert.

|              |  |  |
|--------------|--|--|
| Firma        | Bronkhorst Deutschland Nord GmbH         | HTK Hamburg                            |
| Bezeichnung  | F-201CV-2K0-AGD-00-V                     | GSC-B9SA-BB22                          |
| Medium       | Wasserstoff                              | Wasserstoff                            |
| Regelbereich | 0,05 - 2,5 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ | 0,08 - 4 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ |
| Vordruck     | 7 bar (ü)                                | 7 - 10 bar (ü)                         |
| Preis        | 1.187,50 €                               | 1.239,00 €                             |

TABELLE 5.4: MFC für Wasserstoff

|              |  |   |
|--------------|--|---|
| Firma        | Bronkhorst Deutschland Nord GmbH       | HTK Hamburg                             |
| Bezeichnung  | F-201CV-10K-AGD-00-V                   | GSC-C9SA-BB23                           |
| Medium       | Luft                                   | Luft                                    |
| Regelbereich | 0,12 - 6 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ | 0,12 - 12 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ |
| Vordruck     | 7 bar (ü)                              | 7 - 9 bar (ü)                           |
| Preis        | 1.187,50 €                             | 1.155,00 €                              |

TABELLE 5.5: MFC für Luft

|              |  |  |
|--------------|--|--|
| Firma        | Bronkhorst Deutschland Nord GmbH       | HTK Hamburg                            |
| Bezeichnung  | F-201CV-5K0-AGD-00-V                   | GSC-B9SA-BB23                          |
| Medium       | Stickstoff                             | Stickstoff                             |
| Regelbereich | 0,12 - 6 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ | 0,08 - 4 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$ |
| Vordruck     | 7 bar (ü)                              | 7 - 9 bar (ü)                          |
| Preis        | 1.187,50,- €                           | 1.155,00 €                             |

TABELLE 5.6: MFC für Stickstoff

## 5.5 DRUCKREGLER

Zur Druckmessung sog. piezoresistive Sensoren eingesetzt. Dabei handelt es sich um Membrane, auf welchen eine Messbrücke aus piezoresistivem Material angebracht ist. Diese haben die Eigenschaft, dass sie bei Druck- oder Zugbelastung ihren elektrischen Widerstand ändern. Wirkt nun ein Druck auf die Membran, wird diese gedehnt und mit ihr die Messbrücke. Die Änderung des Widerstands ist proportional zur Druckänderung. Der Drucksensor ist an ein Regelventil gekoppelt, welches durch Öffnen bzw. Schließen den Druck regelt.

Die Firma HTK-Hamburg verkauft Druckregler nur als Kombi-Gerät mit thermischer Massendurchflussmessung. Dies ermöglicht die Regelung des Drucks und das gleichzeitige Erfassen des Durchflusses. In der geplanten Anlage werden sog. Vordruckregler verbaut, was bedeutet, dass der Druck vor dem Regler geregelt wird. (Angebote und Datenblätter s. A.37 )

|              |                                  |               |
|--------------|----------------------------------|---------------|
| Firma        | Bronkhorst Deutschland Nord GmbH | HTK Hamburg   |
| Bezeichnung  | P-702C-6K0R-AGD-00-V             | GSB-B9SA-BB26 |
| Medium       | Wasserstoff                      | Wasserstoff   |
| Regelbereich | 0,25 - 4 bar (ü)                 | 0 - 4 bar (ü) |
| Vordruck max | k.A                              | 14 bar (ü)    |
| Preis        | 1.777,45 €                       | 2.372,00 €    |

TABELLE 5.7: Vordruckregler für Wasserstoff

|              |                                  |               |
|--------------|----------------------------------|---------------|
| Firma        | Bronkhorst Deutschland Nord GmbH | HTK Hamburg   |
| Bezeichnung  | P-702C-6K0R-AGD-00-V             | GSB-C9SA-BB26 |
| Medium       | Luft                             | Luft          |
| Regelbereich | 0,8 - 4 bar (ü)                  | 0 - 4 bar (ü) |
| Vordruck max | k.A                              | 14 bar (ü)    |
| Preis        | 1.777,45 €                       | 2.288,00 €    |

TABELLE 5.8: Vordruckregler für Luft

Die Druckregler von HTK Hamburg sind sehr interessant, da sie Kombigeräte aus Durchfluss- und Druckregler sind. Da der Durchfluss an der Stelle wo die Druckregler verbaut werden ebenfalls erfasst werden soll, werden diese empfohlen.

## 5.6 DURCHFLUSSMESSER

Die Durchflussmessung kann einerseits, wie bei den MFC's beschrieben, thermisch, andererseits auch mittels Schwebekörper gemessen werden. Dabei wird die Strömung von unten in ein senkrecht verlaufendes Rohr geleitet. Der Durchmesser des Rohrs wird nach oben konisch erweitert. Darin befindet sich ein Schwebekörper mit definiertem Gewicht und definiertem Strömungswiderstand. Je nach Stärke des Durchflusses wird dieser von der Strömung nach oben gedrückt. Über den Zusammenhang des Strömungswiderstands mit der Gewichtskraft und der Auftriebskraft ( $F_s = F_G - F_A$ ), kann so auf einen Durchfluss geschlossen werden.

Die Firma Mass View bietet eine elektronische Version dieser Durchflussmesser an. Sie werden mit der Durchflussmessung der Kombigeräte von HTK-Hamburg zum Vergleich in den folgenden Tabellen dargestellt. (Angebote und Datenblätter s. A.41)

| Firma        | Mass View                               | HTK Hamburg                             |
|--------------|---|---|
| Bezeichnung  | MV-194-H2                               | GSB-B9SA-BB26                           |
| Medium       | Wasserstoff                             | Wasserstoff                             |
| Messbereich  | 0,1 - 10 $\frac{\text{ln}}{\text{min}}$ | 0,08 - 4 $\frac{\text{ln}}{\text{min}}$ |
| Vordruck max | 9 bar (ü)                               | 14 bar (ü)                              |
| Preis        | 633,00 €                                | (s. Tab. 5.7)                           |

TABELLE 5.9: Durchflussmesser Wasserstoff

| Firma        | Mass View                               | HTK Hamburg                              |
|--------------|---|--|
| Bezeichnung  | MV-104                                  | GSB-C9SA-BB26                            |
| Medium       | Luft                                    | Luft                                     |
| Messbereich  | 0,2 - 20 $\frac{\text{ln}}{\text{min}}$ | 0,12 - 12 $\frac{\text{ln}}{\text{min}}$ |
| Vordruck max | 9 bar (ü)                               | 14 bar (ü)                               |
| Preis        | 633,00 €                                | (s. Tab 5.8)                             |

TABELLE 5.10: Durchflussmesser Luft

Da mit der Auswahl der Vordruckregler (Kombi-Geräte) von HTK-Hamburg eine Durchflussmessung integriert ist und diese Variante außerdem billiger ist als der Druckregler von Bronkhorst plus Durchflussmesser von Mass View, wird die Variante der Firma HTK-Hamburg empfohlen.

## 5.7 MISCHVENTIL

Zur Herstellung des Wasserstoff-Stickstoffgemisches reicht vermutlich das Zusammenführen der beiden Gasströme über ein T-Stück aus, um ein ausreichend homogenes Gemisch zu erhalten. Für den Fall, dass festgestellt wird, dass das Gemisch nicht homogen genug ist, wurde eine Gas Mixing Chamber von Bronkhorst Deutschland Nord GmbH (354,35 €) und ein Gasmischblock von HTK-Hamburg (125,00 €) angefragt. (Angebote und Datenblätter s. A.43)

## 5.8 KOSTENANALYSE

In Kapitel 5 wurden primär die Komponenten angefragt, welche teuer und daher für die Kostenanalyse am wichtigsten sind. Mit den Preisen aus den Angeboten und den geschätzten Preisen für die noch nicht angefragten Komponenten, soll ein ungefährender Gesamtpreis für die Anlage ermittelt werden.

In Tabelle 5.11 werden die empfohlenen Komponenten, die jeweilig benötigten Stückzahlen und die daraus resultierenden Gesamtpreise dargestellt.

| Anlagenteil                | Komponente                    | St. | Firma          | Gesamtpreis                 |
|----------------------------|-------------------------------|-----|----------------|-----------------------------|
| <b>Brennstoffzelle:</b>    | Stack                         | 1   | ZBT GmbH       | 4.800,00 €                  |
| <b>Elektronische Last:</b> | Gesamtsystem mit Messung(U&I) | 1   | ET System      | 736,00 €                    |
| <b>Gaszufuhr:</b>          | MFC Wasserstoff               | 1   | HTK-Hamburg    | 1.239,00 €                  |
|                            | MFC Luft                      | 1   | HTK-Hamburg    | 1.155,00 €                  |
|                            | MFC Stickstoff                | 1   | HTK-Hamburg    | 1.155,00 €                  |
| <b>Befeuchtung:</b>        | Befeuchtergefäß               | 2   | M&C Tech Group | 399,00 €                    |
|                            | Laborwasserbad                | 1   | PCE GmbH       | 388,74 €                    |
| <b>Gasabfuhr:</b>          | Durchflussmesser Wasserstoff  | 1   | HTK-Hamburg    | im Vordruckregler enthalten |
|                            | Durchflussmesser Luft         | 1   | HTK-Hamburg    | im Vordruckregler enthalten |
|                            | Vordruckregler Wasserstoff    | 1   | HTK-Hamburg    | 2.372,00 €                  |
|                            | Vordruckregler Luft           | 1   | HTK-Hamburg    | 2.288,00 €                  |
| <b>Summe</b>               |                               |     |                | <b>14.532,74 €</b>          |

TABELLE 5.11: Angefragte Komponenten mit netto Preisen

Tabelle 5.12 enthält die Komponenten, die noch angefragt werden müssen. Es wurde recherchiert, mit welchen Preisen man bei den jeweiligen Komponenten zu rechnen hat.

| <b>Anlagenteil</b>     | <b>Komponente</b>                      | <b>St.</b> | <b>Gesamtpreis ca.</b> |
|------------------------|--|------------|------------------------|
| <b>Brennstoffzelle</b> | Zellspannungsmessung                   | 5          | 200,00 €               |
| <b>Gaszufuhr:</b>      | Wasserstoffflasche                     | 1          | Miete                  |
|                        | Stickstoffflasche                      | 1          | Miete                  |
|                        | Flaschen-druckminderer                 | 2          | 120,00 €               |
| <b>Befeuchtung:</b>    | Dreiwegeventil (Bypass)                | 2          | 200,00€                |
|                        | Beheizte Gaszuführung                  | 2          | 800,00 €               |
| <b>Gasabfuhr:</b>      | Wasserabscheider                       | 2          | 1.000,00 €             |
|                        | Wasserbehälter                         | 2          | 50,00 €                |
|                        | Waage                                  | 2          | 150,00 €               |
| <b>Kühlung:</b>        | Luftverdichter (Ventilator)            | 1          | 50,00 €                |
|                        | Luftführung (Gehäuse)                  | 1          | 200,00 €               |
|                        | Massenstrommessung (Anemometer)        | 1          | 150,00 €               |
| <b>Sonstiges:</b>      | Verrohrung/Fittinge                    |            | 500,00 €               |
|                        | Temperaturfühler Anlage + Einzelzellen | 14         | 420,00 €               |
| <b>Summe</b>           |  |            | <b>3.840,00 €</b>      |

TABELLE 5.12: Komponenten die noch angefragt werden müssen

Die Summe für die Kosten aus Tab. 5.11 und 5.12 liegen somit bei ca.18.372,74 € Netto. Da die Signalverarbeitung und Signalführung, sowie die Anbindung an den Steuer-PC nicht Bestandteil dieser Arbeit sind und ein Puffer für Änderungen und unvorhergesehene Kosten zur Verfügung stehen soll, werden 30 % auf den ermittelten Gesamtpreis aufgeschlagen. Somit muss für die hier geplante Anlage mit Gesamtkosten von ca. **24.000,00 €** Netto gerechnet werden.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die seit Jahrzehnten öffentlich geführte Diskussion der CO<sub>2</sub>-neutralen Energiegewinnung, beschränkt sich zur Zeit weitestgehend auf Gewinnung von elektrischem Strom durch Wind-, Solar- und Wasserkraft. Selten wird die Möglichkeit einer Wasserstoffwirtschaft, basierend auf oben genannten Technologien angesprochen. Da dieser Weg ein großes Potential birgt und die Brennstoffzelle eine essentielle Rolle dabei spielt, ist es wichtig das zukünftige Fachpersonal entsprechend darauf zu schulen. Die HAW Hamburg bietet das Modul "Electro-chemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems" im Masterstudiengang an. Der in dieser Arbeit entworfene Brennstoffzellen-Versuchsstand soll das Modul um einen Praxisteil erweitern.

In Anlehnung an dieses Modul wurden die Charakteristika der Brennstoffzelle speziell im Hinblick auf Temperatureinflüsse, Gasbereitstellung und den Zusammenhang von Stromstärke und Spannung herausgearbeitet. Anschließend wurden Laborversuche vorgeschlagen, welche diese Zusammenhänge darstellen und eine Auswahl getroffen.

Daraus wurden Anforderungen abgeleitet und die Parameter der Brennstoffzelle, Mess- und Regelungstechnik und der Gasversorgung festgelegt.

Die darauf folgende Ausarbeitung eines Anlagenkonzepts und technische Realisierung der einzelnen Anlagenteile, stellt den Hauptteil der Arbeit dar welcher mit einem Fließbild der Anlage und einer dazugehörigen Stückliste der nötigen Komponenten abgeschlossen wird. Im hinteren Teil der Arbeit wurden, neben der Brennstoffzelle, die Komponenten bei entsprechenden Herstellern angefragt, die als essentiell und preislich ausschlaggebend erachtet wurden oder in enger Absprache mit Herstellern speziell konfiguriert werden mussten (Waschflaschenbeheizung, Druckregelung). So konnte über eine grobe Kostenanalyse ein Gesamtpreis von 24.000,00 € Netto für die Anlage ermittelt werden.

Anknüpfend an diese Arbeit, sollten folgende Schritte zur praktischen Realisierung erfolgen:

- Auslegung und Anfrage, der Komponenten aus Tabelle 5.12.
- Entwurf und Realisierung der Signalverarbeitung, Signalführung und des Steuerungsprogramms (LabView).
- Kauf, Montage und Inbetriebnahme der Anlage.



## LITERATUR

1. BRANDT, HENDIK: „Entwurf, Aufbau und Optimierung eines PEM-Brennstoffzellensystems zur Hausenergieversorgung mit Dampfreformer“. Diss. Universität Duisburg-Essen, 2006 (siehe S. 27).
2. HAUBROCK, JENS: „Parametrierung elektrischer Äquivalentschaltbilder von PEM Brennstoffzellen“. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2007 (siehe S. 19, 20).
3. KARAMANOLIS, STRATIS: *Brennstoffzellen - Schlüsselemente der Wasserstofftechnologie*. Vogel Buchverlag, 2003 (siehe S. 11, 14, 16, 32, 41).
4. KURZWEIL, PETER: *Brennstoffzellentechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012 (siehe S. 8, 11, 12, 14, 21, 32).
5. MERGEL, JÜRGEN und BERND EMONTS: „Wasserelektrolyse und regenerative Gase als Schlüsselfaktoren für die Energiesystemtransformation“. *Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven* (2012), Bd.: 189 ff (siehe S. 24, 25).
6. MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT: *Funktionsweise einer Brennstoffzelle*. URL: <http://www4.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/44289/> (siehe S. 10).
7. NOWAK, WOLFGANG, JOCHEN ARTHKAMP, WULF BINDE und THOMAS BECK: *Das KWK-Gesetz 2012 Grundlagen, Förderung, praktische Hinweise*. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), 2012 (siehe S. 8).
8. SIEMER, MARC: „Lokale Entropieproduktionsraten in der Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle“. Diss. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 2007 (siehe S. 21).
9. VEESER, THOMAS: „Skript Anlagenautomatisierung“. 22.02.2013 (siehe S. 30).
10. VOIGT, CORNELIA, DOMINIK SOLLMANN, HEIDI LÖBERT und DAGMAR MARTIN: *Brennstoffzelle - Funktionsweise und Anwendungen*. 2011. URL: [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/16/pc/elektrochemie/brennstoffzellen/h\\_tec/brennstoffzellen\\_funktion\\_anwendung/brennstoffzellen\\_funktion\\_anwendung.vlu.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/16/pc/elektrochemie/brennstoffzellen/h_tec/brennstoffzellen_funktion_anwendung/brennstoffzellen_funktion_anwendung.vlu.html) (siehe S. 9, 11).
11. WOLFGANG, BECHMANN und SCHMIDT JOACHIM: *Einstieg in die physikalische Chemie für Nebenfächler*. Springer, 2006 (siehe S. 24).



# A ANHANG

## A.1 NUTZWERTANALYSE WASSERSTOFFVERSORGUNG

| Speicherung             |            | Druckflasche |     | Elektrolyseur |     | Reformer  |     | Metallhydridspeicher |     |
|-------------------------|------------|--------------|-----|---------------|-----|-----------|-----|----------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung    |     | Bewertung     |     | Bewertung |     | Bewertung            |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 5            | 1,5 | 3             | 0,9 | 2         | 0,6 | 4                    | 1,2 |
| Unterhaltungskosten     | 0,2        | 5            | 1   | 3             | 0,6 | 1         | 0,2 | 5                    | 1   |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 3            | 0,3 | 5             | 0,5 | 4         | 0,4 | 4                    | 0,4 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4            | 0,8 | 3             | 0,6 | 3         | 0,6 | 5                    | 1   |
| Komplexität             | 0,2        | 4            | 0,8 | 2             | 0,4 | 1         | 0,2 | 4                    | 0,8 |
| $\Sigma$                | 1          |              | 4,4 |               | 3   |           | 2   |                      | 4,4 |

| Druck aufbauen/regeln   |            | Verdichter |     | Druckminderer |     | Wassersäule/Gewicht |     |
|-------------------------|------------|------------|-----|---------------|-----|---------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung  |     | Bewertung     |     | Bewertung           |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 3          | 0,9 | 4             | 1,2 | 5                   | 1,5 |
| Unterhaltungskosten     | 0,2        | 4          | 0,8 | 5             | 1   | 4                   | 0,8 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 4          | 0,4 | 2             | 0,2 | 1                   | 0,1 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4          | 0,8 | 4             | 0,8 | 1                   | 0,2 |
| Komplexität             | 0,2        | 3          | 0,6 | 5             | 1   | 1                   | 0,2 |
| $\Sigma$                | 1          |            | 3,5 |               | 4,2 |                     | 2,8 |

## A.2 NUTZWERTANALYSE WASSERSTOFFVERSORGUNG

| Massenstrom regeln      |            | Verdichterdrehzahl |     | MFC       |     | Stromregelventil |     |
|-------------------------|------------|--------------------|-----|-----------|-----|------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung          |     | Bewertung |     | Bewertung        |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 3                  | 0,9 | 3         | 0,9 | 3                | 0,9 |
| Unterhaltungskosten     | 0,1        | 3                  | 0,3 | 4         | 0,4 | 3                | 0,3 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 4                  | 0,4 | 4         | 0,4 | 3                | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 3                  | 0,6 | 4         | 0,8 | 4                | 0,8 |
| Komplexität             | 0,1        | 2                  | 0,2 | 3         | 0,3 | 3                | 0,3 |
| Genauigkeit             | 0,2        | 3                  | 0,6 | 4         | 0,8 | 3                | 0,6 |
| $\Sigma$                | 1          |                    | 3   |           | 3,6 |                  | 3,2 |

| Befeuchtung             |            | Verdampfer |     | Bubblers(Eigenbau) |     | Membranbefeuchter |     |
|-------------------------|------------|------------|-----|--------------------|-----|-------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung  |     | Bewertung          |     | Bewertung         |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 2          | 0,6 | 4                  | 1,2 | 3                 | 0,9 |
| Unterhaltungskosten     | 0,1        | 3          | 0,3 | 3                  | 0,3 | 4                 | 0,4 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 3          | 0,3 | 4                  | 0,4 | 4                 | 0,4 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4          | 0,8 | 3                  | 0,6 | 3                 | 0,6 |
| Komplexität             | 0,1        | 2          | 0,2 | 3                  | 0,3 | 4                 | 0,4 |
| Genauigkeit             | 0,2        | 4          | 0,8 | 3                  | 0,6 | 3                 | 0,6 |
| $\Sigma$                | 1          |            | 3   |                    | 3,4 |                   | 3,3 |

### A.3 NUTZWERTANALYSE WASSERSTOFFVERSORGUNG

| Überschuss erfassen     |            | Durchflussmessung |     | Auffangen/Füllstand |     |
|-------------------------|------------|-------------------|-----|---------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung         |     | Bewertung           |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 2                 | 0,6 | 3                   | 0,9 |
| Unterhaltungskosten     | 0,1        | 5                 | 0,5 | 5                   | 0,5 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 3                 | 0,3 | 3                   | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4                 | 0,8 | 3                   | 0,6 |
| Komplexität             | 0,1        | 4                 | 0,4 | 2                   | 0,2 |
| Genauigkeit             | 0,2        | 4                 | 0,8 | 2                   | 0,4 |
| $\Sigma$                | 1          |                   | 3,4 |                     | 2,9 |

| Gegendruck halten       |            | MFC       |     | Druckregler |     | Rückführen |     |
|-------------------------|------------|-----------|-----|-------------|-----|------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung |     | Bewertung   |     | Bewertung  |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 3         | 0,9 | 3           | 0,9 | 4          | 1,2 |
| Unterhaltungskosten     | 0,2        | 4         | 0,8 | 5           | 1   | 5          | 1   |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 4         | 0,4 | 4           | 0,4 | 3          | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4         | 0,8 | 4           | 0,8 | 5          | 1   |
| Komplexität             | 0,2        | 2         | 0,4 | 4           | 0,8 | 1          | 0,2 |
| $\Sigma$                | 1          |           | 3,3 |             | 3,9 |            | 3,7 |

## A.4 NUTZWERTANALYSE LUFTVERSORGUNG

| Speicherung             |            | Umgebung  |     | Druckflasche |     | Druckluftleitung |     |
|-------------------------|------------|-----------|-----|--------------|-----|------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung |     | Bewertung    |     | Bewertung        |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 5         | 1,5 | 4            | 1,2 | 5                | 1,5 |
| Unterhaltungskosten     | 0,2        | 4         | 0,8 | 4            | 0,8 | 4                | 0,8 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 3         | 0,3 | 3            | 0,3 | 3                | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 5         | 1   | 3            | 0,6 | 3                | 0,6 |
| Komplexität             | 0,2        | 1         | 0,2 | 4            | 0,8 | 4                | 0,8 |
| $\Sigma$                | 1          |           | 3,8 |              | 3,7 |                  | 4   |

| Druckaufbauten/regeln   |            | Verdichter |     | Druckminderer |     |
|-------------------------|------------|------------|-----|---------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung  |     | Bewertung     |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 3          | 0,9 | 4             | 1,2 |
| Unterhaltungskosten     | 0,2        | 4          | 0,8 | 5             | 1   |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 3          | 0,3 | 3             | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 3          | 0,6 | 4             | 0,8 |
| Komplexität             | 0,2        | 3          | 0,6 | 5             | 1   |
| $\Sigma$                | 1          |            | 3,2 |               | 4,3 |

## A.5 NUTZWERTANALYSE LUFTVERSORGUNG

| Massenstrom regeln      |            | Verdichterdrehzahl |     | MFC       |     | Stromregelventil |     |
|-------------------------|------------|--------------------|-----|-----------|-----|------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung          |     | Bewertung |     | Bewertung        |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 3                  | 0,9 | 3         | 0,9 | 3                | 0,9 |
| Unterhaltungskosten     | 0,1        | 3                  | 0,3 | 4         | 0,4 | 3                | 0,3 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 4                  | 0,4 | 4         | 0,4 | 3                | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 3                  | 0,6 | 4         | 0,8 | 4                | 0,8 |
| Komplexität             | 0,1        | 2                  | 0,2 | 3         | 0,3 | 3                | 0,3 |
| Genauigkeit             | 0,2        | 3                  | 0,6 | 4         | 0,8 | 3                | 0,6 |
| $\Sigma$                | 1          |                    | 3   |           | 3,6 |                  | 3,2 |

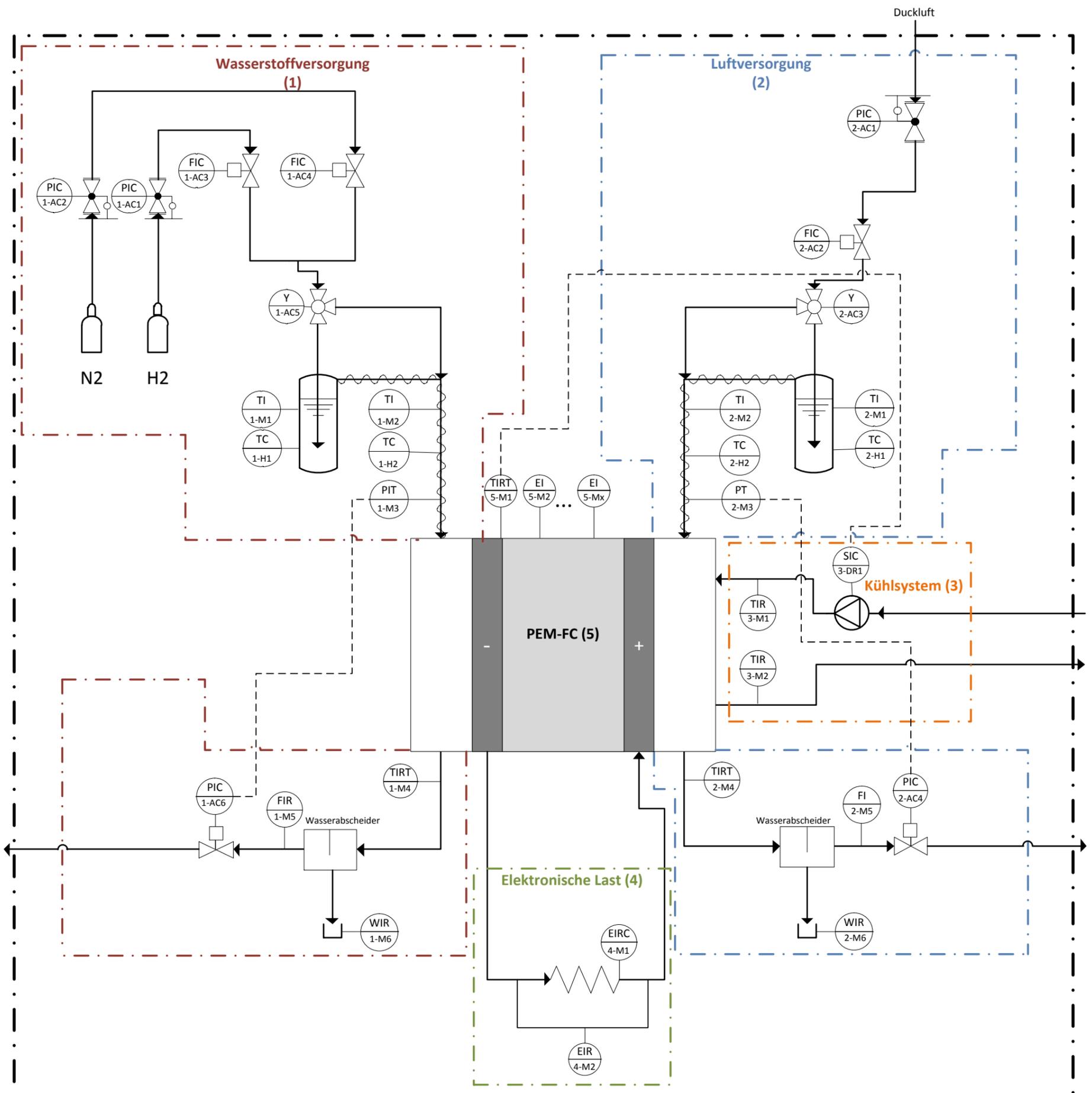
| Befeuchtung             |            | Verdampfer |     | Bubbler(Eigenbau) |     | Membranbefeuchter |     |
|-------------------------|------------|------------|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung  |     | Bewertung         |     | Bewertung         |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 2          | 0,6 | 4                 | 1,2 | 3                 | 0,9 |
| Unterhaltungskosten     | 0,1        | 3          | 0,3 | 3                 | 0,3 | 4                 | 0,4 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 3          | 0,3 | 4                 | 0,4 | 4                 | 0,4 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4          | 0,8 | 3                 | 0,6 | 3                 | 0,6 |
| Komplexität             | 0,1        | 2          | 0,2 | 3                 | 0,3 | 4                 | 0,4 |
| Genauigkeit             | 0,2        | 4          | 0,8 | 3                 | 0,6 | 3                 | 0,6 |
| $\Sigma$                | 1          |            | 3   |                   | 3,4 |                   | 3,3 |

## A.6 NUTZWERTANALYSE LUFTVERSORGUNG

| Überschuss erfassen     |            | Durchflussmessung |     | Auffangen/Füllstand |     |
|-------------------------|------------|-------------------|-----|---------------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung         |     | Bewertung           |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 2                 | 0,6 | 3                   | 0,9 |
| Unterhaltungskosten     | 0,1        | 5                 | 0,5 | 5                   | 0,5 |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 3                 | 0,3 | 3                   | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4                 | 0,8 | 3                   | 0,6 |
| Komplexität             | 0,1        | 4                 | 0,4 | 2                   | 0,2 |
| Genauigkeit             | 0,2        | 4                 | 0,8 | 2                   | 0,4 |
| $\Sigma$                | 1          |                   | 3,4 |                     | 2,9 |

| Gegendruck halten       |            | MFC       |     | Druckregler |     | Rückführung |     |
|-------------------------|------------|-----------|-----|-------------|-----|-------------|-----|
| Kriterien               | Gewichtung | Bewertung |     | Bewertung   |     | Bewertung   |     |
| Anschaffungskosten      | 0,3        | 3         | 0,9 | 3           | 0,9 | 4           | 1,2 |
| Unterhaltungskosten     | 0,2        | 4         | 0,8 | 5           | 1   | 5           | 1   |
| Pädagogische Wertigkeit | 0,1        | 4         | 0,4 | 4           | 0,4 | 3           | 0,3 |
| Sicherheit              | 0,2        | 4         | 0,8 | 4           | 0,8 | 5           | 1   |
| Komplexität             | 0,2        | 2         | 0,4 | 4           | 0,8 | 1           | 0,2 |
| $\Sigma$                | 1          |           | 3,3 |             | 3,9 |             | 3,7 |

## A.7 FLIESSSCHEMA



Bezeichnungen nach EN 62424

Nomenklatur der Gerätebezeichnung

Bsp.: 1-AC1

Die erste Ziffer beschreibt den Anlagenteil (1)

Danach folgt das Kürzel, welches den Gerätetypen festlegt ( AC für Actuator)

Fortlaufende Nummer ( 1)

Anlagenteile:

1 = Wasserstoffversorgung

2 = Luftversorgung

3 = Kühlsystem

4 = Elektronische Last

5 = Brennstoffzelle

Kürzel für Gerätetypen:

AC = Actuator (Stellglied)

DR = Drive (Antrieb)

H = Heater (Heizung)

M = Measurement (Messung)

## A.8 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



ZBT GmbH || Carl-Benz-Straße 201 || D-47057 Duisburg

HAW Hamburg  
Labor für Elektrochemie/Brennstoffzellen  
Berliner Tor 21  
20099 Hamburg

Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte an:

Projektleiter: Dr. Peter Beckhaus  
Tel.: 0203-7598-3020  
E-Mail: p.beckhaus@zbt-duisburg.de

Unser Ansprechpartner in Ihrem Haus:

Name: Peter Kuhn  
Tel.: 01739933274  
Fax:  
E-Mail: peter.kuhn@haw-hamburg.de

Ihre Anfrage vom: August 15

Angebotsdatum: 17.08.2015

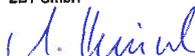
### ANGEBOT 731529/Rev00

Thema: Lieferung Brennstoffzellenstapel

| Pos.                     | Artikelbezeichnung / Leistungsbeschreibung  | Anz. | Einzelpreis in € | Gesamtpreis in € |
|--------------------------|---|------|------------------|------------------|
| 1                        | Lieferung eines Brennstoffzellenstapels<br>- Luftkühlung<br>- 5 Zeller, á 50 cm <sup>2</sup><br>- Leistung bei Normalbetriebsbedingungen ca. 100 W<br>- eingefahren und getestet<br>- nur für Laborbetrieb, Wasserstoff / Luft  | 1    | 2.700,00         | 2.700,00         |
| 2                        | Upgrade des Brennstoffzellenstapels aus Pos. 1<br>- Druckbetrieb bis 3 bar <sub>g</sub><br>Pos. 2 steht unter dem Vorbehalt der vorherigen<br>Durchführung von spezifischen Untersuchungen am ZBT, im<br>Falle des Scheiterns dieser Untersuchungen werden wir<br>diesen Teil des Auftrags nicht annehmen können oder in<br>Absprache mit dem Auftraggeber verändern müssen | 1    | 2.100,00         | 2.100,00         |
| <b>Gesamtsumme netto</b> |   |      |                  | <b>4.800,00</b>  |

Liefertermin: Nach Absprache, 8 Wochen nach Auftragsingang und Klärung der Spezifikationen  
Angebotsbindung: 31.12.2015  
Rechnungsstellung: Nach Leistungserbringung der Einzelpositionen  
Versandkosten: Auslieferung und Installation inklusive  
Zahlungsziel: 14 Tage nach Erhalt der Rechnung ohne Abzug  
Die Preise verstehen sich netto zzgl. der gesetzlichen Mehrwertsteuer von z.Zt. 19%.  
Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen der ZBT GmbH (www.zbt-duisburg.de).

ZBT GmbH

  
Prof. Dr. rer. nat. Angelika Heinkel  
Geschäftsführung

  
Dr.-Ing. Peter Beckhaus  
Abteilungsleiter

Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH || Carl-Benz-Straße 201 || D-47057 Duisburg  
1+49 (203) 7598 0 || +49 (203) 7598 2222 || info@zbt-duisburg.de || www.zbt-duisburg.de  
Sparkasse Duisburg || BLZ 350 500 00 || Konto-Nr. 20 900 91 25 || IBAN DE88 3505 0000 0209 0091 25 || SWIFT-BIC DUIS DE 33XXX  
Geschäftsführung: Prof. Dr. Angelika Heinkel || Amtsgericht Duisburg HRB 9186 || USt-Id-Nr. DE217681999 || Zoll-Nr. 5313554

## A.9 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



MEMO:

25. August 2015

### Typical Stack Data ZBT FC Stacks

Dr.-Ing. Peter Beckhaus  
p.beckhaus@zbt-duisburg.de

- confidential -

### PEM-FC-Stack 5 cells air cooled

#### 1.1 Technical data

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Type:                       | Polymer Electrolyte Membrane fuel cell (PEM-FC)                                       |
| Electrolyte:                | Acid cation exchange membrane (perfluorinated)  |
| MEA-type                    | 5 layer, pure hydrogen  |
| Type of bipolar plate       | Plastic compound, injection moulded   |
| Rate of degradation         | Unspecified, but 1000h of operation typical without irreversible degradation          |
| Number of start/stop cycles | Unspecified, but uncritical   |
| Number of cells             | 5   |
| Active cell area            | 50 cm <sup>2</sup> active nominal   |
| Geometrical dimensions      |   |
| Length                      | 80 mm (Endplate to endplate) / 14 mm incl. ports                                      |
| Width                       | 84 mm   |
| Height                      | 168 mm  |
| weight                      | 1.800 kg  |
| Mounting                    | Mounting is possible using integrated bore holes in the end plates, damping necessary |
| positioning                 | Horizontal installation, or Perpendicular installation with ports down                |
| Single cell supervision     | Plugging holes for contactors are integrated in the bipolar plates                    |
| Cooling media               | Air   |
| Surface temperature max.    | 55°C / 80 °C depending on membrane and operation mode                                 |

#### 1.2 Electrical data (Standard MEA)

|                                    |                                |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Nominal current                    | 30 A                           |
| Open Circuit Voltage               | 4,75 V                         |
| Nominal Voltage                    | 3 V                            |
| Minimum Voltage                    | 2 V                            |
| Nominal Power                      | 100 W                          |
| Single cell voltage monitoring     | Necessary, contactors included |
| max. current at standard operation | 40 A                           |
| max. current at start operation    | 10 A                           |

## A.10 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

### Typical Stack Data ZBT FC Stacks



#### 1.3 Media supply cathode

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Medium                             | Air, free of particles and harmful gases   |
| Media connection                   | POM-contactors 10 mm   |
| Position of media connection:      | Supply contactor on the cathode end plate (near top), outlet on the anode side end plate (near bottom) / Flexible on customer's demand |
| Media supply                       | recommended: oilfree membrane pump and passive heat/humidity exchanger   |
| Lambda during operation            | recommended: 2   |
| minimum gas supply during low load | 1,5 l/min  |
| Amount of gas during full load     | approx. 5 l/min @ 30 A   |
| Pressure drop                      | < 100 mbar on full load  |

#### 1.4 Media supply anode

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Medium                     | Hydrogen purity: 99,99%   |
| Media connection           | POM-contactors 10 mm  |
| Position media connection: | Supply contactor on the cathode end plate (near top), outlet on the cathode end plate (near bottom) / Flexible on customer's demand |
| Gas use                    | recommended: hydrogen recirculation by certified pump, condenser and purge valve  |
| Gas flow at nominal load   | approx. 1,1 l/min @ 30 A and recirculation  |
| Pressure drop              | max. 50 mbar  |
| Inlet temperature max.     | dry hydrogen ambient temperature.   |

#### 1.5 Media supply cooling

|                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| Medium                     | Air                    |
| Media connection           | Open stream            |
| Position media connection: | Blower mounted on side |
| Medium over pressure       | -                      |

## A.11 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

Typical Stack Data ZBT FC Stacks



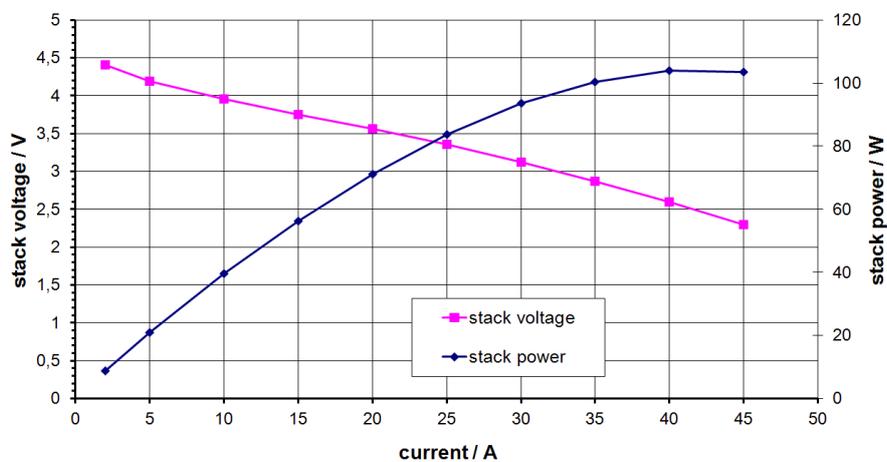
### 1.6 Operation conditions

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Power bandwidth                     | 10 W – 100 W   |
| Operating stack temperature         | <70 °C (measured in cooling channels) @ above described operating conditions   |
| Ambient temperature                 | 4°C - 35°C   |
| Storing temperature                 | 4°C - 60°C (with isolated media connections)   |
| Operating pressure                  | Atmospherically / near atm.  |
| Necessary steps for first operation | After storage of the stack re-humidification of the membrane by supply of humid air for > 1h, supply of H <sub>2</sub> and verification of all single cell voltages (0,9 V at no load) |
| Necessary steps for start           | Media supply (anode / cathode), verification of open circuit voltage of all cells, max. load for 1min: 10A   |
| Necessary steps for stop            | Electrical disconnection of the stack, Stop of media supply.   |

### 1.7 Further information

#### ZBT 5 cells fuel cell stack, air cooled

48cm<sup>2</sup> active area, 70°C stack temperature, humidified anode and cathode



pic 1: Current / voltage and current / power characteristics

## A.12 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

### Typical Stack Data ZBT FC Stacks



After reaching of length of life ZBT offers the free and professional disposal of the stack.

The information in this document is property of ZBT GmbH, Duisburg. Please keep the information confidential.

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik  
ZBT GmbH  
Carl-Benz-Straße 201  
D-47057 Duisburg  
Germany

Telefon: +49-203-7598 0  
Telefax: +49-203-7598 2222  
[www.zbt-duisburg.de](http://www.zbt-duisburg.de)  
[info@zbt-duisburg.de](mailto:info@zbt-duisburg.de)

## A.13 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

QUINTECH

THE EUROPEAN FUEL CELL SUPPLIER

Produkte
News
Kontakt
Impressum
Feedback
Home



**Forschung & Entwicklung**

- Test Equipment
- Brennstoffzellen**
- Labor-Einzelzellen
- S. Test Cell-Quality Assurance
- Phosphorsaure Brennstoffzelle
- Labor-Brennstoffzellen-Stacks
- Brennstoffzellen-Stacks
- MFC-Testing-Kit
- Hardware für Redox-Flow
- Einzelzelle für DMFC & EMFC
- Einzelzelle für MFC
- Elektrolysezellen
- Reformer
- Komponenten
- Zubehör
- Stanzen & Pressen
- Lehre & Demo**
- Anwendungen**
- Angebote**
- Technische Informationen**

### ► Laborstack & kundenspezifischer Brennstoffzellenstack

**Beschreibung:**  
Wir bieten kundenspezifische Stacks an. Der EFC50-CST Stack wurde entwickelt, um dem Kunden die Freiheit zu geben, die Betriebscharakteristik zu wählen. Der Benutzer spezifiziert die Anzahl der Zellen mit einem Minimum von 7 EMEs und 8 Graphitplatten und einem Maximum von 30 EMEs und 31 Graphitplatten. Der Stack wird aus den gleichen Zellen mit 50 cm<sup>2</sup> aktive Fläche wie der 50 W Stack hergestellt. Die Leistung des Stacks hängt von der Anzahl der Zellen und den Betriebsbedingungen (Temperatur, Befeuchtung, Druck, etc.) ab. ElectroChem Stacks wurden für einfache Bedienung und hohe Zuverlässigkeit entwickelt. Dieser Stack bietet Ihnen jahrelangen problemlosen Betrieb. Der EFC50-ST kann ohne externe Befeuchtung und mit einem Druck bis zu 3 bar mit H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> betrieben werden. Der EFC50-ST liefert 50 W Leistung unter normalen Betriebsbedingungen und kann bis zu 100 W Spitzenlast liefern. Gasrückführung ist bei normalen Betrieb nicht erforderlich. Der EFC50-ST kann mit einer Umwandlungsrate bei Verwendung von reinem H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> von 98% betrieben werden. Der empfohlene Betriebsdruck liegt bei 50 psig. Jede Zellplatte enthält je eine Buchse für Temperatur- und Spannungsmessung.

**Spezifikationen:**

|  |                               |                              |
|--|-------------------------------|------------------------------|
| <b>Durchschnittliche Zellspannung:</b> | 0,65 +/- 0,05 V               |                              |
| <b>Stromdichte:</b>                    | 350 +/- 50 mA/cm <sup>2</sup> |                              |
| <b>Leistung:</b>                       | 180 - 280 mW/cm <sup>2</sup>  |                              |
| <b>Befeuchtung:</b>                    | abhängig von Leistungsdichte  |                              |
| <b>Nominale Leistung:</b>              | 50 W                          | 100 W                        |
| <b>Größe:</b>                          | 13,5x13,5x13,5 cm             | 13,5x13,5x19,0 cm            |
| <b>Gewicht:</b>                        | 4,0 kg (8,8 lbs.)             | 4,5 kg (10 lbs.)             |
| <b>Stückzahl EME:</b>                  | 50 cm <sup>2</sup> , 7 EMEs   | 50 cm <sup>2</sup> , 14 EMEs |
| <b>Typ:</b>                            | Polymer-Elektrolyt            | Polymer-Elektrolyt           |
|  |                               | 200 W                        |
|  |                               | 13,5x13,5x35,0 cm            |
|  |                               | 6,4 kg (14 lbs.)             |
|  |                               | 50 cm <sup>2</sup> , 28 EMEs |
|  |                               | Polymer-Elektrolyt           |

### Stack mit konditionierten EMEs

(Lieferung erfolgt getestet und mit Polarisationskurve)

| Typ               | Beschreibung  | Preis €     |
|-------------------|---|-------------|
| EFC-50-02-7-ST    | 50 cm <sup>2</sup> PEM BZ Hardware; 7 EMEs; 8 Graphitplatten; Serpentinflussfeld; Anschlüsse; vergoldete Stromkollektorplatten; Bananensteckeranschlüsse an jeder Platte; 2 Bananenstecker  | 6.784,-     |
| EFC-50-02-7-ST-DM | 50 cm <sup>2</sup> PEM BZ Hardware; 7 (konditioniert für Direktmethanol) EMEs; 8 Graphitplatten; Serpentinflussfeld; Anschlüsse; vergoldete Stromkollektorplatten; Bananensteckeranschlüsse an jeder Platte; 2 Bananenstecker   | 7.462,-     |
| EFC-50-03-7-ST    | 50 cm <sup>2</sup> PEM BZ Hardware; 7 EMEs; 8 Graphitplatten; Parallelflussfeld; Anschlüsse; vergoldete Stromkollektorplatten; Bananensteckeranschlüsse an jeder Platte; 2 Bananenstecker   | 7.462,-     |
| EFC-50-aq         | je weitere Bipolarplatte und EME  | auf Anfrage |
| EFC-100-300W      | 100 cm <sup>2</sup> luft- / wassergekühlt; Stack wurde entwickelt zur Produktion von 200 Watt; speziell in rechteckigem Format entwickelt, um die Luftkühlung zu erleichtern; Parallelflussfeld; eine Seite der Platte horizontal; die andere Seite der Platte vertikal; aktive Fläche: 14,35 x 6,98 cm | auf Anfrage |
| EFC-100-500W      | 100 cm <sup>2</sup> luft- / wassergekühlt; Stack wurde entwickelt zur Produktion von 500 Watt; speziell in einem rechteckigen Format konzipiert für bessere Luftkühlung; aktive Fläche: 14,35 x 6,98 cm   | auf Anfrage |

### Brennstoffzellenstack ohne EME

| Typ           | Beschreibung  | Preis € |
|---------------|---|---------|
| FC-50-02-7-ST | 50 cm <sup>2</sup> PEM BZ Hardware für 7 Zellen; 8 Graphitplatten; Serpentinflussfeld; Anschlüsse; vergoldete Stromkollektorplatten; Bananensteckeranschlüsse an jeder Platte; 2 Bananenstecker | 4.888,- |
| FC-50-03-7-ST | 50 cm <sup>2</sup> PEM BZ Hardware für 7 Zellen; 8 Graphitplatten; Parallelflussfeld; Anschlüsse; vergoldete Stromkollektorplatten; Bananensteckeranschlüsse an jeder Platte; 2 Bananenstecker  | 4.888,- |

**SUCHE**

**Neue Produkte**

Unsere neuen Produkte:  
Gasdiffusionslagen H1410 und W01002P ...  
[mehr »](#)

**World of Energy Solutions**

Wir sind auf der World of Energy Solutions, 6.-8. Oktober 2014 ...  
[mehr »](#)

**QuinTech**  
Brennstoffzellen Technologie  
Danziger Straße 8  
73035 Göppingen

Telefon 0 71 61 / 94 63 18  
Telefax 0 71 61 / 94 63 19  
E-Mail: [quintech@quintech.de](mailto:quintech@quintech.de)

BRENNSTOFFZELLEN TECHNOLOGIE

[Seite drucken](#)

## A.14 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



Dreibein GmbH Barnerstr. 3a 22765 Hamburg

HAW Hamburg  
Peter Kuhn

Berliner Tor  
20099 Hamburg

### Angebot

|              |            |
|--------------|------------|
| Datum        | 17.04.2015 |
| Angebots-Nr. | AN335-0174 |
| Kunden-Nr.   | 10335      |

|            |                |
|------------|----------------|
| Bearbeiter | RS             |
| Tel.:      | 040 333 103 90 |

| Pos. | Art.-Nr. | Beschreibung  | Menge | Einheit | Preis    | Summe    |
|------|----------|---|-------|---------|----------|----------|
| 1    | HC 611   | Fuel Cell Integration-System<br>50 W Brennstoffzellen-System inkl.<br>- 50 W Brennstoffzellen-Stack<br>- Lüfter<br>- Magnetventile<br>- Temperatursensor<br>- Steuerplatine<br>- Monitoringsoftware | 1     | Stück   | 2.310,00 | 2.310,00 |
| 2    | HC 623   | Hybrid Extension<br>- Gleichspannungswandler mit<br>integriertem Laderegler<br>- 12 V Blei-Batterie<br>- Kabel und Anschlüsse   | 1     | Stück   | 258,00   | 258,00   |
| 3    | DR       | Stack 50W Kpl. mit Lüfter<br>BxHxT: 135x150x90, 1150g<br>H60-0080   | 1     | Stück   | 1.750,00 | 1.750,00 |

Der Gesamtbetrag setzt sich wie folgt zusammen:  
€ 820,42 MwSt zu 19,0% auf € 4.318,00 netto.

**NETTOBETRAG € 4.318,00**

MwSt GESAMT € 820,42

**Zahlungsbedingungen Netto 30 Tg**

**Summe € 5.138,42**

**Angebotsfrist: 12 Wochen**

**Lieferung erfolgt ca. 3 Wochen nach Auftragsingang**

Dreibein GmbH \* Barnerstr. 3a \* 22765 Hamburg \* Tel 040 333 103 90 \* Fax 040 333 103 91 \* info@dreibeinlehrsysteme.de  
Bankverbindung Deutsche Bank BLZ 20070024 Konto 3535960 BIC DEUT DE DBHAM IBAN DE72 200 700 240 3535960 00  
Amtsgericht Hamburg HRB 118588 \* USt.-IdNr DE277454456 \* St.-Nr. 41/716/03000 FA HH-Altona

## A.15 BRENNSTOFFZELLEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



### Technische Daten

Instructor Integration System

| FC50 Brennstoffzellenstack |   |
|----------------------------|---|
| <b>Allgemein</b>           |   |
| Typ                        | PEM Brennstoffzellen - Stack, 10 Zellen |
| Kühlung                    | Luft                                    |
| Brennstoff                 | Wasserstoff                             |
| Design                     | offene Kathode                          |
| <b>Elektrisch</b>          |   |
| Nennspannung               | 5,0 V <sub>DC</sub>                     |
| Ausgangsstrom              | 8,0 A                                   |
| Nennleistung               | 40 W                                    |
| Max. Strom                 | 10 A                                    |
| Max. Leistung              | 50 W                                    |
| Leerspannung               | 9,0 V <sub>DC</sub>                     |
| <b>Thermisch</b>           |   |
| Betriebstemperatur         | 15 - 50 C                               |
| Max. Starttemperatur       | 45 C                                    |

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Brennstoff</b>                   |   |
| Empfohlene H <sub>2</sub> -Reinheit | 5.0 (99,999%)   |
| H <sub>2</sub> -Eingangsdruck       | 0,4 - 0,8 bar (5,8 - 11,6 psig)   |
| Wasserstoffverbrauch                | Max. 700 Nml/min (bei 0 C, 1013 bar)  |
| <b>Abmessung</b>                    |   |
| Anzahl Zellen                       | 10  |
| Breite x Tiefe x Höhe               | 120 x 103 x 135 mm  |
| Gewicht                             | 1,15 kg   |
| <b>Kontrolleinheit</b>              |   |
| Datenwiedergabe via Software        | Wasserstoffverbrauch, Lüfterleistung, Brennstoffzellentemperatur, Brennstoffzellenspannung, Laststrom |

# A.16 ELEKTRONISCHE LASTEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

**THE WORLD OF POWER**



**ET SYSTEM**

ET System electronic GmbH Postfach 80 68804 - Altlußheim

HAW Hamburg  
Herr Peter Kuhn  
Berliner Tor 21

20099 Hamburg

**Angebot-Nr. 151198**

Datum : 18.08.2015  
Ihr Zeichen :  
Ihre Anfrage vom : 18.08.2015  
Anfrage-Nr. :  
Vertrieb : Roland Kosmowski +49 6205 39 48-31  
Angebotsgültigkeit : 90 Tage

phone : 0173 9933 274 fax :

Sehr geehrter Herr Kuhn,

Seite 1 von 2

für Ihre Anfrage, sowie Ihr Interesse an unseren Produkten möchten wir uns bedanken.  
Gemäß Ihrer Anfrage bzw. Ihrer Spezifikation erhalten sie freibleibend unser Angebot:

| Pos   | Anzahl | Bezeichnung   | Einzelpreis netto | Gesamtpreis netto |
|---|--------|---|-------------------|-------------------|
| 1   | 1      | ELP/DCM 9711<br>elektronische Last<br>Leistung: 150 W<br>Lasteingangsspannung: 0 - 150 VDC<br>Laststrom: 0 - 30 A<br>CC, CR, CV, CW, CC+CV, CR+CV<br>Schutz gegen Überstrom, Überspannung, Überlast,<br>Übertemperatur und Verpolungsschutz<br>Abmessungen: 253 x 111 x 396 mm<br>Gewicht: 3,5 kg | 631,00 €          | 631,00 €          |
| Lieferzeit nach Auftragseingang: 4 - 5 Wochen |        |   |                   |                   |
| 2   | 1      | ELP/DCM 9712<br>elektronische Last<br>Leistung: 300 W<br>Lasteingangsspannung: 0 - 150 VDC<br>Laststrom: 0 - 30 A<br>CC, CR, CV, CW, CC+CV, CR+CV<br>Schutz gegen Überstrom, Überspannung, Überlast,<br>Übertemperatur und Verpolungsschutz<br>Abmessungen: 253 x 111 x 396 mm<br>Gewicht: 3,5 kg | 795,00 €          | 795,00 €          |
| Lieferzeit nach Auftragseingang: 4 - 5 Wochen |        |   |                   |                   |
| 3   | 1      | Option../DCM-131<br>Schnittstelle RS 232  | 105,00 €          | 105,00 €          |
| 4   | 1      | Option../DCM-132<br>Schnittstelle RS 485  | 105,00 €          | 105,00 €          |
| 5   | 1      | Option../DCM-133<br>Schnittstelle USB   | 105,00 €          | 105,00 €          |

**ET System electronic GmbH**  
Hauptstraße 119-121  
68804 - Altlußheim  
Telefon : +49 6205 39 48-0  
Telefax : +49 6205 375 60  
e-mail : info@et-system.de  
internet : www.et-system.de

**ET-System electronic Gesellschaft zur Herstellung und Vertrieb von elektronischen Prüf- und Messgeräten mbH**  
Bankverbindung: VOBÄ Kur- und Rheinpfalz eG  
BLZ: 54790000  
Konto.-Nr.: 9000704  
BIC: GENODE61SPE  
IBAN: DE 39547900000009000704

Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Eric Keim  
Prokurist: Roland Kosmowski  
Registergericht: Amtsgericht Mannheim  
Handelsregister: HRB 421186  
Gerichtsstand für beide Teile: Schwetzingen  
Sitz der Gesellschaft: Altlußheim  
Ust.ID-Nr.: DE 144 285 482

## A.17 ELEKTRONISCHE LASTEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

THE WORLD OF POWER



Angebot-Nr. 151198 / 18.08.2015 Seite 2 von 2

**Gesamtbetrag netto****1.741,00 €**

Die Preise gelten netto + MwSt., ab Werk, zuzüglich Verpackung  
Zahlungsbedingungen: Vorkasse

Die Grundlage für unser Angebot sind die Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Fa. ET System electronic GmbH. Diese können auf unserer Webseite <http://www.et-system.de/de/impressum.html> eingesehen und heruntergeladen werden. Für eventuelle Fragen oder weitere Informationen stehen wir Ihnen gerne jederzeit zur Verfügung. Wir hoffen, Ihnen mit unserem Angebot, eine für Ihre Bedürfnisse angemessene und interessante Lösung unterbreitet zu haben und verbleiben

mit freundlichen Grüßen

**ET System electronic GmbH**

Bitte Angebots - Nummer bei Bestellung angeben

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R. Kosmowski'.

Röland Kosmowski

**ET System electronic GmbH**  
Hauptstraße 119-121  
68804 - Altlußheim  
Telefon : +49 6205 39 48-0  
Telefax : +49 6205 375 60  
e-mail : [info@et-system.de](mailto:info@et-system.de)  
internet : [www.et-system.de](http://www.et-system.de)

**ET-System electronic Gesellschaft zur Herstellung und Vertrieb von elektronischen Prüf- und Messgeräten mbH**  
Bankverbindung: VOBA Kur- und Rheinpfalz eG  
BLZ: 54790000  
Konto.-Nr.: 9000704  
BIC: GENODE61SPE  
IBAN: DE 3954790000009000704

Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Eric Keim  
Prokurist: Roland Kosmowski  
Registergericht: Amtsgericht Mannheim  
Handelsregister: HRB 421186  
Gerichtsstand für beide Teile: Schwetzingen  
Sitz der Gesellschaft: Altlußheim  
Ust.ID-Nr.: DE 144 285 482

# A.18 ELEKTRONISCHE LASTEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

## ELP/DCM97 series programmable DC electronic load 150 - 300 W load



**FEATURES**

- Six high speed operation modes: CC,CR,CV,CW,CC+CV,CR+CV
- High-luminance VFD screen with 2 lines & 4 channels display channels
- Intelligent fan system fan will be automatically initiated according to the temperature
- Battery testing and short-circuit function
- Available of dynamic testing and rising edge and falling edge setting
- External current waveform monitor terminal
- Power-on-self-test, software calibration and standard rack mount
- 1000/1200 V on request
- Over current, over voltage, over power, over heat, polarity reversed protection
- Soft start time setting, carrying the power supplier according to the voltage value set
- Supporting external trigger input and output
- Supporting remote voltage compensation and multidata storage
- Communication mode: GPIB/RS232/RS485/USB (Option)
- Customer specific models on request

| Model  | ELP/DCM9711 |                | ELP/DCM9712    |                | ELP/DCM9712B   |                | ELP/DCM9712C   |                |                |
|--|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Input Rating   | Power       | 150 W          |                | 300 W          |                | 300 W          |                | 300 W          |                |
|  | Current     | 0 - 30 A       |                | 0 - 30 A       |                | 0 - 15 A       |                | 0 - 60 A       |                |
|  | Voltage     | 0 - 150 V      |                | 0 - 150 V      |                | 0 - 500 V      |                | 0 - 150 V      |                |
| CC Mode  | Range       | 0 - 3 A        | 0 - 30 A       | 0 - 3 A        | 0 - 30 A       | 0 - 3 A        | 0 - 15 A       | 0 - 6 A        | 0 - 60 A       |
|  | Resolution  | 0,1 mA         | 1 mA           |
|  | Accuracy    | 0,03%+0,05%FS  |
| CV Mode  | Range       | 0,1 - 19.999 V | 0,1 - 150 V    | 0,1 - 19.999 V | 0,1 - 150 V    | 0,1 - 19.999 V | 0,1 - 150 V    | 0,1 - 19.999 V | 0,1 - 150 V    |
|  | Resolution  | 1 mV           | 10 mV          |
|  | Accuracy    | 0,03%+0,02%FS  |
| CR Mode (Voltage and current input value > 10% full messument)       | Range       | 0,03 - 10 K Ω  | 0,03 - 5 K Ω   | 0,03 - 10 K Ω  | 0,03 - 5 K Ω   | 0,3 - 10 K Ω   | 0,3 - 5 K Ω    | 0,03 - 10 K Ω  | 0,03 - 5 K Ω   |
|  | Resolution  | 16 bit         |
|  | Accuracy    | 0,1%+0,1%FS    |
| CW Mode (Voltage and current input value > 10% full messument)       | Range       | 0 - 150 W      | 0 - 150 W      | 0 - 300 W      |
|  | Resolution  | 1 mW           | 10 mW          |
|  | Accuracy    | 0,1%+0,1%FS    |
| V Measurement  | Voltage     | 0 - 19.999 V   | 0 - 150 V      | 0 - 19.999 V   | 0 - 150 V      | 0 - 19.999 V   | 0 - 500 V      | 0 - 19.999 V   | 0 - 500 V      |
|  | Resolution  | 1 mV           | 10 mV          |
|  | Accuracy    | 0,015%+0,03%FS | 0,015%+0,03%FS | 0,015%+0,03%FS | 0,015%+0,03%FS | 0,015%+0,03%FS | 0,015%+0,05%FS | 0,015%+0,03%FS | 0,015%+0,03%FS |
| I Measurement  | Current     | 0 - 3 A        | 0 - 30 A       | 0 - 3 A        | 0 - 30 A       | 0 - 3 A        | 0 - 15 A       | 0 - 6 A        | 0 - 60 A       |
|  | Resolution  | 0,01 mA        | 0,1 mA         |
|  | Accuracy    | 0,03%+0,05%FS  | 0,03%+0,08%FS  | 0,03%+0,05%FS  | 0,03%+0,08%FS  | 0,03%+0,05%FS  | 0,03%+0,08%FS  | 0,03%+0,05%FS  | 0,03%+0,08%FS  |
| W Measurement (Voltage and current input value > 10% full messument) | Watt        | 100 W          | 150 W          | 100 W          | 300 W          | 100 W          | 300 W          | 100 W          | 300 W          |
|  | Resolution  | 1 mW           | 10 mW          |
|  | Accuracy    | 0,1%+0,1%FS    |

|                             |  |                 |        |                |        |                |        |                |        |
|-----------------------------|--|-----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|
| <b>Battery Test</b>         | Battery Input: 0,1 - 150 V; Max. Measurement: Capacity = 999 AH; Resolution = 0,1 mA; Test Time = 1 S - 16 H |                 |        |                |        |                |        |                |        |
| <b>Dynamic Test</b>         | Transition List: 0 - 25 kHz; 2,5 A/uS; T1 & T2: 60 uS - 999 S; Accuracy: +/- 15 % offset + 10 %FS            |                 |        |                |        |                |        |                |        |
| <b>CC soft-startup Time</b> | 1 mS; 2 mS; 5 mS; 10 mS; 20 mS; 50 mS; 100 mS; 200 mS; 500 mS; 1000 mS; Accuracy: +/- 15 % offset + 10 %FS   |                 |        |                |        |                |        |                |        |
| <b>Short Circuit</b>        | Current CC   | = 3,3 A         | = 33 A | = 3,3 A        | = 33 A | = 3,3 A        | = 18 A | = 6,6 A        | = 66 A |
|                             | Voltage CV   | 0 V             |        | 0 V            |        | 0 V            |        | 0 V            |        |
|                             | Resistance RC  | = 55 mΩ         |        | = 35 mΩ        |        | = 300 mΩ       |        | = 25 mΩ        |        |
| <b>Temperature</b>          | Operating  | 0 - 40 °C       |        | 0 - 40 °C      |        | 0 - 40 °C      |        | 0 - 40 °C      |        |
|                             | Nonoperating   | -10 °C - 70 °C  |        | -10 °C - 70 °C |        | -10 °C - 70 °C |        | -10 °C - 70 °C |        |
| <b>Dimension</b>            | WxHxD (mm)   | 253 x 111 x 396 |        |                |        |                |        |                |        |
| <b>Weight</b>               | Kg   | 3,5             |        |                |        |                |        |                |        |

Hauptstraße 119 – 121  
D-68804 Altlußheim

Telefon +49-6205-3948-0  
Telefax +49-6205-37560

E-Mail info@et-system.de  
Web www.et-system.de



## A.19 ELEKTRONISCHE LASTEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

| Model  |            | ELP/DCM9712830      |                    |
|--|------------|---------------------|--------------------|
| Input Rating   | Power      | 300 W               |                    |
|  | Current    | 0 - 30 A            |                    |
|  | Voltage    | 0 - 500 V           |                    |
| CC Mode  | Range      | 0 - 3 A             | 0 - 30 A           |
|  | Resolution | 0,1 mA              | 1 mA               |
|  | Accuracy   | 0,05%+0,05%FS       | 0,05%+0,08%FS      |
| CV Mode  | Range      | 0,1 - 19.999 V      | 0,1 - 500 V        |
|  | Resolution | 1 mV                | 10 mV              |
|  | Accuracy   | 0,03%+0,02%FS       | 0,03%+0,05%FS      |
| CR Mode (Voltage and current input value > 10% full measurement)       | Range      | 0,3 $\Omega$ - 10 K | 0,3 $\Omega$ - 5 K |
|  | Resolution | 16 bit              | 16 bit             |
|  | Accuracy   | 0,1%+0,1%FS         | 0,1%+0,1%FS        |
| CW Mode (Voltage and current input value > 10% full measurement)       | Range      | 0 - 300 W           | 0 - 300 W          |
|  | Resolution | 1 mW                | 10 mW              |
|  | Accuracy   | 0,1%+0,1%FS         | 0,1%+0,1%FS        |
| V Measurement  | Voltage    | 0 - 19.999 V        | 0 - 500 V          |
|  | Resolution | 1 mV                | 10 mV              |
|  | Accuracy   | 0,015%+0,03%FS      | 0,015%+0,03%FS     |
| I Measurement  | Current    | 0 - 3 A             | 0 - 30 A           |
|  | Resolution | 0,01 mA             | 0,1 mA             |
|  | Accuracy   | 0,05%+0,05%FS       | 0,05%+0,08%FS      |
| W Measurement (Voltage and current input value > 10% full measurement) | Watt       | 100 W               | 300 W              |
|  | Resolution | 1 mW                | 10 mW              |
|  | Accuracy   | 0,1%+0,1%FS         | 0,1%+0,1%FS        |

**Battery Measurement** Battery Input: 0,5 - 120 V; Max. Measurement: Capacity = 999H; Resolution = 0,1 mA; Time Range = 1S - 16 HS

**Dynamic Measurement** Transition List: 0 - 25 kHz; 2,5 A/uS; T1 & T2: 60 uS - 999 S; Accuracy: +/- 15 % offset + 10 %FS

**CC soft-startup Time** 1 mS; 2 mS; 5 mS; 10 mS; 20 mS; 50 mS; 100 mS; 200 mS; Accuracy: +/- 15 % offset + 10 %FS

|               |               |                 |        |
|---------------|---------------|-----------------|--------|
| Short Circuit | Current CC    | = 3,3 A         | = 18 A |
|               | Voltage CV    | 0 V             |        |
|               | Resistance RC | = 45 m $\Omega$ |        |
| Temperature   | Operating     | 0 - 40 °C       |        |
| Dimension     | WxHxD (mm)    | 253 x 111 x 396 |        |
| Weight        | Kg            | 3,5             |        |

# A.20 ELEKTRONISCHE LASTEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



Suche nach Schlagwort oder Teilern.

[InfoZone](#) [Hilfe](#)  
0 **0,00 €**

---

Alle Produkte
Unsere Marken
Neue Produkte
Mein Konto
Services

**500.000 Produkte führender Hersteller**

**Schnelle und zuverlässige Lieferung**

[RS Home](#) > [Prüf- und Messtechnik](#) > [Stromversorgung und Leistungsmessung](#) > [Elektronische Lasten](#)

## Gossen Metrawatt 32 EL Elektronische Last, 0 → 150 W, 0 → 30 A / 0 → 360 V, programmierbar

RS Best.-Nr. **493-7861**  
 Marke **Gossen Metrawatt**  
 Herst. Teile-Nr. **K850A**

**700,00 €**  
 Preis pro: Stück

Menge 1  
 700,00 €

Lieferbar am folgenden Werktag (Mo-Fr) bei Bestelleingang werktags bis 22 Uhr.

Menge  Hinzufügen

Lieferverfügbarkeit überprüfen Zu einer Teilleiste hinzufügen

---

**Kalibrierungsoptionen:** ?

Gossen Metrawatt 32 EL Elektronische Last, 0 → 150 W, 0 → 30 A / 0 → 360 V, programmierbar



Abbildung stellvertretend für Produktreihe

### Produktdetails

**Elektronische Lasten SSL Serie, programmierbar**

- Eingangsleistung von 150W (SSL-32EL150) oder 300W (SSL-32EL300)
- Potentialfreier Eingang
- Ausgang schaltbar ON/OFF
- Stromkennlinie oder R-Kennlinie wählbar
- Einstellung über Drehgeber oder Tastatur
- Multifunktionale LCD Anzeige
- Speicher für Geräteeinstellungen, Lastprofil
- Tischgerät geeignet für 19" Einbau
- Rechnersteuerung über RS232 oder RS485 möglich

|                      |                |
|----------------------|----------------|
| Strombereich         | 0-30A          |
| Spannungsbereich     | bis 350Vdc     |
| Auflösung Stromsenke | 10mA           |
| Auflösung R-Last     | 10mΩ           |
| Abmessungen B/H/T    | 215/100/280 mm |
| Gewicht              | 5kg            |

**Mehr Infos und technische Dokumente**

- RoHS Status: Nicht zutreffend
- [SSL-Last-KONSTANTER Serie/Series 32 EL](#)
- [SSL – KONSTANTER Series 32 EL Electronic Load Data Sheet](#)
- [SSL-Last-Konstanter Serie 32 EL](#)

Ihre Vorteile bei RS

- Lieferung am nächsten Werktag
- Schnell und einfach
- Zuverlässige Lieferung
- Ganz nach Ihren Wünschen

Produkt zum Vergleich hinzufügen

### Eigenschaften

Alternativen finden

Um ein vergleichbares Produkt zu finden, wählen Sie bitte die benötigten Attribute

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| Konstantleistungs-Betriebsbereich | 0 → 150 W |
| Konstantspannungs-Betriebsbereich | 0 → 360 V |
| Konstantstrom-Betriebsbereich     | 0 → 30 A  |

## A.21 ELEKTRONISCHE LASTEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

### Zubehör

| Typ  | Bezeichnung  | Artikelnummer   | Code | EURO      |
|--|--|-----------------|------|-----------|
| Montage-Set  | Montage-Set 1x32N für KONSTANTER SSP/SLP 32N   | K990A           | A3   | 90,-      |
| Montage-Set  | Montage-Set 2x32N für KONSTANTER SSP/SLP 32N   | K990B           | A3   | 90,-      |
| Netzkabel  | Drehstrom-Netzkabel für SSP64N und SYSKON  | K991B           | A3   | 70,-      |
| Jumper-Netzkabel   | Jumper-Netzkabel (Durchschleifkabel), 0,4 m für SLP32N und SSP32N  | K991A           | A3   | 60,-      |
| IEEE-Kabel   | Bus-Kabel IEEE / IEEE, 2 m für KONSTANTER  | K931A           | A3   | 300,-     |
| RS232-Kabel  | Schnittstellenkabel RS232, 2 m   | GTZ3241000R0001 | A1   | 49,-      |
| RS232-Adapter  | Interface-Adapter RS232 für die Serien LSP, SSL  | K910A           | A3   | 190,-     |
| USB-Adapter  | Interface-Adapter USB für die Serien LSP, SSL  | K910B           | A3   | 190,-     |
| RS232-USB-Adapterkabel   | Schnittstellenadapterkabel RS232/USB, für die Ankopplung der Geräteserien SSP, MSP und SPL über RS232 an PCs mit USB-Schnittstelle | Z501L           | A2   | 120,-     |
| <b>Software für KONSTANTER</b>   |  |                 |      |           |
| Bediensoftware „Soft Front Panel“ und Treiber für Standardplattformen stehen zum Download auf unserer Internetseite zur Verfügung. |  |                 |      | kostenlos |

# A.22 BEFEUCHTUNG: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



M&C TechGroup Germany GmbH, Pf. 104224, 40853 Ratingen, Germany  
**HAW Hamburg**  
 Labor für Elektrochemie/Brennstoffzellen  
 Herr Peter Kuhn  
 Berliner Tor 21  
 20099 Hamburg



### Angebot 1030109 vom 19.08.2015

Ihre Anfrage: FP-BF vom 17.08.2015

Ihre Kunden Nr.: 65885, Ihre E-Mail: peter.kuhn@haw-hamburg.de

Wir danken für Ihre Anfrage und bieten Ihnen entsprechend unseren Verkaufsbedingungen, Stand Oktober 2005, (einzusehen unter www.mc-techgroup.com) wie folgt an:

Angebot freibleibend

Ansprechpartner: Herr Stephan Schmidt , Tel. +49 2102 935-137, E-Mail: stephan.schmidt@mc-techgroup.com sm  
 Vertriebsbüro: Herr Oliver Arlt , Tel. +49 5105 5838855, E-Mail: oliver.arlt@mc-techgroup.com

### Angebotsgültigkeit: KW 13 / 2016

| Pos                | Artikel  | Menge | Einzelpreis | Betrag EUR    |
|--------------------|--|-------|-------------|---------------|
| 1.000              | <b>03F5700 FP-BF</b><br>Befeuchtergefäß Typ FP-BF mit Einperlfritte F-W. Inhalt: 70ml. Anschluss: G1/4"i. Werkstoff: PVDF, Viton, Glas.<br>Stat. Warennr. 84213980 Warenursprung EEC / DE<br>Auslieferungsort: Ratingen<br><i>266,00 - 25,00 % Sonderrabatt = 199,50</i>   | 1 ST  | 199,50      | 199,50        |
| 2.000              | <b>03F5750 FP-BF-GL25</b><br>Befeuchtergefäß Typ FP-BF-GL25 mit GL25-Kondensatausgang im Filterglas und Einperlfritte F-W. Inhalt: 70ml. Anschluss: G1/4"i. Werkstoff: PVDF, Viton, Glas.<br>Stat. Warennr. 84213980 Warenursprung EEC / DE<br>Auslieferungsort: Ratingen<br><i>281,00 - 25,00 % Sonderrabatt = 210,75</i> | 1 ST  | 210,75      | 210,75        |
| 3.000              | <b>Fracht und Verpackung</b><br>Auslieferungsort: Ratingen   | 1 ST  | 10,00       | 10,00         |
| <b>Gesamtwert:</b> |  |       |             | <b>420,25</b> |

(Zuzüglich der zum Zeitpunkt der Rechnungslegung gültigen Umsatzsteuer)

Lieferzeit: ca. 2 Wochen

M&C TechGroup Germany GmbH  
 Geschäftsführer Olaf Sommer  
 Rehhecke 79, 40885 Ratingen  
 Germany

Tel +49 2102 935-0  
 Fax +49 2102 935-1111  
 info@mc-techgroup.com  
 www.mc-techgroup.com

Amtsgericht Düsseldorf  
 HRB 53843  
 USt-Ident-Nr. DE 814788475  
 WEEE-Reg.-Nr. DE 99278920

Stadtsparkasse Düsseldorf  
 KTO 100 435 965 7 / BLZ 300 501 10  
 IBAN DE 32300501101004359657  
 BIC DUSS DE 33

M&C TechGroup  
 Gasentnahme- & Gasaufbereitungs-  
 technologie • Projektierung und  
 Bau von Analyse-Sondersystemen

## A.23 BEFEUCHTUNG: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

Embracing Challenge



FP-BF

### Befeuchtergefäß Serie FP®

Version FP-BF

#### Besonderheiten

- Einfaches Nachfüllen
- Direkte Sichtkontrolle des Füllstandes
- Optimaler Befeuchtungseffekt
- Geringes Totvolumen
- Mit Wandhalter

#### Anwendung

Bei der Nullpunktkalibrierung von Analysatoren, die wasserdampfquerempfindlich sind, wird zur Befeuchtung des N<sub>2</sub>-Nullgases das Befeuchtergefäß FP-BF vor dem Gaskühler verwendet, um Wasserdampf-Querempfindlichkeitsfehler entsprechend zu berücksichtigen. Das Nullgas ist dann ebenso wie das Messgas bei z.B. +5 °C wasserdampfgesättigt.

Prüfgase mit wasserlöslichen Komponenten dürfen nicht über das Befeuchtergefäß geleitet werden.

#### Beschreibung

Das M&C-Befeuchtergefäß FP-BF ist aus Bauteilen des Universal-Filterprogrammes zusammengestellt und hat die gleiche Funktion wie die Waschflasche FP-W, jedoch wird der Glaskörper F-120G, bzw. F-120G-D mit einem geringeren Volumen von nur 70 ml verwendet.

Eine Gasverteilerfritte gewährleistet einen optimalen Befeuchtungseffekt des N<sub>2</sub>-Nullgases. Ohne das Befeuchtergefäß öffnen zu müssen, ist der Füllstand von außen zu beurteilen. Zum Nachfüllen sind keine Werkzeuge erforderlich, wobei die optimale Positionierung des Dicht-O-Ringes stets eine sichere Abdichtung des Befeuchtergefäßkörpers zum Befeuchtergefäßkopf gewährleistet.

Gasein- und -ausgang können an der Wandhalterung um 180° gedreht werden, so dass bei der Montage eine flexible Anpassung an örtliche Gegebenheiten möglich ist.

Für besondere Anwendungen wird das Befeuchtergefäß FP-BF-GL25 mit einem GL25-12 Anschluss am Boden des Glaskörpers geliefert.

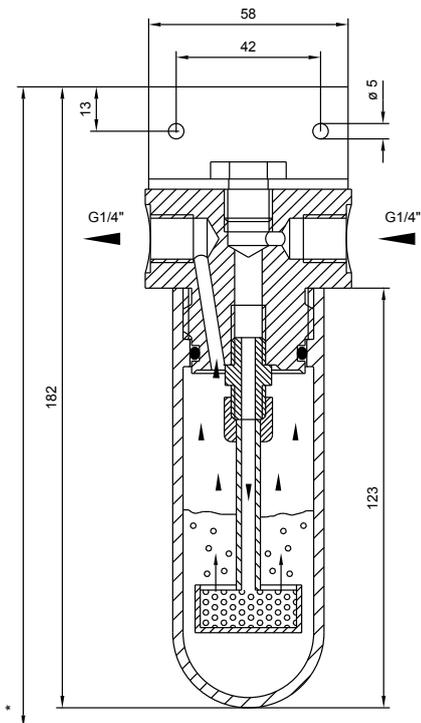
Es darf keine Betriebssituation entstehen, bei der im Ausgang der Waschflasche Überdruck oder im Eingang Unterdruck entsteht, da ansonsten die Flüssigkeit zum Eingang der Waschflasche herausgehebert wird.

# A.24 BEFEUCHTUNG: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



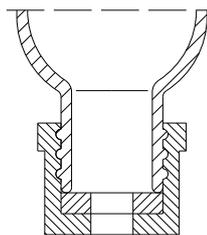
## Abmessungen

### Befeuchtergefäß FP-BF



\* Ausbaumaß 290

### Befeuchtergefäß FP-BF-GL25 Teilansicht des Glaskörpers mit GL25-12 Anschluss am Boden



GL25-12 Anschluss mit Dichtklemmung für 12 mm Rohr

Abmessungen in mm

## Technische Daten

| Befeuchtergefäß   | FP-BF  | FP-BF-GL25                                      |
|---|--|---|
| Artikel-Nr.   | 03F5700  | 03F5750   |
| Medium berührte Teile:<br>Kopfteil, Verschraubung,<br>Schlauch, O-Ring Dichtung,<br>Einperlfritte, Glaskörper | PVDF<br>FPM<br>Glas                              |   |
| Inhalt ca.  | 70 ml  |   |
| Durchfluss  | max. 100 l/h                                     |   |
| Betriebstemperatur  | -20 bis +80 °C                                   |   |
| Lagertemperatur   | -30 bis +110 °C                                  |   |
| Betriebsdruck max.  | 5 bar abs., bei 20 °C                            | 2 bar abs. / 5 bar abs. mit GL-Anschlussadapter |
| Montageart  | Wandmontage mit Haltewinkel, Einbaulage vertikal |   |
| Füllmittel  | Standardlieferung ohne Füllung                   |   |
| Anschlüsse  | G1/4" i DIN ISO 228/1                            | G1/4" i, GL25-12                                |
| Gewicht   | 0,3 Kg   |   |

## A.25 BEFEUCHTUNG: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

### Ihr Angebot

PCE Deutschland GmbH - Im Langel 4 - 59872

Meschede

HAW Hamburg Labor für  
Elektrochemie/Brennstoffzellen



**vom:** 15.08.2015

**angefragt von:** Peter Kuhn

**Email:** peter.kuhn@haw-hamburg.de

Sehr geehrter Herr Peter Kuhn,

vielen Dank für Ihr Interesse an unseren Produkten und  
Dienstleistungen. Es gelten unsere Allgemeinen  
Geschäftsbedingungen.

**Sachbearbeiter:** Michael Jancso

**Telefon:** 02903 976 990

**Email:** mja@warensortiment.de

**Fax:** 02903 976 99 29

Wir bieten Ihnen wie folgt an:

| Bezeichnung   | Menge                  | Einzelpreis | Rabatt | Gesamtpreis |
|---|------------------------|-------------|--------|-------------|
|  <b>DH.WB000106</b><br>Labor- Wasserbad WiseBath WB- 6<br>Das Labor-Wasserbad WiseBath WB-6 dient dem<br>indirekten und gleichmäßigen Erhitzen und Temperieren<br>von Proben im Labor. Dazu wird das Gefäß mit der<br>Probe in das Wasser im Labor-Wasserbad eingetaucht.<br>Mit einem Drehregler am Labor-Wasserbad kann die<br>gewünschte Temperatur eingestellt werden.<br>- Heizleistung 800 W - Betriebstemperatur:<br>Umgebungstemperatur +5 °C, bis 100 °C -<br>Fassungsvermögen: 6 Liter - robustes Stahlgehäuse | 1<br>Stück (VPE 1 St.) | 388,74 €    | 0.00 % | 388,74 €    |
|   |                        |             | 0,00 € |             |

|  |                 |
|--|-----------------|
| <b>Zwischensumme</b>   | <b>388,74 €</b> |
| Lieferkostenaufpreis durch Versandart (DHL Standard Netto / Deutschland) | 5,95 €          |
| <b>Lieferkosten</b>  | <b>5,95 €</b>   |
| <b>Nettosumme</b>  | <b>394,69 €</b> |
| MwSt. zu 19,00%  | 74,99 €         |
| <b>Gesamtsumme</b>   | <b>469,68 €</b> |

Zahlungsbedingung : Zahlung innerhalb 10 Tage ohne Abzüge

Liefertyp: Versand

Versandart: DHL Standard Netto

Zahlweise: Überweisung

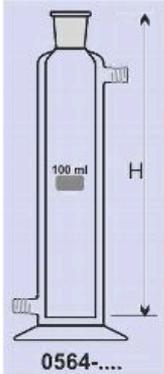
Lieferzeit: 1-2 Werktage

Gültigkeit: 1 Monat

Für eventuelle Rückfragen zu diesem Angebot stehen wir Ihnen gern zur Verfügung.

## A.26 BEFEUCHTUNG: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

**Unterteile, temperierbar**



Temperierbare Gaswaschfalsche ; **ohne** Gaswaschflaschen-Aufsatz , mit Schliff-Hülse NS29/32 ; mit 2x Gewindeanschluß für Temperiermantel , ohne PE-Verschraubung ; passend für Standart-Aufsätze mit Art.Nr. 0552-.... ; Innenhöhe ca. 190mm  
- weitere Größen auf Anfrage -

0564-....

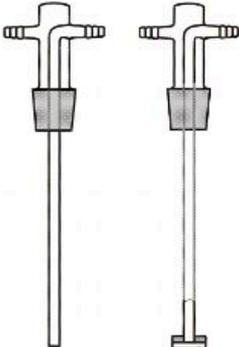
Detailbilder >> 1

| Bestell-Nr.            | Nenninhalt | Schliff  | Gewinde | Innen-Höhe(H) | Glasart  | Fuß  | Preis           | Nettopreis   | Lager-  |   |  |
|------------------------|------------|----------|---------|---------------|----------|------|-----------------|--------------|---------|---|--|
|                        |            |          |         |               |          |      | inkl.MwSt.      | ohne MwSt.   | bestand |   |  |
| <b>0564-10-0102914</b> | 100ml      | NS 29/32 | 2x GL14 | ca.190 mm     | Klarglas | mit  | <b>114.88 €</b> | 96.54 € [N]  | 4       | 1 |  |
| <b>0564-10-0252914</b> | 250ml      | NS 29/32 | 2x GL14 | ca.190 mm     | Klarglas | ohne | <b>141.40 €</b> | 118.82 € [N] |         | 1 |  |
| <b>0564-10-0502914</b> | 500ml      | NS 29/32 | 2x GL14 | ca.190 mm     | Klarglas | ohne | <b>172.45 €</b> | 144.92 € [N] |         | 1 |  |
| <b>0564-10-1002914</b> | 1000ml     | NS 29/32 | 2x GL14 | ca.190 mm     | Klarglas | ohne | <b>223.08 €</b> | 187.46 € [N] |         | 1 |  |

Steuersätze: [N]=19.0%  
Preisangabe zzgl. **Versandkosten**»

## A.27 BEFEUCHTUNG: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

**Sicherheitsaufsatz für Gaswaschflasche allein; mit Glasolive**

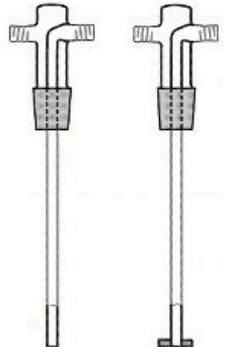


Sicherheitsaufsatz für Gaswaschflasche allein ; mit NS 29/32; DIN 12596 ; Boro 3.3

| Bestell-Nr.  | Kern    | 2x Olive | Porosität Fritte | Glasart   | Preis inkl.MwSt. | Nettopreis ohne MwSt. | Lagerbestand |   |   |
|--------------|---------|----------|------------------|-----------|------------------|-----------------------|--------------|---|---|
| 0552-30-30   | NS29/32 | 10mm     | ohne Fritte      | Klarglas  | 16.16 €          | 13.58 € [N]           | 10           | 1 | 🛒 |
| 0552-30-3006 | NS29/32 | 6 mm     | ohne Fritte      | Klarglas  | 18.80 €          | 15.80 € [N]           |              | 1 | 🛒 |
| 0552-30-3008 | NS29/32 | 8 mm     | ohne Fritte      | Klarglas  | 18.80 €          | 15.80 € [N]           |              | 1 | 🛒 |
| 0552-30-30B  | NS29/32 | 10mm     | ohne Fritte      | Braunglas | 39.72 €          | 33.38 € [N]           |              | 1 | 🛒 |
| 0554-40-40   | NS29/32 | 10mm     | P 0              | Klarglas  | 32.32 €          | 27.16 € [N]           | 4            | 1 | 🛒 |
| 0554-40-41   | NS29/32 | 10mm     | P 1              | Klarglas  | 32.32 €          | 27.16 € [N]           | 1            | 1 | 🛒 |
| 0554-40-42   | NS29/32 | 10mm     | P 2              | Klarglas  | 32.32 €          | 27.16 € [N]           | 13           | 1 | 🛒 |
| 0554-40-43   | NS29/32 | 10mm     | P 3              | Klarglas  | 32.32 €          | 27.16 € [N]           | 2            | 1 | 🛒 |
| 0554-40-44   | NS29/32 | 10mm     | P 4              | Klarglas  | 36.35 €          | 30.55 € [N]           | 1            | 1 | 🛒 |
| 0554-40-45   | NS29/32 | 10mm     | P 5              | Klarglas  | 37.37 €          | 31.40 € [N]           |              | 1 | 🛒 |

Steuersätze: [N]=19.0%  
Preisangabe zzgl. **Versandkosten**»

**Sicherheitsaufsatz für Gaswaschflaschen allein; mit GL 14**



Sicherheitsaufsatz für Gaswaschflaschen allein; mit NS 29/32; DIN 12596 ; Boro 3.3

| Bestell-Nr. | Porosität Fritte | Preis inkl.MwSt. | Nettopreis ohne MwSt. | Lagerbestand |   |   |
|-------------|------------------|------------------|-----------------------|--------------|---|---|
| 0552-40-00  | ohne Fritte      | 20.19 €          | 16.97 € [N]           | 3            | 1 | 🛒 |
| 0554-60-00  | P 0              | 36.35 €          | 30.55 € [N]           |              | 1 | 🛒 |
| 0554-60-11  | P 1              | 36.35 €          | 30.55 € [N]           |              | 1 | 🛒 |
| 0554-60-22  | P 2              | 36.35 €          | 30.55 € [N]           | 4            | 1 | 🛒 |
| 0554-60-33  | P 3              | 36.35 €          | 30.55 € [N]           |              | 1 | 🛒 |
| 0554-60-44  | P 4              | 40.40 €          | 33.95 € [N]           |              | 1 | 🛒 |
| 0554-60-55  | P 5              | 41.40 €          | 34.79 € [N]           |              | 1 | 🛒 |

Steuersätze: [N]=19.0%  
Preisangabe zzgl. **Versandkosten**»

## A.28 BEFEUCHTUNG: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

### WÄRME-, KÄLTEGERÄTE

#### TEMPERIERGERÄTE

#### UMWÄLTHERMOSTATE

##### Peltier Thermostat PT 31, A. KRÜSS Peltier Thermostat PT 31

Der elektronische Wasserbad-Thermostat mit Peltierelement ist ein vielseitiges und leistungsstarkes Gerät zur Temperierung von Refraktometern, Polarimetern usw. Er ist äußerst robust, kompakt und einfach zu bedienen. Aufgrund seiner kleinen Größe nimmt er im Labor kaum Platz weg.

**Technische Daten:**

Temperatur: 8°C bis 40°C, stufenlos regelbar  
Genauigkeit: ± 0,2°C  
Auflösung: 0,1°C

|   |             |        |
|---|-------------|--------|
| Artikel   | Best.-Nr.   | €/St.  |
| Peltier Thermostat PT 31<br>für Refraktometer/Polarimeter mit RS232-Schnittstelle | 65 61 20031 | 990,00 |



##### Wärme-Umwälzthermostate, Huber Heating Circulators

Dank der minimierten Füllvolumina sind die Modelle CC-104A und MPC-104A (mit Polycarbonatbad) sowie CC-202C und MPC-202C (mit Edelstahlbad) speziell für die Temperierung kleinerer externer Volumina prädestiniert. Alle Modelle sind serienmäßig mit rückseitigen Pumpenanschlüssen M16x1 ausgestattet. Modelle mit Pilot ONE haben eine drehzahlgeregelte Druck-Saugpumpe. Die Temperaturkonstanz nach DIN 12876 beträgt bei den Compatible Control-Modellen 0,02 K, bei den MPC-Modellen 0,05 K.

**Technische Daten:**

Heizleistung kW (alle Modelle): 2  
Pumpendruck max. (l/min / bar)  
CC-Modelle: 27 / 0,7  
MPC-Modelle: 20 / 0,2

| Typ      | Temp.-Ber.<br>°C | Bad-<br>öffnung<br>mm | Bad-<br>tiefe<br>l | Abmess.<br>Vol.<br>(BxTxH)<br>mm | Best.-Nr.   | €/St.   |
|----------|------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------------|-------------|---------|
| CC-104A  | (15) 25 – 100    | Ø 25                  | 4                  | 147 x 235 x 330                  | 10 59 61041 | 1620,00 |
| MPC-104A | (15) 25 – 100    | Ø 25                  | 4                  | 147 x 235 x 330                  | 10 59 61042 | 1140,00 |
| CC-202C  | (-30) 45 – 200   | Ø 25                  | 2                  | 178 x 260 x 355                  | 10 59 62021 | 1830,00 |
| MPC-202C | (-30) 45 – 200   | Ø 25                  | 2                  | 178 x 260 x 355                  | 10 59 62022 | 1350,00 |



##### Wärme-Bad- und Umwälzthermostate, Huber Heating Bath Circulators

Wärme-Bad- und Umwälzthermostate eignen sich für Temperaturen bis 200°C bzw. 300°C. Die Compatible Control-Modelle haben eine stufenlos regelbare Druck- und Saugpumpe. Der Pumpendruck kann mit einem optionalen Drucksensor geregelt werden. So schützen Sie zum Beispiel Ihre Glasapparatur vor Bruch. Die Geräte werden bevorzugt zur Temperierung von extern angeschlossenen Applikationen eingesetzt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Objekte direkt im offenen Thermostatenbad zu temperieren.

**Technische Daten:**

Pumpendruck max. (l/min / bar):  
CC-205B: 27 / 0,7  
MPC-205B: 20 / 0,2  
CC-304B – CC-315B: 33 / 0,7  
Temperaturkonstanz nach DIN 12876: 0,02 K

| Typ      | Temp.-Ber.<br>°C | Bad-<br>Vol.<br>l     | Bad-<br>tiefe<br>mm | Heiz-<br>lstg.<br>kW | Abmessungen<br>(BxTxH)<br>mm | Best.-Nr.   | €/St.   |
|----------|------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|-------------|---------|
| CC-205B  | (-30) 45 – 200   | 5,0                   | 150                 | 2,0                  | 178 x 337 x 355              | 10 59 62051 | 2100,00 |
| MPC-205B | (-30) 45 – 200   | 5,0                   | 150                 | 2,0                  | 178 x 337 x 355              | 10 59 62052 | 1620,00 |
| CC-304B  | (-20) 28 – 300   | 5,0                   | 155                 | 2,0                  | 210 x 335 x 392              | 10 59 60304 | 2670,00 |
| CC-308B  | (-20) 28 – 300   | 8,5/5,2 <sup>1)</sup> | 155                 | 3,0                  | 242 x 404 x 392              | 10 59 60308 | 3300,00 |
| CC-315B  | (-20) 28 – 300   | 15/8,5 <sup>1)</sup>  | 200                 | 3,0/4,0              | 335 x 382 x 433              | 10 59 60315 | 3940,00 |

<sup>1)</sup> mit Verdrängereinsatz



## A.29 DURCHFLUSSREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



### ANGEBOT

|          |  |             |                         |
|----------|--|-------------|-------------------------|
| An       | : Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg | Angebot Nr. | : D1511093-B            |
|          |  | Datum       | : 26 August, 2015       |
| z.Hd.    | : Herrn Kuhn                                       | Seiten      | : 5                     |
| Tel.-Nr. | : 0173/9933274                                     |             |                         |
| Fax-Nr.  | : Haupt-Nr: 040/42875- 9149                        | Referenz    | : e-Mail vom 11.08.2015 |
| E-mail   | : Peter.Kuhn@haw-hamburg.de                        | Referenz    | : e-Mail vom 11.08.2015 |

HAW Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg  
Ulmenliet 20  
21033 Hamburg-Bergedorf  
Deutschland

Sehr geehrter Herr Kuhn,

wir danken für Ihre Anfrage und bieten zu unseren Geschäftsbedingungen freibleibend an:

- 1) 1 Stk **F-201CV-2K0-AGD-00-V HI-TEC Digitaler Massendurchflussregler**
- 
- |                |   |
|----------------|---|
| Modell-Reihe   | : EL-FLOW Select  |
| Schutzklasse   | : IP-40   |
| Medium         | : H2 (Wasserstoff)  |
|                | : (frei von Flüssigkeiten und Feststoffen)  |
| Bereich        | : 0,05...2,5 l/min  |
| Genauigkeit    | : ±0,5% v. Istwert zzgl. ±0,1% v. Endwert<br>(bezogen auf die bei der Kalibrierung vorherrschenden Bedingungen) |
| Zertifikat     | : 3-Punkt-Kalibrierung  |
| Temperatur     | : 20...70 °C  |
| Vordruck (P1)  | : 8 bar (a)   |
| Nachdruck (P2) | : 1...5 bar (a)   |
| Ventilfunktion | : Normal geschlossen  |
| Dichtungen     | : Viton   |
| Plunger        | : Viton   |
| Anschlüsse     | : G 1/4" innen  |
| Ausgangssignal | : 4...20 mA aktiv (RS-232 0...100%)   |
| Eingangssignal | : 4...20 mA passiv  |
| Spannungsvers. | : +15...24 Vdc  |
| Preis          | : <b>EUR 1.250,- minus 5,0% = EUR 1.187,50 Netto pro Stück</b>  |

Kalibriert für  
Temperatur: 20 °C

- 2) 1 Stk **F-201CV-10K-AGD-00-V HI-TEC Digitaler Massendurchflussregler**
- 
- |              |   |
|--------------|---|
| Modell-Reihe | : EL-FLOW Select  |
| Schutzklasse | : IP-40   |
| Medium       | : AiR (Luft)  |
|              | : (frei von Flüssigkeiten und Feststoffen)  |
| Bereich      | : 0,24...12 l/min   |
| Genauigkeit  | : ±0,5% v. Istwert zzgl. ±0,1% v. Endwert<br>(bezogen auf die bei der Kalibrierung vorherrschenden Bedingungen) |

#### SENSORS FOR MASS FLOW AND PRESSURE

Bronkhorst Deutschland Nord GmbH Südfield 1B D-59174 Kamen Deutschland  
T +49 2307/92512-0 F +49 2307/92512-55 I www.bronkhorst-nord.de E info@bronkhorst-nord.de  
Handelsregister Hamm HRB-Nr. 3233 Geschäftsführer: Gunther Kolder/Fergus van Beek  
ABN AMRO Bank N.V. Frankfurt IBAN DE82503240003000013032 BIC FTSBDEFAXXX  
Volksbank Dortmund IBAN DE36441600142421666601 BIC GENODEM1DOR  
USt-IdNr.: DE 124791880 Steuer-Nr. 322/5705/1220

## A.30 DURCHFLUSSREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

D1511093-B  
26 August, 2015



|                |  |
|----------------|--|
| Zertifikat     | : 3-Punkt-Kalibrierung   |
| Temperatur     | : 20...70 °C   |
| Vordruck (P1)  | : 8 bar (a)  |
| Nachdruck (P2) | : 1...5 bar (a)  |
| Ventilfunktion | : Normal geschlossen   |
| Dichtungen     | : Viton  |
| Plunger        | : Viton  |
| Anschlüsse     | : G 1/4" innen   |
| Ausgangssignal | : 4...20 mA aktiv (RS-232 0...100%)                            |
| Eingangssignal | : 4...20 mA passiv   |
| Spannungsvers. | : +15...24 Vdc   |
| Preis          | : <b>EUR 1.262,- minus 5,0% = EUR 1.198,90 Netto pro Stück</b> |

Kalibriert für  
Temperatur: 20 °C

3) 1 Stk F-201CV-5K0-AGD-00-V **HI-TEC Digitaler Massendurchflussregler**



|                |   |
|----------------|---|
| Modell-Reihe   | : EL-FLOW Select  |
| Schutzklasse   | : IP-40   |
| Medium         | : N2 (Stickstoff)   |
|                | : (frei von Flüssigkeiten und Feststoffen)  |
| Bereich        | : 0,08...4 l/min  |
| Genauigkeit    | : ±0,5% v. Istwert zzgl. ±0,1% v. Endwert<br>(bezogen auf die bei der Kalibrierung vorherrschenden Bedingungen) |
| Zertifikat     | : 3-Punkt-Kalibrierung  |
| Temperatur     | : 20...70 °C  |
| Vordruck (P1)  | : 8 bar (a)   |
| Nachdruck (P2) | : 1...5 bar (a)   |
| Ventilfunktion | : Normal geschlossen  |
| Dichtungen     | : Viton   |
| Plunger        | : Viton   |
| Anschlüsse     | : G 1/4" innen  |
| Ausgangssignal | : 4...20 mA aktiv (RS-232 0...100%)   |
| Eingangssignal | : 4...20 mA passiv  |
| Spannungsvers. | : +15...24 Vdc  |
| Preis          | : <b>EUR 1.250,- minus 5,0% = EUR 1.187,50 Netto pro Stück</b>  |

Kalibriert für  
Temperatur: 20 °C

## A.31 DURCHFLUSSREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



HTK HAMBURG GMBH  
 WOELCKENSTRASSE 11  
 22393 HAMBURG - SASEL  
 Tel. 040 / 600 35 - 53  
 Fax. 040 / 600 35 - 83  
 eMail htk@htk-hamburg.com  
 Internet http://www.htk-hamburg.com

HTK Hamburg GmbH | Woelckenstrasse 11 | D - 22393 Hamburg-Sasel

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**HAW Hamburg**  
**Lohbrügger Kirchenstrasse 65**  
**21033 Hamburg**

Ihre Kd. Nr.: 110244

Deutschland

Fax: +49-40-42891-2681

1 / 5

|                  |                       |                  |                                    |
|------------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|
| HTK Angebot Nr.: | 17320-1               | vom:             | 24.08.15                           |
| Ihre Anfrage:    | GSC / Herr Peter Kuhn | Liefertermin:    | ca. 3-4 Wochen nach Auftragsingang |
|                  |                       | Lieferbedingung: | ab Werk, zzgl. Verpackung          |

Erfüllungsort und  
 Gerichtstand: Hamburg (HTK® Allg. Geschäftsbedingungen V33)  
 Zahlungsbedingungen: 30T netto

Wir bieten Ihnen, zu unseren Allgemeinen Geschäftsbedingungen V33 freibleibend wie folgt an:

| Artikel  | Menge                       | Preis / Stk. | Summe / Total |
|--|-----------------------------|--------------|---------------|
| Thermischer Massendurchflussregler<br>GSC Smart controller | 1,00 Stk.                   | 1.239,00 EUR | 1.239,00 EUR  |
| Typ  | GSC-B9SA-BB22               |              |               |
| Medium   | H2/Wasserstoff              |              |               |
| Messbereich  | 0,08-4 l/min                |              |               |
| Genauigkeit  | ±1% vom Endwert             |              |               |
| Temperatur   | 20 °C                       |              |               |
| Vordruck   | 8 - 10 bar a                |              |               |
| Nachdruck  | 1.013 bar a                 |              |               |
| Anschluss  | G1/4" Innengewinde          |              |               |
| Gehäusemat.  | Aluminium                   |              |               |
| Dichtungen   | FKM                         |              |               |
| Speisung   | +24 Vdc                     |              |               |
| Ausgang  | RS485 + 4-20mA              |              |               |
| Sollwert   | RS485 + 4-20mA              |              |               |
| Regelventil  | Typ 0.2(34%)                |              |               |
| Kal.Prot.  | mit                         |              |               |
| -  | Referenz-Druck: 1013 [mBar] |              |               |
| -  | Referenz-Temperatur: 0 [°C] |              |               |

**HTK HAMBURG®GmbH**

Dieses Angebot wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

ISO 9001:2008  
  
 HANDELSREGISTER:  
 HAMBURG HRB 22 243  
 GESCHÄFTSFÜHRER:  
 JOACHIM M. BAUMERT (EEK)  
 GUNNAR A. BAUMERT (EEK)  
 RASMUS F. BAUMERT (EEK)  
 BANKVERBINDUNGEN:  
  
 HAMBURGER SPARKASSE  
 COMMERZBANK AG HAMBURG  
 UST - DE 811 198 502

## A.32 DURCHFLUSSREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



HTK HAMBURG GMBH  
 WOELCKENSTRASSE 11  
 22393 HAMBURG - SASEL  
 Tel. 040 / 600 35 - 53  
 Fax. 040 / 600 35 - 83  
 eMail htk@htk-hamburg.com  
 Internet http://www.htk-hamburg.com

HTK Hamburg GmbH | Woelckenstrasse 11 | D - 22393 Hamburg-Sasel

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**HAW Hamburg**  
**Lohbrügger Kirchenstrasse 65**  
**21033 Hamburg**

Ihre Kd. Nr.: 110244

Deutschland

Fax: +49-40-42891-2681

2 / 5

|                  |                       |                  |                                    |
|------------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|
| HTK Angebot Nr.: | 17320-1               | vom:             | 24.08.15                           |
| Ihre Anfrage:    | GSC / Herr Peter Kuhn | Liefertermin:    | ca. 3-4 Wochen nach Auftragsingang |
|                  |                       | Lieferbedingung: | ab Werk, zzgl. Verpackung          |

| Artikel  | Menge                       | Preis / Stk. | Summe / Total |
|--|-----------------------------|--------------|---------------|
| Thermischer Massendurchflussregler<br>GSC Smart controller | 1,00 Stk.                   | 1.155,00 EUR | 1.155,00 EUR  |
| Typ  | GSC-C9SA-BB23               |              |               |
| Medium   | Air/Luft                    |              |               |
| Messbereich  | 0,12-12 l/min               |              |               |
| Genauigkeit  | ±1,0 % vom Endwert          |              |               |
| Temperatur   | 20 °C                       |              |               |
| Vordruck   | 8- -10 bar a                |              |               |
| Nachdruck  | 1.013 bar a                 |              |               |
| Anschluss  | G1/4" Innengewinde          |              |               |
| Gehäusemat.  | Aluminium                   |              |               |
| Dichtungen   | FKM                         |              |               |
| Speisung   | +24 Vdc                     |              |               |
| Ausgang  | RS485 + 4-20mA              |              |               |
| Sollwert   | RS485 + 4-20mA              |              |               |
| Regelventil  | Typ 0.5(62%)                |              |               |
| Kal.Prot.  | mit                         |              |               |
| -  | Referenz-Druck: 1013 [mBar] |              |               |
| -  | Referenz-Temperatur: 0 [°C] |              |               |
| -  | Dynamik: 100:1              |              |               |

**HTK HAMBURG®GmbH**

Dieses Angebot wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

ISO 9001:2008  
  
 HANDELSREGISTER:  
 HAMBURG HRB 22 243  
 GESCHÄFTSFÜHRER:  
 JOACHIM M. BAUMERT (EEK)  
 GUNNAR A. BAUMERT (EEK)  
 RASMUS F. BAUMERT (EEK)  
 BANKVERBINDUNGEN:  
  
 HAMBURGER SPARKASSE  
 COMMERZBANK AG HAMBURG  
 UST - DE 811 198 502

## A.33 DURCHFLUSSREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

HTK Hamburg GmbH | Woelckenstrasse 11 | D - 22393 Hamburg-Sasel

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**HAW Hamburg**  
**Lohbrügger Kirchenstrasse 65**  
**21033 Hamburg**

**Deutschland**

Fax: +49-40-42891-2681

**HTK<sup>®</sup>**  
**HAMBURG**

HTK HAMBURG GMBH  
 WOELCKENSTRASSE 11  
 22393 HAMBURG - SASEL  
 Tel. 040 / 600 35 - 53  
 Fax. 040 / 600 35 - 83  
 eMail htk@htk-hamburg.com  
 Internet http://www.htk-hamburg.com

Ihre Kd. Nr.: 110244

3 / 5

|                         |                       |                         |                                      |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| <b>HTK Angebot Nr.:</b> | <b>17320-1</b>        | <b>vom:</b>             | <b>24.08.15</b>                      |
| <b>Ihre Anfrage:</b>    | GSC / Herr Peter Kuhn | <b>Liefertermin:</b>    | ca. 3-4 Wochen nach Auftragsseingang |
|                         |                       | <b>Lieferbedingung:</b> | ab Werk, zzgl. Verpackung            |

| Artikel  | Menge                       | Preis / Stk. | Summe / Total |
|--|-----------------------------|--------------|---------------|
| Thermischer Massendurchflussregler<br>GSC Smart controller | 1,00 Stk.                   | 1.155,00 EUR | 1.155,00 EUR  |
| Typ  | GSC-B9SA-BB23               |              |               |
| Medium   | N2/Stickstoff               |              |               |
| Messbereich  | 0,08-4 l/min                |              |               |
| Genauigkeit  | ±1% vom Endwert             |              |               |
| Temperatur   | 20 °C                       |              |               |
| Vordruck   | 8 - 10 bar a                |              |               |
| Nachdruck  | 1.013 bar a                 |              |               |
| Anschluss  | G1/4" Innengewinde          |              |               |
| Gehäusemat.  | Aluminium                   |              |               |
| Dichtungen   | FKM                         |              |               |
| Speisung   | +24 Vdc                     |              |               |
| Ausgang  | RS485 + 4-20mA              |              |               |
| Sollwert   | RS485 + 4-20mA              |              |               |
| Regelventil  | Typ 0.5(20,3%)              |              |               |
| Kal.Prot.  | mit                         |              |               |
| -  | Referenz-Druck: 1013 [mBar] |              |               |
| -  | Referenz-Temperatur: 0 [°C] |              |               |

**HTK HAMBURG<sup>®</sup>GmbH**

Dieses Angebot wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

ISO 9001:2008  
  
 HANDELSREGISTER:  
 HAMBURG HRB 22 243  
 GESCHÄFTSFÜHRER:  
 JOACHIM M. BAUMERT (EEK)  
 GUNNAR A. BAUMERT (EEK)  
 RASMUS F. BAUMERT (EEK)  
 BANKVERBINDUNGEN:  
  
 HAMBURGER SPARKASSE  
 COMMERZBANK AG HAMBURG  
 UST - DE 811 198 502

## A.34 DRUCKREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



### ANGEBOT

|          |  |             |                         |
|----------|--|-------------|-------------------------|
| An       | : Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg | Angebot Nr. | : D1511140-A            |
|          |  | Datum       | : 27 August, 2015       |
| z.Hd.    | : Herrn Kuhn                                       | Seiten      | : 3                     |
| Tel.-Nr. | : 0173/9933274                                     |             |                         |
| Fax-Nr.  | : Haupt-Nr: 040/42875- 9149                        | Referenz    | : e-Mail vom 26.08.2015 |
| E-mail   | : Peter.Kuhn@haw-hamburg.de                        |             |                         |

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg  
 Berliner Tor 5  
 20099 Hamburg  
 Deutschland

Sehr geehrter Herr Kuhn,

wir danken für Ihre Anfrage und bieten zu unseren Geschäftsbedingungen freibleibend an:

|  |       |  |
|--|-------|--|
| 1)   | 1 Stk | <b>P-702C-6K0R-AGD-00-V HI-TEC Digitaler Druckregler</b>   |
|  |       | Modell-Reihe : EL-PRESS<br>Schutzklasse : IP-40<br>medienber. Teile : SS 316L<br>Medium : Luft<br>: (frei von Feststoffen)<br>Bereich : 0,8...4 bar (g)<br>Durchflussbereich : max. ca. 19 l/min<br>Genauigkeit : ±0.5% v. Endwert<br>(bezogen auf die bei der Kalibrierung vorherrschenden Bedingungen)<br>Zertifikat : 3-Punkt-Kalibrierung<br>Temperatur : 20...70 °C<br>Vordruck (P1) : geregelt<br>Nachdruck (P2) : 0 bar (g)<br>Ventilfunktion : Normal geschlossen<br>Druckgeregeltes Volumen : 1 - 5 Liter<br>Regelfunktion : Vordruckregler<br>Dichtungen : Viton<br>Plunger : Viton<br>Anschlüsse : G 1/4" innen<br>Ausgangssignal : 4...20 mA aktiv (RS-232 0...100%)<br>Eingangssignal : 4...20 mA (Eingangswiderstand gegen Null, R = 250 Ohm)<br>Spannungsvers. : +15...24 Vdc<br>Preis : <b>EUR 1.871,- minus 5,0% = EUR 1.777,45 Netto pro Stück</b> |

kalibriert für  
 Temperatur: 20 °C

Düse: 1 mm

Druckvolumen: 0,8...20 Liter

Durchfluss bei einem Vordruck von 0,8 bar (g) und einem Nachdruck von 0 bar (g):  
 ca. 6,9 l/min

#### SENSORS FOR MASS FLOW AND PRESSURE

Bronkhorst Deutschland Nord GmbH Südfeld 1B D-59174 Kamen Deutschland  
 T +49 2307/92512-0 F +49 2307/92512-55 I www.bronkhorst-nord.de E info@bronkhorst-nord.de  
 Handelsregister Hamm HRB-Nr. 3233 Geschäftsführer: Gunther Kolder/Fergus van Beek  
 ABN AMRO Bank N.V. Frankfurt IBAN DE82503240003000013032 BIC FTSBDEFAXXX  
 Volksbank Dortmund IBAN DE36441600142421666601 BIC GENODEM1DOR  
 USt-IdNr.: DE 124791880 Steuer-Nr. 322/5705/1220

## A.35 DRUCKREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

D1511140-A  
27 August, 2015



|    |       |                             |  |
|----|-------|-----------------------------|--|
| 2) | 1 Stk | <u>P-702C-6K0R-AGD-00-V</u> | <b>HI-TEC Digitaler Druckregler</b>  |
|    |       | Modell-Reihe                | : EL-PRESS   |
|    |       | Schutzklasse                | : IP-40  |
|    |       | medienber. Teile            | : SS 316L  |
|    |       | Medium                      | : Wasserstoff (H <sub>2</sub> )<br>(frei von Feststoffen)                                |
|    |       | Bereich                     | : 0,25...4 bar (g)   |
|    |       | Durchflussbereich           | : max. ca. 6,5 l/min   |
|    |       | Genauigkeit                 | : ±0.5% v. Endwert<br>(bezogen auf die bei der Kalibrierung vorherrschenden Bedingungen) |
|    |       | Zertifikat                  | : 3-Punkt-Kalibrierung   |
|    |       | Temperatur                  | : 20...70 °C   |
|    |       | Vordruck (P1)               | : geregelt   |
|    |       | Nachdruck (P2)              | : 0 bar (g)  |
|    |       | Ventilfunktion              | : Normal geschlossen   |
|    |       | Druckgeregeltes Volumen     | : 1 - 5 Liter  |
|    |       | Regelfunktion               | : Vordruckregler   |
|    |       | Dichtungen                  | : Viton  |
|    |       | Plunger                     | : Viton  |
|    |       | Anschlüsse                  | : G 1/4" innen   |
|    |       | Ausgangssignal              | : 4...20 mA aktiv (RS-232 0...100%)  |
|    |       | Eingangssignal              | : 4...20 mA (Eingangswiderstand gegen Null, R = 250 Ohm)                                 |
|    |       | Spannungsvers.              | : +15...24 Vdc   |
|    |       | Preis                       | : <b>EUR 1.871,- minus 5,0% = EUR 1.777,45 Netto pro Stück</b>                           |

kalibriert für  
Temperatur: 20 °C

Düse: 0,3 mm

Druckvolumen: 0,8...20 Liter

Durchfluss bei einem Vordruck von 0,8 bar (g) und einem Nachdruck von 0 bar (g):  
ca. 2,3 l/min

## SENSORS FOR MASS FLOW AND PRESSURE

Bronkhorst Deutschland Nord GmbH Südfeld 1B D-59174 Kamen Deutschland  
T +49 2307/92512-0 F +49 2307/92512-55 I www.bronkhorst-nord.de E info@bronkhorst-nord.de  
Handelsregister Hamm HRB-Nr. 3233 Geschäftsführer: Gunther Kolder/Fergus van Beek  
ABN AMRO Bank N.V. Frankfurt IBAN DE82503240003000013032 BIC FTSBDEFAXXX  
Volksbank Dortmund IBAN DE36441600142421666601 BIC GENODEM1DOR  
USt-IdNr.: DE 124791880 Steuer-Nr. 322/5705/1220

## A.36 DRUCKREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



HTK HAMBURG GMBH  
 WOELCKENSTRASSE 11  
 22393 HAMBURG - SASEL  
 Tel. 040 / 600 35 - 53  
 Fax. 040 / 600 35 - 83  
 eMail htk@htk-hamburg.com  
 Internet http://www.htk-hamburg.com

HTK Hamburg GmbH | Woelckenstrasse 11 | D - 22393 Hamburg-Sasel

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**HAW Hamburg**  
**Lohbrügger Kirchenstrasse 65**  
**21033 Hamburg**

Ihre Kd. Nr.: 110244

Deutschland

Fax: +49-40-42891-2681

4 / 6

|                  |                       |                  |                                    |
|------------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|
| HTK Angebot Nr.: | 17320-2               | vom:             | 27.08.15                           |
| Ihre Anfrage:    | GSC / Herr Peter Kuhn | Liefertermin:    | ca. 3-4 Wochen nach Auftragsingang |
|                  |                       | Lieferbedingung: | ab Werk, zzgl. Verpackung          |

| Artikel  | Menge                                     | Preis / Stk. | Summe / Total |
|--|---|--------------|---------------|
| Thermischer Massendurchflussregler<br>GSC Smart controller | 1,00 Stk.                                 | 2.372,00 EUR | 2.372,00 EUR  |
| Typ  | GSB-B9SA-BB26                             |              |               |
| Medium   | H <sub>2</sub> /Wasserstoff               |              |               |
| Messbereich  | 0,08 - 4 l/min                            |              |               |
| Genauigkeit  | ±1 % v. Endwert mit Dynamik 50:1          |              |               |
| Temperatur   | 20 °C                                     |              |               |
| Anschluss  | G1/4" Innengewinde                        |              |               |
| Gehäusemat.  | Aluminium                                 |              |               |
| Dichtungen   | FKM                                       |              |               |
| Speisung   | +24 Vdc                                   |              |               |
| Ausgang  | RS485 + 4-20mA                            |              |               |
| Regelventil  | Typ 1.2(66,9%)                            |              |               |
| Kal.Prot.  | mit                                       |              |               |
| -  | Referenz-Druck: 1.013 [mBar]              |              |               |
| -  | Referenz-Temperatur: 0 [°C]               |              |               |
| -  | Druckregelung                             |              |               |
| -  | Vordruckregelung                          |              |               |
| -  | Transmitterkörper: lose                   |              |               |
| -  | Kabellänge: 5 m                           |              |               |
| -  | Drucktransmitter: 567-1259, 0..10 bar a   |              |               |
| -  | Überlastungsgrenze: 15 bar a              |              |               |
| -  | Druckmessbereich: 1.013-5 bar a = 4-20 mA |              |               |
| -  | Druckregelbereich: 1.1 - 5.0 bar a        |              |               |
| -  | Genauigkeit: ±0,5 % vom Endwert           |              |               |
| -  | Prozessvolumen: 1 [ln]                    |              |               |

**HTK HAMBURG®GmbH**

Dieses Angebot wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

ISO 9001:2008  
  
 HANDELSREGISTER:  
 HAMBURG HRB 22 243  
 GESCHÄFTSFÜHRER:  
 JOACHIM M. BAUMERT (EEK)  
 GUNNAR A. BAUMERT (EEK)  
 RASMUS F. BAUMERT (EEK)  
 BANKVERBINDUNGEN:  
  
 HAMBURGER SPARKASSE  
 COMMERZBANK AG HAMBURG  
 UST - DE 811 198 502

## A.37 DRUCKREGLER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



HTK HAMBURG GMBH  
 WOELCKENSTRASSE 11  
 22393 HAMBURG - SASEL  
 Tel. 040 / 600 35 - 53  
 Fax. 040 / 600 35 - 83  
 eMail htk@htk-hamburg.com  
 Internet http://www.htk-hamburg.com

HTK Hamburg GmbH | Woelckenstrasse 11 | D - 22393 Hamburg-Sasel

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**HAW Hamburg**  
**Lohbrügger Kirchenstrasse 65**  
**21033 Hamburg**

Ihre Kd. Nr.: 110244

Deutschland

Fax: +49-40-42891-2681

5 / 6

|                  |                       |                  |                                    |
|------------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|
| HTK Angebot Nr.: | 17320-2               | vom:             | 27.08.15                           |
| Ihre Anfrage:    | GSC / Herr Peter Kuhn | Liefertermin:    | ca. 3-4 Wochen nach Auftragsingang |
|                  |                       | Lieferbedingung: | ab Werk, zzgl. Verpackung          |

| Artikel  | Menge                                   | Preis / Stk. | Summe / Total |
|--|---|--------------|---------------|
| Thermischer Massendurchflussregler<br>GSC Smart controller                   | 1,00 Stk.                               | 2.288,00 EUR | 2.288,00 EUR  |
| Typ  | GSB-C9SA-BB26                           |              |               |
| Medium   | Air/Luft                                |              |               |
| Messbereich  | 0,12 - 12 l/min                         |              |               |
| Genauigkeit  | ±1 % v. Endwert mit Dynamik 50:1        |              |               |
| Temperatur   | 20 °C                                   |              |               |
| Anschluss  | G1/4" Innengewinde                      |              |               |
| Gehäusemat.  | Aluminium                               |              |               |
| Dichtungen   | FKM                                     |              |               |
| Speisung   | +24 Vdc                                 |              |               |
| Ausgang  | RS485 + 4-20mA                          |              |               |
| Sollwert   | RS485                                   |              |               |
| Regelventil  | spezial                                 |              |               |
| Kal.Prot.  | mit                                     |              |               |
| -  | Referenz-Druck: 1.013 [mBar]            |              |               |
| -  | Referenz-Temperatur: 0 [°C]             |              |               |
| -  | Druckregelung                           |              |               |
| -  | Vordruckregelung                        |              |               |
| -  | Transmitterkörper : lose                |              |               |
| -  | Kabellänge: 5 m                         |              |               |
| -  | Drucktransmitter: 567-1259, 0..10 bar a |              |               |
| -  | Überlastungsgrenze: 15 bar a            |              |               |
| -  | Druckmessbereich : 1-5 bar a = 4-20 mA  |              |               |
| -  | Druckregelbereich: 1.1 - 5.0 bar a      |              |               |
| -  | Genauigkeit: ±0,5 % vom Endwert         |              |               |
| -  | Prozessvolumen: 1 [ln]                  |              |               |
| Einschrauber, Edelstahl, 6mm Klemmring x<br>1/4" BSPP male, mit Viton-O-Ring | 10,00 Stk.                              | 16,94 EUR    | 169,40 EUR    |

**HTK HAMBURG ®GmbH**

Dieses Angebot wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

ISO 9001:2008  
  
 HANDELSREGISTER:  
 HAMBURG HRB 22 243  
 GESCHÄFTSFÜHRER:  
 JOACHIM M. BAUMERT (EEK)  
 GUNNAR A. BAUMERT (EEK)  
 RASMUS F. BAUMERT (EEK)  
  
 BANKVERBINDUNGEN:  
 HAMBURGER SPARKASSE  
 COMMERZBANK AG HAMBURG  
 UST - DE 811 198 502

# A.38 DURCHFLUSSMESSER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



Mass Flow Meters - Gas

< previous
listing
next >



**Mass flow meter with display for H2 [0.1 .. 10 l<sub>n</sub>/min]**  
**Online price starting at: €633.00**  
Model: MV-194-H2  
 Shipping Weight: 0.7kg  
 Brand: MASS-VIEW

[larger image](#)

Qty Discounts Off Price

|         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1-5     | 6-9     | 10-19   | 20-49   | 50+     |
| €633.00 | €617.18 | €601.35 | €585.53 | €569.70 |

\* Discounts may vary based on options above

**Please Choose:**

**Calibration certificate** yes, please deliver a printed sheet (+€36.00)

**Power supply** PIPS-MV [7.03.424] (+€52.00) (+0.14kg)

**Adapter set** Not necessary

Fully stocked, despatch will be within 2 days.



Add to Cart:

add to cart

Description

Video

Specs

Dimensions

Downloads

Applications

Photos

Complementary Products

### Technical Specifications

| Performance                       | Specifications  |
|-----------------------------------|---|
| Accuracy                          | ± 2% RD for flow > 50% of max. capacity<br>± (1% RD + 0.5% FS) on lower flows |
| Repeatability                     | < 0.2% FS typical   |
| Pre-installed gas                 | H2  |
| Rangeability                      | up to 1:100   |
| Operating pressure                | 0 .. 10 bar(g) / 0 .. 150 psi(g)  |
| Pressure coefficient              | 0.2% / bar typical at Air   |
| Operating temperature             | 0 .. 50°C (32 .. 122°F)   |
| Temperature coefficient           | Zero: <0.1%FS/°C, Span: <0.2%RD/°C  |
| Attitude sensitivity              | < 0.1% FS   |
| Response time (t <sub>63%</sub> ) | 2 s   |

\* Notes:  
 - Mass flow units l<sub>n</sub>/min and SLM refer to normal operating conditions, i.e. 0°C (32°F) and 1013 mbar (14.7 psi)  
 - Technical specifications are based on Air at maximum FS  
 - All specifications subject to change without notice

| Mechanical               | Specifications     |
|--------------------------|--------------------|
| Materials (wetted parts) | aluminium, Viton   |
| Gas connections (in/out) | G 1/4" BSPP female |

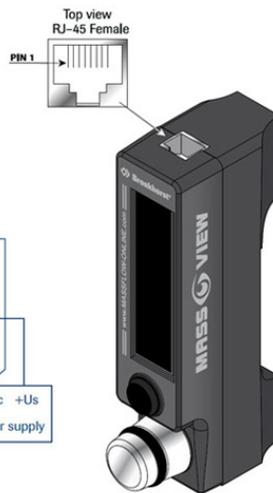
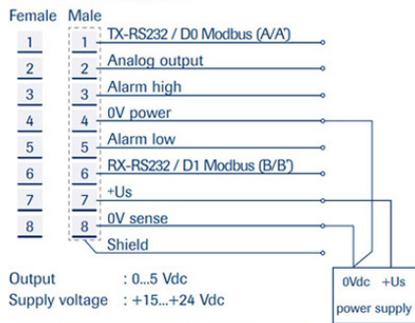
| Electrical              | Specifications  |
|-------------------------|---|
| Electrical connection   | 8-pin RJ-45 modular jack  |
| Output                  | analog: 0 .. 5 Vdc<br>digital: RS232 / RS485 (Modbus-RTU/ASCII) |
| Required supply voltage | 15 .. 24 Vdc (± 10%)  |
| Power consumption       | approx. 135 mA<br>switching current 0.5 A, 24 Vdc               |

## A.39 DURCHFLUSSMESSER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

| Min. and max. relay contracts |  | one side grounded (0 Vdc power)    |
|-------------------------------|--|------------------------------------|
| Safety                        |  | Specifications                     |
| Test pressure                 |  | 21 bar (a) / 300 psi (a)           |
| Ingress protection            |  | IP-50                              |
| Leak integrity (outboard)     |  | < 1 x 10 <sup>-9</sup> mbar l/s He |
| EMC                           |  | CE declaration                     |

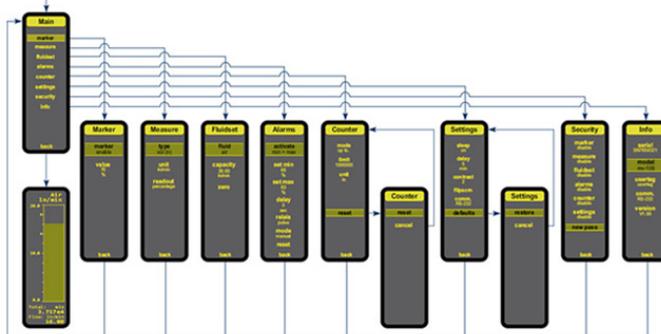
### Electrical Connection

#### Hook-up diagram



### Display Menu

The 4-way button with center push gives access to a user-friendly menu, e.g. for zero function, for selection of pre-installed gases in pre-installed ranges, setting of engineering units, alarm functions (minimum/maximum/counter limit) and counter functions. Password protection is provided to prevent unauthorized changes. Below overview of the MASS-VIEW® menu functions illustrates the great versatility of this product line.



# A.40 DURCHFLOSSMESSER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



Mass Flow Meters - Gas

previous
listing
next



**Mass flow meter with display [Med Flow]**

**Online price starting at: €633.00**

Model: MV-104  
Shipping Weight: 0.7kg  
Brand: MASS-VIEW

 [larger image](#)

**Please Choose:**

**Calibration certificate**

**Power supply**

**Adapter set**

Qty Discounts Off Price

|         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1-5     | 6-9     | 10-19   | 20-49   | 50+     |
| €633.00 | €617.18 | €601.35 | €585.53 | €569.70 |

\* Discounts may vary based on options above

**Limited stock available, book now to avoid disappointment.**

Add to Cart:

add to cart 



|             |       |       |            |           |              |        |                        |
|-------------|-------|-------|------------|-----------|--------------|--------|------------------------|
| Description | Video | Specs | Dimensions | Downloads | Applications | Photos | Complementary Products |
|-------------|-------|-------|------------|-----------|--------------|--------|------------------------|

**> Technical Specifications**

| Performance                       | Specifications  |
|-----------------------------------|---|
| Accuracy                          | ± 2% RD for flow > 50% of max. capacity<br>± (1% RD + 0.5% FS) on lower flows   |
| Repeatability                     | < 0.2% FS typical   |
| Pre-installed gases               | Air, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, Ar, CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> and C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> |
| Standard calibration gas          | Air, other gases are converted using our Fluidat <sup>®</sup> conversion model which will introduce extra inaccuracy  |
| Rangeability                      | up to 1:100   |
| Operating pressure                | 0 .. 10 bar(g) / 0 .. 150 psi(g)  |
| Pressure coefficient              | 0.2% / bar typical at Air   |
| Operating temperature             | 0 .. 50°C (32 .. 122°F)   |
| Temperature coefficient           | Zero: <0.1%FS/°C, Span: <0.2%RD/°C  |
| Attitude sensitivity              | < 0.1% FS   |
| Response time (t <sub>63%</sub> ) | 2 s   |

\* Notes:

- Mass flow units l<sub>n</sub>/min and SLM refer to normal operating conditions, i.e. 0°C (32°F) and 1013 mbar (14.7 psi)
- Technical specifications are based on Air at maximum FS
- All specifications subject to change without notice

| Mechanical               | Specifications     |
|--------------------------|--------------------|
| Materials (wetted parts) | aluminium, Viton   |
| Gas connections (in/out) | G 1/4" BSPP female |

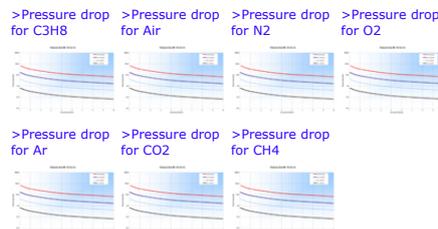
## A.41 DURCHFLUSSMESSER: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

| Electrical                    | Specifications   |
|-------------------------------|--|
| Electrical connection         | 8-pin RJ-45 modular jack   |
| Output                        | analog: 0 .. 5 Vdc<br>digital: RS232 / RS485 (Modbus-RTU/ASCII)    |
| Required supply voltage       | 15 .. 24 Vdc (± 10%)   |
| Power consumption             | approx. 135 mA   |
| Min. and max. relay contracts | switching current 0.5 A, 24 Vdc<br>one side grounded (0 Vdc power) |

---

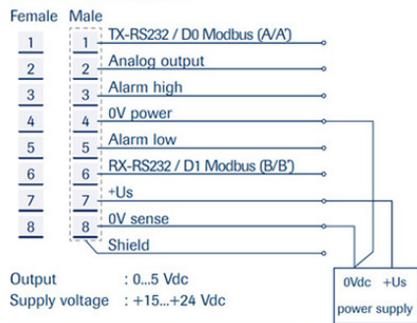
| Safety                    | Specifications                     |
|---------------------------|------------------------------------|
| Test pressure             | 21 bar (a) / 300 psi (a)           |
| Ingress protection        | IP-50                              |
| Leak integrity (outboard) | < 1 × 10 <sup>-9</sup> mbar l/s He |
| EMC                       | CE declaration                     |

### > Pressure Drop



### > Electrical Connection

#### Hook-up diagram



### >Display Menu

The 4-way button with center push gives access to a user-friendly menu, e.g. for zero function, for selection of pre-installed gases in pre-installed ranges, setting of engineering units, alarm functions (minimum/maximum/counter limit) and counter functions. Password protection is provided to prevent unauthorized changes. Below overview of the MASS-VIEW® menu functions illustrates the great versatility of this product line.

## A.42 MISCH EINHEITEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER

D1511093-B  
26 August, 2015

**Optional bieten wir Ihnen an:**

- 6) 1 Stk ~~7.01.188~~ **Gas Mixing Chamber**  
Material: Edelstahl
- Eingang für kleinen Flow  
Durchfluss : max. 1.000 mln/min  
Prozessanschluss : 1/8"
- Eingang für großen Flow:  
Durchfluss : min. 300 mln/min  
max. 10.000 mln/min  
Prozessanschluss : 1/4"
- Ausgang  
Prozessanschluss : 1/4"
- Preis : **EUR 373,- minus 5,0% = EUR 354,35 Netto pro Stück**

**SENSORS FOR MASS FLOW AND PRESSURE**

Bronkhorst Deutschland Nord GmbH Südfeld 1B D-59174 Kamen Deutschland  
T +49 2307/92512-0 F +49 2307/92512-55 I www.bronkhorst-nord.de E info@bronkhorst-nord.de  
Handelsregister Hamm HRB-Nr. 3233 Geschäftsführer: Gunther Kolder/Fergus van Beek  
ABN AMRO Bank N.V. Frankfurt IBAN DE82503240003000013032 BIC FTSBDEFAXXX  
Volksbank Dortmund IBAN DE36441600142421666601 BIC GENODEM1DOR  
USt-IdNr.: DE 124791880 Steuer-Nr. 322/5705/1220

## A.43 MISCH EINHEITEN: ANGEBOTE U. DATENBLÄTTER



HTK HAMBURG GMBH  
 WOELCKENSTRASSE 11  
 22393 HAMBURG - SASEL  
 Tel. 040 / 600 35 - 53  
 Fax. 040 / 600 35 - 83  
 eMail htk@htk-hamburg.com  
 Internet http://www.htk-hamburg.com

HTK Hamburg GmbH | Woelckenstrasse 11 | D - 22393 Hamburg-Sasel

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**HAW Hamburg**  
**Lohbrügger Kirchenstrasse 65**  
**21033 Hamburg**

Ihre Kd. Nr.: 110244

Deutschland

Fax: +49-40-42891-2681

6 / 6

HTK Angebot Nr.: 17320-2 vom: 27.08.15  
 Ihre Anfrage: GSC / Herr Peter Kuhn Liefertermin: ca. 3-4 Wochen nach Auftragsseingang  
 Lieferbedingung: ab Werk, zzgl. Verpackung

| Artikel              | Menge  | Preis / Stk. | Summe / Total        |
|----------------------|--|--------------|----------------------|
| Artikel              | 1,00 Stk.                                    | 125,00 EUR   | 125,00 EUR           |
| -                    | Gasmischblock inkl. Dichtringe und Schrauben |              |                      |
| -                    | 2 x Eingang G1/4" Innengewinde               |              |                      |
| -                    | 1 x Ausgang G1/4" Innengewinde               |              |                      |
| Verpackung / packing | 1,00 Stk.                                    | 10,00 EUR    | 10,00 EUR            |
| Fracht / freight     | 1,00 Stk.                                    | 10,00 EUR    | 10,00 EUR            |
| Summe netto          |  |              | 8.523,40 EUR         |
| zzgl. 19% MwSt.      |  |              | 1.619,45 EUR         |
| <b>Summe</b>         |  |              | <b>10.142,85 EUR</b> |

**HTK HAMBURG®GmbH**

Dieses Angebot wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

ISO 9001:2008  
  
 HANDELSREGISTER:  
 HAMBURG HRB 22 243  
 GESCHÄFTSFÜHRER:  
 JOACHIM M. BAUMERT (EEK)  
 GUNNAR A. BAUMERT (EEK)  
 RASMUS F. BAUMERT (EEK)  
 BANKVERBINDUNGEN:  
 HAMBURGER SPARKASSE  
 COMMERZBANK AG HAMBURG  
 UST - DE 811 198 502



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Kuhn

Vorname: Peter

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

Erarbeitung eines Brennstoffzellen-Versuchsstands für das Modul "Electro-chemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems"

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

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

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

Freiburg den

Ort

Datum

Unterschrift im Original