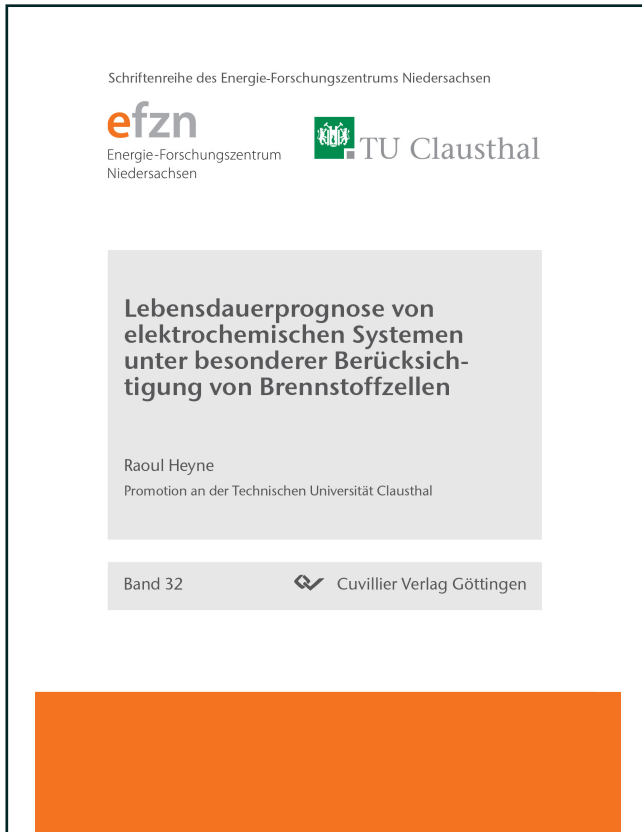




Raoul Heyne (Autor)

# **Lebensdauerprognose von elektrochemischen Systemen unter besonderer Berücksichtigung von Brennstoffzellen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7066>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# 1 Einleitung

Durch den Plan der Bundesregierung bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die deutschen Straßen zu bringen [14] und Deutschland zu einem Leitmarkt für Elektromobilität zu machen, ist das Thema Elektromobilität in den letzten Jahren vor allem in der Forschung sehr vorangetrieben worden. Dabei sind von den batteriebetriebenen Fahrzeugen hauptsächlich drei verschiedene Klassen relevant: Hybrid-Fahrzeuge mit einer lediglich kleinen Batterie zur Rückgewinnung von Bremsenergie und Optimierung des Motorbetriebs, Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge, die kurze Strecken auch rein elektrisch fahren und deren Batterien im Stillstand über das Stromnetz aufgeladen werden können und die reinen Batterie-Elektrofahrzeuge ohne Verbrennungsmotor. Brennstoffzellenfahrzeuge, also Elektrofahrzeuge, deren rein elektrischer Antriebsstrang von einer Brennstoffzelle mit elektrischer Energie versorgt wird, haben gegenüber batteriebetriebenen Fahrzeugen einen entscheidenden Vorteil: Sie können wie herkömmliche Verbrennungsmotorfahrzeuge innerhalb von Minuten komplett betankt werden. Auch die Reichweite von Brennstoffzellenfahrzeugen liegt mit den verwendeten Hochdrucktanks schon bei ca. 400 km, was bei einem batteriebetriebenen Fahrzeug mit vergleichbarer Leistung immer noch eine sehr große und damit teure Batterie erfordern würde. Ebenso finden Brennstoffzellen als Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Einzug. Auf Grund der hohen elektrischen Wirkungsgrade von Brennstoffzellen mit bis zu 60 % lässt sich mit diesen Anlagen Strom bei deutlich geringerer Wärmeentwicklung produzieren als das mit heutigen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis von Verbrennungsmotoren der Fall ist. Zudem sind Brennstoffzellen wesentlich leiser und zeigen durch die geringe Anzahl an beweglichen Teilen einen weitaus kleineren Verschleiß.

Sowohl Batterien als auch Brennstoffzellen erfüllen inzwischen alle technischen Anforderungen, die an Energiesysteme für verschiedene Anwendungen gestellt werden. Hemmnis



für die breite und schnelle Markteinführung sind die Kosten sowie die Lebensdauer im tatsächlichen Betrieb. Neben technischen Verbesserungen zur Erhöhung der Lebensdauer stellt aber auch die bisher mangelhafte Prognose der Lebensdauer bei Änderungen von Betriebsstrategien, Materialien und anderen konstruktiven Änderungen ein Hindernis dar.

In dieser Arbeit wird deshalb eine Möglichkeit zur Lebensdauerprognose von Brennstoffzellen entwickelt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den unterschiedlichen Stromverteilungen innerhalb der Brennstoffzelle, die zu lokal unterschiedlichen Alterungsprozessen führen und normalerweise eine Prognose erschweren. In Kapitel 4 werden die Inhomogenitäten in der Stromverteilung einer Brennstoffzelle in Abhängigkeit von fünf wesentlichen Betriebsparametern untersucht. Dazu werden neben einem konstanten Strom zusätzlich die Inhomogenitäten bei veränderlichem Strom, also einem Mischstrom bestehend aus einem Direct Current- (DC-) und Alternating Current- (AC-)Anteil, untersucht. Mit Hilfe spezieller Messplatten zur flächendeckenden Strommessung an zwei verschiedenen Stellen des Brennstoffzellenstacks wird das Stromverhalten bezüglich eines Ausgleichs der Strominhomogenitäten über mehrere Zellen des Stacks hinweg und der Beständigkeiten der Strominhomogenität ermittelt. Schließlich wird die Dynamik der Brennstoffzelle anhand des realen Lastprofils einer Batterie aus einem Elektrofahrzeug analysiert.

Im Anschluss wird in Kapitel 5 durch konstruktive Änderungen der Brennstoffzellengaszufuhr versucht, die Strominhomogenitäten in der Brennstoffzelle zu verringern. Dazu wird ein neuartiger Brennstoffzellenstack konzipiert, bei dem jede Zelle individuell mit Brenngas versorgt werden kann. Anschließend wird diese Zelle im Kreuzbetrieb untersucht, bei welchem jede Zelle mit abwechselnden Gasflussrichtungen versorgt wird, und Normal- und Kreuzbetrieb bei Mischströmen verglichen. Außerdem werden die Änderungen der Strominhomogenitäten durch den Brennstoffzellenstack hindurch untersucht. Dabei kann die Theorie, dass sich der höchste Strom am Wasserstoffgaseinlass ausbildet und entlang des Gaskanals immer weiter abnimmt, weil die Konzentration des Wasserstoffs durch den Verbrauch bei der Reaktion im Einklang mit dem Faraday'schen Gesetz abnimmt, überprüft werden. Ferner wird postuliert, dass sich durch die alternierenden Bedingungen von einer Zelle zur nächsten die Strominhomogenitäten verringern, weil der Stromausgleich über die Bipolarplatte und andere Komponenten zu gering ist.

Für die Lebensdauerprognose bei lokal unterschiedlichen strom- und konzentrationsabhängigen Alterungsbedingungen wird ein orts aufgelöstes Modell zur Abbildung der Strominhomogenität in Kapitel 6 vorgestellt und gezeigt, wie ein dreidimensionales Modell einer Brennstoffzelle aufgebaut werden kann.

Zur Verringerung der Simulationszeit wird in Kapitel 7 ein nulldimensionales Modell für die Lebensdauervorhersage entwickelt. Den darin verwendeten Parametern werden physikalisch-chemische Prozesse zugeordnet, sodass der Ort der Komponenten, an denen die Alterungsprozesse in der Brennstoffzelle ablaufen, erkennbar sind und somit eine Verbindung von der Betriebsführung zum Degradationsort in der Brennstoffzelle geschaffen wird. Dazu wird auch der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Brennstoffzellenspannung untersucht.

In Kapitel 8 wird das Modell über die zeitliche Abhängigkeit der einzelnen Parameter der verwendeten Larminie-Gleichung selbst zu einem zeitabhängigen Modell weiterentwickelt. Das Modell basiert auf einer sehr detaillierten Aufbereitung der Daten und bedient sich der Annahme eines linearen Verlaufs für die einzelnen Parameter. Trotz dieser Vereinfachung können mit dem Modell hervorragende Ergebnisse bezüglich der Prognose erzielt werden. Das entwickelte Modell wird anschließend mit den bekannten Modellen aus der Literatur verglichen, welche mal detaillierter und dafür mit längeren Simulationszeiten und manchmal weniger detailliert mit kurzen Berechnungszeiten an die Prognose herangehen. Abschließend wird in Kapitel 8.7 aus einer Kombination der Daten von verschiedenen Brennstoffzellensystemen eine geschlossene Formel zur Abschätzung der realen Lebensdauer von Brennstoffzellen in Abhängigkeit vom Stromverlauf und der Zeit entwickelt.

Schließlich wird das für Brennstoffzellen entstandene Modell in Kapitel 9 auf Batterien übertragen. Dazu wird gezeigt, wie die Daten von Batterien aufbereitet werden müssen und welche verwendet werden können, um mit Hilfe des Modells eine Lebensdauerprognose vornehmen zu können. Für die Batterie eines realen Elektrofahrzeugs mit einer Fahrleistung von ca. 5000 Kilometern pro Jahr wird eine geschlossene Formel als erste Näherung für die Lebensdauerabschätzung angegeben.

Zuletzt werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit im Kapitel 10 zusammengefasst.

Insgesamt soll mit dieser Arbeit ein Beitrag geleistet werden, um die Strominhomogenitäten



in der Brennstoffzelle als Voraussetzung für höhere Lebensdauern minimieren zu können und die Lebensdauerprognose für Brennstoffzellen zu verbessern.



## 2 Theoretische Grundlagen

Die grundlegenden Gleichungen für ein Brennstoffzellensystem sind die Reaktionsgleichungen. Nach diesen gibt es auf der Anodenseite der Brennstoffzelle die Aufspaltung von einem Wasserstoffmolekül in zwei Protonen und zwei Elektronen und auf der Kathodenseite die Reaktion von einem halben Sauerstoffmolekül mit den beiden Protonen und Elektronen zu Wasser:

Anodenreaktion:



Kathodenreaktion:



Gesamtreaktion:



Die zugehörigen theoretischen Grundlagen, die ein elektrochemisches System wie Batterien und Brennstoffzellen beschreiben, beschränken sich im Wesentlichen auf zwei Formeln: Die Nernstgleichung und die Butler-Volmer-Gleichung.



## 2.1 Nernstgleichung

Die Nernstgleichung wird verwendet, um die Änderung des Gleichgewichtspotentials der Zelle durch Abweichung des Zustandes von den Standardbedingungen und in Abhängigkeit von den Aktivitäten zu berechnen. Sie kann aus den thermodynamischen Potentialen hergeleitet werden und hat folgende Form [24]:

$$E = E_0 - \frac{RT}{n_e F} \cdot \ln \left( \frac{a_{\text{ox}}}{a_{\text{red}}} \right). \quad (2.4)$$

$R$  ist die allgemeine Gaskonstante,  $F$  die Faradaykonstante,  $T$  beschreibt die Temperatur und  $n_e$  die Elektronenreaktionswertigkeit, also die Anzahl der bei einer Reaktion teilnehmenden Elektronen.  $a$  steht für die Aktivität des jeweiligen Redox-Partners, einmal für die Oxidation  $a_{\text{ox}}$  und einmal für die Reduktion  $a_{\text{red}}$ .  $E_0$  beschreibt das Potential, welches auch als elektromotorische Kraft bezeichnet wird. Dieses kann ebenfalls direkt aus thermodynamischen Größen gewonnen werden und hat folgende Form:

$$E_0 = -\frac{\Delta G^0}{n_e F} = 1,23 \text{ V}. \quad (2.5)$$

$\Delta G^0$  ist die Gibbsche freie Standardreaktionsenthalpie. Die Berechnung des sich ergebenden Wertes für die am Anfang des Kapitels aufgezeigte Reaktion kann in Kapitel 6.2 nachvollzogen werden. Deutlich wird, dass das Gleichgewichtspotential neben der Temperatur auch von den Aktivitäten abhängt. Da gezeigt werden kann, dass die Aktivität wiederum wie folgt von den Drücken abhängt,

$$\text{Aktivität } a = \frac{p}{p^0}, \quad (2.6)$$

ist ebenfalls eine Druckabhängigkeit der Gleichgewichtsspannung gegeben. Dies gilt jedoch nur für ideale Gase, was bei Wasserstoff noch am ehesten gegeben ist.  $p$  ist dabei der Partialdruck des Gases und  $p^0$  der Normaldruck. Problematisch ist das Ganze, wenn Wasser produziert wird, da dieses flüssig oder gasförmig vorkommen kann. Bei flüssigem Wasser stellt jedoch  $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$  eine gute Näherung dar [36].



Damit ergibt sich für die Wasserstoffbrennstoffzelle, wenn nur die Drücke zur Verfügung stehen:

$$E = E_0 - \frac{RT}{n_e F} \cdot \ln \left( \frac{\frac{p_{\text{H}_2}}{p^0} \cdot \left( \frac{p_{\text{O}_2}}{p^0} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p^0}}} \right). \quad (2.7)$$

Wenn die Drücke in Bar angegeben sind und näherungsweise angenommen wird, dass 1 bar dem Standarddruck  $p^0$  entspricht, so kann Gleichung 2.7 vereinfacht werden zu

$$E = E_0 - \frac{RT}{n_e F} \cdot \ln \left( \frac{p_{\text{H}_2} \cdot (p_{\text{O}_2})^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \right). \quad (2.8)$$

Die elektromotorische Kraft ist durch die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Gibb'schen freien Standardreaktionsentropie selbst druck- und temperaturabhängig. Dabei ist dieser Einfluss eher gering. Die Temperaturabhängigkeit beträgt etwa -0,85 mV/K und die Druckabhängigkeit ist ebenfalls gering und somit technisch für die Anwendungsgebiete von Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen nicht relevant [8, 24].

## 2.2 Butler-Volmer-Gleichung

Die Butler-Volmer-Gleichung beschreibt den Ladungsträgerdurchtritt an der Phasengrenze von der elektronischen zur ionischen Leitung, wo eine Ladungsdoppelschicht entsteht [24]. Bei Stromfluss gibt es eine Abweichung des Elektrodenpotentials vom Gleichgewichtspotential. Diese Abweichung nennt man Überspannung [23]. Die Formel wird über einen Arrheniusansatz hergeleitet [23] und hat folgende Form:

$$j = j_0 \cdot \left( e^{\frac{\alpha n F}{RT} \cdot \eta_D} - e^{-\frac{(1-\alpha) n_e F}{RT} \cdot \eta_D} \right). \quad (2.9)$$

Auf Grund der Arrheniusgleichung kommen die Exponentialfunktionen zustande. Dabei ist  $j$  die Stromdichte, häufig auch als  $i$  beschrieben, und  $\eta_D$  die Durchtrittsüberspannung.



$j_0$  ist die Austauschstromdichte und die beiden Exponentialfunktionen beschreiben den Anteil der Stromdichte der Hin- und Rückreaktion [23].  $\alpha$  beschreibt den Durchtritts- oder Symmetriefaktor. Laut Jonas [31] beschreibt  $\alpha$  den Ort der Durchtrittsreaktion in Bezug darauf, ob die Reaktion direkt an der Elektrode oder auf der anderen Seite der Doppelschicht stattfindet. Der Wert wird häufig mit 0,5 angenähert, wie auch von Volmer [61].

Die Austauschstromdichte  $j_0$  wird dabei durch folgende Gleichungen beschrieben [23], wobei für die eine Teilstromdichte im Ruhepotential  $\varphi_0$ , bei welchem beide Teilstromdichten gleich groß sind

$$j_D^-(\varphi_0) = -j_0 = -nF c_{\text{ox}} k_0^- e^{-\frac{(1-\alpha)n_e F \varphi_0}{RT}} \quad (2.10)$$

und für die andere Teilstromdichte der Reaktion

$$j_D^+(\varphi_0) = j_0 = -nF c_{\text{red}} k_0^+ e^{-\frac{\alpha n_e F \varphi_0}{RT}} \quad (2.11)$$

geschrieben werden kann. Dabei ist  $c_{\text{ox}}$  die Konzentration des oxidierten Stoffs und  $c_{\text{red}}$  die des reduzierten.  $k_0^-$  und  $k_0^+$  beschreiben die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten.  $n_e$  ist die Elektronenreaktionswertigkeit. Hier gibt es eine Schwierigkeit, denn für die Reaktionsgleichung von Wasserstoff und Sauerstoff gibt es zwei Schreibweisen:



oder



Die beiden Reaktionsgleichungen sind äquivalent. Jedoch bezieht sich Gleichung 2.13 auf ein Produkt von 1 mol Wasser und die Edukte sind 1 mol Wasserstoff und 1/2 mol Sauerstoff. Weil es sinnvoll ist, immer von 1 mol des Produktes auszugehen, ist diese Gleichung

für die Wertigkeit der Reaktion entscheidend. Berücksichtigt werden sollte auch, dass für jedes Wasserstoffmolekül und dadurch jedes erzeugte Wassermolekül zwei Elektronen durch den externen Stromkreis der Brennstoffzelle fließen. Für 1 mol Wasser fließen also  $2N_A$  Elektronen durch den externen Stromkreis, mit der Avogadrokonstante  $N_A$ . Der Ladungsfluss ist dann:

$$2N_A e = 2F. \quad (2.14)$$

Die Reaktionsgleichung 2.12 wird benutzt, wenn von einzelnen Molekülen ausgegangen wird, weil ein halbes Sauerstoffmolekül in der Natur nicht vorkommt, ein halbes Mol an Sauerstoffmolekülen kann aber sehr wohl vorkommen. Die Butler-Volmer-Gleichung mit der Faradaykonstante ist für molare Gasmengen gedacht und folglich muss für sie die Reaktionsgleichung 2.13 gelten und die Elektronenreaktionswertigkeit für Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen  $n_e = 2$  sein. Dies wird auch dadurch ersichtlich, dass vier Elektronen mit ihrer Elementarladung nicht wirklich eine große Überspannung hervorrufen können, 2 mol Elektronen hingegen schon. Diese Begründung des Wertes für die Elektronenreaktionswertigkeit steht im Einklang mit der von Larminie und Dicks für die Nernstgleichung [36]. Auch konnte für die Tafelgleichung, welche direkt aus der Butler-Volmer-Gleichung folgt, wenn für eine Reaktionsrichtung nach der Spannung aufgelöst wird (Gleichung 2.15), gezeigt werden, dass der Koeffizient des Logarithmus theoretisch hergeleitet werden kann. Dabei wird für die Elektronenreaktionswertigkeit ebenfalls der Faktor 2 verwendet [45].

$$\eta_D = A \cdot \ln \left( \frac{j}{j_0} \right). \quad (2.15)$$

## 2.3 Maxwellgleichungen

Durch die Anodenreaktion (Gleichung 2.1) wird Wasserstoff in Protonen und Elektronen aufgespalten. Dabei können die Protonen und Elektronen nicht wieder miteinander reagieren, weil sie in unterschiedlichen Medien vorkommen. Die Protonen wandern in

den Elektrolyten, wo sie durch ionische Leitung transportiert werden. Die Elektronen wandern in die Elektrode, wo sie durch elektrische Leitung transportiert werden. Durch diese Ladungstrennung entsteht die elektrische Spannung  $U_{AB}$  zwischen den Ladungen an den Punkten  $A$  und  $B$ . Die elektrische Spannung  $U_{AB}$  kann durch das elektrische Feld zwischen den Ladungen und das elektrische Feld wiederum durch die dielektrische Verschiebungsdichte ausgedrückt werden:

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E} \, d\vec{s} = \int_A^B \frac{\vec{D}}{\epsilon_0} \, d\vec{s}. \quad (2.16)$$

Dabei ist  $\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante. Durch die Maxwellgleichungen wird klar, dass sich durch ändernde elektrische Felder, bedingt durch den in Brennstoffzellen gewollten externen Stromfluss, auch magnetische und elektrische Felder aufbauen. Diese Felder wiederum können für ungleichmäßige Ladungsverteilungen und Strominhomogenitäten in Brennstoffzellen sorgen, was in Kapitel 4 ausführlich untersucht wird.

Die Maxwellgleichungen beschreiben einen vollständigen Satz von Feldgleichungen und können in differentieller und integraler Schreibweise zusammengefasst werden. In differentieller Form sehen die Maxwellgleichungen wie folgt aus [20]:

$$\text{rot} \vec{H} = \dot{\vec{D}} + \vec{j}, \quad (2.17a)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\dot{\vec{B}}, \quad (2.17b)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho, \quad (2.17c)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0. \quad (2.17d)$$

$\vec{H}$  ist die magnetische Erregung,  $\vec{D}$  die dielektrische Verschiebungsdichte,  $\vec{j}$  die Leitungsstromdichte,  $\vec{E}$  die elektrische Feldstärke,  $\vec{B}$  die magnetische Feldstärke und  $\rho$  die Ladungsverteilung.



In integraler Form lauten die Maxwellgleichungen [20]:

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \, d\vec{s} = \frac{d}{dt} \iint_A \vec{D} \, d\vec{A} + I_1, \quad (2.18a)$$

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \, d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \, d\vec{A}, \quad (2.18b)$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{D} \, d\vec{A} = Q, \quad (2.18c)$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \, d\vec{A} = 0. \quad (2.18d)$$

Wobei  $I_1$  der Leitungsstrom ist und  $Q$  die Ladung im Volumeninneren.

Aus diesen Gleichungen kann auch das Biot-Savart-Gesetz hergeleitet werden, welches in Kapitel 4.2 zur Berechnung des Magnetfeldes verwendet wird.





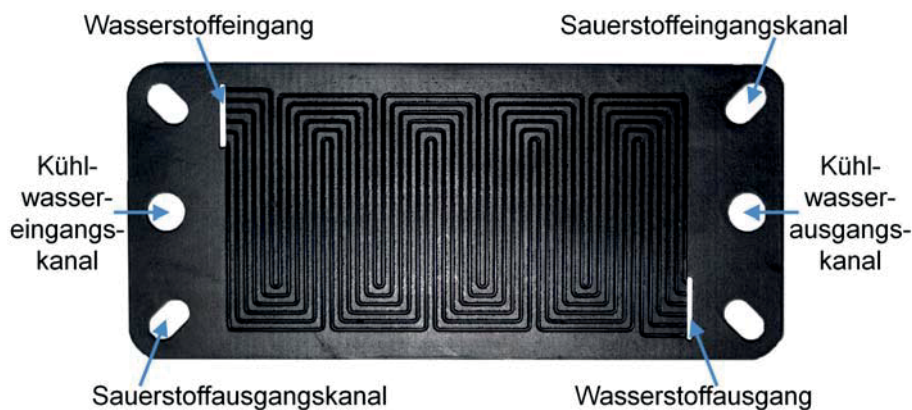
## 3 Messtechnik und Darstellung

In diesem Kapitel werden die verwendeten Brennstoffzellen sowie die Messtechnik und die Art der Darstellung der Ergebnisse beschrieben. Sowohl ein herkömmliches, seriennahes Brennstoffzellensystem als auch ein speziell modifizierter Brennstoffzellenprototyp werden vorgestellt und die jeweiligen Eigenheiten in Bezug auf die durchgeführten Messungen ausgeführt. Anschließend wird zum besseren Verständnis die Darstellung der Ergebnisse erläutert.

### 3.1 Messtechnik

Eine Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle hat die Eigenschaft, dass sie aus Wasserstoff und Sauerstoff Wasser produziert und die frei werdende Reaktionsenergie mit einem Wirkungsgrad von bis zu 60 % dazu genutzt werden kann, direkt eine Spannung zu erzeugen, welche einen Stromfluss bedingt. Dazu wird der Wasserstoff auf der Anodenseite zugeführt und dort katalytisch in Protonen und Elektronen aufgespalten. Durch eine protonenleitende Membran ist es nur den Protonen möglich durch die Zelle zur Kathode zu wandern. Die Elektronen sammeln sich an der Elektrode und werden durch einen äußeren Stromkreis zur Elektrode der Kathodenseite geführt. Dort reagieren die Protonen und Elektronen mit dem Sauerstoff aus der Luft zu Wasser, welches meistens in Form von Wasserdampf abgegeben wird. Die Flussrichtungen vom Wasserstoff und Sauerstoff sind dabei stets entgegen gerichtet, denn durch das Gegenstromprinzip können mehr Reaktanden miteinander reagieren. Soll die Spannung einer Brennstoffzelle erhöht werden, müssen mehrere Zellen in Reihe geschaltet werden. Dabei genügt ein einziges Elektrodenpaar mit einem Ladungsfluss von abwechselnd Elektronen und Protonen durch

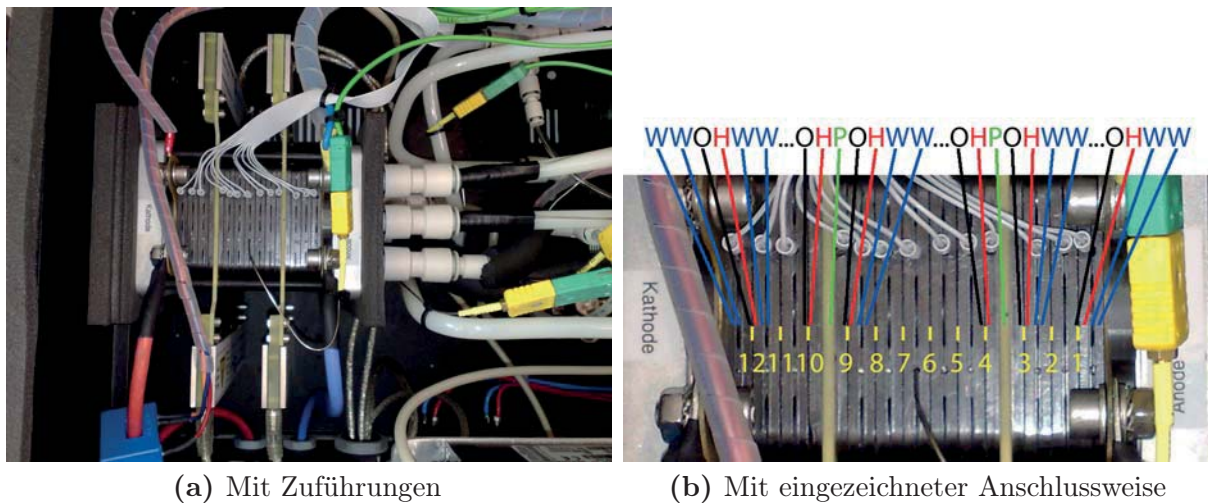
die Zellen des Stacks, sodass die Protonen einer Zelle mit den Elektronen der folgenden Zelle reagieren können. Die Brennstoffzelle besitzt außen eine Bipolarplatte, in welcher die Kühlung entlang läuft und welche auf ihren Außenseiten Gaskanäle für die Führung der Gase hat (Abbildung 3.1). Daran grenzt die Gasdiffusionsschicht zur gleichmäßigen Weiterführung der Gase und der Weiterleitung des Stroms an die Bipolarplatte. Danach kommt die Membran-Elektroden-Einheit (MEA), welche die Elektroden, den Elektrolyten, Katalysatoren und die protonenleitende Membran enthält.



**Abbildung 3.1:** Bipolarplatte mit gegenüberliegenden Gaseingängen und Wasserstoffanschluss auf der Rückseite.

### 3.1.1 Herkömmliches Brennstoffzellensystem

Für diese Arbeit steht ein Brennstoffzellensystem mit zwölf Zellen vom Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) zur Verfügung. Das ZBT hat schon viele Brennstoffzellen entwickelt, sodass das vorliegende System kein erster Prototyp ist und die mit dem System gefundenen Ergebnisse auch für andere Brennstoffzellen dieser Art eine allgemeingültige Aussagekraft haben. Die Brennstoffzelle hat einen maximalen Strom von 40 A und dabei eine maximale Leistung von ca. 200 W. Der kleinste Strom, der gefahren wird, ist  $I = 1$  A, wobei die Brennstoffzelle eine Spannung von etwa 10,4 V hat. Kleinere Ströme werden wegen der stärkeren Degradation durch die dadurch vorliegenden höheren Spannungen



**Abbildung 3.2:** Fotos der Brennstoffzelle mit Strommessplatten der Firma S++ (Modell Current Scan Shunt). W steht für Kühlwasseranschluss, H für Wasserstoff, O für Sauerstoff und P für Messplatte.

nicht gefahren (siehe auch Kapitel 7.2, dort sind auch weitere Alterungsmechanismen der Brennstoffzelle zu finden). Die Brennstoffzelle wird trocken betrieben, die zugeführten Gase werden also nicht angefeuchtet. Bevor ein Test gestartet wird, findet eine kurze Einfahrprozedur von etwa zwei Minuten bei kleinstmöglichem Strom für eine erste Anfeuchtung der Membran statt. Die aktive Fläche der Brennstoffzelle beträgt  $50 \text{ cm}^2$ . Die Parameter Temperatur, Purgedauer, Purgeintervall, Rezirkulation und Stöchiometrie können innerhalb vorgegebener Grenzen verändert werden (siehe auch Seite 27). Als Standardeinstellungen werden folgende Werte benutzt, bei welchen die Brennstoffzelle stabil läuft: Ein Purgeintervall von 60 s, eine Purgeöffnungszeit von 0,5 s, eine Rezirkulation von 75 %, eine Temperatur von  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  und eine Stöchiometrie von 2,0. Davon ausgehend werden die einzelnen Parameter variiert. Mit einem Labviewprogramm werden der Gesamtstrom, die Gesamtspannung, die Einzelzellspannungen, die Kühlwassereingangstemperatur, der Kathodengasfluss und Stellsignale aufgezeichnet. Die maximale Aufzeichnungsrate ist 2 Hz. Zusätzlich wurden für die Messungen von Stromverteilungen Messplatten der Firma S++ eingebaut, die eine flächige Strommessung ermöglichen (Abb. 3.2).

Zu sehen ist, dass die Strommessplatten zwischen der dritten und vierten Zelle und zwischen der neunten und zehnten Zelle eingebaut wurden, sodass einmal Strominhomogenitäten auf der Anodenseite und einmal auf der Kathodenseite des Brennstoffzellenstacks gemessen