

T3 - Brennstoffzelle

1 Vorwort

Dieses Skript ersetzt kein Lehrbuch! Sie müssen sich mit Hilfe der im folgenden angeführten Literaturhinweise selbständig in das Thema einarbeiten. Die Grundlagen enthalten Querverweise auf die Aufgaben zur Vorbereitung (AzV). Zum Verständnis (und Bestehen der Vorbesprechung) ist ihre Bearbeitung vor Versuchsbeginn unumgänglich. Die Antworten auf die AzV sollen in den theoretischen Grundlagen Ihres Protokolls verarbeitet sein.

Als Stromquelle wird die Brennstoffzelle mit elektrotechnischen Hilfsmitteln charakterisiert. Sicherer Umgang mit Strom- und Spannungsmessgeräten sowie elektrischen Basisgrößen wird vorausgesetzt.

Druckgasflaschen, reiner Sauerstoff und Wasserstoff stellen Gefahrenquellen für Mensch und Material dar. Frischen Sie vor Versuchsbeginn Ihre Kenntnisse aus der Sicherheitsbelehrung auf!

2 Einleitung

Brennstoffzellen haben eine Zukunft als effiziente Systeme zur Stromerzeugung. Bereits seit den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts werden sie in Raumfahrt- und militärischen Anwendungen eingesetzt, weil sie von allen bekannten Technologien zur Stromerzeugung die höchste Leistungsdichte besitzen und dabei autonom, rückstandsfrei und zuverlässig arbeiten. Diese Eigenschaften machen sie zur realistischen Alternative zu Wärmekraftmaschinen. An ihrer wirtschaftlichen Massenapplicierbarkeit (für Fahrzeugantriebe, dezentrale Hausenergieversorgung, portable Alternativen zu Batterien und Akkus) wird rege geforscht. Die Vision ist eine Energieversorgung auf der Basis von regenerativ gewonnenem Wasserstoff (grüner Wasserstoff), der in Brennstoffzellen verstromt wird. Die GASAG und die Netzgesellschaft Berlin-Brandenburg (NBB) entwickeln mit Partnern einen gemeinsamen Fahrplan für eine klimaneutrale und zuverlässige Energieversorgung. Ein Teil des dazu notwendigen Wasserstoffs wird aus Solarstrom mit Hilfe der Elektrolyse von Wasser gewonnen.¹

Im vorliegenden Versuch erhalten Sie die Möglichkeit, eine solche regenerative Stromerzeugung aus wissenschaftlicher Sicht zu beleuchten. Zunächst werden Sie den Wirkungsgrad einer Wasserelektrolyse bestimmen. Danach betreiben Sie eine Polymerelektrolyt-Membran (auch Protonenaustauschmembran, engl.: Proton Exchange Membrane, PEM) Brennstoffzelle mit Wasserstoff und Sauerstoff und ermitteln ihre verschiedenen thermodynamischen und technischen Parameter.

¹ <https://www.berlin.de/sen/web/presse/pressemitteilungen/2023/pressemitteilung.1334094.php>

3 Grundlagen

3.1 Brennstoffzelle

Verschaffen Sie sich zuerst einen Überblick über die Arten und Funktionsweisen von Brennstoffzellen.² Bearbeiten Sie daraufhin AzV1!

In einer Brennstoffzelle wird (theoretisch) die gesamte von einer Reaktion abgegebene Nutzarbeit in elektrische Energie umgewandelt, indem die Elektronen der Reaktionspartner vor der Bindungsbildung durch einen Stromkreis geleitet werden und in einem externen Verbraucher elektrische Arbeit leisten. Dabei besteht ein Zusammenhang zwischen der Gibbs-Reaktionsenergie und der Spannung, die von dieser Reaktion erreicht werden kann. Leiten Sie entsprechende Gleichungen her, indem Sie AzV2 bis AzV5 bearbeiten!

Der mechanische Wirkungsgrad einer Maschine ist definiert als das Verhältnis von erhaltener nutzbarer Energie zur eingesetzten Energie und kann höchstens gleich eins werden. Im Gegensatz dazu wird der thermodynamische Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle auf die Reaktionsenthalpie bezogen^{1,9}, weil elektrische Energie üblicherweise von Wärmekraftmaschinen erzeugt wird, die nur Reaktionswärmen nutzen können. Somit ist leicht ein Vergleich zwischen beiden Technologien möglich (AzV6). Ähnlich wie bei einer Wärmekraftmaschine besteht auch bei Brennstoffzellen ein Unterschied zwischen dem tatsächlichen und dem theoretisch erreichbaren Wirkungsgrad. Eine Ursache dafür liegt im Innenwiderstand der Brennstoffzelle begründet. Die PEM stellt im geschlossenen Stromkreis selbst einen Widerstand mit seinen unerwünschten Folgen dar (Spannungsabfall und Erwärmung (AzV7)). Um den Unterschied zwischen theoretischem und realem Wirkungsgrad zu quantifizieren, wird die Zellspannung in Abhängigkeit vom Entnahmestrom gemessen. Aus dieser Strom-Spannungs-Kurve können die Zellparameter Innenwiderstand und maximale Leistung ermittelt werden² (AzV8, AzV9). Wird die Strom-Spannungs-Kurve außerdem bei geschlossenem Ausgang aufgenommen, d.h., es werden unverbrauchte Reaktionsgase in die Brennstoffzelle zurückgeführt, dann lässt sich zusätzlich der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle in Abhängigkeit vom Lastwiderstand bestimmen (AzV10).

3.2 Elektrolyse

Die Elektrolyse ist der zur Brennstoffzelle umgekehrte Vorgang. Deshalb können mit ihrer Hilfe die Reaktionsgase für den Betrieb der Brennstoffzelle mit einer optimalen Ökobilanz hergestellt werden (AzV11). Die oben angeführten Definitionen des thermodynamischen sowie mechanischen Wirkungsgrades gelten hier sinngemäß (AzV12).

4 Aufgaben zur Vorbereitung (AzV)

1. Welche Teilreaktionen laufen an der Anode bzw. Kathode der Brennstoffzelle ab? Geben Sie auch die Polaritäten an! Welche Gesamtreaktion ergibt sich daraus? Wie nennt man diese Reaktion? Wie viele Elektronen werden bei einem Mol Formelumsatz ausgetauscht?

² C. Gerthsen, H. O. Kneser, H. Vogel, Physik, 16. Auflage, Springer-Verlag Berlin 1989, S. 301-302 (Stichworte: Innenwiderstand einer Spannungsquelle, Leistungsanpassung).

2. Leiten Sie aus Ihrer Kenntnis der Definitionen von elektrischer Arbeit, Stromstärke und chemischer Nutzarbeit einen Zusammenhang (Gl. 1) zwischen Standard-Gibbs-Energie einer Reaktion und der damit erzielbaren Spannung her.^{3,4}
3. Wie groß ist die theoretisch mit der PEM-Brennstoffzelle erreichbare Spannung unter Standardbedingungen?
4. Leiten Sie aus der Abhängigkeit der Gibbs-Reaktionsenergie von den Aktivitäten der reagierenden Stoffe^{5,6 bzw. 11} mit Hilfe von Gl. 1 die Abhängigkeit der Zellspannung von den Aktivitäten her (Gl. 2) (Sie erhalten damit im Prinzip die Nernst Gleichung, eine Grundgleichung der Elektrochemie. Hier interessiert jedoch lediglich ihre thermodynamische Interpretation.)
5. Wie groß ist die theoretische Spannungsverringerung, wenn die Gasversorgung der Brennstoffzelle von reinem Sauerstoff auf Luft umgestellt wird?
6. Berechnen Sie den theoretischen thermodynamischen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle und vergleichen Sie ihn mit dem Wirkungsgrad von Wärmekraftwerken!
7. Wie stark ändert sich die Spannung der Brennstoffzelle bei Temperaturveränderung? Benutzen Sie hierfür die Temperaturabhängigkeit der Gibbs-Reaktionsenergie (charakteristische Funktionen der Thermodynamik)⁷ und Gl. 1
8. Übernehmen Sie den Ersatzschaltplan für einen Stromkreis aus Brennstoffzelle mit Innenwiderstand und elektrischem Verbraucher ins Protokoll.²
9. Leiten Sie den Zusammenhang zwischen Innenwiderstand und Außenwiderstand bei bester Leistungsanpassung her!
10. Überlegen Sie sich sorgfältig, welche Gleichungen für die Berechnung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Lastwiderstand notwendig sind und welche Messgrößen Sie dafür am Versuchstag registrieren müssen!
11. Welche Teilreaktionen laufen an der Anode und Kathode des Elektrolyseapparates ab? Geben Sie auch die Polaritäten und die Gesamtreaktion an!

5 Aufgaben zur Versuchsauswertung

Hinweis: Abweichungen vom erwarteten Verhalten und unerwartete Beobachtungen sollen prinzipiell diskutiert werden! Bei allen beteiligten Gasen zur Auswertung wird von idealem Verhalten ausgegangen.

5.1 Elektrolyse

1. Führen Sie die Wasserelektrolyse durch!
2. Bestimmen Sie das Verhältnis von erzeugter chemischer Energie zu eingesetzter elektrischer Energie der Elektrolyse!

³ R. Reich, Thermodynamik, 2. Auflage, VCH Weinheim 1993. Kap. 10.1, S. 91-95.

⁴ R. Reich, Thermodynamik, 2. Auflage, VCH Weinheim 1993, Kap. 10.5, S. 104-107.

⁵ G. Wedler, Lehrbuch der Physikalischen Chemie, 3. Auflage, VCH 1987, Kap. 2.6.2, S. 340-354.

⁶ P. W. Atkins, Physikalische Chemie, 2. Auflage, VCH 1996, Kap. 9.1.2, S. 258-266.

⁷ G. Wedler, Lehrbuch der Physikalischen Chemie, 3. Auflage, VCH 1987, Kap. 2.3.2, S. 252-256.

5.2 Brennstoffzelle

1. Messen Sie die Leerlaufspannung der Brennstoffzelle bei Betrieb mit Wasserstoff und Sauerstoff aus den Druckgasflaschen und offenen Gasableitungen! Vergleichen Sie diese mit der theoretisch zu erwartenden Leerlaufspannung!
2. Messen Sie die Leerlaufspannung der Brennstoffzelle bei Betrieb mit Wasserstoff aus der Druckgasflasche und Luft sowie offenen Gasableitungen! Vergleichen Sie die Differenz zum unter 1. gemessenen Wert mit der theoretisch zu erwartenden Differenz!
3. Betreiben Sie die Brennstoffzelle mit Wasserstoff und Sauerstoff aus den Druckgasflaschen und offenen Gasableitungen! Verwenden Sie die folgenden Lastwiderstände (in Ω): 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100!
 - a. Stellen Sie den Verlauf der von der Brennstoffzelle gelieferten Spannung in Abhängigkeit vom Lastwiderstand graphisch dar!
 - b. Ermitteln Sie daraus die Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle!
 - c. Bestimmen Sie den Innenwiderstand der Brennstoffzelle! (Elektrokinetische Vorgänge an den Elektroden der Brennstoffzelle führen zu einer Variabilität des Innenwiderstandes. Benutzen Sie zur Auswertung nur den Bereich, in dem der Innenwiderstand weitgehend konstant ist.)
 - d. Tragen Sie die elektrische Leistung über dem Lastwiderstand auf! Bei welchem Lastwiderstand entfaltet die Brennstoffzelle ihre größte Leistung? Vergleichen Sie diesen Wert mit dem erwarteten Wert (AzV9)! Vergleichen Sie die Maximalleistung mit den Herstellerangaben!
4. Betreiben Sie die Brennstoffzelle mit Wasserstoff und Sauerstoff aus den Büretten der Elektrolyseapparatur unter Rückführung unverbrauchter Gase (Kreislaufbetrieb mit Pumpen)! Verwenden Sie die folgenden Lastwiderstände (in Ω): 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 30, 50, 100!
 - a. Berechnen Sie die chemische Energie, die Sie der Brennstoffzelle während der Belastung mit jedem einzelnen Widerstand zugeführt haben!
 - b. Berechnen Sie die Verhältnisse von abgegebener elektrischer Energie zu aufgenommener chemischer Energie der Brennstoffzelle in Abhängigkeit vom Lastwiderstand! (Das entspricht der Definition des Wirkungsgrades einer mechanischen Vorrichtung. Erstellen sie hierfür eine Tabelle, die auch Zwischenergebnisse und die unter Punkt 4.a berechneten chemischen Energien enthält!)
 - c. Tragen Sie die unter 4.b berechneten Verhältnisse über dem Lastwiderstand graphisch auf!
 - d. Ermitteln Sie den Mittelwert der unter 4.b berechneten Verhältnisse der Brennstoffzelle!
5. Beantworten Sie auf der Grundlage der von Ihnen ermittelten Parameter der Brennstoffzelle noch folgende Fragen!
 - a. Bei welchem Lastwiderstand würden Sie die Brennstoffzelle betreiben?
 - b. Wie groß ist der Gesamtwirkungsgrad der Prozesse Elektrolyse und Verstromung? (Berücksichtigen Sie hierfür die Ergebnisse von Punkt 4.d und Punkt 2 unter Aufgaben zur Versuchsauswertung/Elektrolyse!) Welche Ursachen für Verluste gibt es?

6 Experimentelles

6.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau (Abb. 1) besteht aus zwei Grundbrettern. Auf dem horizontalen Brett befinden sich die Brennstoffzelle, die Lastwiderstände und die Pumpensteuerung. Am vertikalen Brett sind die Elektrolyseapparatur sowie die Gaszuführungs- und Gasableitungssysteme (links Wasserstoff, rechts Sauerstoff bzw. Luft) der Brennstoffzelle angebracht. Eine Bezeichnung der einzelnen Elemente entnehmen Sie bitte der Abbildung und nachfolgender Tabelle.

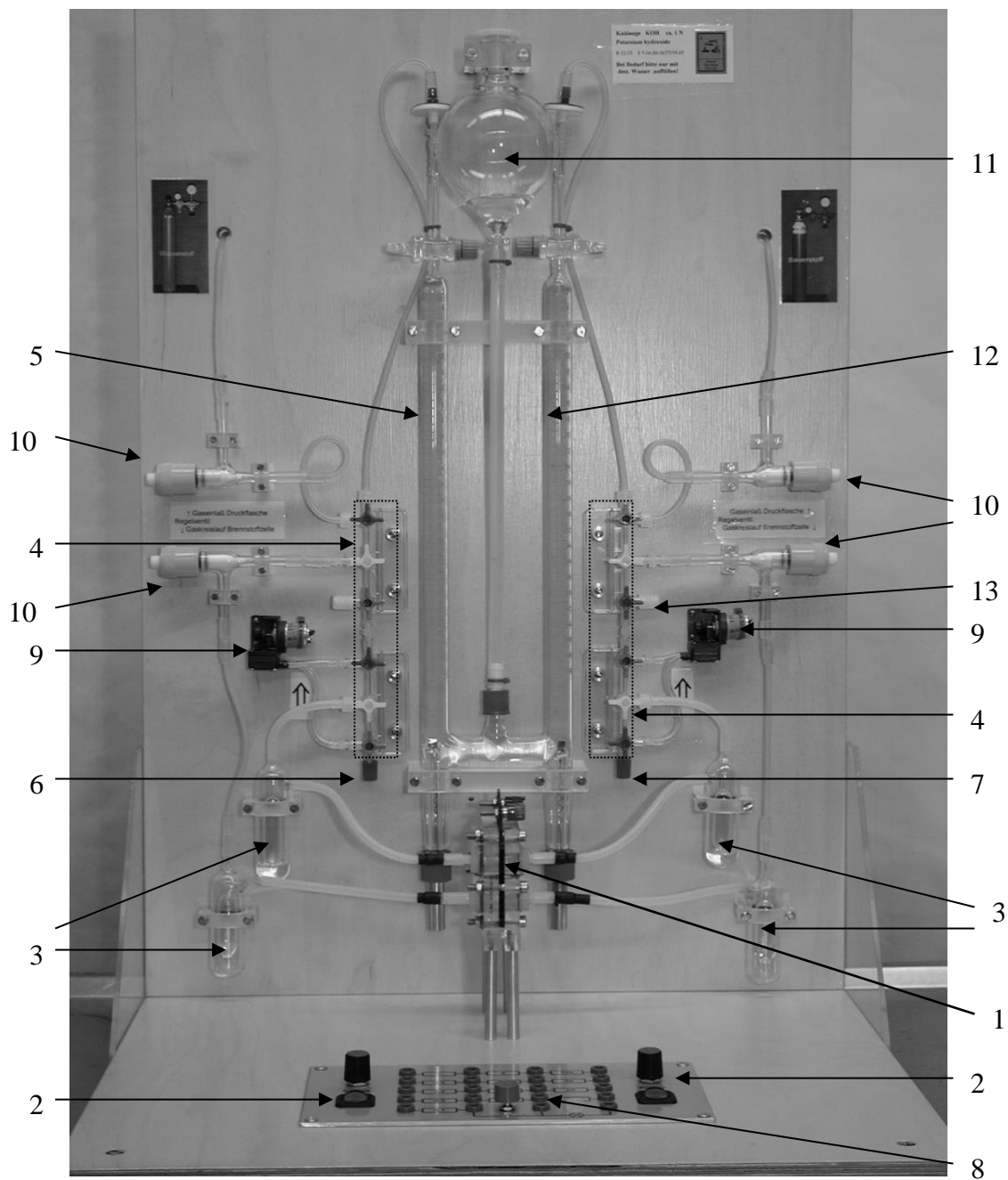


Abb. 1: Versuchsaufbau

1	Brennstoffzelle (h-tec; F 107) ⁸	8	Lastwiderstände (mit Taster)
2	Steuereinheit für die Umwälzpumpen	9	Umwälzpumpen
3	Blasenzähler für Gasflussregelung	10	Nadelventile zur Gasflussregelung
4	Gasverteiler mit Dreiwegehähnen	11	Ausgleichsgefäß (1 mol/l H ₂ SO ₄)
5	Gasbürette (H ₂)	12	Gasbürette (O ₂)
6	Gasauslass (H ₂)	13	Gasauslass bei Betrieb mit Luft
7	O ₂ -Gasauslass bzw. Luft-Gaseinlass		

6.2 Versuchsdurchführung

6.2.1 Vorbereitungen

1. Schauen Sie sich die Apparatur in Ruhe an! Überlegen Sie sich Gasflusswege (s. Anlagen) und elektrische Stromkreise.
2. Schließen Sie zunächst ein Spannungsmessgerät an die Brennstoffzelle an. Benutzen Sie dafür die Enden der bereits ansteckten Kabel - die fragilen Anschlüsse der Brennstoffzelle selbst sind tabu! Das Messgerät bleibt während des gesamten Versuchs angeschlossen!
3. Sollten sich noch mehr als 10 ml Gas in den Büretten der Elektrolyseapparatur befinden, entlassen Sie diese in die Atmosphäre. Aufpassen, dass die 5% H₂SO₄ (1 mol/l nicht in die Leitungen gelangt!
4. Stellen Sie die Versorgung der Brennstoffzelle mit H₂ und O₂ aus den Flaschen gemäß Anlage 1, "Betrieb Brennstoffzelle aus der Druckgasflasche, Durchfluss" ein. Um einen Druckaufbau in der Brennstoffzelle zu vermeiden, beginnen Sie am besten mit den Gasableitungen. Regeln Sie mit den Ventilen "Gaseinlass Druckflasche" und "Gaskreislauf Brennstoffzelle" die Blasenfrequenzen an den Blasenzählern auf den Gaszuführungsseiten der Brennstoffzelle auf ca. 1-2 Blasen pro Sekunde. Eine Absperrung der Gasversorgung erfolgt mit der wandseitigen Manschette, indem diese um 90° gedreht wird.
5. Wenn die Spannung der Brennstoffzelle 800 mV übersteigt, können Sie testen, ob sie auch einen Strom zu treiben in der Lage ist. Schließen Sie einfach die Lampe an.

6.2.2 Elektrolyse

1. Überprüfen Sie, ob die Elektrolyseapparatur mit der korrekten Polung angeschlossen ist! Lassen Sie sich nicht von den Farben der Stromkabel blenden. Überlegen Sie sich noch einmal, welche Messgrößen Sie zur Bestimmung des Wirkungsgrades registrieren müssen!
2. Stellen Sie die Spannung und die Stromstärke am Stromversorgungsgerät ein, indem Sie das Gerät einschalten. Die Elektrolysespannung sollte ≈ 15 V, die Stromstärke ≤ 0.5 A betragen.
3. Lassen Sie die Elektrolyse so lange laufen, bis die H₂-Bürette vollständig gefüllt ist (max. 50 ml). Da das einige Zeit in Anspruch nimmt, können Sie bereits mit dem nächsten Versuchsteil beginnen, aber beobachten Sie ständig den Verlauf der Elektrolyse!
4. Schalten Sie das Stromversorgungsgerät ab.

6.2.3 Spannungen bei offenem Stromkreis

1. Die Brennstoffzelle sollte nach den Vorbereitungsmaßnahmen noch gemäß Anlage 1 mit H₂ und O₂ aus den Druckgasflaschen und offenen Gasableitungen betrieben sein. Falls nicht, führen Sie die unter *Vorbereitungen* aufgeführten Maßnahmen durch!
2. Falls Sie noch die Lampe betreiben, dann öffnen Sie den Stromkreis wieder.
3. Messen Sie die Spannung, die von der Brennstoffzelle erreicht wird. Warten Sie bis sich die Spannung stabilisiert hat ca. 10 min.
4. Bereiten Sie nun die Messung der Spannung bei Betrieb der Brennstoffzelle mit H₂ aus der Druckgasflasche und Luft vor, indem Sie zunächst die Versorgung mit O₂ am ersten Dreiwegehahn nach dem Nadelventil "Gaseinlass Druckflasche" stoppen.
5. Stellen Sie den Gasweg für die Versorgung der Brennstoffzelle mit Luft gemäß Anlage 3 ein.
6. Schalten Sie die Pumpe auf der Luftversorgungsseite ein und regeln Sie ihre Drehgeschwindigkeit so ein, dass der Blasenähler am Einlass zur Brennstoffzelle ca. vier Blasen pro Sekunde erkennen lässt.
7. Messen Sie die Spannung, die von der Brennstoffzelle erreicht wird. Wahrscheinlich sinkt die Spannung, dann warten Sie bis diese sich stabilisiert hat oder wenigstens 10 min.

6.2.4 Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle⁸

1. Schalten Sie die Pumpe ab und versorgen Sie die Brennstoffzelle wieder mit O₂ aus der Druckgasflasche bei geöffneten Gasableitungen gemäß Anlage 1. An den Blasenählern zur Brennstoffzelle sollen jeweils 1 -2 Blasen pro Sekunde zu erkennen sein. Regeln Sie gegebenenfalls an den Ventilen nach.
2. Überlegen Sie sich noch einmal, welche Messgrößen Sie zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle registrieren müssen! Überlegen Sie sich auch, wie Sie die vorgegebenen Lastwiderstände verbinden müssen, um die Messungen ausführen zu können!
3. **Sicherheitshinweis!** Alle Lastwiderstände müssen über den Taster mit der Brennstoffzelle verbunden werden! Ein Verbindungskabel zur Brennstoffzelle sollte also immer mit der rechten Seite des Tasters verbunden bleiben. In diesem Versuchsteil schließen Sie die Stromkreise jeweils nur für 5 s!
4. Verbinden Sie den 0.1 Ω - Widerstand über den noch offenen Taster mit der Brennstoffzelle.
5. Schließen Sie für 5 s den Taster und beobachten Sie die Abnahme der Spannung. Den nach 5 s erreichten Wert notieren Sie sich. (Nach den bisher vorliegenden Erfahrungen liegt dieser Wert sehr gut im Bereich der erzielbaren Messgenauigkeit.)
6. Beobachten Sie die Zunahme der Spannung bei wieder geöffnetem Stromkreis. **Sicherheitshinweis!** Sollte die von der Brennstoffzelle erreichte Spannung über 1100 mV steigen, dann hat sie sich aufgrund des vorhergegangenen Stromflusses durch den Innenwiderstand zu stark erwärmt. Warten Sie in diesem Falle, bis die Spannung wieder unter 1100 mV gefallen ist, bevor Sie mit der nächsten Messung beginnen! Protokollieren Sie auch den maximalen Spannungswert.

⁸ Bedienungsanleitung für PEMFC Kit Art.-Nr. 1919 der Firma h-tec (liegt am Arbeitsplatz aus; auch www.h-tec.com)

7. Wiederholen Sie die Schritte 4. bis 6. mit folgenden Lastwiderständen (in Ω): 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100. Beachten Sie dabei bitte immer den Sicherheitshinweis.
8. Nach Beendigung der Messungen drehen Sie Gasflüsse am ersten Dreiwegehahn nach den Ventilen "Gaseinlass Druckflasche" ab. Achten Sie auf einen geöffneten Stromkreis an der Brennstoffzelle!

6.2.5 Wirkungsgrad der Brennstoffzelle

1. Versorgen Sie die Brennstoffzelle mit dem Gas aus der Wasserstoff-Bürette (auf der Sauerstoffseite bleibt die Versorgung über die Druckgasflasche bestehen) des Elektrolyseapparates im Kreislauf gemäß Anlage 4 und achten Sie auf eine stabile Leerlaufspannung. Schalten Sie die Pumpe auf der H_2 - Seite ein und regeln Sie ihre Drehgeschwindigkeit so ein, dass sich in den Blasenzählern an den Einlassstutzen zur Brennstoffzelle Blasenfrequenzen von einer bis vier Blasen pro Sekunde erkennen lassen.
2. Überlegen Sie sich noch einmal, welche Messgrößen Sie zur Berechnung der Wirkungsgrade der Brennstoffzelle bei verschiedenen Lastwiderständen registrieren müssen! Überlegen Sie sich auch, wie Sie die vorgegebenen Lastwiderstände verbinden müssen, um die Messungen ausführen zu können!
3. **Sicherheitshinweis!** Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, führt ein hoher Stromfluss zu einer Erwärmung der Brennstoffzelle. Im Extremfall kann die PEM dadurch zerstört werden. Betreiben Sie die Brennstoffzelle daher mit jedem Lastwiderstand nicht länger als zum Verbrauch von 1 ml H_2 aus der Bürette unbedingt nötig ist! Beachten Sie auch Punkt 6. des vorhergehenden Abschnitts *Versuchsdurchführung, Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle*. Beginnen Sie also die Messungen erst, wenn die von der Brennstoffzelle erreichte Spannung unter 1100 mV gesunken ist!
4. Schließen Sie einen Stromkreis aus Brennstoffzelle und Lastwiderstand von 0.3 Ω so lange, bis 1 ml H_2 verbraucht wurde und protokollieren Sie alle zur Berechnung des Wirkungsgrades notwendigen Messgrößen.
5. Warten Sie gegebenenfalls, bis die Spannung bei geöffnetem Stromkreis wieder auf einen stabilen Wert der Leerlaufspannung, bevor Sie Schritt 4. mit dem nächsten Lastwiderstand in der Reihe 0.5, 1, 3, 5, 10, 30, 50, 100 (alle in Ω) wiederholen. (Sollte nicht mehr genügend Gas in den Büretten vorhanden sein, können Sie diese mit Gas aus der Druckflasche entsprechend Anlage 5 auffüllen.)
6. Nach Beendigung dieses Versuchsteils schließen Sie die Büretten an den daran angebrachten Küken/Hähnen. Achten Sie auf einen geöffneten Stromkreis an der Brennstoffzelle!

6.2.6 Versuchende

1. Schließen Sie die Gaszuführungen zur Brennstoffzelle!
2. Öffnen Sie die Gasableitungen der Brennstoffzelle zur Atmosphäre! (Ein Austrocknen der Brennstoffzelle wird durch die wassergefüllten Blasenähler verhindert.)
3. Trennen Sie das Spannungsmessgerät von der Brennstoffzelle. Berühren Sie dabei **nicht** die fragilen Anschlüsse an der Brennstoffzelle selbst! Achten Sie auf einen geöffneten Stromkreis der Brennstoffzelle!

6.3 Literatur

notwendig:

- [1] H. Wendt, M. Götz, "Brennstoffzellentechnik", Chemie in unserer Zeit, 31(6):301-309, 1997.
- [2] C. Gerthsen, H. O. Kneser, H. Vogel, Physik, 17. Aufl., Springer-Verlag Berlin 1993, S. 301 – 302, Kap. 6.3.4d (Stichworte: Innenwiderstand einer Spannungsquelle, Leistungsanpassung).
- [3] R. Reich, Thermodynamik, 2. Auflage, VCH Weinheim 1993. Kap. 10.1, S. 91-95.
- [4] R. Reich, Thermodynamik, 2. Auflage, VCH Weinheim 1993, Kap. 10.5, S. 104-107.
- [5] G. Wedler, Lehrbuch der Physikalischen Chemie, 3. Auflage, VCH 1987, Kap. 2.6.2, S. 340-354.
- [6] P. W. Atkins, Physikalische Chemie, 2. Auflage, VCH 1996, Kap. 9.1.2, S. 258-266.
- [7] G. Wedler, Lehrbuch der Physikalischen Chemie, 3. Auflage, VCH 1987, Kap. 2.3.2, S. 252-256.
- [8] Bedienungsanleitung für PEMFC Kit Art.-Nr. 1919 der Firma h-tec (liegt am Arbeitsplatz aus; auch www.h-tec.com)

empfohlen:

- [9] C. H. Hamann, W. Vielstich, Elektrochemie II, Taschentext, Verlag Chemie. Physik Verlag, 2005, 4. Auflage.
- [10] R. Reich, Thermodynamik, 2. Auflage, VCH Weinheim 1993, Kap. 11.4, S. 119-122.

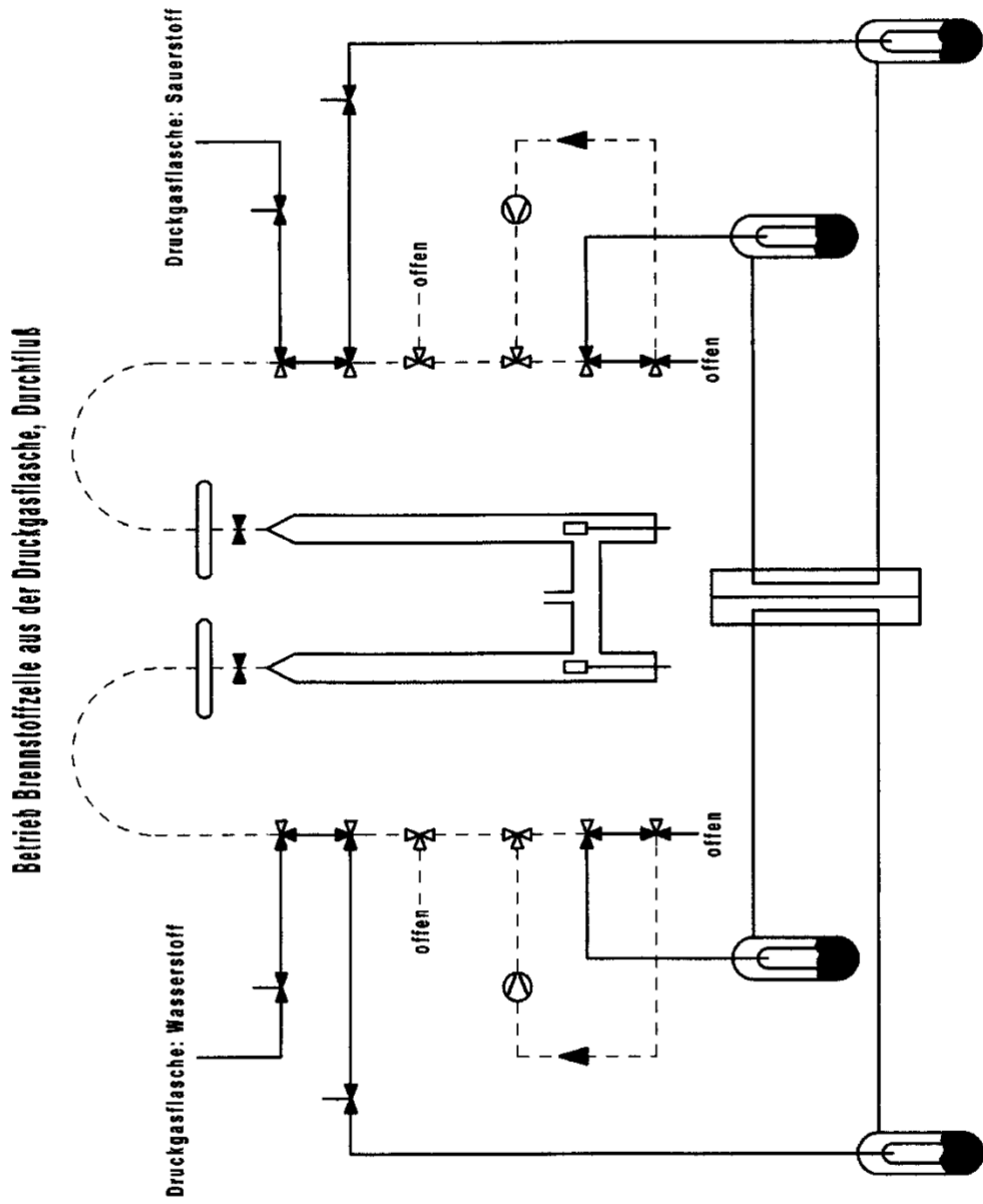
Tabellensammlung:

Thermodynamische Werte finden Sie im z. B. im Tabellenanhang von P. W. Atkins, Physikalische Chemie, 5. Auflage, VCH 2013.

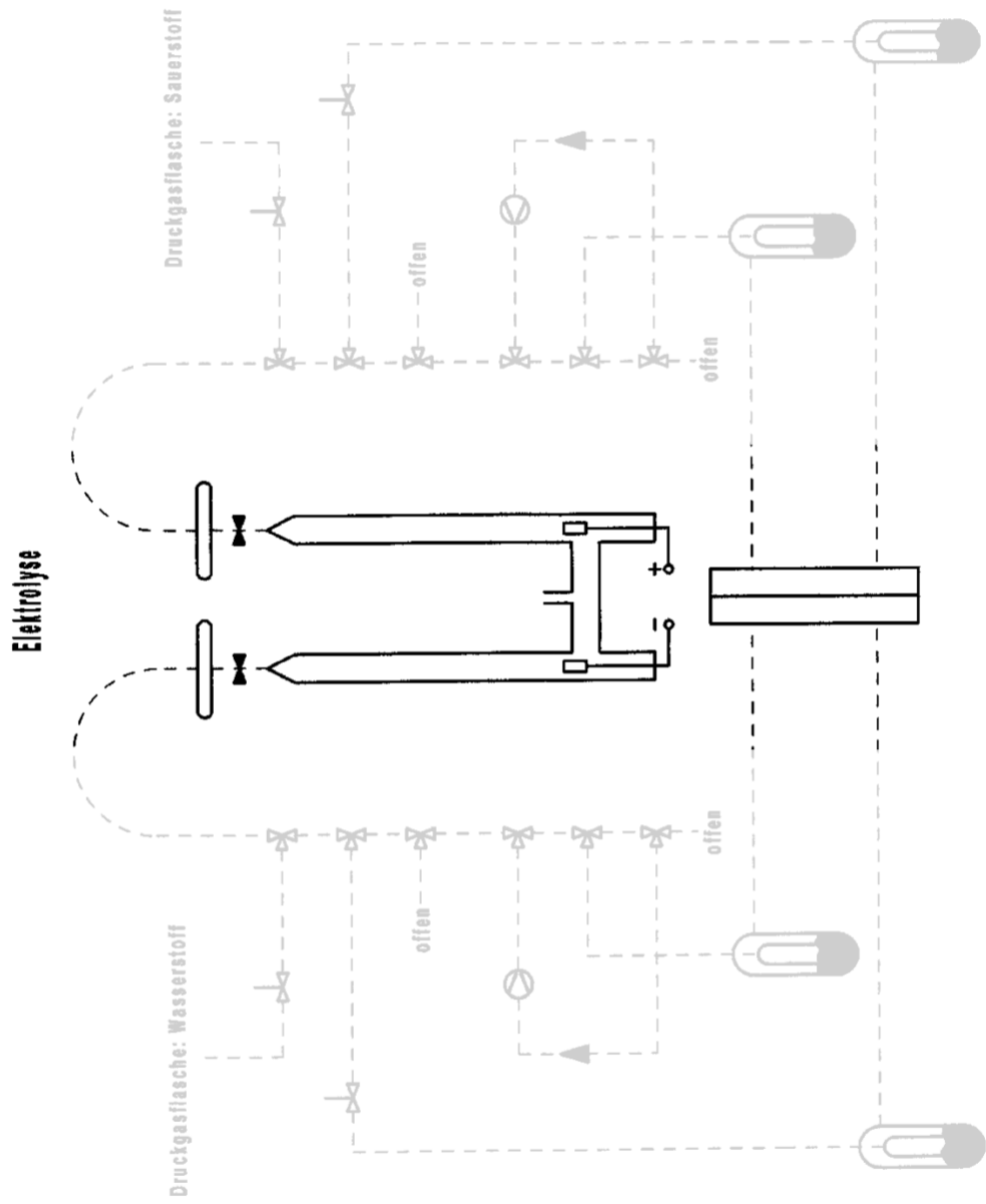
6.4 Anlagen

1. Betrieb Brennstoffzelle aus der Druckgasflasche, Durchfluss
2. Elektrolyse
3. Betrieb der Brennstoffzelle mit Luftsauerstoff (Pumpe) und Wasserstoff aus der Druckgasflasche, Durchfluss
4. Betrieb aus der Bürette, Gaskreislauf (Pumpe)
5. Bürette befüllen aus der Druckgasflasche

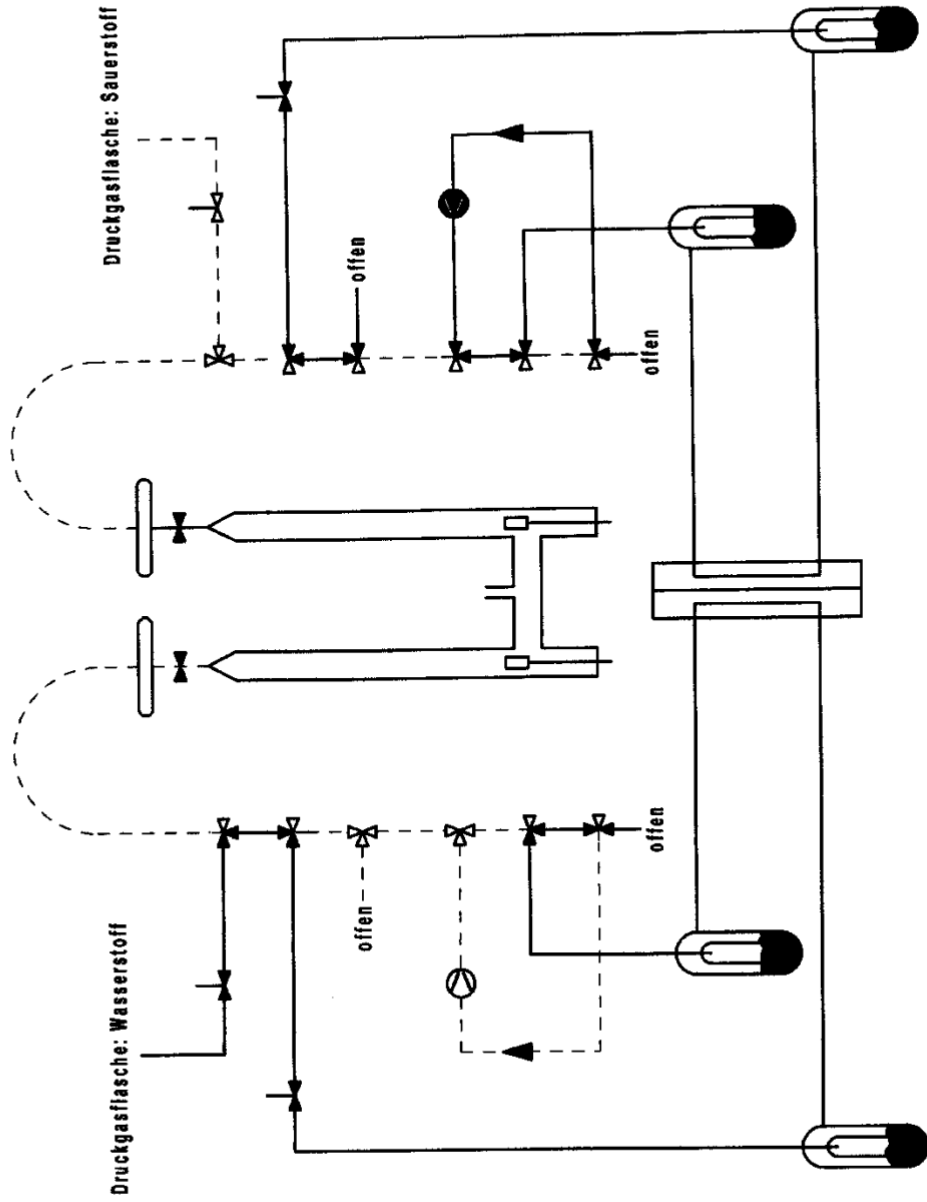
Anlage 1



Anlage 2



Betrieb mit Luftsauerstoff (Pumpe an) und Wasserstoff aus der Druckgasflasche, Durchfluß



Betrieb aus der Bürette (H₂, Pumpe an) und aus der Druckgasflasche (O₂)

